

NACHHALTIGE ENERGIEGEWINNUNG ohne die heiße Luft

**“THIS BOOK IS A
TOUR DE FORCE ...
AS A WORK OF
POPULAR SCIENCE
IT IS EXEMPLARY”**

THE ECONOMIST

**“THIS IS TO
ENERGY AND CLIMATE
WHAT FREAKONOMICS
IS TO ECONOMICS.”**

CORY DOCTOROW,
BOINGBOING.NET



SUSTAINABLE ENERGY— WITHOUT THE HOT AIR

David JC MacKay

Deutsche Übersetzung von Thomas F. Kerscher

Nachhaltige Energiegewinnung – ohne die heiße Luft

David JC MacKay

Engl. Originaltitel: *Sustainable Energy – without the hot air*
Deutsche Übersetzung von Thomas F. Kerscher

*Allen gewidmet, die nicht das Privileg von
2 Milliarden Jahre lang angesparten
Energiereserven haben werden.*

Inhalt

NACHHALTIGE ENERGIEGEWINNUNG – OHNE DIE HEISSE LUFT

Inhalt	i
Vorwort zur deutschen Ausgabe	iii
Vorwort des Autors	v
Teil I: Zahlen, keine Adjektive.....	1
1. Motivation.....	2
2. Die Bilanz.....	24
3. Autos	31
4. Wind.....	34
5. Flugzeuge.....	38
6. Solar.....	42
7. Heizung und Kühlung	56
8. Wasserkraft	61
9. Licht	64
10. off-shore Wind.....	68
11. Kleinalelektronik – Gadgets	77
12. Wellen.....	82
13. Lebensmittel und Landwirtschaft.....	86
14. Gezeiten	92
15. Dinge des täglichen Gebrauchs.....	101
16. Geothermie	110
17. Öffentlicher Dienst.....	115
18. Können wir von Erneuerbaren Energien leben?.....	119
Teil II: Die Energiewende - Making a Difference	129
19. Jeder große Schritt zählt	130
20. Besserer Transport	134
21. Intelligente Heizungen.....	158
22. Effiziente Verwendung von Elektrizität.....	173
23. Nachhaltige fossile Brennstoffe?	175
24. Kernkraft?	179
25. Leben von den Erneuerbaren anderer Länder?	197
26. Schwankungen und Speicherung.....	206
27. Fünf Energiepläne für England	223
28. Betrachtung der Kosten	233
29. Was jetzt zu tun ist	241
30. Energiepläne für Europa, Amerika und die Welt	250
31. Das Letzte worüber wir sprechen sollten	258
32. Sag Ja!	268
Acknowledgments – Dank des Autors	269
Teil III: Technischer Anhang	271
Anhang A. Autos II.....	272
Anhang B: Wind II	281
Anhang C: Flugzeuge II.....	288
Anhang D: Solar II.....	303
Anhang E: Heizung II	309

Anhang F: Wellen II.....	325
Anhang G: Gezeiten II.....	329
Anhang H: Dinge des täglichen Gebrauchs II	339
Teil IV: Nützliche Daten	344
Anhang I: Schnellreferenz.....	345
Anhang J: Bevölkerungsdichten	354
Die Energiegeschichte Englands.....	358
Liste der Weblinks.....	360
Literaturverzeichnis.....	363
Über den Autor.....	375
Umrechnungstabellen.....	376

Vorwort zur deutschen Ausgabe

Noch bevor ich die Lektüre von „Sustainable Energy – without the hot air“ von David MacKay beendet hatte, war mir klar, wie sehr ein solches Buch in der deutschen Debatte um die regenerativen Energien seit Jahren fehlt. Bei manchen Aussagen und Diskussionsbeiträgen engagierter Politiker und Umweltaktivisten der letzten Jahre sträubten sich mir oft genug die Nackenhaare, wenn ich sie aus einem naturwissenschaftlichen Blickwinkel heraus auf Plausibilität zu prüfen versuchte. So wie es wohl auch David MacKay ging, als er mit diesem Buch begann.

Zunächst hatte ich nur vor, einige Ausschnitte aus Davids Buch zu übersetzen und an geeigneter Stelle ins Netz zu stellen oder Freunden zu mailen. Freunden, von denen ich sicher weiß, dass sie es gut meinen mit ihrem Engagement um umweltverträglichen Umgang mit Energie. Freunde, bei denen ich aufrichtig bedauere, wenn gut gemeint und gut gesagt manchmal so weit auseinanderliegen.

Doch Davids Buch hat mich nicht mehr losgelassen und so habe ich viele Stunden meiner Freizeit damit verbracht, es (weitgehend) komplett zu übersetzen. Mein Dank geht an dieser Stelle an meine Familie, die mir diesen Freiraum geschaffen und mich tatkräftig unterstützt hat.

Ich kenne viele gute Veröffentlichungen im Umfeld der Energieproblematik und bin überzeugt, dass es noch viele noch bessere gibt, die ich nicht kenne. Eine Flut energie-relevanter Forschungsergebnisse wurde in den letzten Jahren erzielt und in einschlägigen Fachzeitschriften veröffentlicht. „No job is finished until the paperwork is done“ heißt es unter Wissenschaftlern: keine Forschungsarbeit ist fertig, bevor die Ergebnisse veröffentlicht sind. Doch nicht allein *DASS* veröffentlicht wird, ist entscheidend, sondern genauso das *WIE*. Das Ergebnis soll idealer Weise so dargestellt sein, dass jeder Interessierte es auch verstehen und nachvollziehen kann. Darin liegt in meinen Augen die wirkliche Genialität des vorliegenden Buchs. Wie kein anderer versteht es David MacKay, die energiepolitisch relevanten physikalischen Sachverhalte auf den Punkt zu bringen, mit einem Augenzwinkern das Wesentliche zusammenzufassen und in einem Stil darzustellen, dass das Lesen einfach Spaß macht.

David MacKay schreibt ausdrücklich für Praktiker, nicht für Wissenschaftler. Er rät die Lektüre seines Buches insbesondere energiepolitisch interessierten Wählern und Gewählten.

Wenn auch manche der hier diskutierten Ansätze auf deutsche Gegebenheiten weniger zutreffen, so ist doch die Sichtweise des Problems, das Herangehen und der Umgang mit bestehendem Potenzial eins zu eins übertragbar. Sicher mag Photovoltaik in Deutschland bereits erheblich weiter ausgebaut sein (und allein wegen der geografischen Breite bessere Erträge erzielen) als in England und im Gegenzug mögen Wellen- oder Gezeitenkraft hierzulande praktisch keine Rolle spielen, doch die gesamt-energetische Problemstellung und die Ratlosigkeit über deren Lösung ist hier wie dort weitgehend dieselbe.

Während die deutsche Bundesregierung derzeit noch über die ministerielle Zuständigkeit für einen Energieplan streitet, hat England bereits begonnen, einen solchen zu entwickeln und vorzustellen. Die englische Regierung hat dabei auch auf den Inhalt dieses Buches gesetzt, indem sie David MacKay als Regierungsberater verpflichtete.

Dieses Buch gibt einem das Rüstzeug, die vorgestellten grundsätzlichen Erwägungen über die englischen Verhältnisse hinaus zielgenau auf die Verhältnisse vor Ort zu übertragen. Dieses Übertragen konkret auszuformulieren wird der nächste logische Schritt sein, der in einer zweiten deutschsprachigen Auflage dieses Werks noch einzuarbeiten sein wird. Doch bis dahin will ich Sie, liebe Leserinnen und Leser, nicht auf die Folter spannen und habe deshalb die vorliegende erste Version bereits heute veröffentlicht.

Viel Spaß beim Lesen wünscht Ihnen

Dr. Thomas F. Kerscher
Wang, den 26. November 2009



*No job is finished until the
paperwork is done ...*

Vorwort des Autors

Wovon handelt dieses Buch?

Es liegt mir daran, die nationale Emission von Gequatsche zu beschränken – Gequatsche über nachhaltige Energien. Jeder sagt, es sei wichtig, von fossilen Brennstoffen unabhängig zu werden, und wir alle sind aufgerufen, umzudenken, „to make a difference“, wie es der englische Slogan griffig beschreibt, doch viele der vielbeschworenen Maßnahmen tragen dazu gar nicht bei.

Die Emissionen von Gequatsche sind derzeit ziemlich hoch, weil viele Menschen emotional werden (etwa über Windanlagen und Atomkraft) aber niemand über Zahlen redet. Oder wenn jemand Zahlen erwähnt, dann wählt er sie so, dass sie groß klingen, Eindruck machen und seine Argumentationspunkte unterfüttern, anstatt zu vernünftiger Diskussion zu führen.

Dies ist ein geradeheraus geschriebenes Buch über Zahlen. Das Ziel ist, den Leser um die Falltüren herumzuführen zu Maßnahmen, die wirklich etwas bewegen und zu Politik, die ihren Beitrag leistet. Zu einem Plan, der aufgeht.

Dies ist ein freies Buch

Es wurde nicht geschrieben, um Geld damit zu verdienen. Es wurde geschrieben, weil nachhaltiger Umgang mit Energie wichtig ist. Die englische Originalfassung ist zum freien Download verfügbar unter www.withouthotair.com.¹

Das ist ein freies Buch auch in einem weiteren Sinn: Jeder kann all das Material aus diesem Buch frei benutzen, außer Cartoons und Fotos von namentlich genannten Fotografen, unter der Creative Commons Attribution-Non-Commercial-Share-Alike 2.0 UK: England & Wales Licence.²

(Die Cartoons und Fotos wurden ausgenommen, da die Urheber ihre Zustimmung lediglich zum Gebrauch in diesem Buch, nicht jedoch darüber hinaus erteilten.) Jeder ist insbesondere eingeladen, das Material für Schulungen und Vorträge zu verwenden. Die o.g. Website enthält separate hochauflösende Dateien von allen Abbildungen in diesem Buch.

Wie man dieses Buch lesen sollte

Einige Kapitel beginnen mit einem Zitat. Nehmen Sie bitte nicht an, das Zitieren bedeute, ich würde mit dem Inhalt einverstanden sein. Nehmen Sie diese Zitate als Provokationen, als Hypothesen, mit denen man sich kritisch auseinandersetzen sollte.

Viele der ersten Kapitel (mit 1,2,3 ... bezeichnet) haben längere technische Abschnitte (A,B,C ...), die ihnen zugeordnet sind. Diese technischen Abschnitte beginnen auf Seite 271.

Am Ende jeden Kapitels sind weiterführende Hinweise sowie Literatur- und Quellenangaben. Fußnoten findet der Autor verwirrend, wenn sie im Text verstreut sind, daher wurden im englischen Original keine Fußnoten verwendet. Fußnoten beziehen sich daher stets auf Anmerkungen des Übersetzers.

¹ Die vorliegende deutsche Fassung ist auch unter http://www.gemeinde-wang.de/images/pdfs/nachhaltige_energiegewinnung.pdf verfügbar.

² Gleiches gilt für die vorliegende deutsche Übersetzung. Die genauen Lizenzbestimmungen sind in deutscher Sprache unter <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/de/legalcode> zu finden.

Im Text sind weiterhin Webadressen angegeben. Wenn eine Webadresse unverhältnismäßig lang ist, wird der TinyURL-Service verwendet, siehe <http://tinyurl.com/yh8xse>.

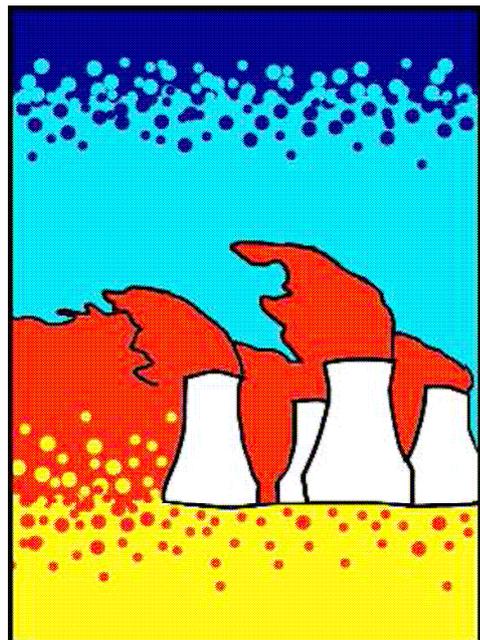
Feedback und Korrekturen sind jederzeit willkommen. Sicherlich sind auch Rechenfehler in diesem Buch vorhanden. In früheren Versionen lagen einige der Zahlen sogar um einen Faktor zwei daneben. Während ich hoffe, dass die verbleibenden Fehler deutlich kleiner sind als das, gehe ich dennoch davon aus, dass ich zukünftig noch die eine oder andere Zahl im Lichte neuer Erkenntnisse korrigieren werde.

Das Original ist folgendermaßen zu zitieren:

David J.C. MacKay. *Sustainable Energy – without the hot air.*

UIT Cambridge, 2008. ISBN 978-0-9544529-3-3. Available free online from www.withouthotair.com.

Teil I: Zahlen, keine Adjektive



1. Motivation

*We live at a time when emotions and feelings count more than truth,
and there is a vast ignorance of science.*

James Lovelock

Kürzlich las ich zwei Bücher, eines von einem Physiker und eines von einem Ökonomen. In „Out of Gas“ beschreibt der Physiker David Goldstein eine drohende Energiekrise, ausgelöst durch das Ende des Ölzeitalters. Die Krise käme bald, sagt er voraus, und die Krise wäre einschneidend, nicht wenn der letzte Tropfen Öl gefördert wird, sondern wenn die Ölförderung die Nachfrage nicht mehr befriedigt, vielleicht schon 2015 oder 2025. Zudem, sagt Goldstein, würde diese Krise – selbst wenn wir es auf magische Weise schafften, all unseren Energiebedarf rechtzeitig auf Atomkraft umzuschalten – nur durch eine Krise der Atomkraft ersetzt werden, die dann an die 20 Jahre später käme, wenn die Uranvorkommen erschöpft wären.

In „The Skeptical Environmentalist“ zeichnet Björn Lomborg ein komplett anderes Bild. „Alles ist in Ordnung“, tatsächlich „wird alles noch besser“. „Uns steht keine größere Energiekrise bevor“, meint er und „es gebe genug Energie“.

Wie können zwei kluge und gebildete Menschen zu solch unterschiedlichen Schlüssen kommen? Das wollte ich herausfinden.

In England schaffte es die Energie erstmals 2006 in die Schlagzeilen. Die öffentliche Debatte entzündete sich an neuen Nachrichten über den globalen Klimawandel und an einer Verdreifachung des Gaspreises innerhalb von 6 Jahren. Wie sollte England seinen Energiebedarf in den Griff bekommen? Und wie die Welt?

„Wind oder Atom?“ zum Beispiel. Größere Polarisierung in den Standpunkten kluger Leute war kaum vorstellbar. Während einer Debatte über den geplanten Ausbau von Atomkraft sagte Michael Meacher, früherer Umweltminister: „Wenn wir die Treibhausgase bis 2050 um 60 % senken wollen, führt kein Weg an den Erneuerbaren³ vorbei.“ Sir Bernhard Ingham, ehemals Beamter im öffentlichen Dienst, der für den Atomkraftausbau sprach, meinte: „Jeder der sich auf Erneuerbare verlässt, um die Energielücke zu schließen, lebt in einer ausgesprochenen Traumwelt und ist in meinen Augen ein Feind des Volkes.“

Ähnliche Uneinigkeit kann man in der Öko-Bewegung hören. Alle sind sich einig, dass dringend etwas getan werden muss, aber was? Jonathon Porritt, Vorsitzender der Sustainable Development Commission (Kommission für nachhaltige Entwicklung) schreibt: „Es gibt keine Rechtfertigung, Pläne für neue Atomkraftwerke zu forcieren, denn alle derartigen Vorschläge sind unvereinbar mit der Regierungsstrategie für Nachhaltige Entwicklung.“ Und „eine atomenergiefreie Strategie könnte und sollte ausreichen, alle CO₂-Reduktionen zu ermöglichen, die wir bis 2050 und darüber hinaus brauchen, und sicheren Zugang zu verlässlichen Energiequellen gewährleisten.“ Dagegen schreibt der Umweltaktivist James Lovelock in seinem Buch „The Revenge of Gaia“: „Bereits jetzt ist es viel zu spät, um eine nachhaltige Entwicklung einzuleiten“. Aus seiner Sicht ist Energie aus Kernspaltung, wenn auch nicht als langfristiges Allheilmittel für unseren kranken

³ Im englischen Original steht „Renewables“ häufig als Kurzform für „renewable energies“, erneuerbare Energien. Ich übernehme diese praktische Abkürzung und schreibe kurz „Erneuerbare“.

Planeten wünschenswert, doch „die einzige effektive Medizin, die wir derzeit zur Verfügung haben“. Windräder sind „nur eine Geste, die ökologischen Glaubensbezeugungen [unserer Führungspersönlichkeiten] zu untermauern“.

Diese hitzige Debatte geht in ihrem Kern um Zahlen. Wie viel Energie kann jede Quelle beitragen, zu welchen ökonomischen und sozialen Kosten, und mit welchen Risiken? Doch aktuelle Zahlen sind sehr selten erwähnt. In öffentlichen Debatten sagen die Leute lediglich „Atomkraft ist eine Goldgrube“ oder „Wir haben riesige Mengen an Wellen und Wind“. Das Problem an dieser Art des Sprachgebrauchs ist: Es reicht nicht zu wissen, dass etwas riesig ist. Wir müssen herausfinden, in welcher Relation dieses „riesig“ zu einem anderen „riesig“ steht, nämlich zu unserem riesigen Energieverbrauch. Um diese Relation darzustellen, brauchen wir Zahlen, keine Adjektive.

Wo Zahlen benutzt werden, ist deren Bedeutung oft verschleiert durch ihre unvorstellbare Größe. Zahlen werden verwendet, um zu beeindrucken und um Argumentationspunkte zu unterfüttern, anstatt zu informieren. „Die Einwohner von Los Angeles fahren täglich 227 Millionen Kilometer – die Entfernung von der Erde zum Mars“ „Jedes Jahr werden 11 Millionen Hektar Regenwald zerstört“ „6,3 Milliarden Kilogramm Abfall werden jährlich in die Meere verklappt“ „Die Engländer werfen jedes Jahr 2,6 Milliarden Scheiben Brot weg.“ „Der jährliche Papiermüll in England würde 103448 Doppeldeckerbusse füllen“.

Wenn man alle ineffektiven Ideen zur Lösung der Energiekrise aneinander legte, würden sie bis zum Mond und zurück reichen ... oder?

Und die Folge dieses Mangels an aussagekräftigen Zahlen und Fakten? Wir werden überschwemmt von zahlenfreiem und unzählbarem Unsinn. Über die Medien werden Ratschläge verteilt, wie wir unser Schärflin zur Rettung des Planeten beitragen können, etwa: „Stecken Sie ihre Handy-Ladegeräte aus, wenn sie nicht benutzt werden.“ Wenn jemand entgegnet, dass Handy-Ladegeräte nicht wirklich unsere Nummer Eins in der Liste der Energieverbraucher sind, wird das Motto „Jeder kleine Schritt zählt“ ausgegeben. Jeder kleine Schritt zählt? Ein realistischeres Motto ist

Wenn jeder Beitrag klein ist, ist auch der Gesamteffekt klein.

Unternehmen tragen zum täglichen Unsinn bei, indem sie uns erzählen, wie wundervoll wir doch sind und wie sie uns dabei helfen, „unseren Beitrag zu leisten“. Die Homepage von BP zum Beispiel preist die CO₂-Reduktion, die sie sich erhoffen, wenn sie den Anstrich ihrer Schiffe verändern. Fällt darauf jemand herein? Sicher wird jeder vermuten, dass es nicht der Anstrich außen am Tanker, sondern die Ladung in seinem Inneren ist, die Aufmerksamkeit verdiente, um die CO₂-Emissionen einer Gesellschaft signifikant zu reduzieren...

BP rief auch einen Web-basierten „CO₂-Absolutionsservice“ ins Leben, „targetneutral.com“, der behauptet, man könne seine CO₂-Emission neutralisieren, und dass „das die Welt nichts koste“, speziell, dass Sie Ihre CO₂-Verschmutzung für 40€ loswerden könnten. Wie kann das gehen? Wenn die wahren Kosten, dem Klimawandel zu begegnen, gerade mal 40 € pro Person betrügen, dann könnte eine Regierung das aus der Portokasse leisten!

Noch schlimmer sind Firmen, die das gegenwärtige Umweltbewusstsein ausbeuten, indem sie „Wasserkraft-Batterien“, „biologisch abbaubare Handys“, „portable Windturbinen zum Anstecken“ und andere unsinnige Dinge anbieten.

Auch Kampagnen führen oftmals in die Irre. Leute, die Erneuerbare Energien gegenüber Atomkraft favorisieren, sagen: „Off-shore Windparks können die gesamten Haushalte Englands mit Strom versorgen“, und dann sagen sie „Neue AKWs werden

wenig gegen den Klimawandel ausrichten“, da 10 neue AKWs „die Emissionen nur um 4% verringern“. Dieses Argument ist irreführend, da das Spielfeld auf halbem Weg gewechselt wurde, von der „Anzahl versorgter Haushalte“ zur „CO₂-Reduktion“. Die Wahrheit ist, dass die Menge elektrischer Leistung der wundervollen Windkraftwerke, die „alle Haushalte Englands versorgen“ können, genauso groß ist wie die Leistung von 10 AKWs. „Alle Haushalte Englands versorgen“ trägt also mit 4% zur CO₂-Emission Englands bei.

Vielleicht die schlimmsten Unsinn-Stifter sind aber die Leute, die es eigentlich wirklich besser wissen sollten – die Medien und Verleger, die den Unsinn verbreiten – zum Beispiel „New Scientist“ mit dem Artikel über das „wasser-betriebene Auto“ (vgl. auch die Anmerkungen am Ende des Kapitels zu den furchtbaren Details. Jedes Kapitel hat Endnoten mit Quellenangaben und Anmerkungen. Um den Leser nicht abzulenken, wollte ich diese Anmerkungen nicht als Fußnoten im Text platzieren).

In einem Klima, in dem die Leute die Zahlen nicht verstehen, können Zeitungen, Kampagnen, Firmen und Politiker mit allem durchkommen.

Wir brauchen einfache Zahlen, und wir brauchen sie aussagekräftig, vergleichbar und einprägsam.

Haben wir die Zahlen zur Hand, können wir auch Fragen wie diese beantworten:

1. Kann ein Land wie England theoretisch mit seinen eigenen erneuerbaren Energieressourcen leben?
2. Wenn jeder seine Thermostate ein Grad näher an die Außentemperatur dreht, ein kleineres Auto fährt und Handyladegeräte ausschaltet, wenn sie nicht benutzt werden, kann die Energiekrise dann abgewendet werden?
3. Sollte die Steuer auf Kraftstoffe signifikant erhöht werden? Sollte man die erlaubte Höchstgeschwindigkeit auf allen Straßen halbieren?
4. Ist jemand, der Windkraft den Vorzug über Atomkraft gibt, ein Feind des Volkes?
5. Wenn der Klimawandel „eine größere Bedrohung als der Terrorismus“ ist, sollte die Regierung dann die „Glorifizierung des Reisens“ kriminalisieren und Gesetze gegen die „Verherrlichung des Verbrauchs“ erlassen?
6. Können wir durch ein Umsteigen auf „fortschrittliche Technologien“ die CO₂-Verschmutzung stoppen, ohne unseren Lebensstil zu ändern?
7. Sollten die Leute angehalten werden, mehr vegetarische Nahrungsmittel zu essen?
8. Ist die Erdbevölkerung um den Faktor 6 zu hoch?

Fig.1.1: Ein Greenpeace Flyer, den ich 2006 in meiner Junk-Mail fand. Können die geliebten Windmühlen die verhassten Kühltürme ersetzen?



Warum diskutieren wir über Energiepolitik?

Drei verschiedene Motivationen nähren die heutige Energiediskussion:

Erstens: Fossile Brennstoffe sind eine begrenzte Ressource. Gut möglich, dass billiges Öl (für unsere Autos und Lastwagen) und billiges Gas (zum Heizen von Gebäuden) innerhalb einer Generation ausgehen werden. Deshalb suchen wir alternative Energiequellen. Nimmt man zur Kenntnis, dass fossile Brennstoffe eine wertvolle Ressource sind, die zur Herstellung von Plastik und vielen anderen kreativen Dingen verwendbar ist, sollte man sie vielleicht für eine bessere Verwendung aufheben, anstatt sie einfach anzuzünden.

Zweitens: Wir haben ein Interesse an der Sicherheit der Energieversorgung. Auch wenn fossile Brennstoffe weiterhin irgendwo auf der Welt verfügbar sind, wollen wir vielleicht nicht davon abhängig sein, da das unsere Wirtschaft verwundbar macht und uns den Launen unzuverlässiger Fremder ausliefert. (Ich hoffe Sie hören die Zunge in meiner Backe!)

Fig.1.2: Gehen uns die fossilen Brennstoffe aus? Rohölproduktion aus der Nordsee, und der Ölpreis in Dollar pro Barrel.

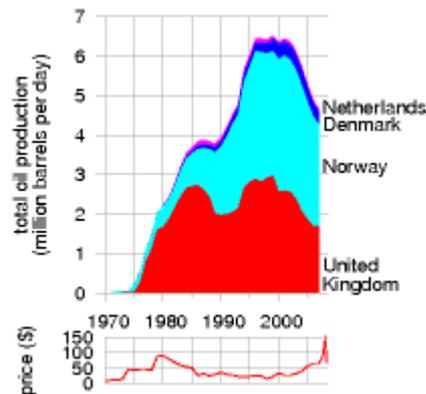
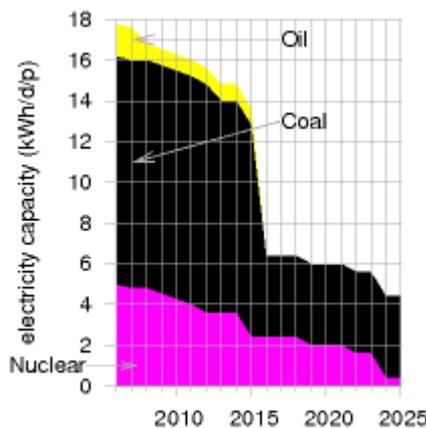


Fig.1.3: Die Energielücke, verursacht durch Kraftwerksstilllegungen nach Plänen des Energieunternehmens EDF. Die Grafik zeigt Atom-, Kohle- und Ölkraftwerke, in kWh pro Person und Tag. Als „Kapazität“ wird die maximale Einspeiseleistung einer Quelle bezeichnet.



Wie in Fig. 1.2. zu sehen, sieht es so aus, als hätten „unsere“ fossilen Brennstoffe den Zenit bereits überschritten. Für England zeichnet sich ein spezielles Versorgungssicherheits-Problem ab, bekannt als das „Energy Gap“: Ein wesentlicher Anteil an alten Kohlekraftwerken und AKWs wird in den nächsten 10 Jahren vom Netz gehen (Fig. 1.3), somit besteht die Gefahr, dass der Elektrizitätsbedarf teilweise die Elektrizitätsproduktion übersteigen wird, wenn man nicht adäquat gegensteuert.

Drittens: Es ist sehr wahrscheinlich, dass die Benutzung fossiler Brennstoffe das Klima verändert. Der Klimawandel wird mehreren menschlichen Aktivitäten angelastet, vorrangig jedoch dem verstärkten Treibhauseffekt durch CO₂-Emission. Der Hauptanteil an CO₂-Emission kommt aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe. Und der Hauptgrund, fossile Brennstoffe zu verbrennen, ist zur Energiegewinnung. Um den Klimawandel in den

Griff zu bekommen, müssen wir also einen neuen Weg finden, Energie zu erzeugen. Das Klimaproblem ist somit größtenteils ein Energieproblem.

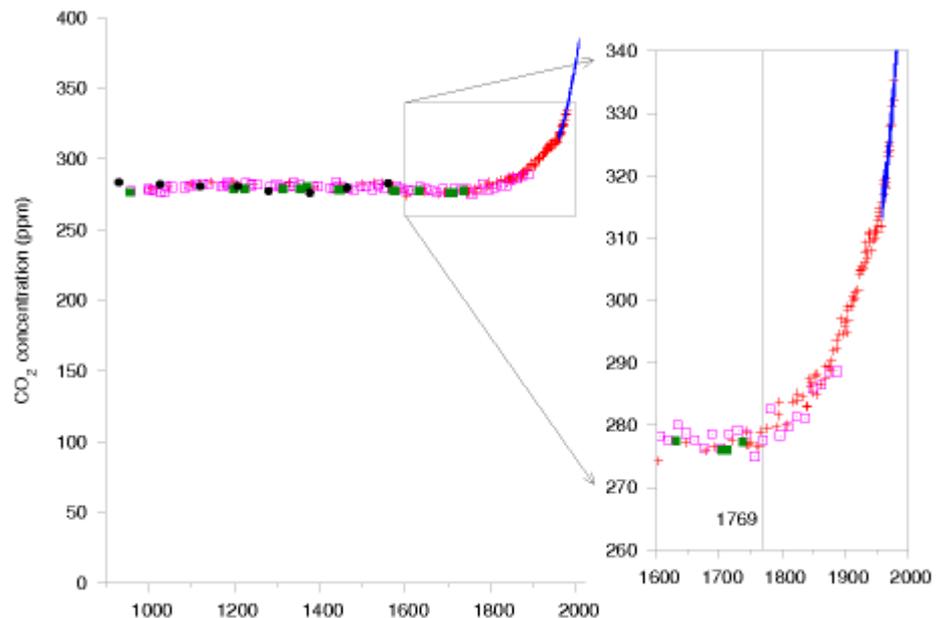
Welcher dieser drei Punkte uns auch immer motiviert, wir brauchen Zahlen zur Energiethematik und eine Politik, die sie zusammenzählen kann.

Die ersten beiden Punkte beinhalten eine geradlinige und durchaus auch egoistische Motivation, fossilen Brennstoffeinsatz drastisch zu reduzieren. Der dritte Punkt, Klimawandel, ist eine eher altruistische Motivation – die Auswirkungen des Klimawandels treffen nicht uns, sondern zukünftige Generationen über viele hundert Jahre. Mancher mag finden, dass Klimawandel nicht in seiner Verantwortung liegt und argumentieren: „Was kann ich mit meinem Handeln schon bewirken? China liegt außerhalb jeder Kontrolle!“ Deshalb will ich den Klimawandel hier etwas ausgiebiger behandeln, denn während der Arbeit an diesem Buch stieß ich auf einige interessante Fakten, die auch Licht auf diese ethischen Fragestellungen werfen. Der geneigte Leser, der kein Interesse am Klimawandel hat, möge den nächsten Abschnitt einfach überspringen.

Die Sache mit dem Klimawandel

Will man die Erfordernis nachhaltiger Energiepolitik über den Klimawandel motivieren, argumentiert man üblicherweise in drei Schritten: Erstens: Menschen verursachen durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe einen Anstieg der CO₂-Konzentration; zweitens: CO₂ ist ein Treibhausgas; drittens: Erhöhung des Treibhauseffekts hat den Anstieg der mittleren globalen Temperatur (und einige weitere Effekte) zur Folge.

Fig.1.4: Kohlendioxid-(CO₂)-Konzentrationen (in ppm) während er letzten 1100 Jahre, gemessen an Luft, die in Bohrkernen aus Gletschern eingeschlossen war (Werte bis 1977) und aus direkten Messungen auf Hawaii (Werte ab 1958).



Beginnen wir mit der Tatsache, dass die CO₂-Konzentrationen in Luft und Wasser ansteigen. Fig. 1.4. zeigt Messungen der CO₂-Konzentration in Luft seit dem Jahr 1000 bis heute. Einige „Skeptiker“ haben angemerkt, dass der gegenwärtige Anstieg der CO₂-Konzentration ein natürliches Phänomen sei. Meint „Skeptiker“ hier, „jemand, der noch keinen Blick auf die Daten warf“? Denken Sie nicht, dass möglicherweise irgendetwas passiert sein könnte zwischen 1800 und 2000? Etwas, das nicht Teil des natürlichen Prozesses war, der in den 1000 Jahren davor wirkte?

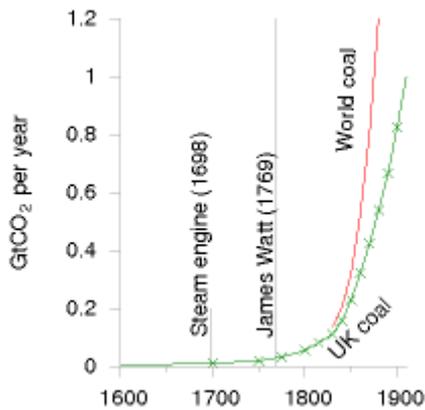
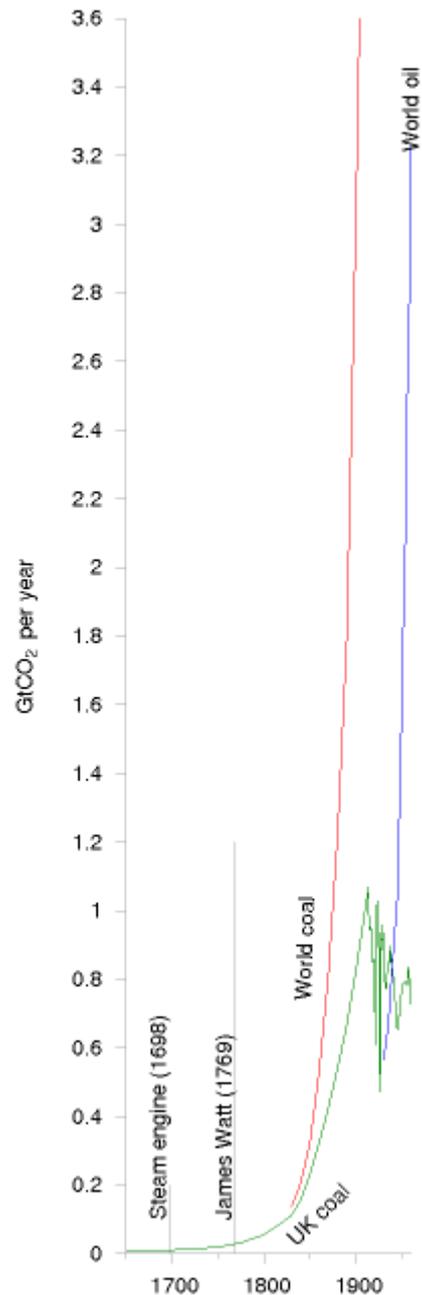


Fig.1.5 (oben): die Geschichte der englischen und der weltweiten Kohleproduktion von 1600 bis 1910. Produktionsraten dargestellt in Milliarden Tonnen CO₂ – eine unverständliche Einheit, zugegeben, doch keine Sorge, wir werden sie in Kürze personalisieren.

Fig.1.6 (rechts): Was als nächstes passierte. Die Geschichte der englischen Kohleproduktion von 1650 bis 1960, in derselben Einheit wie Fig.1.5.

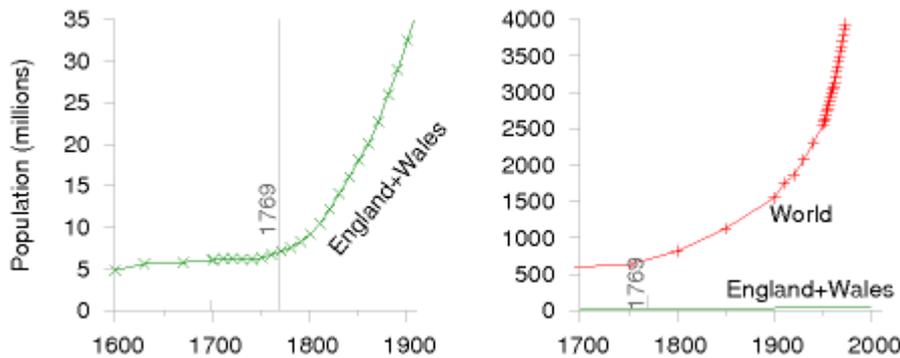


Etwas geschah in dieser Zeit, und das war die Industrielle Revolution.⁴ In der Zeichnung ist das Jahr 1769 gekennzeichnet, in dem James Watt seine Dampfmaschine patentierte. Während die erste funktionierende Dampfmaschine schon 1698 erfunden wurde, brachte Watts viel effizientere Maschine die Industrielle Revolution erst ins Rollen. Eines der Haupt-Einsatzgebiete der Dampfmaschine war das Abpumpen von Wasser aus Kohlebergwerken. Fig. 1.5 zeigt die britische Kohleproduktion ab 1769. Als Skaleneinheit für die Kohleproduktion benutze ich jeweils eine Milliarde Tonnen des CO₂,

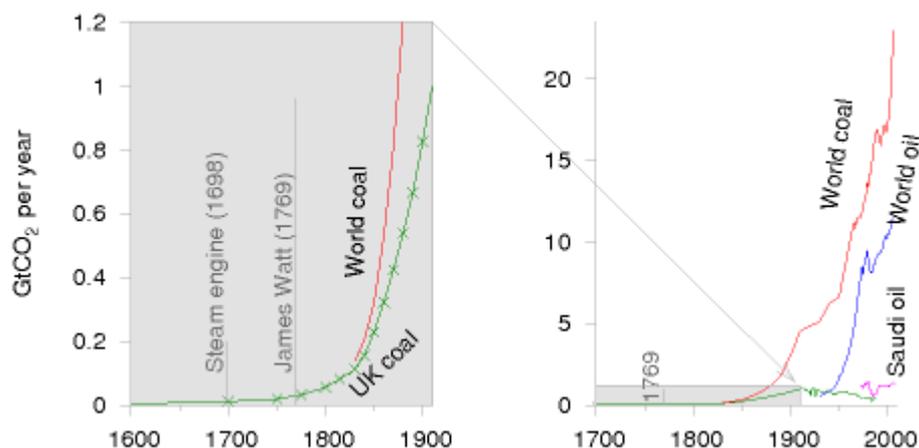
⁴ Unzweifelhaft ist die Industrielle Revolution und der mit ihr verbundene Anstieg der CO₂-Emission zeitlich mit dem Einsetzen einer globalen Erwärmung korreliert. Eine solche zeitliche Korrelation ist oft ein Hinweis auf kausale (ursächliche) Zusammenhänge zwischen Ereignissen, und aus heuristischer Sicht ist es durchaus sinnvoll, besonders in zeitlich korrelierten Vorgängen nach Kausalzusammenhängen zu suchen. Als Beweis sollte man diese Korrelation jedoch nicht vorbringen, sie birgt gewisse Risiken. Nehmen wir etwa die Geburtenrate in Deutschland und tragen sie in einem zeitlichen Diagramm über die letzten Jahrzehnte auf, sehen wir einen klaren Abwärtstrend. Nehmen wir Veröffentlichungen von Biologen über Vogelbestände, sagen wir, die in Deutschland brütenden Weißstörche, finden wir in demselben Zeitraum einen ähnlich deutlichen Rückgang. Hier einen Kausalzusammenhang zu vermuten und würde man aber landläufig eher als Ammenmärchen abtun.

das bei der Verbrennung dieser Kohle frei wird. Um 1800 wurde Kohle vorrangig verwendet für die Eisenproduktion, für die Schifffahrt, zur Gebäudeheizung und zum Antrieb von Lokomotiven und anderen Maschinen und natürlich um die Pumpen anzutreiben, die den Abbau von immer mehr Kohle aus den Hügeln von England und Wales ermöglichten. England war schrecklich gesegnet mit Kohle: Als die Industrielle Revolution begann, lagerte unter Britannien etwa die gleiche Menge Kohle wie unter Saudi-Arabien Öl.

In den 30 Jahren von 1769 bis 1800 verdoppelte sich die britische Kohleproduktion. Weitere 30 Jahre später (1830) hatte sie sich erneut verdoppelt. Die nächste Verdoppelung geschah innerhalb 20 Jahren (1850), und nochmals eine Verdopplung in weiteren 20 Jahren (1870). Die Kohle erlaubte es England, den Globus pink zu färben. Der Wohlstand, der dadurch nach England und Wales kam, spiegelt sich in einem Jahrhundert von nie da gewesenem Bevölkerungswachstum wider.



Andere Länder sprangen auf den Zug auf, so dass die Revolution sich verbreitete. Fig.1.6 zeigt die britische und weltweite Kohleproduktion auf derselben Skala wie Fig.1.5, wobei das Fenster der Geschichte auf 50 Jahre später verschoben ist. Die britische Kohleproduktion hatte ihr Maximum 1910, doch verdoppelte sich zwischenzeitlich die Weltproduktion alle 20 Jahre. Es ist schwierig, die Geschichte der Kohleproduktion in *einem* Diagramm darzustellen. Um die nächsten 50 Jahre auf derselben Skala darzustellen, müsste das Buch einen Meter hoch sein. Um diese Schwierigkeit zu überwinden, kann man entweder die senkrechte Achse umskalieren:



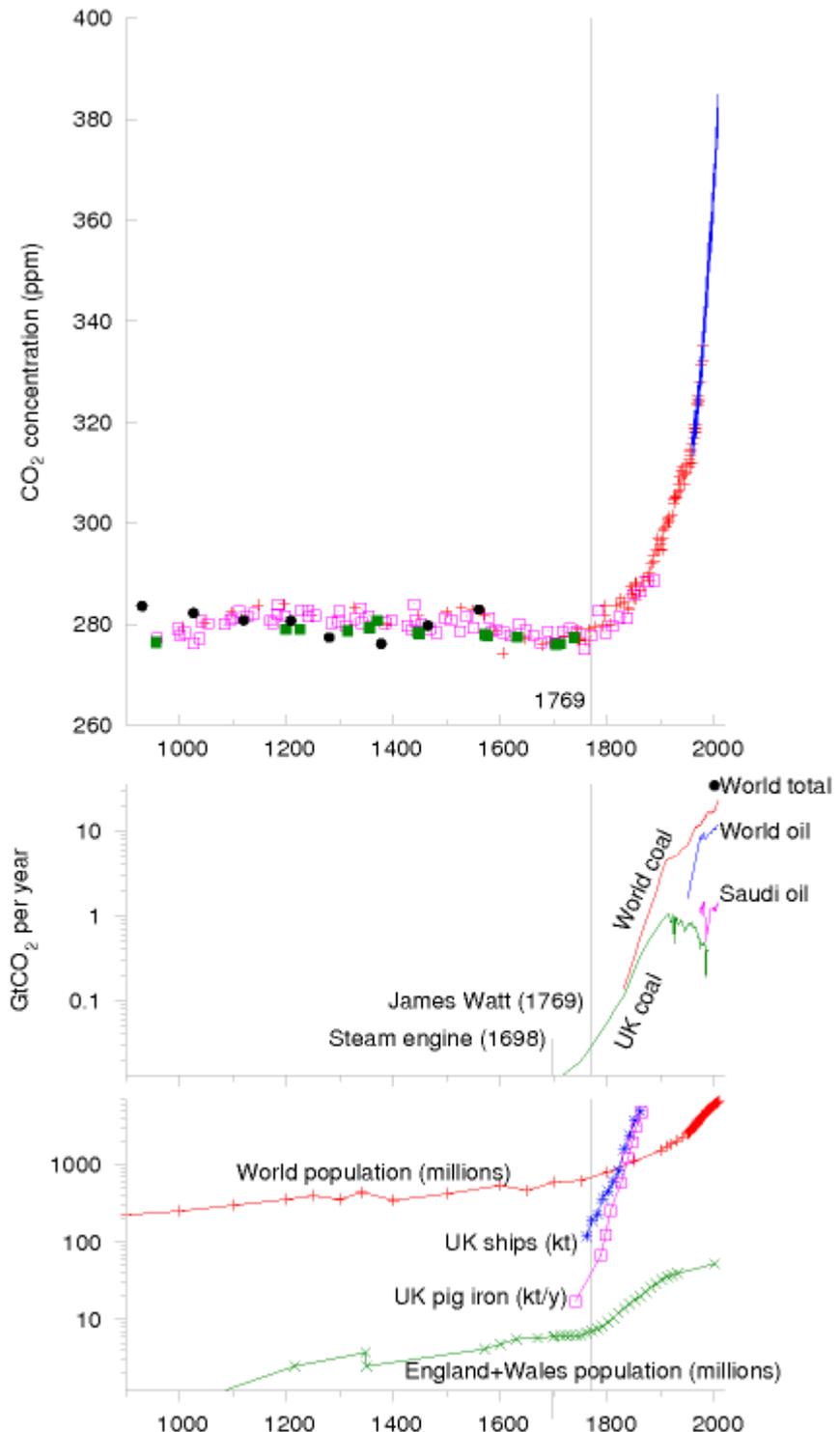
Oder man kann die senkrechte Achse nichtlinear stauchen, so dass kleine und große Werte gleichzeitig in einem einzigen Diagramm darstellbar werden. Eine bevorzugte Art der nichtlinearen Stauchung ist die logarithmische Skala, die ich in den unteren beiden Diagrammen der Fig.1.7 (Seite 9) benutzt habe. Auf einer logarithmischen Skala ist jede Verzehnfachung (von 1 auf 10, von 10 auf 100, von 100 auf 1000) durch denselben

Abstand repräsentiert. In einer logarithmischen Skala bildet sich eine Größe, die einen konstanten jährlichen prozentualen Zuwachs (sog. Exponentielles Wachstum) hat, als eine gerade Linie ab. Logarithmische Diagramme eignen sich hervorragend, um Wachstum zu verstehen. Während die linearen Diagramme in den Abbildungen oben die Botschaft transportieren, dass britische und weltweite Kohleproduktion gewaltig anstiegen, und dass britische und weltweite Bevölkerung ebenfalls gewaltig anstiegen, können sie die relativen Wachstumsraten nicht evident darstellen. Die logarithmische Darstellung erlaubt uns dagegen einen Vergleich der Wachstumsraten.

Fig.1.7: Die obere Grafik zeigt CO₂-Konzentrationen (in ppm) während der letzten 1100 Jahre, dieselben Daten wie Fig.1.4.

Die untere Grafik stellt auf einer logarithmischen Skala einige Konsequenzen der Industriellen Revolution dar: Deutliche Bevölkerungszunahme in England und auf der gesamten Welt, eine bemerkenswerte Zunahme der englischen Roheisenproduktion (in 1000 t pro Jahr) und das Wachstum in der Tonnage englischer Schiffe (in 1000 t).

Im Gegensatz zu den linearen Skalen der vorherigen Seiten erlaubt die logarithmische Darstellung, die Weltbevölkerung und die englische Bevölkerung in einem gemeinsamen Diagramm darzustellen und interessante Parallelen zu entdecken.



Sieht man auf die Steigungen z.B. der Bevölkerungskurven, kann man erkennen, dass die Wachstumsrate der Weltbevölkerung in den letzten 50 Jahren etwas über der Wachstumsrate von England und Wales um 1800 liegt.

Von 1769 bis 2006 stieg die weltweite jährliche Kohleproduktion auf das 800-fache. Und sie wächst heute noch weiter. Andere fossile Brennstoffe werden ebenfalls gefördert – die mittlere Abbildung in Fig.1.7 zeigt z.B. die Ölproduktion – aber bezüglich CO₂-Emission ist die Kohle nach wie vor führend.

Verbrennen fossiler Brennstoffe ist die Hauptursache für den Anstieg der CO₂-Konzentration. Das ist eine Tatsache, doch Achtung: Ich höre ein andauerndes Gemurmel einer Schar von Klimawechsel-Inaktivisten. Was sagen die? Hier Dominic Lawson, ein Kolumnist des „Independent“:

„Das Verbrennen fossiler Brennstoffe schickt etwa **sieben Gigatonnen** CO₂ pro Jahr in die Atmosphäre, das klingt nach ziemlich viel. Doch Biosphäre und Ozeane schicken etwa **1.900 Gigatonnen** bzw. **36.000 Gigatonnen** CO₂ jährlich in die Atmosphäre - ... ein Grund, weswegen einige von uns skeptisch sind, wenn so großes Aufhebens gemacht wird über den Anteil der durch die Menschheit verursachten Verbrennung am Treibhauseffekt. Die industriellen („man-made“) CO₂-Emissionen zu senken ist Größenwahn, der die Bedeutung der Menschen weit überschätzt. Politiker können das Wetter nicht ändern.“

Nun, ich habe viel übrig für Skeptizismus, und nicht alles, was Skeptiker sagen, ist Mist – und auch verantwortungsloser Journalismus wie bei Dominic Lawson verdient eine gute Erwiderung.

Das erste Problem mit Lawsons Darstellung ist, dass alle drei Zahlen, die er erwähnt (**7**, **1.900** und **36.000**) falsch sind. Die korrekten Zahlen sind **26**, **440** und **330**. Ungeachtet dieses Fehlers wenden wir uns Lawsons zentralem Punkt zu, der relativen Kleinheit der industriellen („man-made“) Emissionen.

Ja, natürliche Ströme von CO₂ sind definitiv größer als alles, was wir „dazugeschaltet“ haben, als wir vor 200 Jahren ernsthaft begannen, fossile Brennstoffe zu verbrennen. Aber es ist irreführend, nur die großen natürlichen Ströme *in* die Atmosphäre zu quantifizieren und dabei die Rückströme in die Biosphäre und die Ozeane zu vernachlässigen, die nahezu gleich groß sind. Der Punkt ist: diese natürlichen Ströme in die und aus der Atmosphäre waren fast exakt im Gleichgewicht über Jahrtausende.

So könnte man sagen, die natürlichen Ströme heben sich gegenseitig auf. Sie hielten, groß wie sie waren, die CO₂-Konzentration in Atmosphäre und Ozean konstant über die letzten tausend Jahre. Verbrennen von fossilen Brennstoffen erzeugt dagegen einen zusätzlichen Strom, der, obwohl er absolut gesehen klein ist, möglicherweise nicht durch die natürlichen CO₂-Ströme aufgehoben wird. Um mit einer simplen Analogie zu arbeiten: Stellen Sie sich die Passkontrolle der Zollabfertigung in einem Flughafen vor. Eintausend Passagiere kommen stündlich an, und es gibt gerade genug Angestellte, um diese 1000 Passagiere abzufertigen. Es gibt eine gewisse Warteschlange, doch wegen der Übereinstimmung zwischen Ankunftsrate und Abfertigungsrate wächst diese Schlange nicht ins Unermessliche. Stellen Sie sich nun vor, ein zusätzlicher Passagierstrom würde von einem kleineren Nachbarflughafen etwa wegen Nebels hierher umgeleitet. Dieser Strom würde zusätzliche 50 Passagiere pro Stunde in die Ankunftshalle bringen - eine kleine Erhöhung verglichen mit der ursprünglichen Ankunftsrate von 1000 Passagieren pro Stunde. Zumindest anfänglich würden die Zollstellenleiter das Abfertigungspersonal nicht aufstocken, und diese würden weiterhin genau 1000 Passagiere pro Stunde abfertigen. Was passiert? Die Warteschlange würde langsam aber sicher wachsen.

Fossile Brennstoffe zu verbrennen erhöht unbestreitbar die CO₂ Konzentration in der Atmosphäre und in den Ozeanen. Kein Klimaforscher bestreitet diese Tatsache. Wenn man die CO₂-Konzentrationen betrachtet, ist der Faktor Mensch wohl signifikant.⁵

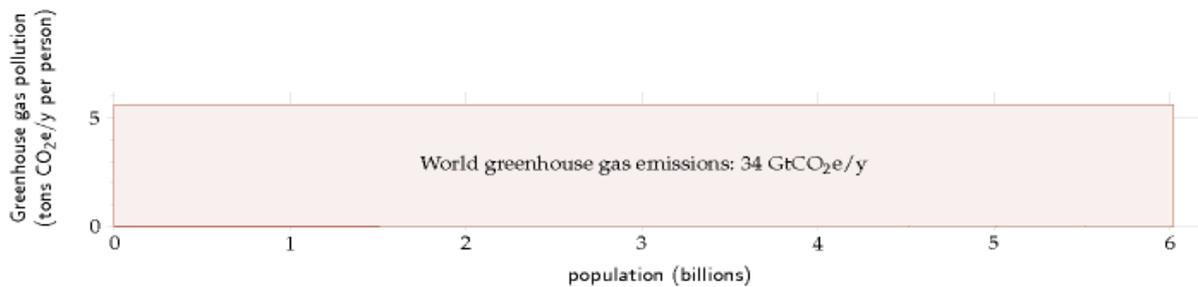
Gehen wir davon aus, das Verbrennen fossiler Brennstoffe erhöhte die CO₂-Konzentration signifikant. Doch stört das wirklich? „CO₂ und Kohlenstoff sind natürlich!“ erinnert uns die Öllobby, „Kohlenstoff ist Leben!“. Wenn CO₂ keine problematischen Effekte hat, dann würden in der Tat CO₂-Emissionen nicht stören. Doch CO₂ ist ein Treibhausgas. Nicht das stärkste, dennoch ein signifikantes. Gibt man mehr davon in die Atmosphäre, so bewirkt es, was Treibhausgase eben bewirken: Es absorbiert von der Erde ausgehende Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung) und re-emittiert sie in eine zufällige Richtung; der Effekt dieser zufälligen Richtungsverteilung ist ein Behindern des Wärmeflusses vom Planeten ins All, etwa wie eine Bettdecke. CO₂ hat also einen wärmenden Effekt. Diese Tatsache stützt sich nicht auf historische globale Klimadaten, sondern auf einfache physikalische Eigenschaften des CO₂ Moleküls. Treibhausgase sind eine Bettdecke, und CO₂ ist eine Teilschicht davon.

Sollte es den Menschen gelingen, die CO₂-Konzentrationen zu verdoppeln oder zu verdreifachen (worauf wir zusteuern könnten, wenn wir weitermachen wie bisher), was würde passieren? Da gibt es eine Menge Unwägbarkeiten. Klimawissenschaft ist schwierig. Das Klima ist ein komplexes, zuckendes Tier, und wie viel Erwärmung eine CO₂-Verdopplung produzieren würde, ist unsicher. Führende Klimamodelle scheinen nahe zu legen, dass eine Verdopplung der CO₂-Konzentration grob denselben Effekt erzeugen würde wie eine Erhöhung der Sonnenintensität um 2%, und die globale Durchschnittstemperatur um etwa 3 Grad erhöhen könnte. Das wäre etwas, was Historiker „a Bad Thing“ nennen würden. Ich will nicht die ganze Litanei möglicher drastischer Effekte herunterbeten, Sie haben sicher davon bereits vieles gehört. Die Litanei beginnt mit „Die Eisdecke Grönlands wird nach und nach abschmelzen und innerhalb einiger hundert Jahre wird der Meeresspiegel um etwa 7 Meter ansteigen.“ Die Auswirkungen dieser Litanei würden zukünftigen Generationen zufallen. Derartige Temperaturen gab es nicht auf der Erde mindestens innerhalb der letzten 100000 Jahre, und es ist zu vermuten, dass das Ökosystem so signifikant verändert würde, dass einige der Dinge, die wir derzeit für gesichert halten, uns die Erde nicht mehr würde bieten können.

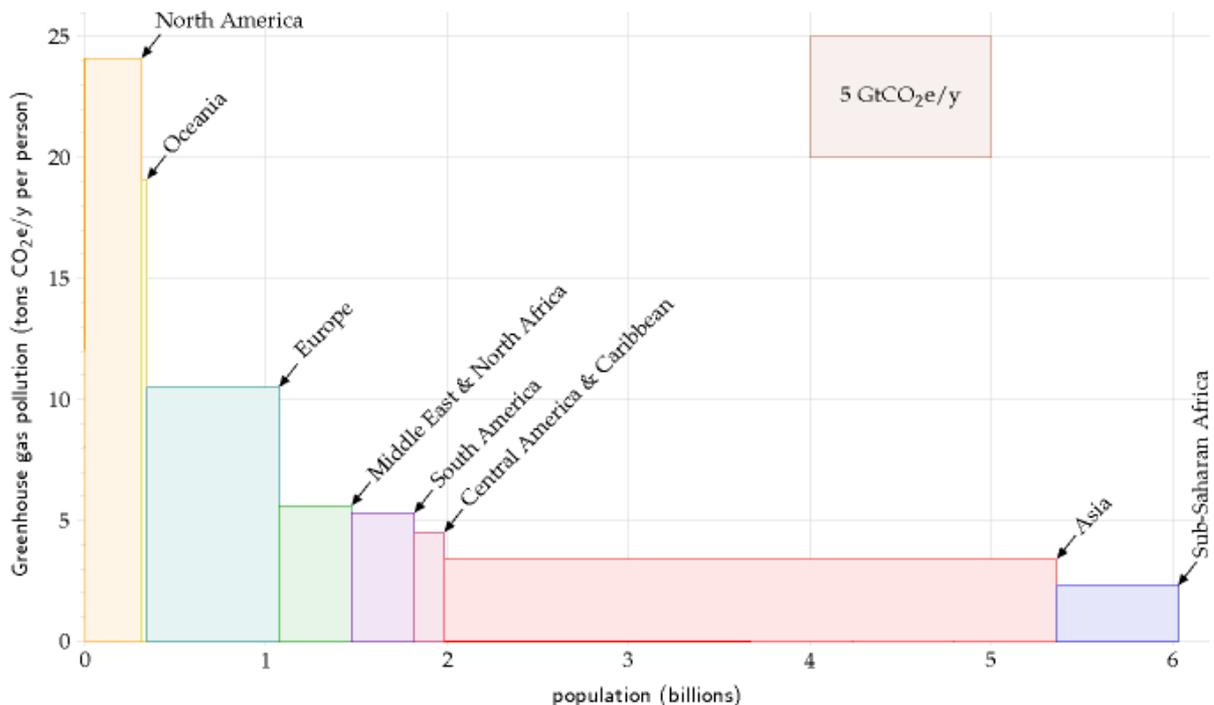
Klimamodelle sind kompliziert und mit großen Unsicherheiten behaftet. Unsicherheit darüber, wie das Klima auf erhöhte Treibhausgase reagieren wird, ist jedoch keine Rechtfertigung für Nichtstun. Wenn Sie auf einem schnellen Motorrad säßen und nahe eines Abhangs durch den Nebel führen, und keine gute Karte der Gegend hätten, wäre der Mangel an einer guten Karte ein Grund, *nicht* abzubremesen?

⁵ Für eine signifikante Änderung muss das natürliche Gleichgewicht der letzten tausend Jahre, der gesamte natürliche Fluss von CO₂ in die und aus der Atmosphäre, durch den vergleichsweise kleinen menschlichen Anteil so nachhaltig gestört sein, dass eine natürliche Kompensation nicht zu erwarten ist. Oder um in unserem Beispiel zu bleiben: Wenn nur ein Teil der Abfertigungsbeamten wegen des zusätzlichen Ansturms die Pinkelpause verkürzen oder das Arbeitstempo um ein paar Prozent steigern würde, wird die Verlängerung der Warteschlange nicht stattfinden oder jedenfalls nicht so dramatisch wie in oberflächlicher Betrachtung vielleicht erwartet. Tatsache ist, dass die dem globalen CO₂-Kreislauf zu Grunde liegenden Mechanismen und Gesetzmäßigkeiten noch zu wenig bekannt sind, als dass man zum gegenwärtigen Zeitpunkt hier eine fundierte Aussage treffen könnte, in welchem Ausmaß eine Kompensation zu erwarten wäre. Siehe hierzu auch die Anmerkungen am Ende des Kapitels, wo die Kompensation auf 40% abgeschätzt wird. Dass eine Kompensation stattfindet, scheint ziemlich sicher aber sie könnte entweder a) nahezu vernachlässigbar gering sein, oder aber b) nahezu den gesamten zusätzlichen CO₂-Eintrag kompensieren. Sogar eine Überreaktion des Systems als Antwort auf eine kleine Störung ist denkbar. Obige Aussage sollte also besser heißen: „ist der Faktor Mensch *vielleicht* signifikant“.

Also, wer soll das Motorrad abbremesen? Wer sollte CO₂ Emissionen abstellen? Wer ist für den Klimawandel verantwortlich? Das ist eine ethische Frage, keine wissenschaftliche, klar, doch auch ethische Diskussionen müssen auf Fakten aufbauen. Lassen Sie uns also die Fakten zu Treibhausgas-Emissionen ergründen. Zuerst ein Wort zu den Einheiten, in denen sie gemessen werden. Treibhausgase umfassen CO₂, Methan und Lachgas (Distickstoffmonoxid), jedes Gas hat unterschiedliche physikalische Eigenschaften; es ist üblich, alle Gasemissionen in CO₂-Äquivalenten anzugeben, wobei „äquivalent“ gleichgesetzt wird mit „mit demselben Erwärmungseffekt über einen Zeitraum von 100 Jahren“. Eine Tonne CO₂-Äquivalent wird abgekürzt mit 1 tCO₂e, eine Milliarde Tonnen als 1 GtCO₂e (eine Gigatonne). Im Jahre 2000 betrug die weltweite Emission⁶ von Treibhausgasen an die 34 Gigatonnen CO₂-Äquivalent jährlich⁷. Eine unvorstellbare Zahl. Doch wir können sie in eine greifbarere und persönlichere Form übersetzen, indem wir sie durch die Anzahl der Menschen auf dem Planeten, 6 Milliarden, teilen und so die Treibhausgas-Verschmutzung pro Person erhalten, die etwa bei 5½ Tonnen CO₂e pro Person und Jahr liegt. So können wir die weltweiten Emissionen in einem Rechteck darstellen, dessen Breite die Bevölkerung (6 Milliarden) und dessen Höhe die pro-Kopf-Emission ist.



Nun, alle Menschen sind gleich, aber nicht alle emittieren 5½ Tonnen CO₂e jährlich. Wir können die Emissionen des Jahres 2000 aufteilen und sehen, wie sich dieses 34-Gigatonnen-Rechteck auf verschiedene Regionen der Welt verteilt:



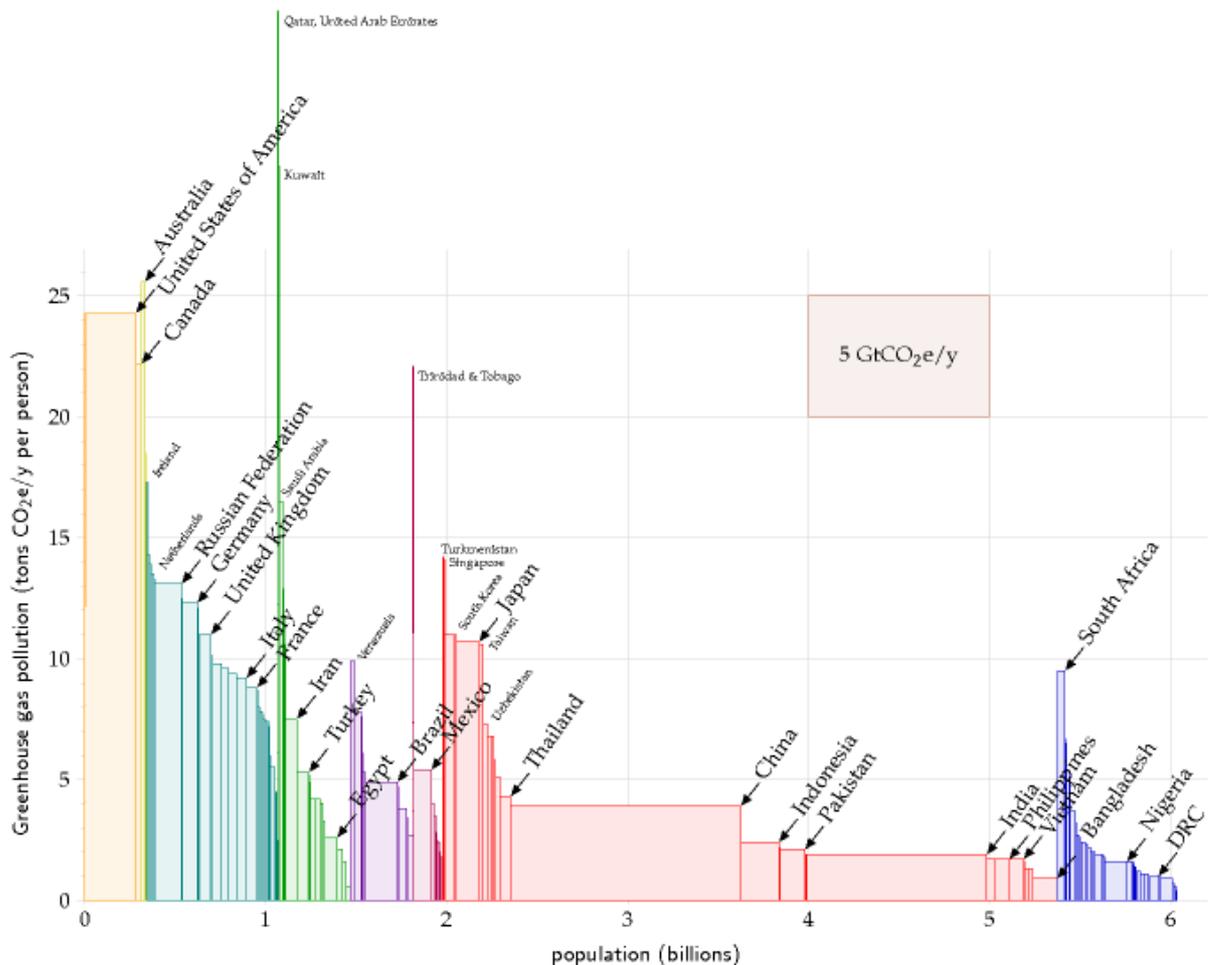
⁶ Hier wie im folgenden wird unter „Emission“ stets nur der – wie wir wissen, relativ gesehen kleine – durch industrielle, also menschliche Aktivitäten verursachte Beitrag verstanden.

⁷ Zu den oben genannten 26 Gt CO₂ kommen noch weitere Anteile der anderen Treibhausgase hinzu.

Dieses Bild, dargestellt in derselben Skala wie das vorige, teilt die Welt in acht Regionen. Jede Rechtecksfläche repräsentiert die Treibhausgas-Emission einer Region. Die Breite des Rechtecks steht für die Bevölkerung dieser Region, und die Höhe für die pro-Kopf-Emission in dieser Region.

Im Jahr 2000 war die pro-Kopf-Emission in Europa doppelt so hoch wie der Weltdurchschnitt, und der Nordamerikas viermal so hoch wie der Weltdurchschnitt.

Wir können die Unterteilung verfeinern und die Regionen weiter in Länder aufsplitten. Da wird es richtig interessant:



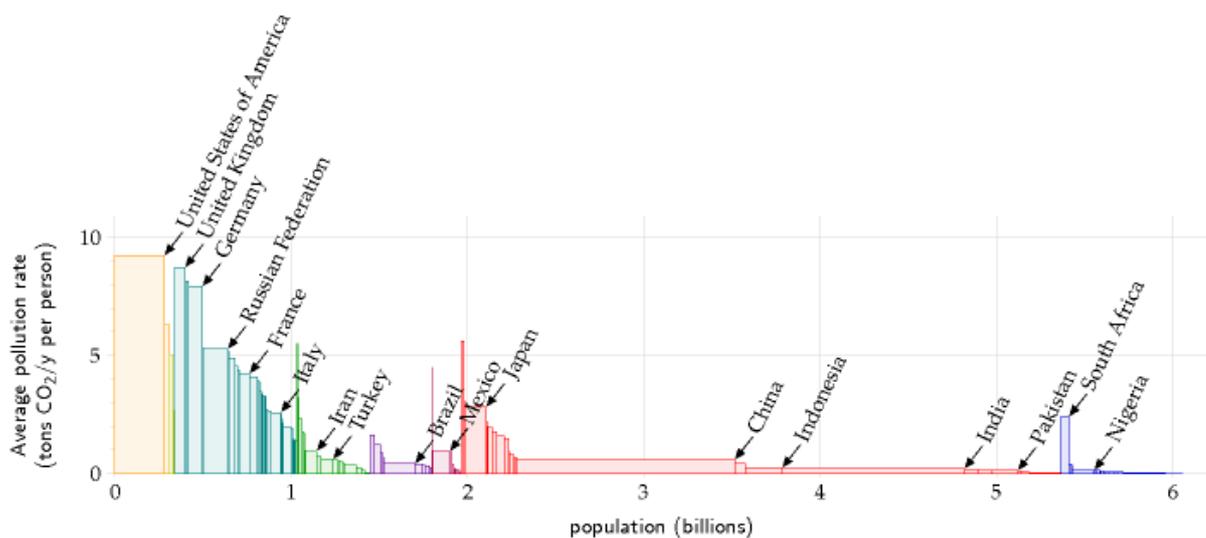
Die Hauptländer mit den größten pro-Kopf-Emissionen sind Australien, USA und Kanada. Europäische Staaten, Japan und Südafrika liegen dahinter. Unter den Europäischen Staaten liegt England im Mittelfeld. Was ist mit China, dem angeblichen „Land außer Kontrolle“? Ja, die Fläche des chinesischen Rechtecks ist etwa die gleiche wie die der USA, doch die pro-Kopf-Emission liegt *unter* dem Weltdurchschnitt. In Indien betragen die pro-Kopf-Emissionen weniger als die Hälfte des Weltdurchschnitts. Darüber hinaus sollte man im Hinterkopf behalten, dass ein nennenswerter Teil der Emissionen in Indien und China auch mit der Produktion von *Waren für reiche Länder* zusammenhängen.

Nun angenommen, dass „etwas getan werden muss“, um Treibhausgas-Emissionen zu reduzieren, wer hat dann eine besondere Verantwortung, etwas zu tun? Wie gesagt, das ist eine ethische Frage. Aber ich kann mir schwerlich ein ethisches System vorstellen, das nicht zu dem Schluss kommt, die Verantwortlichkeit liege insbesondere bei den Ländern auf der linken Seite des Diagramms – Länder, deren Emissionen zwei, drei oder

viermal höher sind als der Weltdurchschnitt. Länder die besonders zahlungsfähig sind. Länder wie England und die USA zum Beispiel.

Historische Verantwortung für den Klimakollaps

Wenn wir annehmen, dass das Klima durch menschliche Aktivitäten zerstört wurde, und dass jemand es zu reparieren hätte, wer sollte dafür bezahlen? Viele meinen dazu: „Der Verschmutzer soll zahlen!“ Die obigen Bilder zeigen, wer heute die Verschmutzung verursacht. Doch es ist nicht die *Rate* der CO₂-Verschmutzung entscheidend, sondern der kumulative Effekt der *gesamten* Emissionen; ein Großteil des emittierten CO₂ (etwa ein Drittel) wird über mindestens 50 oder 100 Jahre in der Atmosphäre hängen. Wenn wir die ethische These akzeptieren, dass „der Verschmutzer zahlen“ sollte, dann sollten wir den historischen Fußabdruck jedes Landes bestimmen. Das nächste Bild zeigt für jedes Land die kumulativen Emissionen von CO₂, ausgedrückt in einer gemittelten Emissionsrate über die Zeitspanne von 1880 bis 2004.

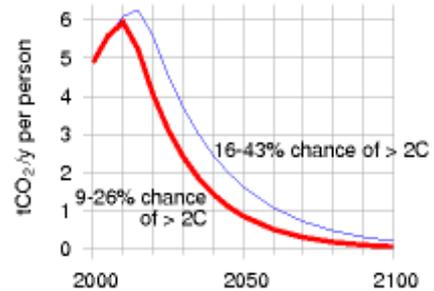


Gratuliere, England! Britannien hat es aufs Siegertreppchen geschafft. England mag heute nur im europäischen Mittelfeld sein, doch im Ranking der historischen Emittier, pro Kopf, ist England zweiter gleich hinter den USA.

OK, genug der Ethik. Was ist nach wissenschaftlicher Schätzung erforderlich, um das Risiko einer globalen 2-Grad-Erwärmung zu vermeiden (2 Grad ist die Grenze, über der vielerlei schlimme Konsequenzen vorhergesagt sind)? Hier herrscht klarer Konsens. Wir müssen unsere Sorglosigkeit im Umgang mit fossilen Brennstoffen ablegen, und wir müssen es schnell tun. Einige Länder, einschließlich England, haben eine mindestens 60%ige Reduktion der Treibhausgase bis 2050 zugesichert, allerdings ist zu betonen, dass 60% Reduktion, so radikal sie sind, das Ruder wahrscheinlich nicht herumreißen werden. Wenn weltweit die Emissionen bis 2050 schrittweise um 60 % gesenkt werden, so schätzen Klimatologen, ist es eher wahrscheinlich, dass die Globaltemperatur um mehr als 2 Grad ansteigen wird. Die Art der Reduktion, die man anstreben muss, ist in Fig.1.8. gezeigt. Diese Grafik zeigt zwei möglicherweise sichere Emissions-Szenarien, die Baer und Mastrandrea (2006) in einem Artikel des Institute of Public Policy Research vorstellten: Die untere Kurve steht unter der Annahme, dass ein weltweites Absenken der Emissionen ab 2007 um runde 5% pro Jahr einsetzt. Die obere Kurve geht von einer kurzen Verzögerung beim Einsetzen der Reduktion aus, und von einer jährlichen Reduktion um 4% weltweit. Bei beiden Szenarien glaubt man, dass eine gewisse Chance besteht, eine Erwärmung um mehr als 2 Grad zu vermeiden. Im unteren Szenario wird die Wahrscheinlichkeit, dass die Erwärmung dennoch die 2-Grad-Marke überschreitet, mit 9-

26% abgeschätzt, beim oberen mit 16-43%. Beide dieser möglicherweise sicheren Szenarien beinhalten übrigens signifikant schärfere Reduktionen der Emissionen als alle Szenarien, die vom IPCC oder im Stern-Report (2007) vorgestellt wurden.

Fig.1.8: Globale Emissionen für zwei Szenarien von Baer und Mastrandrea, ausgedrückt in Tonnen CO₂ pro Person und Jahr, bei einer angenommenen Weltbevölkerung von 6 Milliarden. Beiden Szenarien wird eine reelle Chance zugeschrieben, Erwärmung von mehr als 2°C über den vor-industriellen Level zu vermeiden.



Diese möglicherweise sicheren Trajektorien erfordern eine Senkung der globalen Emission bis 2050 um 70% bzw. 85%. Was würde das für ein Land wie Großbritannien bedeuten? Unterschreiben wir die Idee von „Contraction and Convergence“, d.h. dass alle Länder sich zu gleichen pro-Kopf-Emissionen verpflichten, dann muss England mehr als 85% reduzieren: Es sollte von gegenwärtig 11 Tonnen CO₂e pro Jahr auf 1 Tonne pro Jahr und Person im Jahr 2050 gelangen. Das ist derart einschneidend, am besten denkt man sich dieses Szenario, als gäbe es überhaupt keine fossilen Brennstoffe mehr.

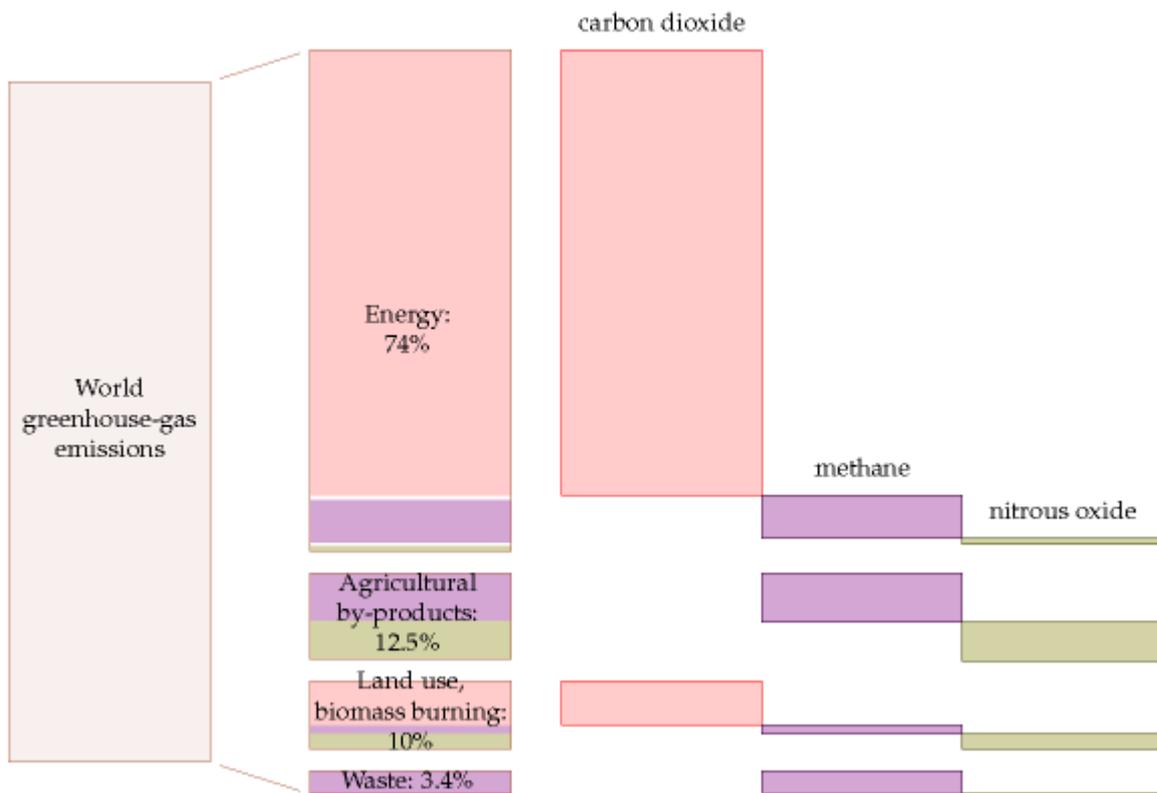


Fig.1.9: Aufschlüsselung der weltweiten Treibhausgas-Emissionen (2000) nach Ursache und nach Art des Gases. Der Verursacher „Energy“ beinhaltet Kraftwerke, industrielle Prozesse, Verkehr, die Verarbeitung fossiler Brennstoffe, die Heiz- und Verbrauchsenergie in Gebäuden. „Land use ...“ beinhaltet Veränderungen durch Flächenverbrauch, Waldrodung, Verbrennen sich nicht-erneuernder Biomasse wie z.B. Torf, „Waste“ beinhaltet die Abfallwirtschaft. Die Größen stehen für das Erwärmungspotenzial in einem 100-Jahres-Rahmen. Quelle: Emission Database for Global Atmospheric Research.

Ein letztes Statement zur Klimawandel-Motivation: Obwohl ein weites Feld von menschlichen Aktivitäten Treibhausgase verursacht, bleibt der Energiesektor der weitaus größte Beitrag. Einige Leute begründen ihr Nichtstun mit Entschuldigungen wie „Das Methan furzender Kühe erzeugt mehr Erwärmung als der Luftverkehr.“ Richtig, landwirtschaftliche Nebenprodukte betragen 2000 etwa ein Achtel der gesamten Treibhausgas-Emission. Doch der Energiesektor trug drei Viertel bei. (Fig.1.9) Das Klimaproblem ist und bleibt grundsätzlich ein Energieproblem.

Warnungen an den Leser

OK, genug zum Klimawandel. Ich werde annehmen, wir seien ausreichend motiviert, fossile Brennstoffe loszuwerden. Was auch immer Ihre Motivation sein mag, Ziel dieses Buches ist, Ihnen behilflich zu sein, die richtigen Zahlen herauszufinden und die nötigen Berechnungen damit anzustellen, um eine politische Strategie zu entwickeln; es soll ein Grundgerüst von Fakten liefern, an Hand dessen Sie abschätzen können, welche Vorschläge wirklich zielführend sind. Ich behaupte nicht, dass die Zahlen oder die Arithmetik in diesem Buch neu seien, die oben erwähnten Bücher von Goodstein, Lomborg und Lovelock zum Beispiel sind voll von interessanten Zahlen und Überschlagsrechnungen, und es gibt viele interessante Quellen im Internet (vgl. Literaturhinweise).

Was ich in diesem Buch versuche, ist, diese Zahlen einfach und einprägsam zu machen; Ihnen zu zeigen, wie Sie selbst relevante Zahlen herausfinden können und die Situation so klar darzustellen, dass jeder denkende Leser in der Lage ist, seine eigenen Schlüsse zu ziehen. Ich will Ihnen nicht meine eigenen Schlussfolgerungen aufdrängen. Überzeugungen sind stärker, wenn sie aus einem selber kommen, anstatt beigebracht worden zu sein. Verstehen ist ein kreativer Prozess. Wenn Sie dieses Buch gelesen haben, wird, so hoffe ich, Ihr Vertrauen gestärkt sein, alles Weitere durch eigenes Nachdenken herausfinden zu können.

Ich möchte betonen, dass die Berechnungen, die wir anstellen werden, beliebig ungenau sind. Vereinfachung ist der Schlüssel zum Verständnis. Zum ersten werden wir die Zahlen runden, damit sie leichter zu merken sind. Zum zweiten erlauben gerundete Zahlen schnelle Berechnungen. Für die Belange dieses Buches ist etwa die Bevölkerung Englands 60 Millionen, die Weltbevölkerung 6 Milliarden. Ich kann natürlich viel genauere Angaben finden, doch würde diese Genauigkeit den Gedankenfluss eher stören. Wenn wir beispielsweise erfahren, dass die weltweite Treibhausgas-Emission im Jahr 2000 jährlich 34 Milliarden Tonnen CO₂-Äquivalent betrug, können wir sofort und ohne Taschenrechner ableiten, dass die durchschnittliche Emission pro Person 5 oder 6 Tonnen CO₂-Äquivalent (pro Person und Jahr) betrug. Dieser grobe Wert ist nicht exakt, aber exakt genug, um interessante Diskussionen zu beflügeln. Wenn Sie dann noch erfahren, dass ein interkontinentaler Hin- und Rückflug fast zwei Tonnen CO₂ pro Passagier emittiert, dann hilft dieser Wert (5-komma-nochwas Tonnen pro Person und Jahr) Ihnen bei der Abschätzung, dass ein einziger solcher Flug jährlich über einem Drittel der mittleren CO₂-Emission einer Durchschnittsperson entspricht. Ich bevorzuge es, meine Berechnungen auf alltägliches Wissen zu stützen anstatt auf unpersönliche landesweite Statistiken. Wenn ich zum Beispiel die typische Windgeschwindigkeit in Cambridge abschätzen will, frage ich: „ist meine Geschwindigkeit als Fahrradfahrer gewöhnlich schneller als der Wind?“ und die Antwort ist ja. So kann ich ableiten, dass die Windgeschwindigkeit in Cambridge selten höher ist als meine übliche Fahrradgeschwindigkeit von 20 km/h. Ich untermauere diese Alltagsabschätzungen mit Berechnungen anderer Leute und mit offiziellen Statistiken (siehe dazu die Literaturhinweise). Dieses Buch ist nicht als Nachschlagewerk für supergenaue Zahlenwerte ausgelegt. Stattdessen will es illustrieren, wie man Näherungswerte als Teil einer konstruktiven und für alle nachvollziehbaren Diskussion verwenden kann. Bei den Berechnungen benutze ich als

Bezugsbasis hauptsächlich England, gelegentlich Europa, Amerika oder die gesamte Welt, aber Sie sollten leicht in der Lage sein, die Berechnung für jedes Land oder jede Region Ihres Interesses zu wiederholen.

Lassen Sie mich dieses Kapitel mit einigen weiteren Warnungen an den Leser beschließen. Nicht nur, dass ich die Unart habe, Zahlen zu approximieren, ich vernachlässige zudem noch alle Arten von Details, um die sich Investoren, Manager und Ökonomen ernstlich Gedanken machen müssen, diese Armen! Wenn Sie versuchen, eine erneuerbare Energiequelle zu etablieren, machen oft schlappe 5% Kostenmehrung den Unterschied zwischen Erfolg und Misserfolg, daher muss im geschäftlichen Bereich jedes Detail Beachtung finden. Doch 5% ist zu klein für das Radar dieses Buches. Dies ist ein Buch über Abschätzungen, zutreffend vielleicht auf einen Faktor 2, manchmal auch nur Faktor 10. Es geht um physikalische Grenzen nachhaltiger Energiegewinnung, nicht um aktuelle ökonomische Machbarkeit. Die Ökonomie ist immer Schwankungen unterworfen, doch die fundamentalen Beschränkungen werden nie verschwinden. Diese Beschränkungen müssen wir verstehen.

Debatten über Energiepolitik sind oftmals verwirrend und emotional, weil die Leute faktische Aussagen mit ethischen Aussagen vermischen.

Beispiele faktischer Aussagen sind „globale Verbrennung fossiler Brennstoffe emittiert 34 Milliarden Tonnen CO₂-Äquivalent pro Jahr“ und „wenn die CO₂-Konzentration verdoppelt wird, führt das zu einer Erwärmung um 1,5° - 5,8° innerhalb der nächsten 100 Jahre“, „ein Temperaturanstieg von 2° würde das Grönland-Eis innerhalb von 500 Jahren abschmelzen lassen“ und „Das komplette Abschmelzen des Grönland-Eises würde eine Erhöhung des Meeresspiegels um rund 7 Meter bewirken“.

Eine faktische Aussage ist entweder wahr oder falsch; herauszufinden, was davon zutrifft, ist oft schwierig, es ist eine wissenschaftliche Frage. Die Beispiele im letzten Absatz sind entweder wahr oder falsch. Wir wissen nicht, ob alle wahr sind. Einige davon werden gegenwärtig als „sehr wahrscheinlich“ eingestuft. Die Schwierigkeit, zu entscheiden, welche faktischen Aussagen wahr sind, führt zu Debatten in der Wissenschaft. Sind genügend wissenschaftliche Experimente und Diskussionen durchgeführt, kann die Wahrheit oder Falschheit der meisten faktischen Aussagen im Einzelfall herausgefunden werden, wenigstens „über jeden vernünftigen Zweifel erhaben“.

Beispiele ethischer Aussagen sind „Es ist falsch, globale Ressourcen in einer Art und Weise auszubeuten, die zukünftigen Generationen erhebliche Kosten beschert“ und „Verschmutzung sollte nicht kostenlos sein“, „wir sollten Schritte einleiten, die eine weitere Verdopplung der CO₂-Konzentrationen unwahrscheinlich machen“ und „Politiker sollten die CO₂-Emissionen deckeln“, „Die Länder mit dem – über die letzten hundert Jahre gerechnet – höchsten CO₂-Ausstoß haben die Verpflichtung, bei Maßnahmen gegen den Klimawandel Vorreiterrollen zu übernehmen“ und „es ist gerecht, CO₂ Emissionsrechte gleichmäßig über die gesamte Weltbevölkerung zu verteilen.“ Solche Aussagen sind weder wahr noch falsch. Ob wir solchen Aussagen zustimmen, hängt von unserer ethischen Beurteilung ab, es steht uns frei. Ethische Aussagen mögen teils unvereinbar mit anderen sein; Beispiel: Tony Blairs Regierung erklärte eine radikale CO₂-Politik: „England soll bis 2050 den CO₂-Ausstoß um 60 % reduzieren“; gleichzeitig drängte Gordon Brown, Kanzler in derselben Regierung, wiederholt die ölproduzierenden Länder, ihre Fördermengen zu erhöhen.

Dieses Buch handelt, ich sage das nochmals nachdrücklich, von Fakten, nicht von Ethik. Ich will die Fakten klar darstellen, damit die Leute eine inhaltliche Debatte über ethische Entscheidungen führen können. Ich will, dass jeder begreift, wie die Fakten die

Optionen begrenzen, die uns hierbei offen stehen. Wie jeder gute Wissenschaftler werde ich versuchen, meine Ansichten über ethische Fragen auszublenden, und wenn doch gelegentlich etwas davon durchkommt – bitte ich um Nachsicht.

Ob es gerecht ist, wenn Europa und Amerika den Energiekuchen an sich reißen, ist eine ethische Frage; meine Aufgabe ist es, daran zu erinnern, dass man den Kuchen nicht behalten und gleichzeitig essen kann; meine Aufgabe ist es, Ihnen dabei zu helfen, unsinnige und ineffektive politische Vorschläge auszuzusondern und zu verwerfen; meine Aufgabe ist es, Ihnen zu helfen, eine Energiepolitik zu finden, die zu Ihren persönlichen Wertevorstellungen passt.

Wir brauchen einen Plan, der das alles zusammenbringt, einen Plan, der aufgeht.

Anmerkungen und Literaturhinweise

Hier am Ende des Kapitels sammle ich zusätzliche Details von Ideen aus dem Text, Quellenangaben zu Daten und Zitaten, und Hinweise für weiterführende Informationen.

Seite

- 2 „... führt kein Weg an den Erneuerbaren vorbei“ „Jeder, der sich auf Erneuerbare verlässt, um die Energielücke zu schließen, lebt in einer ausgesprochenen Traumwelt und ist in meinen Augen ein Feind des Volkes.“ Die Zitate sind aus *Any Questions?*, 27.1.2006, BBC Radio 4 [ydoobr]. Michael Meacher war UK Umweltminister von 1997 – 2003. Sir Bernhard Ingham war Berater von Premierministerin Margaret Thatcher, Vorsitzender des Government Information Service. Er ist *Secretary of Supporters of Nuclear Energy*.
- 2 **Jonathon Porritt** (March 2006). *Is nuclear the answer?* Section 3. Advice to Ministers. www.sd-commission.org.uk
- 3 „Atomkraft ist eine Goldgrube“ oder „Wir haben große Mengen an Wellen und Wind“ „Nuclear is a money pit“, „We have a huge amount of wave and wind.“ Ann Leslie, Journalistin, in einem Bericht über *Any Questions?*, Radio 4, 10. Februar 2006.
- 3 „Die Einwohner von Los Angeles fahren täglich ... von der Erde zum Mars“ – (The Earthworks Group, 1989, Seite 34).
- 3 targetneutral.com verlangt £4 pro Tonne CO₂ für deren Neutralisation. (Eine signifikant kleinere Zahl als alle anderen „Absolutions“-Unternehmen, die ich kenne.) Zu diesem Preis könnte der Durchschnittsbrite seine 11 Tonnen jährlich durch Zahlung von 44€ neutralisieren! Ein Hinweis darauf, dass BP's Neutralisation nicht aufgeht, ist die Tatsache, dass das Projekt nicht nach dem Gold Standard www.cdmgoldstandard.org (Michael Schlup, persönliche Mitteilung) zertifiziert wurde. Viele CO₂-Absolutionsprojekte wurden von Fiona Harvey in der *Financial Times* [2jhve6] als wertlos eingestuft.



„Schau – da ist der Low Carbon Emission Man!“

Fig.1.10: abgedruckt mit freundlicher Genehmigung von PRIVATE EYE / Paul Lowe www.private-eye.co.uk

- 3 „Off-shore Windparks können die gesamten Haushalte Englands mit Strom versorgen“, Ende 2007 erklärte die britische Regierung, sie würde den Bau von Windturbinen genehmigen “enough to power all UK homes.” Nick Rau von der Kampagne “Friends of the Earth’s” begrüßte diese Aussage. “Die mögliche Leistung die durch diese Industrie erzeugt werden kann ist gigantisch“ sagte er [25e59w]. “The Guardian” [5o7mxk]: John Sauven, der Executive Director von Greenpeace, sagte, diese Pläne würde eine “Windenergie-Revolution” einläuten, und die Labour-Partei müsse nun von ihrer Vorliebe für Atomkraft Abschied nehmen, denn diese „could only ever reduce emissions by about 4% at some time in the distant future.“ Nick Rau meinte: “We are delighted the government is getting serious about the potential for offshore wind, which could generate 25% of the UK’s electricity by 2020.” Einige Wochen später gab die Regierung bekannt, dass sie den Neubau von AKWs genehmigt hätte. “Today’s decision to give the go-ahead to a new generation of nuclear power stations...will do little to tackle climate change,” warnten nun die “Friends of the Earth” [5c4olc]. Tatsächlich lagen beide geplanten Kapazitätserweiterungen – Wind und Nuklear – bei derselben Gesamtleistung pro Jahr. Die gesamte genehmigte off-shore Windleistung von 33GW (Peak) hätte an die 10GW pro Jahr produziert (4 kWh/d/p); und der Ersatz der alten Reaktoren hätte 10GW pro Jahr produziert (4 kWh/d/p). Im selben Atemzug erklärten Kernkraftgegner das die Kernkraft-Option „wenig beitrage“, wogegen die Windkraft-Option „alle Haushalte versorgen könne“. In der Tat ist „alle Haushalte versorgen“ und „Emissionsreduktion um 4%“ das gleiche.



“Okay – wir sind uns einig; wir geben bekannt ‚Nichts zu tun ist keine Lösung‘ und warten ab, wie sich die Dinge entwickeln ...“

Fig.1.11: abgedruckt mit freundlicher Genehmigung von PRIVATE EYE / Paul Lowe
www.private-eye.co.uk

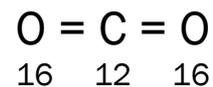
- 4 das „wasser-betriebene Auto“ *New Scientist*, 29th July 2006, p. 35. Dieser Artikel mit der Überschrift “Water-powered car might be available by 2009,” eröffnete: “Forget cars fuelled by alcohol and vegetable oil. Before long, you might be able to run your car with nothing more than water in its fuel tank. It would be the ultimate zero-emissions vehicle. While water is not at first sight an obvious power source, it has a key virtue: it is an abundant source of hydrogen, the element widely touted as the green fuel of the future.” Das Projekt, das der *New Scientist* beschrieb war keinesfalls lächerlich – es ging der Tat um ein Auto mit Bor als Treibstoff, mit einer Bor/Wasser Reaktion als einen der ersten chemischen Schritte. Warum nur fühlte sich der *New Scientist* genötigt, das in den plakativen Aufhänger „Wasser ist Treibstoff“ umzudrehen? Wasser ist kein Treibstoff. War es nie und wird es nie sein. Es ist bereits verbrannt! Das erste Gesetz der Thermodynamik sagt, das man keine Energie aus dem Nichts erschaffen kann; man kann nur Energie von einer Form in

eine andere verwandeln. Die Energie in jeder Maschine muss irgendwo her kommen. Fox News verkaufte eine noch absurdere Story [2fztd3].

- 4 **Klimawandel „eine größere Bedrohung als der Terrorismus“** – Climate change is a far greater threat to the world than international terrorism. Sir David King, Chief Scientific Advisor der UK Regierung,, Januar 2004. [26e8z] - „**Glorifizierung des Reisens**“ – the glorification of travel – ein Hinweis auf den Angriff gegen “glorification” im UK Terrorism Act, vom 13 April, 2006. [ykhayj]
- 5 **Fig. 1.2.** shows production of crude oil including lease condensate, natural gas plant liquids, and other liquids, and refinery processing gain. Quelle: EIA, and BP statistical review of world energy.
- 7 **die erste funktionierende Dampfmaschine.** Tatsächlich beschrieb bereits Hero von Alexandrien eine Dampfmaschine, doch da in den darauffolgenden 1600 Jahren niemand diese Maschine baute, halte ich Savery’s Erfindung von 1698 für die erste machbare Dampfmaschine.
- 6– **Fig. 1.4 und 1.7: Graph der Kohlendioxid-Konzentration.** Daten zusammengetragen von Keeling and Whorf (2005) (Messungen für 1958–2004); Neftel et al. (1994) (1734–1983); Etheridge et al. (1998) (1000–1978); Siegenthaler et al. (2005) (950–1888 AD) und Indermuhle et al. (1999) (from 11 000 to 450 years before present). Der Graf sollte nicht verwechselt werden mit dem “Hockeyschläger-Graphen” der globalen Temperatur. Dem aufmerksamen Leser wir nicht entgangen sein, dass das angeführte Klimawechsel-Argument die historischen Temperaturen nicht verwendet.

Figures 1.5–1.7: Kohleproduktion, Werte von Jevons (1866), Malanima (2006), Netherlands Environmental Assessment Agency (2006), National Bureau of Economic Research (2001), Hatcher (1993), Flinn and Stoker (1984), Church et al. (1986), Supple (1987), Ashworth and Pegg (1986). Jevons war der erste “Peak Oil” Autor. Im Jahr 1865 schätzte er Englands leicht-abzubauende Kohlereserven ab, warf einen Blick auf die Geschichte exponentiellen Wachstums und sagte das Ende des exponentiellen Wachstums und der britischen Führerschaft in der Weltwirtschaft voraus: “We cannot long maintain our present rate of increase of consumption. ...the check to our progress must become perceptible within a century from the present time. ...the conclusion is inevitable, that our present happy progressive condition is a thing of limited duration.” Jevons hatte Recht. Innerhalb eines Jahrhunderts erreichte die britische Kohleproduktion ihren Höhepunkt, und es gab zwei Weltkriege

- 10 **Dominic Lawson,** Mein Zitat bezieht sich auf Dominic Lawson’s Kolumne im *Independent*, 8 June, 2007. Es ist kein wörtliches Zitat. Ich habe die Worte verkürzt und dabei genau darauf geachtet, keinen der Fehler zu korrigieren. Alle drei Zahlen, die er verwendet, sind falsch. Im einzelnen:
Erstens sagt er CO₂, nennt aber Werte für Kohlenstoff: Verbrennen fossiler Brennstoffe bläst 26 Gigatonnen CO₂ in die Atmosphäre (nicht 7 Gigatonnen), ein verbreiteter Fehler. Zweitens behauptet er, die Ozeane würden 36.000 Gigatonnen Kohlenstoff jährlich in die Atmosphäre abgeben. Das ist ein viel schwerwiegender Fehler: 36.000 Gigatonnen ist die Gesamtmenge von Kohlenstoff im Ozean! Der jährliche Strom ist viel kleiner: etwa



Die Gewichte von Kohlenstoff und CO₂ stehen im Verhältnis 12 zu 44, da das Kohlenstoffatom 12 atomare Einheiten und die Sauerstoffatome je 16 atomare Einheiten wiegen. 12 + 16 + 16 = 44.

90 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr ($330 \text{ GtCO}_2/\text{y}$), nach den Standarddiagrammen des Kohlenstoffzyklus [16y5g] (Ich glaube, dass diese 90 GtC/y die theoretische Flussrate sind, wenn man die CO_2 -Konzentration der Atmosphäre auf Null setzt) In gleicher Weise sind seine "1900 Gigatonnen" Strom von der Biosphäre in die Atmosphäre falsch. Der richtige Wert nach den Standard-Diagrammen liegt bei etwa 120 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr ($440 \text{ GtCO}_2/\text{y}$). Zufällig liegt der beobachtete Anstieg der CO_2 -Konzentration etwa da, wo man ihn erwartet, wenn man annimmt, dass menschliche Emissionen von CO_2 in der Atmosphäre verbleiben. Von 1715 bis 2004 sind etwa 1160 GtCO_2 durch fossile Verbrennung und Zementproduktion in die Atmosphäre freigesetzt worden (Marland et al., 2007). Würde all dieses CO_2 in der Atmosphäre verbleiben, wäre ein Anstieg von 160 ppm (von 280 auf 440 ppm) erwartet. Der aktuell gemessene Anstieg liegt bei etwa 100 ppm (von 275 auf 377 ppm). Also ist etwa 60% dessen, was emittiert wurde, jetzt in der Atmosphäre, 40% wurde im natürlichen Kreislauf abgebaut.

- 11 **CO_2 hat also einen wärmenden Effekt.** Die über-emotionalisierte Debatte darüber ist etwas ermüdend, oder? „Die Wissenschaft hat sich festgelegt“ „Nein, hat sie nicht“ „Doch, hat sie!“ Wer aus diesem Hin-und-Her ausbrechen will, dem empfehle ich einen kurzen Report von Charney et al. (1979). Die Ergebnisse dieses Reports sind gewichtig, weil die National Academy of Sciences (das US-Äquivalent der Royal Society) den Report in Auftrag gab und die Autoren nach Expertise auswählte und „unter Berücksichtigung angemessener Ausgewogenheit“. Die Expertengruppe wurde unter der Schirmherrschaft des Climate Research Board of the National Research Council gebildet, um eine wissenschaftlichen Basis zur Projektion zukünftiger durch menschlichen CO_2 -Ausstoß in die Atmosphäre bedingter Klima-veränderungen zu schaffen. Sie wurden insbesondere gebeten, „die prinzipiellen Prämissen unseres derzeitigen Verständnisses dieser Fragestellung zu identifizieren“, „die Angemessenheit und die Unsicherheit unseres Wissens über diese Faktoren und Prozesse quantitativ zu bestimmen“ und „in klaren und objektiven Aussagen unser bestes derzeitiges Verständnis des Kohlendioxid / Klima Problems zusammenzufassen, so dass es für Politiker hilfreich ist.“ Der Report umfasst nur 33 Seiten, er ist frei downloadbar [5qfkaw], und ich kann ihn nur empfehlen. Er zeigt klar, welche Teile der Wissenschaft bereits 1979 festgelegt waren, und wo noch Unsicherheit bestand. Das sind die Hauptpunkte, die ich diesem Bericht entnommen habe: Erstens: Verdopplung des atmosphärischen CO_2 würde die Nettoerwärmung der Troposphäre, der Ozeane und der Landmassen um eine mittlere Leistung von 4 W/m^2 erhöhen, wenn alle weiteren Eigenschaften der Atmosphäre unverändert bleiben. Dieser Heizeffekt kann mit der mittleren Leistung verglichen werden, die Atmosphäre, Land und Ozeane absorbieren, das sind 238 W/m^2 . Verdopplung des CO_2 ist also äquivalent zu einer Erhöhung der Sonnenintensität um $4/238 = 1,7\%$. Zweitens: Die Konsequenzen dieser CO_2 -induzierten Aufheizung sind wegen der Komplexität des Atmosphäre-Ozean-Systems schwer vorhersagbar, doch vermuten die Autoren eine globale Oberflächenerwärmung zwischen 2°C und $3,5^\circ\text{C}$, mit größeren Anstiegen bei höheren Breitengraden. Am Schluss fassen die Autoren zusammen: „Wir haben es versucht, doch wir sind nicht in der Lage, irgendwelche übersehenen oder unterschätzten physikalischen Effekte auszumachen, die die aktuell abgeschätzte globale Erwärmung bei Verdopplung des atmosphärischen CO_2 auf vernachlässigbare Proportionen reduzieren oder sie insgesamt umkehren könnte.“ Dank der Ozeane, „dem großen und gewichtigen Schwungrad des globalen Klimasystems“, könnte die Erwärmung so schleppend einsetzen, dass sie in den nächsten Jahrzehnten schwierig festzustellen sein wird. Dennoch wird „die Erwärmung schließlich auftreten und die

regionalen Klimaveränderungen könnten durchaus signifikant sein“. Das Vorwort des Vorsitzenden des Climate Research Board, Verner E. Suomi, fasst die Folgerungen in einer famosen Kaskade doppelter Verneinungen zusammen: “Wenn Kohlendioxid weiterhin ansteigt, findet die Forschungsgruppe keinen Grund zu bezweifeln, dass dies zu Klimaveränderungen führt und keinen Grund zu glauben, dass diese vernachlässigbar sein werden.”

- 11 die ganze Litanei möglicher drastischer Effekte herunterbeten, Sie haben sicher davon bereits vieles gehört. Falls nicht, vgl. [2z2xg7] .
- 13 **Abbildungen zur Aufschlüsselung der Treibhausgasemissionen nach Regionen und Ländern** Daten von: Climate Analysis Indicators Tool (CAIT) Version 4.0. Washington, DC:World Resources Institute, 2007). Die ersten drei Diagramme zeigen landesweite Summen der sechs wesentlichen Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, PFC, HFC, SF₆), ohne Beiträge aus Flächenverbrauch und Fortwirtschaft. Die Abbildung auf **Seite 14** zeigt nur kumulative Emissionen von CO₂.
- 14 **Gratuliere, England!** Eine aufrichtige Entschuldigung an dieser Stelle an Luxemburg, dessen historische pro-Kopf-Emissionen tatsächlich die von Amerika und England übersteigen, doch fand ich, das Siegertreppchen sollte nur solchen Ländern zugänglich sein, die große pro-Kopf und zugleich große Gesamtemissionen haben. Nach Gesamtemission – historisch – führt USA (322 Gt CO₂), gefolgt (in dieser Reihenfolge) von Russland (90 Gt CO₂), China (89 Gt CO₂), Deutschland (78 Gt CO₂), England (62 Gt CO₂), Japan (43 Gt CO₂), Frankreich (30 Gt CO₂), Indien (25 Gt CO₂) und Kanada (24 Gt CO₂). Die Pro-Kopf-Reihenfolge ist: Luxemburg, USA, England, Tschechien, Belgien, Deutschland, Estland, Qatar und Kanada.
- 14 **eine mindestens 60%ige Reduktion der Treibhausgase bis 2050 zugesichert.** Während der Erstellung dieses Buches wurde Englands Zusage auf 80% Reduktion relativ zum Wert von 1990 erhöht.
- 15 **Fig.1.8.** Im unteren Szenario liegt das Risiko einer Erwärmung um mehr als 2 °C bei geschätzten 9–26%; die kumulative Kohlenstoffemission von 2007 an ist 309 GtC; CO₂-Konzentrationen erreichen ein Maximum von 410 ppm, CO₂e-Konzentrationen bei 421 ppm und im Jahr 2100 fallen die CO₂-Konzentrationen zurück auf 355 ppm. Im oberen Szenario liegt das Risiko einer Erwärmung um mehr als 2 °C bei 16–43%; die kumulativen Kohlenstoffemissionen ab 2007 sind 415 GtC; CO₂-Konzentrationen erreichen ein Maximum von 425 ppm, CO₂e-Konzentrationen von 435 ppm, und im Jahr 2100 fallen die CO₂-Konzentrationen zurück auf 380 ppm. Siehe auch hdr.undp.org/en/reports/global/hdr2007-2008/.
- 16 **interessante Quellen im Internet** Beispielsweise: BP's *Statistical Review of WorldEnergy* [yyxq2m], the Sustainable Development Commission www.sd-commission.org.uk, the Danish Wind Industry Association www.windpower.org, Environmentalists For Nuclear Energy www.ecolo.org, Wind Energy Department, Risø University www.risoe.dk/vea, DEFRA www.defra.gov.uk/environment/statistics, speziell das Buch *Avoiding Dangerous Climate Change* [dzcq], das Pembina Institute www.pembina.org/publications.asp, und das DTI (jetzt bekannt als BERR) www.dti.gov.uk/publications/.
- 17 **faktische Aussagen mit ethischen Aussagen vermischen.** . . . Ethische Aussagen heißen auch „Normative Aussagen“ oder “Werturteile”, und faktische Aussagen auch “Positive Aussagen”. Ethische aussagen enthalten üblicherweise Verben wie „sollen“ oder “müssen” und Adjektive wie „gerecht“, „richtig“ oder „falsch“. Hilfreiches Material bietet dazu Dessler and Parson (2006).

- 17 **Gordon Brown.** Am 10. September 2005 sagte Gordon Brown, der hohe Ölpreis berge ein signifikantes Risiko für die europäische Wirtschaft und das globale Wachstum und drängte die OPEC, die Fördermengen zu erhöhen. Sechs Monate später sagte er “we need . . .more production, more drilling, more investment, more petrochemical investment” (22. April 2006) [y98ys5]. Lassen Sie mich die Kritik an Gordon Brown relativieren und eine seiner jüngeren Aktivitäten lobend erwähnen, nämlich die Förderung von Elektroautos und Hybridfahrzeugen. Wie Sie später sehen werden, ist eine der Folgerungen dieses Buches, dass die Elektrifizierung weiter Teile des Transportwesens ein guter Plan ist, fossile Brennstoffe loszuwerden.

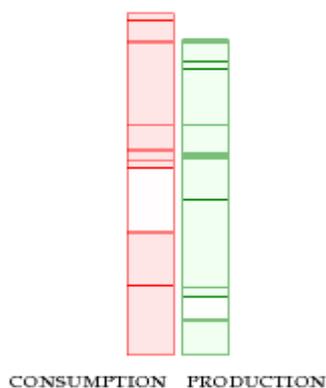
2. Die Bilanz

Nature cannot be fooled.

Richard Feynman

Lassen Sie uns über Energieverbrauch und Energieproduktion reden. Momentan wird die meiste Energie, die in der industrialisierten Welt verbraucht wird, von fossilen Brennstoffen geliefert. Das ist nicht nachhaltig⁸. Wie lange genau wir auf Kosten fossiler Brennstoffe noch leben können, ist eine interessante Frage, doch ist das nicht die Frage, der wir in diesem Buch nachgehen wollen. Ich denke lieber über ein Leben ohne fossile Brennstoffe nach.

Dazu machen wir zwei Stapel. Links auf dem roten Stapel zählen wir all unseren Energieverbrauch zusammen, rechts auf dem grünen Stapel all unsere nachhaltige Energieproduktion. Wir bauen beide Stapel nach und nach auf und diskutieren dabei jeden Beitrag einzeln.



Die Frage, der in diesem Buch nachgegangen werden soll, ist die: „Ist es *theoretisch denkbar*, dass wir nachhaltig leben?“ Also zählen wir rechts alle *denkbaren* nachhaltigen Energiequellen, auf dem grünen Stapel. Im linken, roten Stapel schätzen wir den

⁸ Der Begriff „nachhaltig“ wird hier wie im Folgenden in seiner engeren Bedeutung als Synonym für „immerwährend“ „unerschöpflich“ „aufrechterhaltbar“ verwendet. Er ersetzt den auch im Buchtitel des Originals benutzten englischen Ausdruck „sustainable“, der mit dem Verb „sustain“ = aufrechterhalten verwandt ist. In der englischsprachlichen Literatur wird „sustainable energy“ oft synonym mit „regenerative energy“ gebraucht, in vielen technischen Aspekten ist auch kein Unterschied vorhanden, weil regenerative Energie natürlich auch nachhaltig in diesem Sinne – für ewig aufrechtzuerhalten, unerschöpflich – ist. Dennoch wird hier und da ein Bedeutungs- oder Schwerpunktsunterschied sichtbar: Bei der Nachhaltigkeit geht es im Gegensatz zum Regenerativ-Konzept nicht vorrangig um ein Kreislauf-Denken, sondern um eine Zeitspanne, in der sich „Abnutzungseffekte“ bemerkbar machen. Gezeitenkraft (vgl. Kap. 14) oder Geothermie (vgl. Kap. 16) beispielsweise sind physikalisch betrachtet nicht regenerativ im engeren Sinn, weil die entzogene Energie dem System nicht mehr zurückfließt; sie sind dennoch nachhaltig, weil die Halbwertszeiten der so angezapften Ressourcen (Wärmeenergie des Erdkerns, Rotationsenergie der Erde) riesig im Vergleich mit den Planungshorizonten (mehrere hundert Jahre) sind. Fossile Brennstoffe sind zwar in einem sehr engen Sinn auch regenerativ (auf Zeitskalen von vielen Millionen Jahren werden sich wieder und wieder neue Lagerstätten bilden), wenn man sie aber nachhaltig ausbeutet (also lediglich mit der Entzugsrate, die der Neubildung entspricht) liefern sie keinen nennenswerten Beitrag zur Energieversorgung mehr.

Vgl. hierzu auch folgende Definition in Wikipedia [de.wikipedia.org]: „Das Konzept der *Nachhaltigkeit* beschreibt die Nutzung eines regenerierbaren Systems in einer Weise, dass dieses System in seinen wesentlichen Eigenschaften erhalten bleibt und sein Bestand auf natürliche Weise nachwachsen kann.“

Verbrauch eines „typischen einigermaßen wohlhabenden Menschen“ ab; ich bitte Sie zudem, Ihren eigenen Gesamtverbrauch abzuschätzen und so Ihren *persönlichen* linken Stapel zu erzeugen. Später werden wir auch den derzeitigen *mittleren* Energieverbrauch eines Europäers und eines Amerikaners herausfinden.

Einige der wesentlichen Formen des Verbrauchs für den linken Stapel sind:

- Transport
 - Autos, Flugzeuge, Fracht
- Heizung und Kühlung
- Beleuchtung
- Informationssysteme und andere Apparate
- Nahrungsmittel
- Fertigung

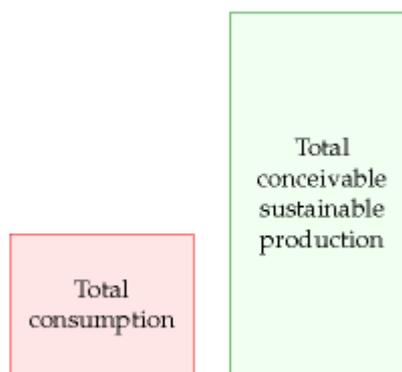
Im rechten Stapel nachhaltiger Produktion werden unsere Hauptkategorien sein:

- Wind
- Solar
 - Photovoltaik, Thermie, Biomasse
- Wasserkraft
- Wellen
- Gezeiten
- Geothermie
- Kernkraft ? (mit Fragezeichen, da nicht klar ist, ob AKWs als „nachhaltig“ gelten können)

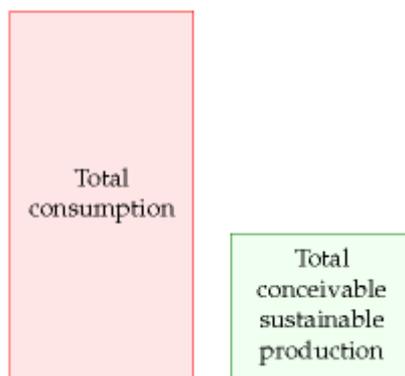
Indem wir unseren Energieverbrauch für Heizung, Transport, Fertigung und so weiter bestimmen, wollen wir nicht nur eine Zahl für den linken Stapel unserer Bilanz errechnen, sondern zudem verstehen, wovon jeder Wert abhängt und wie empfänglich er für Veränderungen wäre.

Im rechten, grünen Stapel addieren wir Schätzungen nachhaltiger Produktion für England. Das erlaubt uns eine Antwort auf die Frage: „Kann England theoretisch von seinen eigenen Erneuerbaren leben?“

Ob die nachhaltigen Energiequellen, die wir auf den rechten Stapel legen, aus ökonomischer Sicht machbar sind, ist eine wichtige Frage, die wir jedoch fürs erste beiseite lassen wollen. Lassen Sie uns zuerst die beiden Stapel aufbauen. Denn manchmal versteifen sich Leute zu sehr auf die ökonomische Machbarkeit und verlieren den Blick für das Große und Ganze. Zum Beispiel diskutieren Leute „Ist Windenergie billiger als Atomkraft?“ und vergessen zu fragen: „Wie viel Wind ist überhaupt verfügbar?“ oder „Wie viel Uran gibt es noch?“. Das Ergebnis unserer Addition könnte so aussehen:



Wenn wir herausfinden, dass der Verbrauch weitaus geringer ist als die theoretisch mögliche nachhaltige Produktion, dann können wir sagen: „Gut, wir können vielleicht nachhaltig leben; wollen wir doch einen Blick auf die Kosten werfen, die diese nachhaltigen Alternativen im ökonomischen, im sozialen und im Umweltbereich verursachen, und herausfinden, welche davon wie viel Forschung und Entwicklung benötigen; wenn wir das gut machen, dann könnte es sein, dass es keine Energiekrise gibt.“ Andererseits könnte unser Ergebnis auch so aussehen:



— ein sehr viel trüberes Bild. Dieses Bild sagt nämlich „Egal wie die Ökonomie nachhaltiger Energiegewinnung aussieht: es ist einfach nicht genug, um unseren gegenwärtigen Lebensstil zu erhalten, massive Änderungen sind unausweichlich“.

Leistung und Energie

Die meisten Diskussionen um Energieverbrauch und -produktion verwirren schon allein wegen ihrer ausufernden Vielfalt von Einheiten, in denen Leistung und Energie gemessen werden, von „Tonnen Rohöläquivalent“ bis „Terawattstunden“ (TWh) und Exajoule (EJ). Niemand außer den Spezialisten hat ein Gefühl dafür, was „ein Barrel Öl“ oder „Eine Million BTUs“ in menschlichen Begriffen bedeuten. In diesem Buch werden wir alles in einem einheitlichen Set personalisierter Einheiten beschreiben, unter denen sich jeder etwas vorstellen kann.



Fig.2.1: Unterscheidung von Energie und Leistung: Jede dieser 60 Watt-Lampen hat 60 Watt Leistung, wenn sie an ist; sie hat nicht eine „Energie“ von 60 W. Sie benutzt 60 W elektrischer Leistung und emittiert 60 W Leistung in Form von Licht und Wärme (hauptsächlich letzteres).

Als Maßeinheit für die Energie wähle ich die Kilowattstunde (kWh). Diese Größe ist „eine Einheit“ auf der Stromrechnung, und sie kostet einen Privatverbraucher etwa 10 Cent (2008). Wie wir sehen werden, erfordern die meisten täglichen Dinge Energiemengen einiger weniger kWh.

Wenn wir Leistung diskutieren (die Geschwindigkeit oder Rate der Energienutzung oder -produktion, ein Energiestrom sozusagen) wird die bevorzugte Maßeinheit die „Kilowattstunde pro Tag“ (kWh/d) sein. Gelegentlich benutzen wir auch das Watt ($40\text{ W} \approx 1\text{ kWh/d}$) und das Kilowatt ($1\text{ kW} = 1000\text{ W} = 24\text{ kWh/d}$), wie ich im folgenden noch erklären werde. Die Kilowattstunde pro Tag ist eine nette auf alltägliche Größenordnungen abgestimmte Einheit, die meisten energiefressenden Aktivitäten fressen in einer Geschwindigkeit, die einer kleinen Zahl von Kilowattstunden am Tag entspricht. Beispielsweise verbraucht eine 40W-Glühlampe, wenn sie permanent eingeschaltet ist,

eine Kilowattstunde pro Tag. Einige Energieversorger versenden mit ihren Rechnungen Grafiken, die den Energieverbrauch in Kilowattstunden pro Tag zeigen. Ich werde diese Einheit für alle Energieformen verwenden, nicht nur für Elektrizität. Ölverbrauch, Gasverbrauch, Kohleverbrauch: Ich werde all diese Leistungen / Energieströme in kWh/d messen. Lassen Sie mich eines klarstellen: Für manche Leute steht „Leistung“ ausschließlich für elektrische Energieströme. Doch dieses Buch handelt von allen Arten von Energieverbrauch und -produktion und für alle diese Arten benutze ich den Begriff „Leistung“.

Eine Kilowattstunde pro Tag ist etwa die Leistung, die man von einem menschlichen Sklaven erwarten kann. Die Anzahl kWh pro Tag, die man verbraucht, ist also die effektive Zahl von Sklaven, die man für sich arbeiten lässt.

Umgangssprachlich benutzen viele Leute die Begriffe Leistung und Energie synonym, doch in diesem Buch halte ich mich strikt an die wissenschaftlichen Definitionen. Leistung ist die Geschwindigkeit, mit der jemand oder etwas Energie benutzt oder liefert.

Vielleicht erklärt man Energie und Leistung am besten an Hand der Analogie zu Wasser und Wasserfluss aus einem Hahn. Wenn Sie Wasser trinken wollen, dann ein bestimmtes Volumen – einen Liter vielleicht (wenn Sie sehr durstig sind). Drehen Sie den Wasserhahn auf, erzeugen Sie einen Wasserfluss – ein Liter pro Minute, sagen wir, wenn der Hahn nur etwas tröpfelt, oder 10 Liter pro Minute bei einem größeren Hahn. Sie können dasselbe Volumen (einen Liter) abfüllen, wenn Sie den tröpfelnden Hahn eine Minute öffnen, oder den größeren für eine Zehntelminute. Das gelieferte Volumen in einer bestimmten Zeit ist gleich dem Fluss multipliziert mit der Zeit:

$$\text{Volumen} = \text{Fluss} \times \text{Zeit}.$$

Wir sagen dann, der Fluss ist die Geschwindigkeit oder die Rate, in der das Volumen geliefert wird. Kennt man das Volumen, das in einer gegebenen Zeit geliefert wird, kann man den Fluss errechnen, indem man das Volumen durch die Zeit dividiert:

$$\text{Fluss} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Zeit}}.$$

Und das ist die Verbindung zu Leistung und Energie: Energie ist wie das Volumen beim Wasser, Leistung entspricht dem Fluss. Wenn z.B. ein Toaster eingeschaltet wird, beginnt er Leistung aufzunehmen mit einer Rate von 1 Kilowatt. Er nimmt so lange ein Kilowatt auf, wie er eben eingeschaltet ist. Andersherum gesagt: ein permanent eingeschalteter Toaster verbraucht 1 Kilowattstunde (kWh) Energie pro Stunde, also 24 kWh pro Tag.

Je länger der Toaster an ist, um so mehr Energie verbraucht er auch. Den Energieverbrauch kann man sich ausrechnen, indem man die Leistung mit der Dauer multipliziert:

$$\text{Energie} = \text{Leistung} \times \text{Zeit}.$$

Die internationale Standardeinheit für die Energie ist das Joule, doch ist ein Joule leider viel zu klein, um damit vernünftig arbeiten zu können. Eine Kilowattstunde ist gleich 3,6 Millionen Joule (3,6 Megajoule).

Leistung ist so hilfreich und so wichtig, dass sie etwas hat, was dem Wasserfluss fehlt: eine eigene spezielle Einheit. Wenn wir über Fluss reden, messen wir ihn in „Liter pro Minute“ oder auch in „Gallonen pro Stunde“, „Kubikmeter pro Sekunde“. Bei solchen Einheiten ist es selbsterklärend, dass Fluss immer ein „Volumen pro Zeiteinheit“ bedeutet. Die Leistung (den Energiefluss) von einem Joule pro Sekunde nennt man ein Watt. 1000 Joule pro Sekunde heißen ein Kilowatt. Oder konkret in obigem Beispiel: Der

Toaster benötigt ein Kilowatt. Ich sage nicht ein Kilowatt pro Sekunde, den das „pro Sekunde“ ist bereits in die Definition des Watt eingebaut: Ein Kilowatt bedeutet gerade „ein Kilojoule pro Sekunde“. Analog sagt man „Ein AKW erzeugt ein Gigawatt.“ Ein Gigawatt ist übrigens eine Milliarde Watt, oder eine Million Kilowatt, oder 1000 Megawatt. Ein Gigawatt ist also eine Million Toaster. Und, weil wir gerade dabei sind: Gigawatt und Megawatt werden mit großem G bzw. M abgekürzt (GW, MW), Kilowatt mit kleinem k (kW).

Und, bitte, sagen Sie niemals „ein Kilowatt pro Sekunde“, „ein Kilowatt pro Stunde“ oder „ein Kilowatt pro Tag“, nichts davon ist eine sinnvolles Maß für eine Leistung. Der Drang, den viele Leute offensichtlich verspüren, „per irgendwas“ zu sagen wenn sie über ihren Toaster sprechen, ist einer der Gründe, weswegen ich mich entschloss, die „Kilowattstunde pro Tag“ als meine Maßeinheit zu verwenden. Ich bitte um Entschuldigung, dass dies manchmal etwas umständlich zu sagen und zu schreiben ist.

Noch eine letzte Bemerkung: Wenn ich sage, „jemand verbraucht eine Gigawattstunde Energie“ ist dadurch nur ausgesagt, wie viel Energie verbraucht wird, nicht wie schnell. Der Ausdruck Gigawattstunde impliziert nicht, dass die Energie in einer Stunde verbraucht worden wäre. Sie können eine Gigawattstunde verbrauchen, indem Sie eine Million Toaster eine Stunde lang einschalten, oder 1000 Toaster über 1000 Stunden.

Wie erwähnt rechne ich Leistungen im Allgemeinen in kWh/d pro Person. Ich mag diese personalisierte Einheitenwahl, weil sie es viel einfacher macht, von nationalen Verhältnissen z.B. in England auf die in anderen Ländern oder Regionen überzugehen. Stellen Sie sich vor, wir diskutieren Müllverbrennung und stellen fest: England erzeugt so 7 TWh pro Jahr, Dänemark 10 TWh pro Jahr. Hilft uns das herauszufinden, ob Dänemark oder England „mehr“ Müll verbrennt? Auch wenn die gesamte Energieproduktion aus Müllverbrennungsanlagen eines Landes interessant sein mag, gewöhnlich werden wir doch vorrangig an der Müllverbrennung pro Person interessiert sein. (Fürs Protokoll: Dänemark 5 kWh/d pro Person, England 0,3 kWh/d pro Person. Also verbrennen die Dänen 13 mal mehr Müll als die Briten). Um Tinte zu sparen, kürze ich manchmal „pro Person“ ab durch „/p“. Indem wir von vorneherein alles pro Person diskutieren, kommen wir zu viel leichter transportierbaren Aussagen, und das wird, hoffentlich, die weltweite Diskussion über Nachhaltigkeit nachhaltig beflügeln.

Spitzfindigkeiten

Ist Energie nicht eine Erhaltungsgröße? Wir reden davon, Energie zu benutzen, doch sagt nicht schon ein Naturgesetz, dass Energie weder erzeugt noch zerstört werden kann?

Ja richtig, da bin ich in der Tat unpräzise. In Wirklichkeit ist das ein Buch über Entropie – eine ziemlich trickreiche und ungleich schwerer erklärbare Sache. Wenn wir ein Kilojoule Energie „aufbrauchen“, verwandeln wir in Wirklichkeit ein Kilojoule Energie mit niedriger Entropie (Elektrizität etwa) in eine exakt gleiche Menge Energie mit höherer Entropie (etwa heiße Luft oder heißes Wasser). Wenn wir die Energie in diesem Sinne „benutzt“ haben, ist sie weiterhin vorhanden, nur können wir sie normalerweise nicht ein weiteres Mal benutzen, da nur nieder-entropische Energie „nützlich“ für uns ist. Manchmal unterscheidet man die verschiedenen Stufen der Energie durch eine Zusatz an den Einheiten: 1 kWh(e) ist eine Kilowattstunde elektrischer Energie, welche die höchste Stufe von Energie darstellt. 1 kWh(th) ist eine Kilowattstunde thermische Energie, beispielsweise die Energie in 10 Litern kochenden Wassers. Energie in heißeren Dingen ist nützlicher (besitzt weniger Entropie) als Energie in lauwarmen Dingen. Eine

dritte Stufe von Energie ist die chemische Energie. Chemische Energie steht ebenfalls auf hoher Stufe, ähnlich der elektrischen Energie.

Es ist eine zwar nachlässige aber bequeme Verkürzung, von Energie statt von Entropie zu reden, und wir werden davon ausgiebig Gebrauch machen in diesem Buch. Gelegentlich werden wir diese Nachlässigkeit nicht an den Tag legen können, etwa wenn es um Kühlungen, Kraftwerke, Wärmepumpen oder Geothermie geht.

Vergleichen wir nicht Äpfel mit Birnen? Ist es zulässig, verschiedene Formen von Energie zu vergleichen wie etwa chemische Energie, die in ein benzinbetriebenes Auto getankt wird mit der Elektrizität einer Windturbine?

Wenn verschiedene verbrauchsseitige Energien mit denkbaren Energiequellen verglichen werden, will man nicht implizieren, dass all diese Energieformen äquivalent und untereinander austauschbar seien.

Elektrizität aus der Windturbine ist nutzlos für ein Benzinauto, und mit Benzin wird man schwerlich einen Fernseher ans Laufen bringen. Im Prinzip kann man Energie von einer Form in die andere umwandeln, aber die Umwandlung beinhaltet Verluste. Mit fossilen Brennstoffen betriebene Generatoren schlucken chemische Energie und produzieren Elektrizität (mit einem Wirkungsgrad von 40 % oder so). Und Aluminiumfabriken schlucken elektrische Energie, um ein Produkt mit sehr hoher chemischer Energie zu erzeugen, Aluminium eben (mit einem Wirkungsgrad von 30% oder so).

In einigen Zusammenfassungen von Energieproduktion und -verbrauch werden alle verschiedenen Energieformen in dieselben Einheiten umgerechnet, aber Multiplikatoren eingeführt, die z.B. elektrische Energie aus Wasserkraft um den Faktor 2,5 höher bewerten als die chemische Energie im Öl. Dieses Aufblasen des effektiven Energiewertes von Elektrizität begründet man so: „Nun, 1 kWh elektrischer Energie ist gleichwertig mit 2,5 kWh Öl, weil wir aus dem Öl durch Betanken eines Generators 40% der 2,5 kWh Elektrizität gewinnen können, das ist genau 1 kWh.“ In diesem Buch werden wir gewöhnlich eine Eins-zu-eins-Umrechnung zu Grunde legen, wenn wir verschiedene Energieformen vergleichen. Es stimmt nämlich nicht, dass 2,5 kWh Öl unausweichlich äquivalent zu 1 kWh Elektrizität sind, das gilt nur innerhalb eines Weltbildes, in dem Öl dazu verwendet wird, Elektrizität zu erzeugen. Aber man kann umgekehrt auch chemische Energie aus Elektrizität gewinnen. In einer alternativen Welt (vielleicht nicht allzu fern) mit relativ viel Elektrizität und wenig Öl könnte man ja Elektrizität verwenden, um flüssige Treibstoffe herzustellen. In dieser Welt würde man sicherlich nicht den selben „Wechselkurs“ benutzen – jede Kilowattstunde Benzin würde dann etwa 3 kWh Elektrizität kosten! Darum denke ich, die zeitlose und wissenschaftliche Art Energieformen zu vergleichen ist, 1 kWh chemische Energie mit 1 kWh Elektrizität gleichzusetzen. Die Entscheidung, eine Eins-zu-eins-Umrechnung zu Grunde zu legen, führt auch dazu, dass meine Summationen teilweise etwas abweichen von denen anderer Autoren. Und nochmals weise ich darauf hin, dass diese Eins-zu-eins-Umrechnungsrate nicht impliziert, man könne Energieformen verlustfrei ineinander umwandeln. Chemische Energie in elektrische zu verwandeln verbraucht immer Energie, genauso wie die Umwandlung elektrischer in chemische Energie.

Physik und Gleichungen

Meine Bestrebung über das gesamte Buch hinweg ist nicht nur, die Indikatorzahlen unseres gegenwärtigen Energieverbrauchs und denkbarer nachhaltiger Produktion herauszuarbeiten, sondern immer auch klar zu machen, wovon diese Zahlen abhängen. Diese Abhängigkeiten zu verstehen ist essentiell, wenn wir uns daran machen wollen, eine sinnvolle Politik zu entwickeln, um die eine oder andere Zahl zu verändern. Nur

wenn wir die Physik hinter der Energieproduktion und dem Energieverbrauch wirklich verstehen, können wir Behauptungen aufstellen wie „Autos vergeuden 99% der ihnen zugeführten Energie, wir könnten Autos bauen, die 100 mal weniger Energie benötigen“. Ist diese Behauptung wahr? Um die Antwort zu erklären, müsste ich eine Formel benutzen, nämlich

$$\text{kinetische Energie} = \frac{1}{2} m v^2.$$

Aber ich musste erkennen, dass vielen Lesern solche Formeln wie eine Fremdsprache vorkommen. Darum hier mein Versprechen: Ich werde all diesen fremdsprachlichen Formelkram in die technischen Kapitel am Ende des Buches packen. Jeder Leser mit einem Abitur oder Hochschulabschluss in Mathe, Physik oder Chemie sollte diese Kapitel genießen. Der Hauptstrang des Buches (von Seite 31 bis Seite 271) ist so gehalten, dass jeder ihn nachvollziehen kann, der addieren, multiplizieren und dividieren kann. Er ist im Besonderen adressiert an unsere lieben gewählten und ungewählten Volksvertreter in den Parlamenten.

Ein letzter Punkt, bevor es losgeht: Ich weiß nicht alles über Energie. Ich habe nicht alle Antworten und die Zahlen, die ich präsentiere, sind offen für Revisionen und Korrekturen (ich erwarte in der Tat Korrekturen und werde diese auf der Website des Buches auch veröffentlichen). Das einzige, was ich sicher weiß, ist, dass die Antworten auf unsere Fragen nach energetischer Nachhaltigkeit Zahlen umfassen werden, so wie jede gesunde Diskussion zu diesem Thema Zahlen benötigt. Das Buch hält sie bereit und zeigt, was man mit ihnen anstellen kann. Ich hoffe, Sie werden es genießen!

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

28 das „pro Sekunde“ ist bereits in die Definition des Watt eingebaut. Andere Beispiele von Einheiten, die schon „pro Zeiteinheit“ eingebaut haben, sind Knoten – „unsere Yacht machte 10 Knoten“ (ein Knoten ist eine Seemeile pro Stunde); Hertz – „ich konnte ein Rauschen bei 50 Hertz hören (ein Hertz ist eine Frequenz mit einer Periode pro Sekunde); Ampere – „die Sicherung brennt durch, wenn der Strom höher als 13 Ampere ist“ (nicht 13 Ampere pro Sekunde!); oder die Pferdestärke PS – „diese stinkende Maschine macht 50 PS“ (nicht 50 PS pro Sekunde, nicht 50 PS pro Stunde, nicht 50 PS pro Tag, einfach 50 PS).

28 sagen Sie niemals „ein Kilowatt pro Sekunde“. Es gibt spezielle, seltene Ausnahmen von dieser Regel. Wenn von einem Zuwachs bei der Leistungsanforderung gesprochen wird, könnte man sagen: „Der britische Verbrauch steigt um 1 Gigawatt pro Jahr“. In Kapitel 26 diskutiere ich Fluktuationen in der Windleistung, ich könnte sagen: „Eines morgens brach die Leistung irischer Windmühlen mit einer Rate von 84 MW pro Stunde ein“. Also bitte Vorsicht! Schon ein zufälliger Versprecher kann zu Verwirrung führen: Ihr Stromzähler etwa misst in Kilowattstunden (kWh), nicht ‚Kilowatt-pro-Stunde‘

Ich stelle auf Seite 376 im Anhang eine Tabelle zur Verfügung, die beim Umrechnen von kWh pro Tag pro Person und den anderen Haupt-Maßeinheiten, in denen Leistungen diskutiert werden, hilft.

3. Autos

Lassen Sie uns in unserem ersten Kapitel zum Verbrauch das Symbol für moderne Zivilisation schlechthin behandeln: Das Auto mit einer einzigen Person darin.

Wie viel Energie verbraucht ein normaler Autobenutzer? Wenn wir die Umrechnungsfaktoren kennen, ist das eine einfache Rechnung:

$$\text{Energie pro Tag} = \frac{\text{Zurückgelegte Strecke pro Tag}}{\text{Strecke pro Treibstoffeinheit}} \times \text{Energie pro Treibstoffeinheit.}$$

Für die täglich zurückgelegte Strecke wollen wir 50 km ansetzen. Für die Strecke pro Treibstoffeinheit, also die Ökonomie des Autos, verwenden wir einen Mittelwert von 8,5 Liter auf 100 km (aus einer Autowerbung für einen Mittelklassewagen), oder

$$100 \text{ km} / 8,5 \text{ l} \approx 12 \text{ km pro Liter.}$$

(Das Zeichen \approx bedeutet „ist ungefähr gleich“).

Wie steht es mit der Energie pro Treibstoffeinheit (auch als Brennwert oder Energiedichte bezeichnet)? Anstatt sie nachzuschlagen, machen wir uns den Spaß, diese Größe durch etwas laterales Denken abzuschätzen. Fahrzeugtreibstoff, ob Diesel oder Benzin, ist Kohlenwasserstoff, und Kohlenwasserstoffe finden wir auch auf unserem Frühstückstisch, mit den zugehörigen Brennwertangaben auf der Verpackung: Etwa 8 kWh pro kg (vgl. Fig.3.2).

Da wir die Ökonomie des Autos bezogen auf eine Volumeneinheit Treibstoff abgeschätzt haben, müssen wir nun auch den Brennwert als Energie pro Volumeneinheit ausdrücken. Um die „8 kWh pro kg“ (eine Energie pro Masseinheit) in eine Energie pro Volumeneinheit umzurechnen, benötigen wir einen Wert für die Dichte des Treibstoffs. Was ist die Dichte von Butter? Butter schwimmt in Wasser, Benzinflecken schwimmen ebenfalls in Wasser, also muss deren Dichte etwas geringer sein als die Dichte von Wasser, welche bei 1 kg pro Liter liegt. Wenn wir die Dichte auf 0,8 kg/l abschätzen, erhalten wir

$$8 \text{ kWh pro kg} \times 0,8 \text{ kg pro Liter} \approx 7 \text{ kWh pro Liter.}$$

Statt wissentlich mit diesem ungenauen Schätzwert weiterzurechnen, will ich auf den tatsächlichen Brennwert für Benzin übergehen, der 10 kWh pro Liter beträgt, also

$$\begin{aligned} \text{Energie pro Tag} &= \frac{\text{Zurückgelegte Strecke pro Tag}}{\text{Strecke pro Treibstoffeinheit}} \times \text{Energie pro Treibstoffeinheit.} \\ &= \frac{50 \text{ km/Tag}}{12 \text{ km/Liter}} \times 10 \text{ kWh/Liter} \\ &\approx 40 \text{ kWh/Tag.} \end{aligned}$$



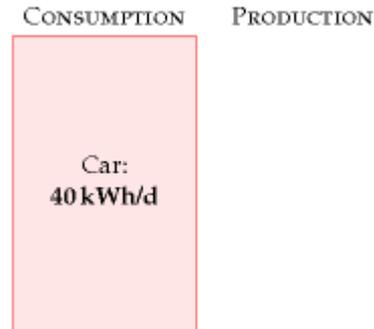
Fig.3.1: Autos. Ein roter BMW, zum Zwerg deklassiert durch ein Raumschiff vom Planeten Dorkon



Fig.3.2: Sie wollen die Energie in Fahrzeugtreibstoffen wissen? Betrachten Sie die Hinweise auf der Butter oder Margarine. Der Brennwert ist 3000 kJ je 100 g, oder 8 kWh pro Kilo.

Glückwunsch! Wir haben unsere erste Verbrauchsabschätzung gemacht. Ich habe dieses Ergebnis im linken Stapel von Fig.3.3 dargestellt. Die Höhe des roten Rechtecks repräsentiert 40 kWh pro Person pro Tag.

Fig.3.3: Das Fazit aus Kapitel 3: ein typischer Autofahrer verbraucht um die 40 kWh pro Tag.



Die Abschätzung betraf einen typischen Autofahrer, der heute ein typisches Auto fährt. Folgende Kapitel werden *Durchschnittsverbräuche* diskutieren, gemittelt über die gesamte Bevölkerung von England. Dabei muss man berücksichtigen, dass nicht jeder ein Auto fährt. In Teil II werden wir auch diskutieren, wie hoch der Verbrauch sein *könnte* unter Berücksichtigung anderer Technologien wie etwa Elektroautos.

Wieso fährt ein Auto gerade 12 km pro Liter? Wohin geht diese Energie? Können wir Autos bauen, die 1200 km pro Liter fahren? Wenn uns daran liegt, den Verbrauch von Autos zu reduzieren, müssen wir die dahinter stehende Physik verstehen. Diese Fragen sind im technischen Kapitel A des Anhangs beantwortet, das eine einfache Theorie zum Verbrauch von Autos vorstellt. Ich ermutige Sie, diese Kapitel zu lesen, wenn Formeln wie $\frac{1}{2}mv^2$ Ihnen keine medizinischen Probleme bereiten.

Das Fazit des Kapitels 3: Ein typischer Autofahrer verbraucht um die 40 kWh täglich. Als nächstes müssen wir nun den rechten Stapel – Energieproduktion – aufbauen, damit wir etwas zum Vergleichen haben.

Fragen

Was ist mit den Energiekosten der Produktion von Fahrzeugtreibstoff?

Ein guter Punkt. Wenn ich die Energie einer bestimmten Aktivität abschätze, neige ich zu einer ziemlich engen „Grenze“ um diese Aktivität. Diese Selektion macht die Abschätzung einfacher, doch gebe ich zu, dass es eine gute Idee ist, den gesamten energetischen Effekt einer Aktivität abzuschätzen. Es wurde bereits abgeschätzt, dass man, um eine Einheit Benzin zu gewinnen, einen Input von 1,4 Einheiten Öl und anderer Primärtreibstoffe benötigt (Treloar et al. 2004).

Was ist mit den Energiekosten zur Herstellung des Autos?

Ja, diese Kosten fallen ebenfalls nicht in die Grenzen der Betrachtung. Autoherstellung wird aber in Kapitel 15 behandelt.

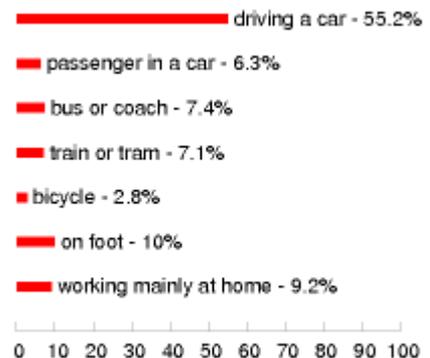


Fig.3.4: Wie die Engländer zur Arbeit fahren, nach einer Umfrage von 2001.



Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 31 Für die täglich zurückgelegte Strecke wollen wir 50 km ansetzen. Das korrespondiert mit 18.000 km pro Jahr. Etwa die Hälfte der britischen Bevölkerung fährt zur Arbeit. Der gesamte Autoverkehr in UK ist 686 Milliarden Passagier-km jährlich, was zu einer „mittleren täglichen Autofahrt-Strecke jedes Engländers“ von 30 km pro Tag führt. Quelle: Department for Transport [5647rh]. Wie auf Seite 25 ausgeführt schätze ich den Verbrauch eines „typischen einigermaßen wohlhabenden Menschen“ ab – den Verbrauch, den viele Menschen anstreben. Einige fahren nicht viel. In diesem Kapitel will ich den Verbrauch einer Person abschätzen, die sich dazu entschlossen hat Auto zu fahren, und nicht den Landesdurchschnittswert herunterbrechen, der Autofahrer und Nicht-Autofahrer zusammenmischt. Hätte ich gesagt: „Der mittlere Energieverbrauch für Autofahren in England ist 13 kWh/d pro Person“, wette ich, dass viele Leute das missverstanden hätten und meinten: „Ich bin Autofahrer, also verbrauche ich schätzungsweise 13 kWh pro Tag“.
- 31 Mittelwert von 8,5 Liter auf 100 km: Der Mittelwert englischer Autos in 2005 [27jdc5] lag bei 33 Meilen pro Gallone (mpg), umgerechnet etwa 8,6 Liter pro 100 km. Benzinautos verbrauchen im Mittel 31 mpg (9,1 l/100km), Dieselfahrzeuge 39 mpg (7,2 l/100km), neue Benziner (unter 2 Jahren) 32 mpg (8,8 l/100km). Quelle: Dept. For Transport 2007. Honda, „die treibstoffsparendste Automarke Amerikas“, meldet, dass ihre Flotte der im Jahr 2005 verkauften Neuwagen einen mittleren Verbrauch von 35 mpg (8,1 l auf 100 km) aufweist [28abpm].
- 31 Wenn wir die Dichte auf 0,8 kg/l abschätzen: Die Dichte von Benzin ist 0,737, von Diesel 0.820–0.950 [nmn4l].

calorific values	
petrol	10 kWh per litre
diesel	11 kWh per litre

- 31 ...den tatsächlichen Brennwert für Benzin übergehen, der 10 kWh pro Liter beträgt: ORNL [2hcgdh] gibt die folgenden Brennwerte an: Diesel: 10.7 kWh/l; Flugbenzin: 10.4 kWh/l; Benzin: 9.7 kWh/l. Wenn man Brennwerte nachschlägt, findet man die Unterscheidung Brennwert (auch „oberer Heizwert“) und Heizwert (Energiegehalt oder Energiewert). Beide Werte unterscheiden sich lediglich um 6% für Motortreibstoffe, so dass für unsere Zwecke die Unterscheidung nicht erforderlich ist, doch lassen Sie es mich hier dennoch erklären: Der Brennwert ist der Wert der chemischen Energie, die bei Verbrennung des Stoffes frei wird. Eines der Verbrennungsprodukte ist Wasser und in den meisten Maschinen und Energieanlagen geht ein Teil der Energie für die Verdampfung dieses Wassers verloren. Der Heizwert gibt an, wie viel Energie nach Abzug dieser Verdampfungsenergie übrigbleibt. Wenn wir uns fragen, wie viel Energie unser Lebensstil kostet, ist der Brennwert die richtige Größe. Der Heizwert ist dagegen für einen Anlagenbetreiber interessant, um zu entscheiden, mit welchem Treibstoff er seine Anlage betreibt. In diesem Buch benutze ich durchwegs Brennwerte.
- Eine letzte Anmerkung für pedantische Spielverderber, die sagen „Butter ist kein Kohlenwasserstoff“: OK, Butter ist kein reiner Kohlenwasserstoff, aber es ist eine gute Näherung, den Hauptbestandteil von Butter als lange Kohlenwasserstoffketten zu sehen, genau wie Benzin. Der Beweis für die ganze Geschichte ist: Diese Näherung brachte uns der korrekten Antwort auf 30% nahe. Willkommen in der Guerilla-Physik.

4. Wind

The UK has the best wind resources in Europe.

Sustainable Development Commission

Wind farms will devastate the countryside pointlessly.

James Lovelock



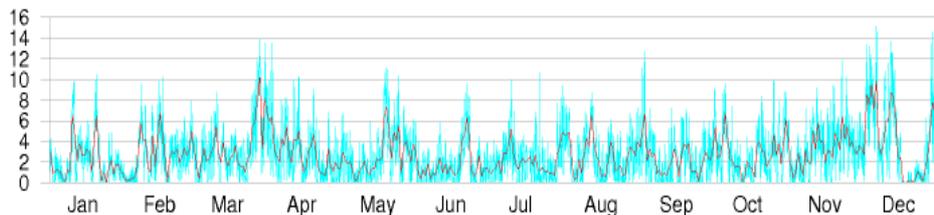
Wie viel Windenergie können wir tatsächlich erzeugen?

Wir können eine Abschätzung für die an Land stehenden (on-shore) Windkraftwerke treffen, indem wir die Windkraft pro Landfläche mit der pro Person zur Verfügung stehenden Landfläche multiplizieren:

Leistung pro Person = **Windleistung pro Fläche** x Fläche pro Person

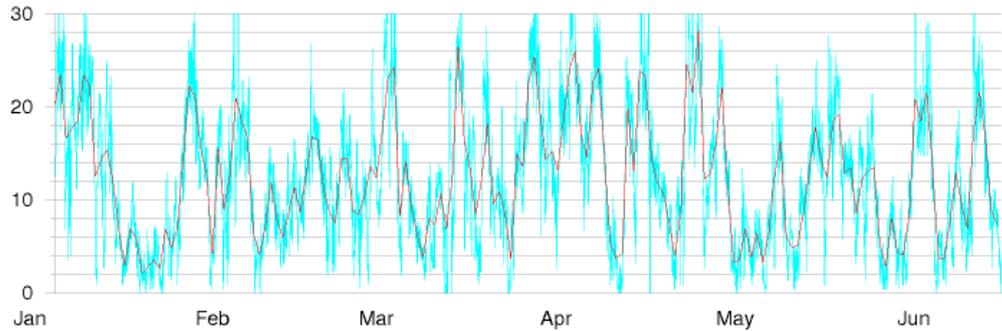
Anhang B erklärt, wie man die Leistung einer Windfarm pro Flächeneinheit abschätzen kann. Wenn typische Windgeschwindigkeiten von 6 m/s (d.h. 22 km/h) auftreten, liefert eine Windfarm etwa 2W/m².

Fig.4.1: Windgeschwindigkeiten in Cambridge, in m/s, täglich (rote Linie) und halbstündlich (blau).



Das ist wahrscheinlich zu hoch gegriffen für viele Orte in England. Fig.4.1 zeigt beispielsweise die mittlere Windgeschwindigkeit in Cambridge im Jahre 2006. Das Tagesmittel erreichte 6 m/s nur an 30 Tagen im Jahr – siehe Fig.4.6 für ein Histogramm. Doch einige Stellen haben deutlich höhere Windgeschwindigkeiten als 6 m/s, beispielsweise Cairngorm in Schottland (Fig.4.2).

Fig.4.2: durchschnittliche Windgeschwindigkeiten in Cairngorm, in m/s, über sechs Monate des Jahres 2006.



Setzt man zudem die Bevölkerungsdichte von 250 Menschen pro Quadratkilometer oder 4000 qm pro Person ein, zeigt sich, dass Wind eine Leistung von

$$2\text{W/m}^2 \times 4000 \text{ m}^2 \text{ pro Person} = 8000 \text{ W pro Person}$$

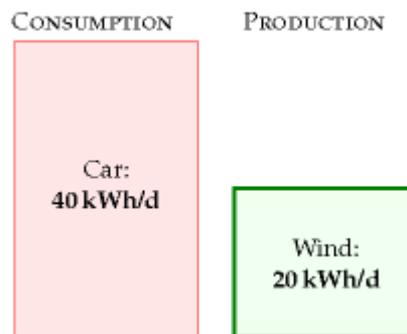
in Windturbinen erzeugen könnte, wenn wir das ganze Land mit ihnen überziehen würden. In unsere Lieblingseinheit umgerechnet sind das 200 kWh/d pro Person.

Aber lassen Sie uns realistisch bleiben. Wie viel Land können wir uns wirklich vorstellen, mit Windmühlen zu überziehen? Vielleicht 10%? Dann sehen wir: Wenn wir die windigsten 10 % von England mit Windmühlen überziehen (die 2 W/m² liefern) könnten wir **20 kWh/d pro Person** erzeugen, was gerade der Hälfte dessen entspricht, was ein Durchschnittsauto für 50 km am Tag verbraucht.

Die on-shore Windenergie-Ressourcen Englands mögen „groß“ sein, doch offensichtlich nicht so groß wie unser großer Verbrauch. Den off-shore Windparks wenden wir uns später zu.

Ich sollte noch betonen, wie großzügig diese Annahmen gewählt wurden. Lassen Sie uns diese Abschätzung des englischen Windpotenzials mit der aktuell installierten weltweiten Windkraftwerksleistung in Relation setzen. Die Windmühlen, die für diese 20 kWh/d erforderlich sind, entsprechen 50 mal der Leistung der gesamten dänischen Wind-Hardware, 7 mal der aller deutschen Windfarmen und zweimal der Leistung der gesamten Flotte aller Windturbinen in der Welt.

Fig.4.3: Fazit aus Kapitel 4: das realistische Maximum on-shore produzierter Windenergie in England liegt bei 20 kWh pro Tag pro Person.



Bitte missverstehen Sie mich nicht. Sagte ich, wir sollten uns nicht darum kümmern, Windfarmen zu installieren? Nicht im geringsten. Ich versuche nur eine hilfreiche Tatsache beizutragen, nämlich dass Windfarmen, wenn sie tatsächlich etwas verändern wollen, eine sehr, sehr große Nutzfläche erfordern.

Diese Schlussfolgerung – dass der maximale Beitrag von on-shore Windkraft, wenn auch „groß“, so dennoch viel kleiner als unser Bedarf ist – ist wichtig, deshalb lassen Sie

uns für die „Schlüsselfigur“ darin, die angenommene Leistung pro Flächeneinheit ($2\text{W}/\text{m}^2$), nochmals eine Gegenprobe mit einer realen englischen Windfarm machen.

Leistung pro Einheitsfläche	
Wind-Farm (Geschw. 6 m/s)	$2\text{ W}/\text{m}^2$

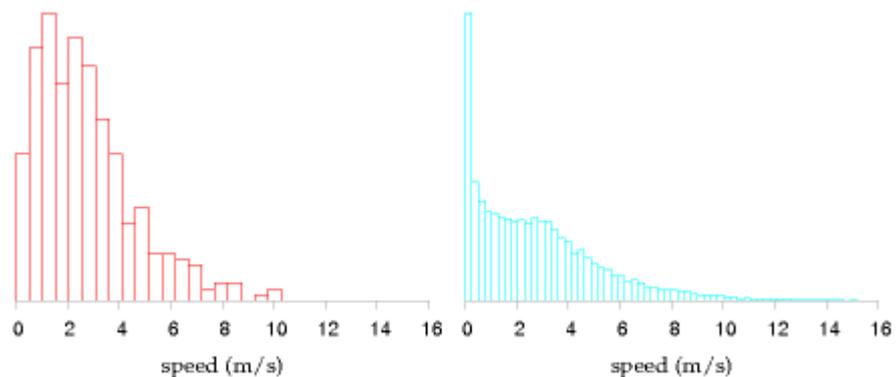
Tabelle 4.4: Windfarmen

Bevölkerungsdichte in England
$250\text{ pro km}^2 \leftrightarrow 4000\text{ qm pro Person}$

Tabelle 4.5: Bevölkerungsdichte (vgl. Anhang J)

Die Whitelee Windfarm nahe Glasgow in Schottland besitzt 140 Turbinen mit einer Spitzenleistung von zusammen 322 MW auf einer Fläche von 55 km^2 . Das sind $6\text{ W}/\text{m}^2$, Spitze. Die mittlere Leistung ist geringer, weil natürlich nicht alle Turbinen die ganze Zeit mit maximalem Output arbeiten. Das Verhältnis von mittlerer Leistung zu Spitzenleistung heißt „Load Faktor“ oder „Kapazitätsfaktor“ und er variiert von Anlage zu Anlage und mit der Hardware, die auf der Anlage installiert ist; ein typischer Faktor für eine gute Anlage mit modernen Turbinen ist 30%. Wenn wir für Whitelee einen Load Faktor von 33% annehmen, dann ist die mittlere Leistung pro Flächeneinheit $2\text{W}/\text{m}^2$ – genau der Wert, den wir in unserer Annahme über die Leistungsdichte auch verwendet hatten.

Fig.4.6:
Histogramm der mittleren Windgeschwindigkeit in Cambridge in m/s: Tagesmittel (links), und halbstündliches Mittel (rechts).



Fragen

Windturbinen werden die ganze Zeit größer und größer. Können größere Turbinen die Antworten dieses Kapitels verändern?

Die Erklärung ist in Anhang B. Größere Turbinen sind finanzökonomisch günstiger, doch vergrößern sie nicht wesentlich die Leistung pro Flächeneinheit, weil größere Windmühlen mit größerem Abstand voneinander installiert werden müssen. Verdoppelt man die Höhen der Windmühlen einer Farm, kann man damit nur um die 30% mehr Leistung erhalten.

Windleistung schwankt die ganze Zeit. Das macht Wind doch sicher weniger nutzbar?

Vielleicht. Wir kommen in Kapitel 26 darauf zurück, wo wir auf die Intermittenz des Windes einen Blick werfen und verschiedene Lösungsmöglichkeiten für dieses Problem diskutieren, einschließlich Energiespeicherung und Anforderungsmanagement.

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 34 **Fig.4.1 und Fig.4.6:** Winddaten für Cambridge von Digital Technology Group, Computer Laboratory, Cambridge [vxhhj]. Die Wetterstation ist auf dem Dach des Gates-Gebäudes, etwa 19 m hoch. Die Windgeschwindigkeiten bei 50 m sind gewöhnlich um 25 % größer. Daten für Cairngorm (**Fig,4.2**) von Heriot-Watt University Physics Department [tdvml].
- 35 **50 mal der Leistung der gesamten dänischen Wind-Hardware:** Bei einem angenommenen Load-Faktor von 33% benötigt der mittlere Bedarf von 20 kWh/d pro Person eine installierte Peak-Leistung von 150 GW. Ende 2006 hatte Dänemark 3,1 GW installierte Leistung, Deutschland 20,6 GW. Weltweit waren es 74 GW (wwindea.org). Übrigens lag der Load-Faktor in Dänemark im Jahr 2006 bei 22%, die gesamte Windkraft erzeugte eine mittlere Leistung von 3 kWh/d pro Person.

5. Flugzeuge

Stellen Sie sich vor, sie machten eine Interkontinentalreise pro Jahr mit dem Flugzeug. Wie viel Energie würde das kosten?

Eine Boeing 747-400 trägt mit 240.000 Litern Treibstoff 416 Passagiere 14.200 km weit. Der Brennwert des Treibstoffes ist wieder wie in Kapitel 3 abgeleitet 10 kWh pro Liter. Dann ist der Energieaufwand eines Hin- und Rückflugs, gleichmäßig auf alle Passagiere verteilt:

$$\frac{2 \times 240.000 \text{ Liter}}{416 \text{ Passagiere}} \times 10 \text{ kWh/Liter} \approx 12.000 \text{ kWh pro Passagier.}$$

Wenn Sie *einen* solchen Flug jährlich machen, ist der damit verbundene mittlere Energieaufwand pro Tag

$$\frac{12.000 \text{ kWh}}{365 \text{ Tage}} \approx 33 \text{ kWh/Tag.}$$

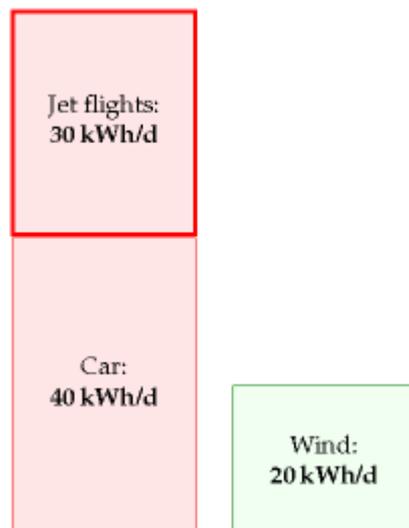


Fig.5.1: Eine Interkontinentalreise pro Jahr zu unternehmen entspricht einem Verbrauch von 30 kWh pro Tag

14.200 km ist etwas weiter als von London nach Cape Town (10.000 km) oder von London nach Los Angeles (9000 km), also haben wir, denke ich, die typische Distanz einer Interkontinentalreise überschätzt; doch haben wir auch den Füllgrad des Flugzeugs überschätzt, und die Energiekosten pro Person liegen höher, wenn das Flugzeug nicht voll besetzt ist. Skalieren wir also ab um einen Faktor 10.000 km / 14.200 km, um eine Abschätzung für Cape Town zu erhalten, und wieder auf um einen Faktor 100 / 80, um zu berücksichtigen, dass das Flugzeug nur zu 80 % voll ist, erhalten wir 29 kWh pro Tag. Damit man es sich leichter merken kann, runden wir einfach auf **30 kWh pro Tag** auf.

Machen wir uns klar, was das bedeutet. Einmal jährlich zu fliegen⁹ verursacht etwas mehr Energiekosten als eine elektrische 1 kW Herdplatte, die permanent angeschaltet ist, 24 Stunden am Tag, das ganze Jahr.

So wie die Abschätzung des Energiebedarfs von Autos im Kapitel 3 von Anhang A begleitet ist, der modellhaft zeigt, wohin die Energie in den Autos geht, diskutiert der

⁹ wobei eine Flugstrecke von 20000 km unterstellt wird

technische Anhang dieses Kapitels (Anhang C), wohin die Energie in den Flugzeugen geht. Anhang C erlaubt uns Antworten auf Fragen wie „Wären Flugreisen signifikant energiesparender, wenn wir in langsameren Flugzeugen flögen?“ Die Antwort ist nein: Im Gegensatz zu Radfahrzeugen, die tatsächlich um so effizienter werden können, je langsamer sie fahren, sind Flugzeuge nahezu so effizient wie es theoretisch möglich ist. Flugzeuge verbrauchen unvermeidbar Energie für zwei Dinge: Sie müssen die Luft niederdrücken, damit sie oben bleiben, und sie müssen den Strömungswiderstand der Luft überwinden. Veränderungen am Flugzeug können seine Effizienz nicht mehr drastisch verbessern. Eine 10% Verbesserung? Ja, möglicherweise. Eine Verdopplung der Effizienz? Da würde ich gepflegt meine Socken verspeisen.

Fragen

Sind nicht Turboprop Maschinen weitaus energieeffizienter?

Nein, die „bedeutend grünere“ Bombardier Q400 NextGen, „die technologisch fortschrittlichste Turboprop der Welt“ braucht nach Herstellerangabe [www.q400.com] 3,81 Liter auf 100 Passagier-km (bei einer Fluggeschwindigkeit von 667 km/h), was einem Energieverbrauch von 38 kWh pro 100 p-km entspricht. Die vollbesetzte 747 hat einen Verbrauch von 42 kWh pro p-km. Somit sind beide Maschinen doppelt so treibstoff-effizient wie ein (nur mit dem Fahrer besetztes) Auto (wieder den europäischen Mittelklassewagen aus Kapitel 3 zu Grunde gelegt).



Fig. 5.2. Bombardier Q400 NextGen. www.q400.com.

Ist Fliegen auf irgendeine Weise besonders schädlich für das Klima?

Ja, nach Expertenmeinung, doch sind die Aussagen noch etwas unsicher [3fbufz]. Fliegen erzeugt neben CO₂ noch andere Treibhausgase, etwa Stickoxide. Wenn Sie Ihren CO₂ Fußabdruck berechnen wollen in Tonnen CO₂-Äquivalent, dann sollten Sie die aktuellen CO₂-Emissionen Ihrer Flüge mit dem Faktor 2 oder 3 hochrechnen. Die Diagramme in diesem Buch beinhalten diesen Faktor aber nicht, da wir uns auf die Energiebilanz fokussieren wollen.

	Energie pro Strecke (kWh pro 100 p-km)
Auto (4 Personen)	20
Ryanair Flugzeuge (im Jahr 2007)	37
Bombardier Q400, voll	38
747, voll	42
747, 80% voll	53
Ryanair Flugzeuge (im Jahr 2000)	73
Auto (1 Person)	80

Tabelle 5.3: Passagiertransport-Effizienz, ausgedrückt in Energie pro 100 Passagier-km.

The best thing we can do with environmentalists is shoot them.

Michael O'Leary, CEO of Ryanair [3asmgy]

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

38 Boeing 747-400 - Daten sind von [9ehws]. Flugzeuge sind heute nicht vollständig voll. Fluglinien sind stolz, wenn ihr durchschnittlicher Füllgrad 80% ist. Easyjet Flugzeuge sind durchschnittlich zu 85% voll (Quelle: thelondonpaper Dienstag, 16. Januar 2007.) Eine zu 80% besetzte 747 braucht ungefähr 53 kWh pro 100 Passagier-km.

Was ist mit Kurzstreckenflügen? 2007 hatte Ryanair, „Europas grünste Fluglinie,“ Transportkosten von 37 kWh pro 100 P-km [3exmgv]. Dies bedeutet, dass das Fliegen in Europa mit Ryanair etwa die gleichen Energiekosten verursacht, als wenn alle Passagiere mit dem Auto zu ihren Zielen führen, jeweils zu zweit in einem Auto. (Für eine Abschätzung, wie es bei anderen Fluglinien aussieht: Im Jahr 2000, vor Ryanairs umweltfreundlichen Investitionen, lag ihr Kraftstoffverbrauch bei über 73 kWh pro 100 P-km.) Von London nach Rom sind es 1430 Kilometer; London nach Malaga sind 1735 Kilometer. Also verursacht eine Rundreise nach Rom mit der grünsten Fluglinie Energiekosten von 1050 kWh, und eine Rundreise nach Malaga kostet 1270 kWh. Wenn Sie also einmal pro Jahr nach Rom und nach Malaga düsen, ist Ihre durchschnittliche Leistungsaufnahme 6,3 kWh/d mit der grünsten Fluglinie und möglicherweise 12 kWh/d mit einer weniger grünen.

Was ist mit Vielfliegern? Um eine silberne Vielflieger-Karte von einer Interkontinentalfluglinie zu erhalten, muss man schon 25.000 Meilen pro Jahr Touristenklasse fliegen. Das sind ungefähr 60 kWh pro Tag, wenn mit den Zahlen dieses Kapitels rechnen und annehmen, dass die Flugzeuge zu 80% voll sind. Sind hier einige Ergänzungen vom Intergovernmental Panel on Climate Change [yrnmum]: Eine volle 747-400 mit lockerer Bestuhlung (262 Sitze) hat bei einem 10.000-Kilometer-Flug einen Energieverbrauch von 50 kWh pro 100 P-km. Mit dichter Bestuhlung (568 Sitze) auf einem 4.000 Kilometer Flug hat das gleiche Flugzeug einen Energieverbrauch von 22 kWh pro 100 P-km. Eine Kurzstrecken-Tupolev-154, die mit 70% ihrer 164 Sitze besetzt 2.235 Kilometer fliegt, verbraucht 80 kWh pro 100 P-km.

39 Veränderungen am Flugzeug können seine Effizienz nicht mehr drastisch verbessern. Das aktuelle Ziel des Advisory Council for Aerospace Research in Europe (ACARE) ist eine 50%-Reduktion des Treibstoffbedarfs pro P-km (relativ zum Basiswert aus dem Jahr 2000), wobei 15-20% Verbesserung bei den Triebwerken erwartet wird. Nach Mitteilungen von 2006 ist Rolls Royce auf halbem Weg zu diesem Ziel [36w5gz]. Dennis Bushnell, wissenschaftlicher Leiter des Forschungszentrums Langley der NASA, scheint mit meiner Gesamteinschätzung der Aussichten für Leistungsfähigkeits-Verbesserungen in der Luftfahrt einverstanden zu sein. Die Luftfahrtindustrie ist erwachsen. „Es wird langfristig nicht viel zu

Short hauls: 6 kWh/d



Fig.5.5: Zwei Kurzstreckenflüge mit der grünsten Kurzstrecken-Airline: 6,3 kWh/d. Vielflieger mit silbernem Bonus-Status: 60 kWh/d.



Fig.5.4: Ryanair Boeing 737-400. Foto von Adrian Pingstone

gewinnen übrig sein außer minimalen Verbesserungen im Prozentbereich.“ (New Scientist, 24. Februar 2007, Seite 33.) Das radikal umgestaltete „Silent Aircraft“ [silentaircraft.org/sax40], wenn es gebaut werden sollte, würde nach theoretischen Vorhersagen um 16% effizienter sein als ein konventionelles Flugzeug (Nickol, 2008) Wenn das ACARE Ziel erreicht wird, dann vermutlich vor allem durch vollere Flugzeuge und besseres Flugverkehrsmanagement.

6. Solar

Wir wollen weiter abschätzen, wie sich der Verbrauch gegenüber der Produktion aufbaut. In den letzten drei Kapiteln fanden wir heraus, dass aufwandsseitig Autofahren und Fliegen größer sind als das realistische on-shore Windkraftpotenzial Englands. Kann Solarenergie die Ertragsseite wieder in Führung bringen?

Die natürliche Leistung des Sonnenscheins an einem wolkenlosen Mittag ist 1000 W pro Quadratmeter. Dies gilt bei senkrechter Einstrahlung, für einen Quadratmeter Fläche, die zur Sonne ausgerichtet ist, nicht für 1 m² Landfläche. Um die Leistung pro Landfläche zu bestimmen, braucht man einige **Korrekturen**. Wir müssen die Neigung zwischen Sonneneinstrahlung und Land beachten, die die Intensität der Mittagssonne auf etwa **60 %** des Wertes am Äquator reduziert. (Fig.6.1). Außerdem verlieren wir etwas wegen der Tatsache, dass nicht die ganze Zeit Mittag ist. An einem wolkenlosen Tag im März oder im September ist das Verhältnis von mittlerer Intensität zur Mittagsintensität an die **32%**. Und an einem durchschnittlichen Ort in England scheint die Sonne nur für etwa **34 %** der Tageslicht-Stunden.

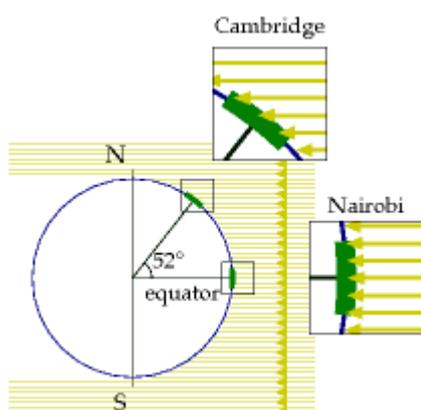
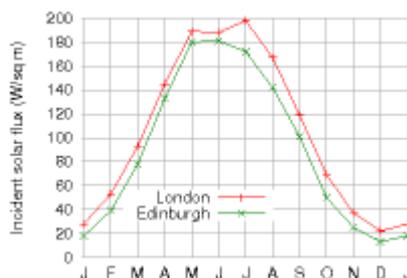


Fig.6.1: Sonnenlicht, das die Erde trifft, am Mittag eines Tages im Herbst oder Frühling. Die Strahlendichte pro Landflächeneinheit ist in Cambridge (52. Breitengrad) etwa 60% des äquatorialen Wertes.

Fig.6.2: Mittlere solare Intensität in London und Edinburgh, als Funktion der Jahreszeiten. Die mittlere Intensität pro Landflächeneinheit ist 100 W/m².



Kombiniert man diese drei Faktoren sowie die zusätzliche Komplikation wechselnder Jahreszeiten, ergibt sich, dass die mittlere natürliche Sonnenschein-Leistung auf einem Quadratmeter Süddach in England bei etwa 110 W/m², auf flachem Grund etwa bei 100 W/m² liegt.

Diese natürliche Leistung können wir nun auf verschiedene Weise in nützliche Leistung verwandeln:

1. Solarthermie: Nutzung des Sonnenscheins zur direkten Aufheizung von Gebäuden oder von Wasser
2. Solare Photovoltaik zur Erzeugung von Elektrizität
3. Solare Biomasse: Verarbeitung von Bäumen, Bakterien, Algen, Getreide, Soja oder Ölsaaten zu Treibstoffen, Chemie oder Baumaterial

4. Nahrung: das selbe wie solare Biomasse, nur befördern wir die Pflanzen direkt in Menschen oder andere Tiere.

(in einem späteren Kapitel werden wir auch noch ein paar andere solare Energietechniken für Wüstengegenden kennen lernen)

Lassen Sie uns schnell grobe Abschätzungen der maximalen realistischen Leistungen machen, die jede dieser Techniken liefern kann. Wir vernachlässigen ihre ökonomischen Kosten und die Kosten für Herstellung und Wartung der notwendigen Energieanlagen.

Solarthermie

Die einfachste solare Energietechnik ist ein Modul, das Wasser erwärmt. Nehmen wir an, wir würden alle südseitigen Dächer mit Solarmodulen ausstatten – das wären etwa 10 m² Module pro Person – und nehmen wir weiter an, diese Module hätten einen Wirkungsgrad von 50%, mit dem sie die 110 W/m² des Sonnenlichts in warmes Wasser verwandeln (Fig.6.3). Wir multiplizieren

$$50 \% \times 10 \text{ m}^2 \times 110 \text{ W/m}^2$$

und finden so, dass solare Wassererwärmung

13 kWh pro Tag pro Person

liefern kann. Ich zeichne dieses Rechteck in Fig.6.4 weiß, um anzudeuten, dass es sich hierbei um niederstufige Energie handelt - heißes Wasser ist weniger wertvoll als die hochstufige Elektrizität, wie sie eine Windturbine liefert. Wärme kann nicht ins Stromnetz eingespeist werden. Wenn Wärme nicht gebraucht wird, ist sie umsonst. Wir sollten im Hinterkopf behalten, dass ein Großteil dieser Wärme nicht am richtigen Platz verfügbar sein wird. In Städten, in denen viele Menschen leben, hat die Wohnbebauung weniger Dachfläche als im Landesdurchschnitt. Zudem ist die gewonnene Wärme nicht gleichmäßig über das Jahr verteilt.

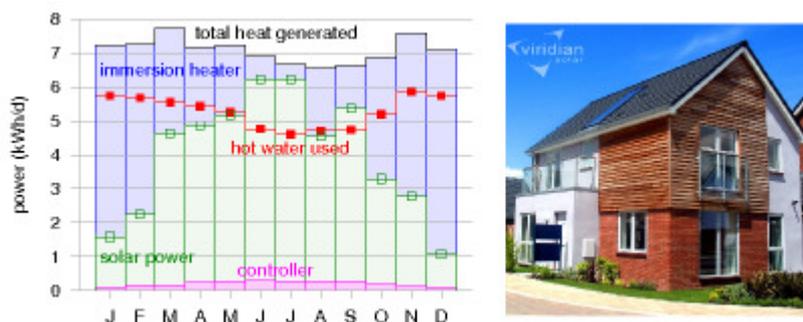


Fig.6.3: Solarenergie erzeugt durch ein 3-m²-Warmwassermodul (grün) und zusätzliche Wärmeanforderung (blau) für die Warmwassererzeugung im Testhaus von Viridian Solar. (Das Foto zeigt ein Haus mit so einem Modul auf dem Dach.) Die mittlere Solarleistung von den 3 m² war 3,8 kWh/d. Das Experiment simulierte den Warmwasserbedarf eines durchschnittlichen europäischen Haushalts – 100 l heißes (60 °C) Wasser täglich. Die 1,5-2 kWh/d große Lücke zwischen der gesamten erzeugten Energie (schwarze Linie ganz oben) und dem genutzten Warmwasser (rote Linie) ist durch Wärmeverluste entstanden. Die Linie in Magenta zeigt die für den Betrieb erforderliche elektrische Leistung. Die mittlere Leistung pro Flächeneinheit beträgt bei diesem Modul 53 W/m².

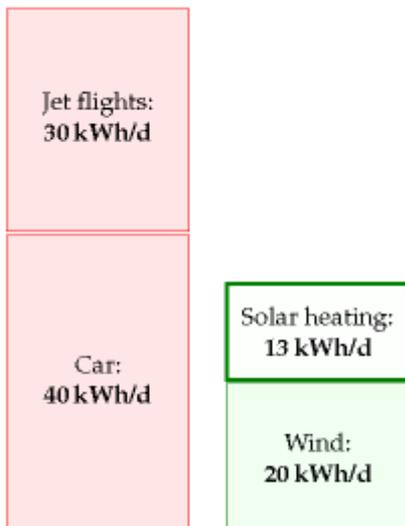


Fig.6.4: Solarthermie: 10 m² thermische Module können (im Mittel) 13 kWh/d thermische Energie liefern.

Photovoltaik

Photovoltaik(PV)-Module wandeln Sonnenlicht in Elektrizität. Typische PV-Module haben eine Effizienz von 10%, sehr aufwändige und teure bis 20%. (Fundamentale Gesetze der Physik limitieren die Effizienz von PV-Systemen auf bestenfalls 60% mit perfekt fokussierenden Spiegeln und Linsen, und auf 45 % ohne Fokussierung. Ein massentaugliches Modul mit 30% Effizienz wäre schon sehr bemerkenswert.) Die mittlere Leistung eines PV-Moduls in England, mit 20 % Effizienz und in Südausrichtung, beträgt also

$$20 \% \times 110 \text{ W/m}^2 = 22 \text{ W/m}^2.$$

Fig.6.5 zeigt Daten, die diese Zahl bestätigen. Geben wir nun jeder Person 10 m² von den teureren (20% effizienten) Solarmodulen und bedecken damit alle Süddächer. Das liefert dann

5 kWh pro Tag pro Person.

Da die Fläche von Süddächern nur etwa 10 m² pro Person beträgt, ist sicher nicht genug Platz für diese PV-Module *und* die Solarthermie-Module aus dem letzten Abschnitt. Also müssen wir uns eigentlich entscheiden, ob wir den einen oder den anderen Beitrag addieren wollen. Egal, ich nehme mal beide mit auf den Produktionsstapel. Derzeit sind die Kosten für PV-Module etwa viermal höher als die für thermische Module, aber sie liefern nur halb so viel Energie, allerdings von höchster Stufe: Elektrizität. Daher würde ich einer Familie, die über Solarenergie nachdenkt, raten, zuerst die solarthermische Versorgung zu prüfen. Die intelligenteste Variante, wenigstens in sonnigen Gegenden, bieten kombinierte Systeme, die sowohl Elektrizität als auch Warmwasser aus einer einzigen Anlage liefern. Dieser Weg wurde zuerst von Heliodynamics eingeschlagen, die die Gesamtkosten ihrer Systeme reduzieren, indem sie kleine hochwertige Galliumarsenid PV-Module mit kleinen flachen nachführbaren Spiegeln umgeben. Die Spiegel fokussieren das Sonnenlicht auf die PV-Module, die Strom und Warmwasser liefern; das Warmwasser wird erzeugt, indem man Wasser an der Rückseite der PV-Module vorbeipumpt.

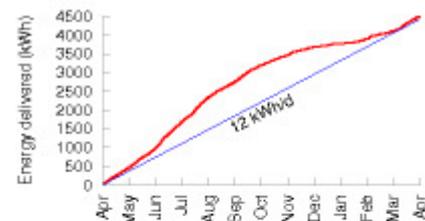


Fig.6.5: Photovoltaik: Daten eines 25 m² Modulfeldes in Cambridgeshire aus 2006. Als Spitzenleistung liefert dieses Feld etwa 4 kW. Der Durchschnitt übers Jahr liegt bei 12 kWh pro Tag. Das sind 20 W pro Quadratmeter Modulfläche.

Die bisherige Erkenntnis: PV auf der Südseite Ihres Hausdachs sollte genug Strom erzeugen, um ein gutes Stück Ihres persönlichen Elektrizitätsbedarfes zu decken, doch die Dächer sind nicht groß genug, um eine große Rolle im Gesamt-Energiebedarf zu spielen. Um mehr mit PV zu bewerkstelligen, müssen wir vom Dach heruntersteigen auf festen Boden. Die beiden Sonnenkämpfer in Fig.6.6 weisen den Weg.



Fig.6.6: zwei Sonnenkämpfer genießen ihre PV-Anlage, die ihre Elektroautos und ihr Heim versorgt. Das Feld aus 120 Modulen (jedes 300 W bzw. 2,2 m²) hat insgesamt eine Fläche von 268 m², einen Spitzen-Output (vor Wechselrichter-Verlusten) von 30,5 kW und einen mittleren Output – in Kalifornien nahe Santa Cruz – von 5 kW (19 W/m²). Foto mit freundlicher Genehmigung von Kenneth Adelman
www.solarwarrior.com

Solarfarmen

Wenn es einen Durchbruch der Solartechnologie gäbe und die Kosten für Photovoltaik weit genug fallen, so dass wir Module überall in die Landschaft stellen könnten, was wäre dann die maximal erreichbare Energieproduktion? Gut, wenn wir 5% Englands mit 10%-effizienten Modulen bestücken, ergäbe das

$$10 \% \times 100 \text{ W/m}^2 \times 200 \text{ m}^2 \text{ pro Person} \approx 50 \text{ kWh/d pro Person.}$$

Ich hatte übrigens nur 10% Effizienz angenommen, da bei Freiflächenanlagen die PV-Module in großen Mengen kostengünstig verfügbar sein müssen, und die weniger effizienten Module die ersten sind, die billiger und billiger sein werden. Die Leistungsdichte (Leistung pro Flächeneinheit) solcher Solarfarmen wäre

$$10\% \times 100 \text{ W/m}^2 = 10 \text{ W/m}^2 .$$

Dies ist doppelt so viel, wie derzeit beispielsweise der Bavaria Solarpark (Fig.6.7) erreicht.



Fig.6.7: Eine PV-Freiflächenanlage mit 6,3 MW (peak), der Solarpark in Mühlhausen, Bayern. Die mittlere Leistung pro Landflächeneinheit dürfte um die 5W/m² liegen. Foto: SunPower.

Könnte diese Flut von Solarmodulen mit der Armee von Windmühlen aus Kapitel 4 koexistieren? Jawohl, ohne Probleme: Windmühlen werfen wenig Schatten und PV-Module am Boden haben kaum Auswirkungen auf den Wind. Wie kühn ist dieser Plan? Die PV-Kapazität, die man braucht, um die 50 kWh/d pro Person zu liefern, ist über 100 mal höher als die derzeit weltweit installierte Photovoltaik. Sollte ich Solarfarmen in meinen Produktionsstapel mit aufnehmen? Da wohnen zwei Herzen in meiner Brust. Einerseits sagte ich eingangs, dass ich herausfinden wollte, wie die Gesetze der Physik nachhaltige Energiegewinnung limitieren und z.B. Finanzierungsaspekte vernachlässigen. Auf dieser Basis sollte ich ohne weiteres die Landschaft industrialisieren und auch Solarfarmen mit berücksichtigen. Andererseits will ich den Leuten helfen, herauszufinden, was zwischen heute und 2050 machbar wäre. Und heute ist PV-Strom viermal teurer als der Marktpreis.

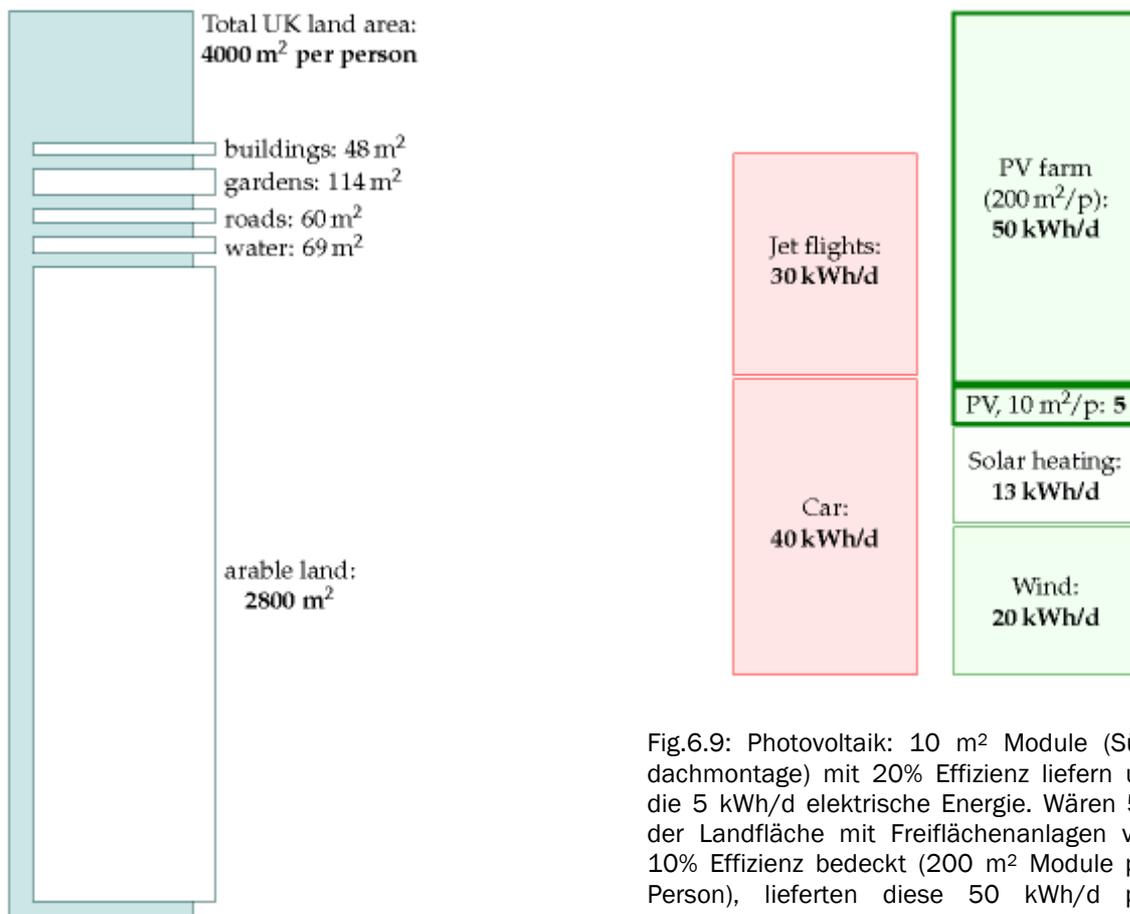


Fig.6.8: Landflächen pro Person in England.

Fig.6.9: Photovoltaik: 10 m² Module (Süddachmontage) mit 20% Effizienz liefern um die 5 kWh/d elektrische Energie. Wären 5% der Landfläche mit Freiflächenanlagen von 10% Effizienz bedeckt (200 m² Module pro Person), lieferten diese 50 kWh/d pro Person.

Ich finde es etwas unverantwortlich, diese Schätzungen in den Produktions-Stapel von Fig.6.9 aufzunehmen – 5% von England mit PV-Modulen zu überdecken scheint jenseits aller plausiblen Grenzen in vielerlei Hinsicht. Wenn wir ernsthaft so etwas durchziehen wollten, dann wäre es vielleicht besser, die Module in einem doppelt so sonnigen Land aufzustellen und einen Teil der Energie über Stromkabel heim zu schicken. Auf diese Idee werden wir in Kapitel 25 zurückkommen.

Sagen und Mythen

Ein PV-Modul herzustellen erfordert mehr Energie als es je liefern kann.

Falsch. Das **Energieausbeute-Verhältnis** (d.h. das Verhältnis zwischen der Energie, die ein System liefert, und der Energie, die zu seiner Herstellung erforderlich ist) eines dachmontierten, ins Stromnetz einspeisenden Solarsystems in Zentral- und Nordeuropa beträgt 4 (angenommene Lebenszeit von 20 Jahren), und über 7 in sonnigeren Ecken wie in Australien (Richards and Watt, 2007). Ein Energieausbeute-Verhältnis größer als eins bedeutet, das System ist „etwas Gutes“, energiemäßig betrachtet. Windturbinen mit 20 Jahren Laufzeit haben ein Energieausbeute-Verhältnis von 80.

Werden PV-Module immer effizienter mit fortschreitender Technik?

Ich bin sicher, dass PV-Module immer billiger werden; und auch, dass sie immer weniger Energieaufwand zu ihrer Herstellung benötigen, also ihr Energieausbeute-Verhältnis sich verbessert. Doch die PV-Abschätzungen dieses Kapitels sind unabhängig von ökonomischen Überlegungen, und auch von Energiekosten der Herstellung. PV-Module mit 20% Effizienz sind bereits nahe am theoretischen Limit (siehe dazu die Anmerkungen am Ende des Kapitels). Ich wäre überrascht, wenn die Abschätzungen dieses Kapitels über PV-Dachanlagen jemals eine signifikante Korrektur nach oben erführen.

Biomasse

All of a sudden, you know, we may be in the energy business by being able to grow grass on the ranch! And have it harvested and converted into energy. That's what's close to happening.

George W. Bush, Februar 2006

Alle verfügbaren Lösungen mit Bioenergie beinhalten, dass zuerst Grünzeug wächst und dann etwas damit passiert. Wie groß kann die Energie wohl sein, die das Grünzeug sammelt? Es gibt vier grundsätzliche Wege, Energie aus solarbetriebenen biologischen Systemen zu extrahieren:

1. Wir können ausgewählte Pflanzen anbauen und diese dann in speziellen Anlagen verbrennen, die Elektrizität oder Wärme oder beides produzieren. Das nennen wir „Kohlesubstitution“.
2. Wir können ausgewählte Pflanzen (Raps, Zuckerrohr oder Korn etwa) anbauen, diese in Ethanol oder Biodiesel verwandeln und dann als Treibstoff in Autos, Züge, Flugzeuge oder ähnliches füllen. Oder wir züchten gentechnisch veränderte Bakterien, Cyanobakterien oder Algen, die direkt Wasserstoff, Ethanol oder Butanol, oder sogar Elektrizität produzieren. Solche Ansätze nennen wir „Ölsubstitution“.
3. Wir können Nebenprodukte der Agrarwirtschaft in Energieanlagen verbrennen. Diese Nebenprodukte reichen von Stroh (Nebenprodukt von Müsliriegeln) bis Hühnerkacke (Nebenprodukt von McNuggets). Verbrennen von Nebenprodukten ist wieder Kohlesubstitution, nur benutzt man einfache Pflanzen, keine energetisch hochwertigen. Eine Energieanlage, die Nebenprodukte verbrennt, wird pro Hektar deutlich weniger Leistung liefern als ein optimierter Biomasse-Anbaubetrieb, doch hat sie den Vorteil, das Land nicht so einseitig zu nutzen. Methangas von Deponien zu verbrennen ist ein ähnlicher Weg der Energiegewinnung, doch ist der nur so lange nachhaltig, wie wir eine nachhaltige Quelle von Abfall zur Verfügung haben, den wir in die Deponien stecken können.

(Das meiste Methan-Deponiegas kommt von Speiseabfällen; in England werfen die Leute etwa 300 g Lebensmittel pro Person und Tag weg.) Verbrennen von Haushaltsmüll ist eine andere – kaum minder rezyklische – Art, Energie aus Biomasse zu gewinnen.

- Wir können Pflanzen anbauen und diese direkt an energie-hungrige Menschen oder Tiere verfüttern.

Bei all diesen Prozessen ist die erste Station der Energie in einem chemischen Molekül wie dem Kohlenwasserstoff in einer Grünpflanze. Wir erhalten also eine Abschätzung für alle diese Prozesse, indem wir die Leistung bestimmen, die durch diese erste Station fließen kann. In allen folgenden Schritten – ob sie nun Traktoren, Tiere, chemische Fabriken, Deponien oder Energieanlagen involvieren – kann die Energie nur noch abnehmen. Daher ist die Leistung¹⁰ der ersten Station eine theoretische Obergrenze für alles, was an Leistung durch jedwede pflanzenbasierte Energietechnologie verfügbar gemacht werden kann.



Fig.6.10: Miscanthus-Gras neben Dr. Emily Heaton, die 163 cm groß ist. In England kann Miscanthus 0,75 W/m² Leistung pro Flächeneinheit erzielen. Foto: Universität von Illinois.

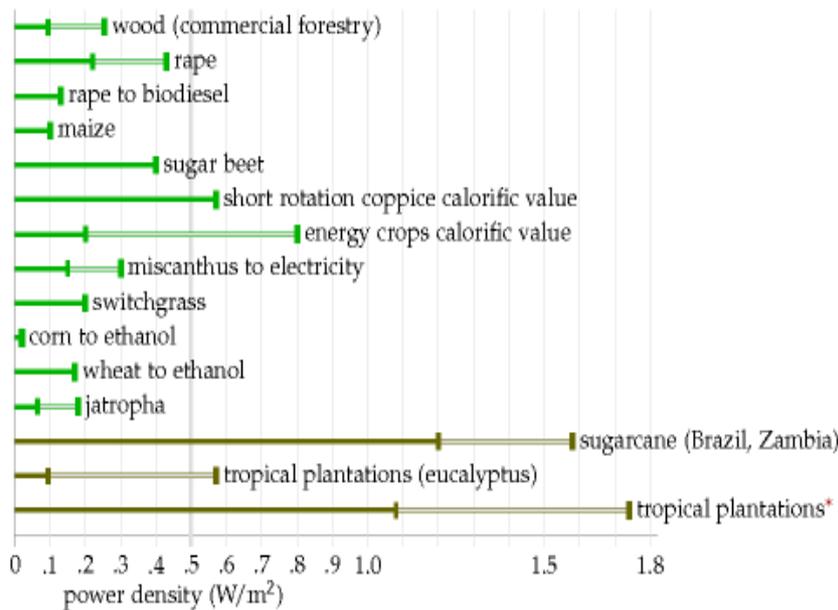


Fig.6.11: Energieproduktion pro Flächeneinheit, die verschiedene Pflanzen erreichen können. (Quellen vgl. Literaturhinweise) Leistungsdichten schwanken abhängig von Bewässerung u. Düngung; z.T. sind Bereiche angegeben, z.B. liegt Holz bei 0,095-0,254 W/m². Die drei letzten Balken stehen für tropische Pflanzen, der letzte geht von Genmodifikation, Düngung u. Bewässerung aus. Im Text benutze ich 0,5 W/m² als Mittelwert für die besten Energiepflanzen NW-Europas.

So lassen Sie uns einfach die Leistung dieser ersten Station abschätzen. (In Anhang D geht es mehr ins Detail und wir bestimmen den maximalen Beitrag jedes einzelnen Prozesses.) Die mittlere Sonnenlicht-Leistung liegt in England bei 100 W/m². Die effektivsten Pflanzen in Europa sind etwa 2%-effizient beim Umwandeln von solarer Energie in Kohlenwasserstoff. Das legt nahe, dass Pflanzen etwa 2 W/m² liefern könnten; jedoch geht ihre Effizienz bei höherem Lichtangebot zurück und die beste Ausbeute von Energiepflanzen in Europa liegt eher bei 0,5 W/m². Wenn wir 75% des Landes mit

¹⁰ Welche ja dem Energie(durch)fluss entspricht, wie oben hergeleitet ...

hochwertigem Grün überziehen, sind das 3000 m² pro Person, die wir der Bioenergie widmen. Das ist so viel Land, wie derzeit als Landwirtschaftsfläche benutzt wird. Also liegt – wenn man alle zusätzlichen Kosten für Anbau, Ernte und Verarbeitung des Grünzeugs vernachlässigt – das Maximum der verfügbaren Leistung bei

$$0,5 \text{ W/m}^2 \times 3000 \text{ m}^2 \text{ pro Person} = 36 \text{ kWh/d pro Person.}$$

Wow, das ist nicht allzu viel, bedenkt man die äußerst großzügigen Annahmen, die wir einbrachten, um eine möglichst hohe Zahl zu erhalten. Wenn Sie Biotreibstoff für Autos oder Flugzeuge aus dem Grün herstellen, sind alle weiteren Schritte in der Kette vom Feld bis zur Zündkerze unausweichlich ineffizient. Ich denke, es wäre sehr optimistisch zu hoffen, dass die summierten Verarbeitungsverluste in der Prozesskette lediglich 33% betragen. Sogar Verbrennen von Getreide in einem hochwertigen Brenner verliert 20% der Energie durch den Kamin. Darum kann sicherlich das gesamte Potenzial von Biomasse und Biotreibstoff nicht größer sein als 24 kWh/d pro Person. Und vergessen Sie nicht, wir wollen einen Teil des Anbaus auch als Futter für uns selbst und unsere tierischen Freunde benutzen.

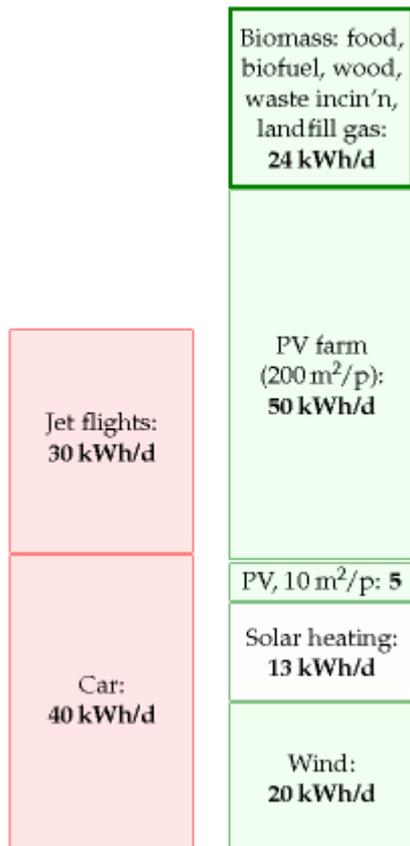


Fig.6.12: Solare Biomasse, einschließlich aller Formen von Biotreibstoff, Müllverbrennung und Lebensmittel: 24 kWh/d pro Person.

Könnte die Gentechnik Pflanzen hervorbringen, die Solarenergie effizienter in Chemikalien umwandeln? Das ist denkbar, doch habe ich keine wissenschaftliche Veröffentlichung gefunden, die für Europa Pflanzen vorhersagt, die eine Energieproduktion von mehr als 1 W/m² erreichen könnten.

Ich lege die 24 kWh/d pro Person auf den grünen Stapel, betone aber, dass ich das für überschätzt halte – ich denke, das wahre Maximum durch Biomasse erreichbarer Leistung wird kleiner sein wegen der Verluste bei Anbau und Verarbeitung.

Eine Schlussfolgerung ist klar geworden: Biotreibstoffe können nicht wesentlich beitragen – zumindest nicht in Ländern wie England, und nicht als Ersatz für Treibstoffeinsatz im Verkehr. Selbst wenn man die Hauptprobleme von Biotreibstoff –

dass ihre Herstellung mit Nahrungsmitteln konkurriert und dass der zusätzliche Aufwand für Landwirtschaft und Verarbeitung oft den Hauptteil der gewonnenen Energie wieder aufzehrt (Fig.6.14) – außen vor lässt, können pflanzliche Biotreibstoffe, in einem europäischen Land wie England, so wenig Leistung liefern, dass sie in meinen Augen kaum der Rede Wert sind.

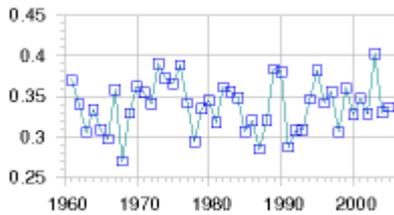
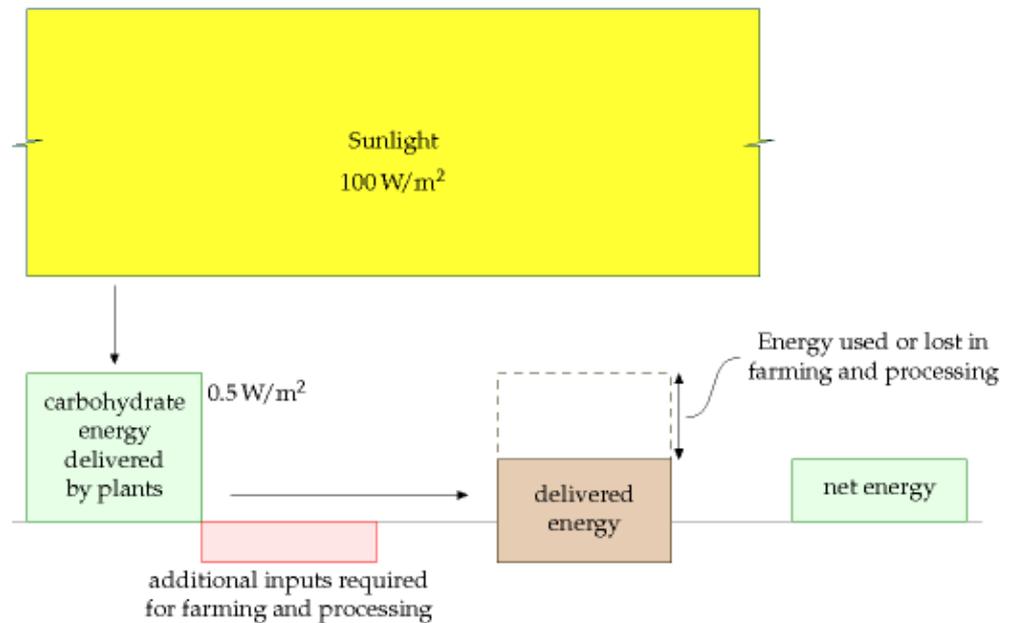


Fig.6.13: Sonne in Cambridge: Anzahl der Sonnenstunden im Jahresverlauf, ausgedrückt als Bruchteil an der Gesamtzahl der Tageslichtstunden.

Fig.6.14: Illustration der quantitativen Frage, die bei jeder Art von Biobrennstoff gestellt werden muss: Wie viel zusätzliche Energie ist für Anbau und Verarbeitung erforderlich? Wie hoch ist die gelieferte Energie? Wie hoch ist der Netto-Energie-Output? Oft kompensieren zusätzlicher Energieaufwand und Verarbeitungsverlust einen Großteil der Pflanzenenergie.



Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 42 **die Neigung zwischen Sonneneinstrahlung und Land:** Die Breite von Cambridge ist $\theta = 52^\circ$; die Intensität der Mittagssonne ist multipliziert mit $\cos \theta \approx 0,6$. Der exakte Faktor hängt von der Jahreszeit ab und schwankt zwischen $\cos(\theta + 23^\circ) = 0,26$ und $\cos(\theta - 23^\circ) = 0,87$.
- 42 **an einem durchschnittlichen Ort in England scheint die Sonne nur für etwa ein Drittel der Tageslicht-Stunden:** Die Highlands haben 1.100 h Sonnenschein pro Jahr – einen Anteil von 25%. Die besten Fleckchen in Schottland haben 1.400 h pro Jahr – 32%. Cambridge: 1.500 ± 130 h pro Jahr – 34%. Die Südküste Englands (der sonnigste Teil Großbritanniens): 1.700 h pro Jahr – 39%. [2rqloc] Daten für Cambridge von [2szckw]. Siehe auch Fig.6.16.
- 42 **die mittlere natürliche Sonnenschein-Leistung auf einem Quadratmeter Süddach in England bei etwa 110 W/m^2 , auf flachem Grund etwa bei 100 W/m^2 :** Quelle: NASA "Surface meteorology and Solar Energy" [5hrxls]. Sind Sie auch überrascht, dass so wenig Unterschied zwischen Süddach und Flachdach ist? Ich war's. Die Differenz ist tatsächlich nur 10% [6z9epq].

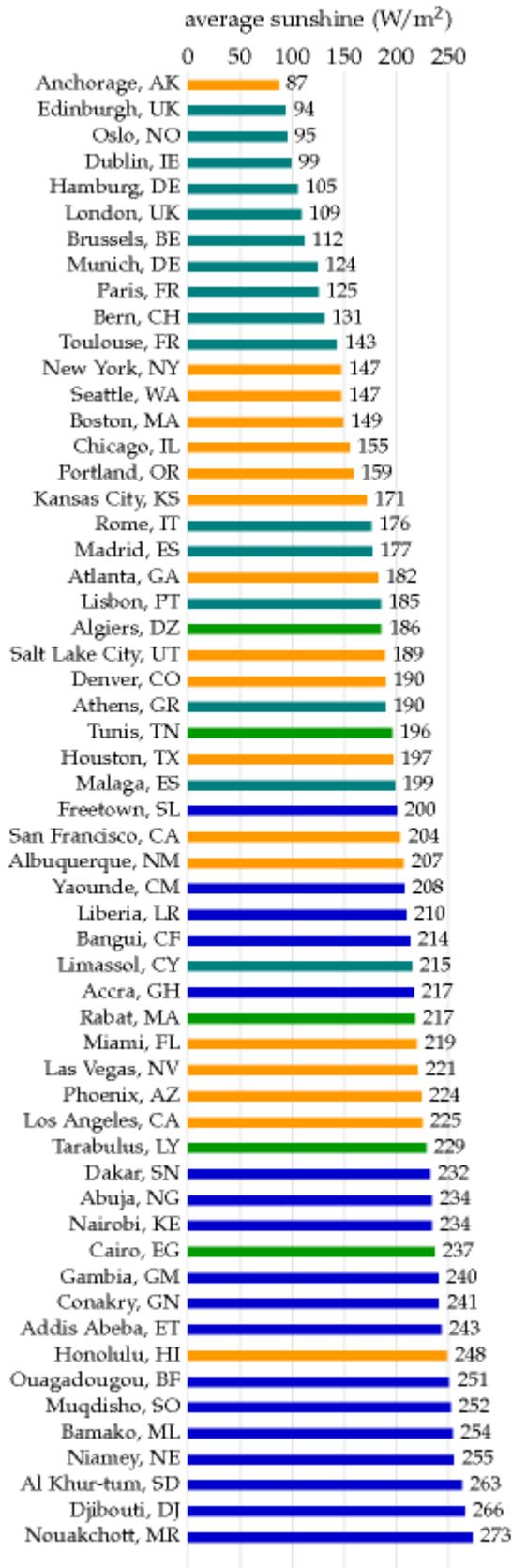


Fig.6.16: Mittlere Leistung von Sonnenlicht auf einer horizontalen Fläche an ausgesuchten Orten in Europa, Nordamerika und Afrika.



43 etwa 10 m² Module pro Person: Ich schätzte die Fläche der Süddächer folgendermaßen ab: Ich nahm die mit Gebäuden bebaute Landfläche pro Person (48 m² in

England, Tabelle I.6), davon $\frac{1}{4}$ als Anteil der nach Süden ausgerichteten Teilflächen und erhöhte das um 40 % wegen der Dachneigung. Das ergibt 16 m² pro Person. Da die Module üblicherweise nur in vorgegebenen Rechteckgrößen verfügbar sind, so dass immer unbedeckte Dachflächen übrigbleiben, also 10 m² Modulfläche¹¹.

- 44 **Die mittlere Leistung eines PV-Moduls:** Es geht die Sage um, dass PV-Module bei wolkigem Wetter nahezu genauso viel Leistung erzeugen wie bei Sonnenschein. Das ist einfach nicht wahr. An einem hellen aber wolkigen Tag konvertieren PV-Module und PV-Anlagen auch Energie, aber viel weniger: Die PV-Produktion fällt auf etwa ein Zehntel ab, wenn die Sonne hinter einer Wolke verschwindet (weil die Intensität des Sonnenlichtes auf 1/10 abfällt). Wie Fig.6.15 zeigt, ist die PV-Ausbeute ziemlich proportional zur Strahlungsintensität – jedenfalls wenn die Module bei 25 °C sind. Um die Dinge zu verkomplizieren hängt die Leistung auch von der Temperatur ab – heißere Module haben eine geringere Leistung (typ. 0,38% Verlust pro °C) – doch sieht man die Daten realer Module an, z.B. bei www.solarwarrior.com, kann man die Hauptaussage bestätigen: Der Output an einem Wolkentag ist deutlich geringer als bei Sonne. Dieser Punkt wird oftmals verschleiert durch die Aussagen von Modulherstellern, die angeben, wie die Effizienz von der Sonneneinstrahlung abhängt. „Die Module sind besonders effizient bei bewölkten Bedingungen“, heißt es da; das mag richtig sein, doch sollte Effizienz nicht mit Leistungs-Output verwechselt werden.

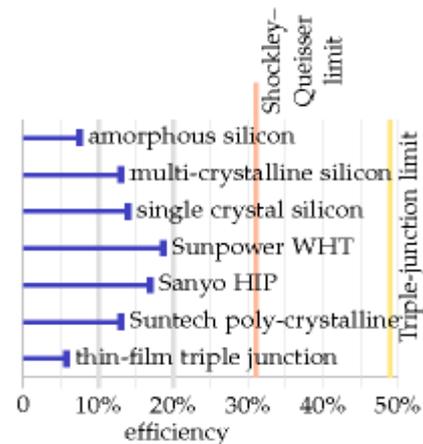


Fig.6.18: Effizienz derzeit am Markt verfügbarer PV-Module. Im Text wird angenommen, dass dachmontierte PV-Module 20%-effizient und Freiflächen-PV 10%-effizient sind. In Gegenden mit 100 W/m² Sonneneinstrahlung liefern 20%-effiziente Module 20 W/m².

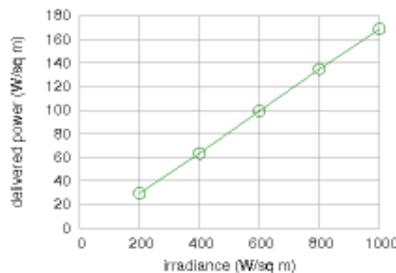


Fig.6.15: Leistung eines Sanyo HIP-210NKHE1 Modul als Funktion der Lichtintensität (bei 25 °C, bei angenommener Ausgangsspannung von 40 V). Quelle: Datenblatt www.sanyo-solar.eu.

- 44 **Typische PV-Module haben eine Effizienz von 10%, sehr aufwändige bis 20%:** Siehe Fig.6.18. Quellen: Turkenburg (2000), Sunpower www.sunpowercorp.com, Sanyo www.sanyo-solar.eu, Suntech.
- 44 **Ein Modul mit 30% Effizienz wäre schon sehr bemerkenswert.** Dieses Zitat ist von Hopfield and Gollub (1978), die über Module mit fokussierenden Spiegellinsen schrieben. Die theoretische Grenze für Standard „Single-Junction“ Module ohne Fokussierungen ist das Shockley-Queisser Limit. Es sagt aus, dass höchstens 31% der Sonnenlicht-Energie in Elektrizität verwandelt werden können (Shockley und Queisser, 1961). (Der Hauptgrund für diese Grenze ist eine Eigenschaft des PV-Halbleitermaterials, genannt Band-Gap, die die Energie eines optimal konvertierten

¹¹ Insbesondere die Wechselwirkung mit Dachfenstern, Dachgauben oder gegenseitigen Verschattungen verringert dieses Modulflächen-zu-Dachflächen-Verhältnis in der Praxis, der Abschlag von $6/16 = 37\%$ ist also eher gering angesetzt.

Photons bestimmt. Photonen mit geringeren Energien werden überhaupt nicht genutzt, Photonen darüber können eingefangen werden, doch ihr über das Band-Gap hinausgehender Energieanteil ist verloren).

Fokussierungen (Linsen oder Spiegel) können die Kosten (pro Watt) reduzieren und die Effizienz erhöhen. Das Shockley-Queisser Limit für Module mit Fokussierung liegt bei 41% Effizienz. Der einzige Weg, das Shockley-Queisser Limit zu übertreffen, ist, das Licht in verschiedene Wellenlängenanteile aufzuspalten und jeden Wellenlängenanteil mit seinem eigenen angepassten Band-Gap zu konvertieren. Dieser Ansatz heißt „Multiple-Junction“ PV. Unlängst wurde über Multiple-Junction Module mit Fokussierung berichtet, die eine Effizienz von 40% hatten. [217t6], www.spectrolab.com. July 2007, University of Delaware

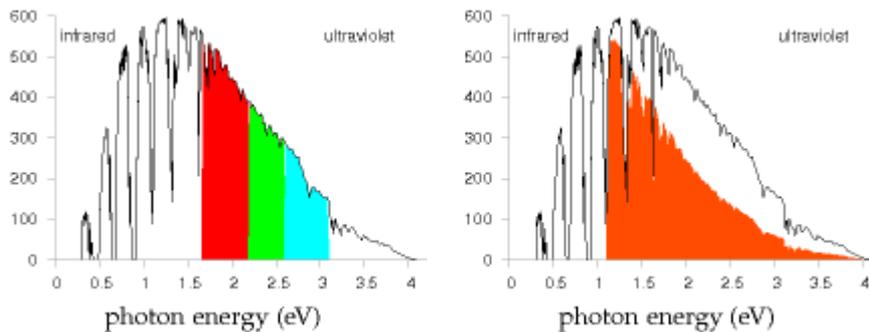


Fig.6.17: Ein Teil der Erklärung von Shockley und Queisser für die 31%-Effizienz-Beschränkung einfacher PV-Module. Links: Das Spektrum des Mittagssonnenlichts. Die vertikale Achse zeigt die Leistungsdichte in W/m^2 pro eV spektralem Intervall. Der sichtbare Bereich ist durch die farbige Hinterlegung gekennzeichnet. Rechts ist die eingefangene Energie eines PV-Halbleiters mit einem einzelnen Band-Gap von 1,1 eV als rotschraffierte Fläche dargestellt. Photonen mit Energien unter dem Band-Gap sind verloren. Ein Teil der Energie von Photonen über dem Band-Gap ist ebenfalls verloren; beispielsweise 50% der Energie eines 2,2 eV Photons. Weitere Verluste entstehen durch die unausweichlich stattfindende Strahlung rekombinierender Ladungen im Halbleiter.

44 Fig.6.5 Daten und Foto mit freundlicher Genehmigung von Jonathan Kimmitt.

44 Heliodynamics – www.hdsolar.com. Siehe Fig.6.19. Ein ähnliches System stellt Arontis her www.arontis.se.



Fig.6.19: eine kombinierte Wärme-und-Strom-Solaranlage von Heliodynamics. Eine Reflektorfläche von $32 m^2$ (etwas größer als die Seite eines Doppeldeckerbusses) liefert bis zu 10 kW Wärme und 1,5 kW Elektrizität. In einem sonnigen Land könnte eines dieser etwa eine Tonne schweren Geräte 60 kWh/d Wärme und 9 kWh/d Elektrizität produzieren. Das entspricht (pro qm Geräteoberfläche) mittleren Flüssen von $80 W/m^2$ Wärme und $12 W/m^2$ Strom. Diese Flüsse sind vergleichbar mit denen aus Standardgeräten zur solaren Heizung und PV-Modulen, doch dieses Konzept von Heliodynamics liefert die Leistung zu geringeren Kosten, denn das meiste Material ist nur einfaches Glas. Zum Vergleich: mittlerer Energiebedarf eines Europäers: 125 kWh/d.

45 der Solarpark in Mühlhausen: Diese 25-Hektar-Solarfarm soll 0,7 MW liefern (17.000 kWh pro Tag) .

Die U-Bahn-Station Stillwater Avenue in New York hat amorphe Silizium-Dünnschicht-Module in ihr Dach integriert, die $4W/m^2$ liefern. Das Nellis Solarkraftwerk in Nevada wurde im Dezember 2007 fertiggestellt. Es soll auf 56 Hektar 30 GWh pro

Jahr erzeugen, das sind $6\text{W}/\text{m}^2$ [5hzs5y]. Serpa Solar Power Plant, Portugal (PV), "das weltgrößte Solarkraftwerk" [39z5m5] [2uk8q8] hat der Sonne nachgeführte Module auf 60 Hektar d.h. 600.000 m^2 oder 0.6 km^2 , die 20 GWh pro Jahr, d.h. 2,3 MW im Mittel liefern sollen. Das ist eine Leistung pro Flächeneinheit von $3.8\text{W}/\text{m}^2$.

- 46 Die PV-Kapazität, die man braucht, um die 50 kWh/d pro Person zu liefern, ist über 100 mal höher als die derzeit weltweit installierte Photovoltaik: Für 50 kWh/d pro Engländer sind 125 GW mittlere Leistung oder 1.250 GW installierte Spitzenleistung erforderlich. Ende 2007 war weltweit eine Spitzen-Leistung von 10 GW installiert, die Zubaurate ist etwa 2 GW pro Jahr.
- 46 5% von England mit PV-Modulen zu überdecken scheint jenseits aller plausiblen Grenzen: Der Hauptgrund, das für unplausibel zu halten ist die Tatsache, dass die Engländer ihr Land lieber für Anbau und Erholung nutzen als für Solarparks. Weitere Bedenken liefert der Preis. Das ist kein Buch über Ökonomie, aber dennoch: Auf Basis der Preise für die bayerische Solarfarm würden die 50 kWh/d/p 91.000 € pro Person kosten. Läuft die Anlage 20 Jahre ohne weitere Kosten, ergeben sich 0,25 €/kWh Herstellungskosten. Weiterführende Literatur: David Carlson, BP solar [2ahecp].
- 48 in England werfen die Leute etwa 300 g Lebensmittel pro Person und Tag weg: Quelle: Ventour (2008).
- 48 Fig.6.10: In den USA kann man ohne Nitratdüngung mit Miscanthus 24 t/ha pro Jahr Trockenmasse erzeugen. In England wird von Ernten um die 12-16 t/ha pro Jahr berichtet. Trockener Miscanthus hat einen Heizwert von 17 MJ/kg, also korrespondiert die englische Ernte mit einer Leistungsdichte von $0,75\text{ W}/\text{m}^2$. Quelle: Heaton et al. (2004) und [6kqq77]. Die angenommene Ernte wird erst nach drei Jahren ungestörtem Wachstum erreicht.
- 48 Die effektivsten Pflanzen in Europa sind etwa 2%-effizient: Bei niedrigen Lichtintensitäten sind die besten britischen Pflanzen 2,4%-effizient in gutgedüngtem Boden (Monteith, 1977), doch fällt die Effizienz bei höherer Lichtintensität ab. Nach Turkenburg (2000) und Schiermeier et al. (2008) ist die Effizienz bei solarer Biomasse unter 1%. Hier sind ein paar Quellen zum Nachprüfen meiner Abschätzung von $0,5\text{ W}/\text{m}^2$ für pflanzliche Leistung in England: Die Royal Commission on Environmental Pollution schätzt die erreichbare Leistungsdichte von Energiepflanzen in England auf $0.2\text{ W}/\text{m}^2$ (Royal Commission on Environmental Pollution, 2004). Auf Seite 43 des "Royal Society's biofuels document" (Royal Society working group on biofuels, 2008), steht *Miscanthus* ganz oben auf der Liste und liefert etwa $0.8\text{ W}/\text{m}^2$ chemische Leistung. Im World Energy Assessment, herausgegeben von UNDP, schreibt Rogner (2000): "Nimmt man 45% Umwandlungs-Effizienz und Ernten von 15 t ofengetrocknetem Material pro ha und Jahr, benötigt man 2 km^2 Felder pro Megawatt (elektrisch) installierter Leistung bei einem Betrieb an 4000 Stunden pro Jahr." Das ergibt eine Leistung pro Flächeneinheit von $0.23\text{ W}(\text{el})/\text{m}^2$. (1W(el) bedeutet 1 Watt elektrischer Leistung.) Energy for Sustainable Development Ltd (2003) schätzt, dass schnellwachsende Holzpflanzen über 10 t trockenes Holz pro ha pro Jahr erzeugen können, was einer Leistungsdichte von $0.57\text{ W}/\text{m}^2$ entspricht. (Trockenes Holz hat einen Brennwert von 5 kWh pro kg.). Nach Archer and Barber (2004) kann die instantane Effizienz eines gesunden Laubbaumes in optimalen Bedingungen 5 % erreichen, doch über längere Zeit liegt die Energiespeicher-Effizienz moderner Pflanzen bei 0.5–1%. Archer and Barber denken, dass es möglich ist, durch genetische Modifikation die Speicher-Effizienz von Pflanzen zu verbessern, insbesondere von C4-Pflanzen, die

bereits von Natur aus einen besonders effizienten Photosyntheseablauf haben. C4-Pflanzen leben hauptsächlich in den Tropen und benötigen hohe Temperaturen, sie wachsen nicht bei Temperaturen unter 10°C. Beispiele von C4-Pflanzen sind Zuckerrohr, Mais, Sorghum, Finger- und Rutenhirse. Zhu et al. (2008) berechneten das theoretische Limit für die Konversionseffizienz zu 4,6% für C3-Photosynthese und 6% für C4-Photosynthese. Die höchsten praktisch erzielten Effizienzen wären 2,4% und 3,7% für C3 bzw. C4 und, nach Boyer (1982), die erzielten Mittelwerte in USA 3-4mal kleiner als diese Rekordwerte (das ist etwa 1% effizient). Ein Grund, warum die Pflanzen nicht das theoretische Limit erreichen, ist, dass sie nicht genug Kapazität haben, um all das einfallende Sonnenlicht vollständig zu nutzen. Beide Artikel (Zhu et al., 2008; Boyer, 1982) diskutieren Vorschläge für genetisches Engineering effizienterer Pflanzen.

- 48 **Figure 6.11.** Die Daten sind aus Rogner (2000) (Nettoenergieerträge von wood, rape, sugarcane, tropical plantations); Bayer Crop Science (2003) (rape to biodiesel); Francis et al. (2005) und Asselbergs et al. (2006) (jatropha); Mabee et al. (2006) (sugarcane, Brazil); Schmer et al. (2008) (switchgrass, marginal cropland in USA); Shapouri et al. (1995) (corn to ethanol); Royal Commission on Environmental Pollution (2004); Royal Society working group on biofuels (2008); Energy for Sustainable Development Ltd (2003); Archer and Barber (2004); Boyer (1982); Monteith (1977).
- 49 **Verbrennen von Getreide in einem hochwertigen Brenner verliert 20% der Energie durch den Kamin:** Quellen: Royal Society working group on biofuels (2008); Royal Commission on Environmental Pollution (2004).

7. Heizung und Kühlung

In diesem Kapitel wird untersucht, wie viel Leistung wir verbrauchen, um die Temperatur unserer Umgebung zu regeln – zu Hause und in der Arbeit – und zum Erwärmen oder Kühlen von Lebensmitteln, Getränken, Wäsche oder Geschirr.



Fig.7.1: Eine Herde neuer Häuser

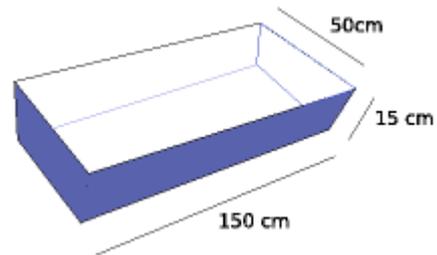


Fig.7.2: Wasser in einer Badewanne

Brauchwassererwärmung

Die größte Menge Warmwasser im Haushalt dürfte durch Baden, Duschen, Geschirrspülen oder Wäschewaschen verbraucht werden – das hängt vom persönlichen Lebensstil ab. Schätzen wir zuerst den Energieverbrauch eines heißen Bades ab:

Das Volumen einer Badewanne sei 50 cm x 15 cm x 150 cm \approx 110 Liter. Die Wassertemperatur liege bei 50°C und das Wasser komme mit 10°C ins Haus. Die Wärmekapazität von Wasser, die angibt, wie viel Energie erforderlich ist, um es zu erwärmen, ist 4.200 J pro Liter pro °C. Also ist die erforderliche Energie, um dieses Wasser um 40°C zu erwärmen:

$$4200 \text{ J/l/}^\circ\text{C} \times 110 \text{ l} \times 40 \text{ }^\circ\text{C} \approx 18 \text{ MJ} \approx 5 \text{ kWh.}$$

Ein Bad zu nehmen verbraucht also 5 kWh. Zum Vergleich: Zum Duschen (mit 30 Liter) benötigt man etwa 1,4 kWh.

Hot water:
12 kWh/d

Fig.7.5: Warmwasser insgesamt zu Hause und am Arbeitsplatz – einschließlich Baden, Duschen, Wäsche, Kochen, Geschirrspülen – macht etwa 12 kWh/d/p aus. Diese Box ist nicht schattiert, um zu zeigen, dass es sich um niederstufige thermische Energie handelt.

Wasserkocher und Kochherde

England hat als zivilisiertes Land eine häusliche Stromversorgung mit 230 Volt. Daran kann man elektrische Wasserkocher anschließen, um ein bis zwei Liter Wasser in wenigen Minuten abzukochen. Ihre Leistung liegt bei 3 kW. Warum 3 kW? Weil das die größte Leistung ist, die eine 230 V Steckdose abgeben kann, ohne die erlaubten 13 A zu überschreiten. In Ländern mit 110 V Netz dauert es doppelt so lang, eine Tasse Tee zu machen.

Wenn ein Haushalt den Wasserkocher 20 Minuten am Tag in Betrieb hat, macht das eine mittlere Leistungsaufnahme von 1kWh pro Tag (Ich werde die folgenden Punkte „pro Haushalt“ abschätzen und 2 Personen pro Haushalt annehmen).

Eine kleine Platte eines Elektroherdes hat dieselbe Leistung wie ein Toaster: 1 kW. Schnellkochplatten leisten 2,3 kW. Benutzt man 2 Herdplatten für eine halbe Stunde täglich auf voller Stufe, sind das 1,6 kWh pro Tag.

Ein Mikrowellenherd hat seine Leistung meist auf der Vorderseite stehen: meiner sagt 900 W, verbraucht aber tatsächlich 1,4 kW. Benutzt man die Mikrowelle 20 Minuten täglich, sind das **0,5 W pro Tag**.

Die Bratröhre braucht mehr: etwa 3 kW bei voller Leistung. Benutzt man die Bratröhre eine Stunde täglich, und ist sie für die Hälfte der Zeit auf ihrer vollen Leistung, dann sind das **1,5 kWh pro Tag**.

Microwave:
1400 W peak

Fridge-freezer:
100 W peak,
18 W average



Fig.7.3: ein Heiz- und ein Kühlgerät



Fig.7.6: 2kW Elektroofen

Gerät	Leistung	Zeit pro Tag	Energie pro Tag
Kochen :			
-Wasserkocher	3kW	1/3 h	1 kWh/d
-Mikrowelle	1,4 kW	1/3 h	0,5 kWh/d
-Elektroherd	3,3 kW	1/2 h	1,6 kWh/d
-Bratröhre	3 kW	1/2 h	1,5 kWh/d
Wäsche:			
-Waschmaschine	2,5 kW		1 kWh/d
-Wäschetrockner	2,5 kW	0,8 h	2 kWh/d
-Trockenschrank			0,5 kWh/d
-Wäscheleine			0 kWh/d
Geschirrspüler	2,5 kW		1,5 kWh/d
Kühlen:			
-Kühlschrank	0,02 kW	24 h	0,5 kWh/d
-Gefriertruhe	0,09 kW	24 h	2,3 kWh/d
-Klimaanlage	0,6 kW	1 h	0,6 kWh/d

Tabelle 7.4: Energieverbrauchswerte für Heiz- und Kühlgeräte, pro Haushalt

heiße Wäsche und heiße Teller

Waschmaschinen, Geschirrspüler oder Wäschetrockner verbrauchen allesamt um die 2,5 kW, wenn sie laufen. Eine Waschmaschine braucht etwa 80 Liter Wasser pro Füllung, die Energiekosten liegen bei 1 kWh bei einer Temperatureinstellung von 40°C. Hängt man die Wäsche in einen Trockenschrank¹², statt den Wäschetrockner zu benutzen, wird ebenfalls Wärme benötigt, um das Wasser zu verdunsten – doch nur etwa 1,5 kWh pro Ladung, statt 3 kWh.

¹² Die in Deutschland weitgehend unbekanntes Airing Cupboards / Trockenschränke – mit Heizung ausgestattete Schränke zum Trocknen von Kleidung – sind in England weit verbreitet und tragen entsprechend zum Energieverbrauch bei.

Zählen wir alle Schätzungen im Zusammenhang mit Warmwasser zusammen, kommen wir auf **12 kWh pro Tag pro Person**.

Warmluft – zu Hause und am Arbeitsplatz

Braucht man mehr Energie zur Bereitstellung von heißem Wasser und heißem Essen oder zum Erwärmen von Luft durch Radiatoren in Gebäuden?

Eine gute Möglichkeit zur Abschätzung der täglich benötigten Energie für Warmluft ist die Betrachtung elektrischer Heizungen, denn deren Leistungsangaben sind uns vertrauter. Die Leistung eines kleinen Heizlüfters ist 1 kW (24 kWh pro Tag). Im Winter benötigt man davon einen pro Person, um nicht zu frieren, im Sommer keinen. Im Mittel wären das dann 12 kWh pro Tag, die unbedingt benötigt werden. Doch die meisten Menschen benutzen mehr als unbedingt nötig und halten mehrere Räume gleichzeitig warm (Küche, Wohnzimmer, Flur, Bad etwa). Eine plausible Hausnummer für Warmluft-erzeugung wäre also etwa das Doppelte davon: **24 kWh pro Tag pro Person**.

Der dieses Kapitel begleitende Anhang E enthält eine detailliertere Betrachtung der Wärmeströme in Gebäuden. Dieses Modell ermöglicht Vorhersagen zu Energieeinsparpotenzialen verschiedener Maßnahmen wie Verringerung der Raumtemperatur am Thermostaten, Doppelverglasung von Fenstern und so weiter.

Heizung im Freien und anderer Luxus

Es gibt einen wachsenden Trend zu Heizschirmen, die auch die Luft draußen erwärmen. Diese haben eine typische Leistung von 15 kW. Benutzt man diese ein paar Stunden am Abend, sind das zusätzliche **30 kWh pro Tag**.

Ein etwas bescheidenerer Luxus ist eine beheizte Bettdecke. Für ein Doppelbett benötigt die 140W; schaltet man sie eine Stunde an, sind das **0,14 kWh**.

Kühlung

Kühlschränke und Gefriertruhen

Wir kontrollieren nicht nur die Temperaturen von Warmwasser und der Warmluft, mit der wir uns umgeben, sondern auch die der kühlenden Schränke, die wir in unsere heißen Häuser quetschen. Meine Kühl-Gefrierkombination, in Fig.7.3 gezeigt, braucht durchschnittlich 18 W, das sind grob 0,5 kWh/d.

Klimaanlagen – Air Condition

In Ländern, in denen die Außentemperaturen über 30°C steigen, betrachtet man Klimaanlage als Notwendigkeit, und die Energiekosten dieser Temperaturkontrolle können ziemlich hoch sein. Doch dieses Buch handelt von den Verhältnissen in England, wo die Temperaturen selten Notwendigkeit für Klimaanlage bieten (Fig.7.8).

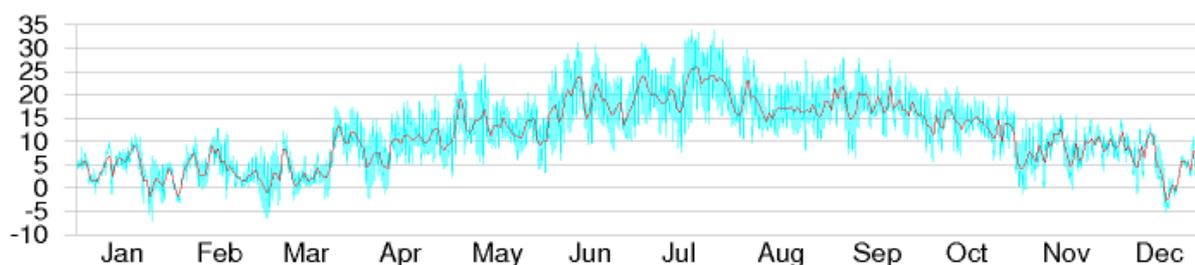


Fig.7.8: Temperatur in Cambridge, in °C, täglich (rot) und halbstündlich (blau) über das Jahr 2006.

Eine ökonomische Art des Air-Conditioning ist eine Luft-Wärmepumpe. Eine elektrische Anlage in Fenstermontage für einen einzelnen Raum braucht 0,6 kW Elektrizität und liefert am Wärmetauscher 2,6 kW Kühlleistung. Um einen Verbrauchswert für England abzuschätzen, nehme ich an, dass die Anlage an 30 Tagen des Jahres je 12 Stunden in Betrieb ist. An den betriebenen Tagen braucht sie 7,2 kWh, gemittelt übers Jahr **0,6 kWh/d**.

Die Abschätzung dieses Kapitels für die Energiekosten für Kühlung – 12kWh/d pro Person – beinhaltet Klimaanlage und häusliche Kühlschränke. Auch Lebensmittel auf ihrem Weg vom Feld zum Einkaufskorb sind häufig gekühlt. Die Energiekosten der Nahrungskette werden aber erst später betrachtet, in Kapitel 15.

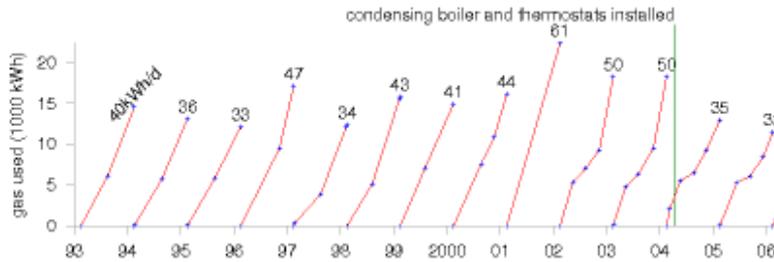


fig.7.10: mein häuslicher Gasverbrauch kumulativ, jedes Jahr von 1993 bis 2005, in kWh. Die Nummer oben an den Jahreslinien ist die mittlere Verbrauchsrate, in kWh pro Tag. Wenn Sie wissen wollen, was 2007 geschah, weiterlesen!

Gesamtbedarf Heizung und Kühlung

Unsere grobe Abschätzung der Gesamtenergie, die für Heizung und Kühlung (einschließlich Wohnung, Arbeitsplatz, Kochen) erforderlich ist, liefert uns **37 kWh/d pro Person** (12 für Warmwasser, 24 für Warmluft, 1 für Kühlung).

fig.7.7: (links) Heiße Luft insgesamt – einschließlich häusliche und berufliche Heizung – um die 24 kWh/d/p.

fig.7.9: (Mitte) Kühlung insgesamt, einschließlich Kühlschrank (Kühl-Gefrierkombination) und ein wenig Klimaanlage im Sommer – 1 kWh/d.

fig.7.11: (rechts) Heizen und Kühlen, etwa 37 Einheiten. Ich entfernte die Hintergrundfarbe für diese Box, um anzudeuten, dass sie für Leistung steht, die durch niederstufige Wärmeenergie geliefert werden kann.



Ob diese Abschätzung die richtige Größenordnung trifft, überprüfe ich mit einem Blick auf meinen privaten Gasverbrauch, der – gemittelt über 12 Jahre – 40 kWh pro Tag beträgt (Fig.7.10). Damals dachte ich, ich wäre ein ziemlich sparsamer Heizungs-

benutzer, doch kümmerte ich mich wenig um meinen aktuellen Energieverbrauch. Kapitel 21 deckt auf, wie viel Energie ich sparte, nachdem ich anfang, darauf zu achten.

Da das Heizen ein großer Beitrag zum Verbrauchsstapel ist, mache ich die Gegenprobe mit der landesweiten Statistik. Der englische Durchschnitt des häuslichen Verbrauchs für Heizung, Wasser und Kochen lag im Jahr 2000 bei 21 kWh pro Tag pro Person, und der Verbrauch im Dienstleistungssektor für Heizung, Kühlung, Verpflegung und Warmwasser bei 8,5 kWh/d/p. Das Heizen am Arbeitsplatz schätzen wir über die Gasrechnung der Universität von Cambridge von 2006-7 ab und erhalten 16 kWh/d pro Angestellten. Zählen wir diese Zahlen zusammen, ergibt das $21 + 8,5 + 16 \approx 45$ kWh/d, wenn man die Universität Cambridge als durchschnittlichen Arbeitsplatz betrachtet. Gut, das ist hinreichend nahe an unserer ersten Abschätzung von 37 kWh/d.

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 57 **Die Bratröhre braucht mehr: etwa 3 kW:** Es gibt offensichtlich einen weiten Bereich. Viele Bratröhren haben eine Maximalleistung von 1,8 bis 2,2 kW. Spitzenöfen reichen bis 6 kW. Der *Whirlpool AGB 487/WP 4 Hotplate Electric Oven Range* hat z.B. eine 5,9 kW Bratröhre und vier 2,3 kW Kochplatten. www.kcmltd.com/electric_oven_ranges.shtml, www.1stforkitchens.co.uk/kitchenovens.html
- 57 **ein Trockenschrank... benötigt... etwa 1,5 kWh pro Ladung:** Ich habe das ausgerechnet, indem ich meine Kleidung wog: Eine Ladung Wäsche, 4 kg trocken, wog nach Entnahme aus meiner Bosch Waschmaschine 2,2 kg mehr (auch nach dem Schleudern). Die Verdunstungs-Wärmeenergie des Wassers bei 15 Grad ist etwa 2.500 kJ/kg. Für die Umrechnung in einen Tagesverbrauch nahm ich an, eine Person hätte alle 3 Tage eine Ladung Wäsche, und dass das Trocknen im Winterhalbjahr wertvolle Wärme dem Haus entzieht. (Im Sommer liefert der Trockenschrank einen kleinen Klimatisierungseffekt, weil das verdunstende Wasser das Haus kühlt.)
- 60 **Der englische Durchschnitt des häuslichen Verbrauchs lag bei 21 kWh/d/p, und der Verbrauch im Dienstleistungssektor bei 8,5 kWh/d/p:** Quelle: Dept. of Trade and Industry (2002a).
- 60 **Die Gasrechnung der Universität von Cambridge von 2006-7 liefert 16 kWh/d pro Angestellten:** Der Gas- und Ölverbrauch der Universität Cambridge (ohne Kollegräume) war 76 GWh. Ich definierte die Universität als Arbeitsplatz für 13.300 Menschen (8602 Festangestellte und 4667 Post-Docs). Der Stromverbrauch war übrigens bei 99,5 GWh. Quelle: University utilities report.

8. Wasserkraft

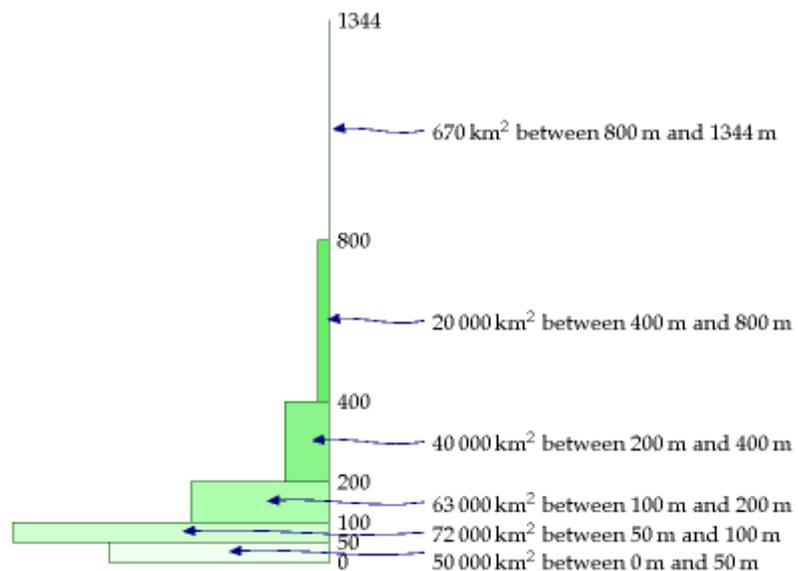


Fig.8.1: Nanty-Moch Damm, Teil eines 55 MW Wasserkraftwerks in Wales. Foto von Dave Newbould www.origins-photography.co.uk



Um aus Wasserkraft Strom zu erzeugen, braucht man Höhe und man braucht Regen. Lassen Sie uns die Gesamtenergie für den gesamten Regen, der auf Meeressniveau hinabfließt, abschätzen. Für diese Schätzung teile ich England in zwei Regionen: die tiefergelegenen, trockeneren Gegenden, die sog. „Lowlands“ und die höhergelegenen, niederschlagsreichen, die „Highlands“. Ich wähle Bedford und Kinlochewe als Repräsentanten der beiden Gegenden.

Fig.8.2: Landhöhen in England. Die Rechtecke zeigen, wie viel Landfläche auf jeder Höhe liegt.



Betrachten wir zuerst die „Lowlands“. Zur Bestimmung der gravitativen Leistung von Lowlands-Regen multiplizieren wir den Regen von Bedford (584 mm pro Jahr) mit der Dichte von Wasser (1000 kg/m^3), der Erdanziehung ($g = 10 \text{ m/s}^2$) und der typischen Höhe der „Lowlands“ über Meeresspiegel, sagen wir 100 m. Pro Flächeneinheit erhalten wir so $0,02 \text{ W/m}^2$. Das ist die Leistung pro Flächeneinheit Land, auf die Regen fällt.

Wenn wir das mit der Fläche pro Person (2.700 m^2 , wenn die „Lowlands“ gleichmäßig auf alle 60 Millionen Engländer verteilt werden) vergleichen, ergibt sich eine mittlere Leistung von etwa 1 kWh pro Tag pro Person. Das ist das absolute obere Limit für Wasserkraft, wenn jeder Fluss aufgestaut und jeder Tropfen genutzt würde.

Realistischerweise würden wir natürlich nur Flüsse mit genügend Höhendifferenz aufstauen, deren Einzugsgebiet viel kleiner ist als das gesamte Land. Ein Großteil des Wassers verdunstet, bevor er eine Turbine trifft, und kein Wasserkraftwerk kann die gesamte potentielle Energie des Wassers umwandeln. Das steckt enge Grenzen für die Wasserkraft in den „Lowlands“. Die Leute mögen gerne Wasserräder betreiben und kleinere Kraftwerkskonzepte umsetzen, aber solche Anlagen werden nie mehr als 1 kWh pro Tag pro Person liefern können.

Betrachten wir nun die „Highlands“. Kinlochewe ist ein regnerischer Fleck: 2.278 mm im Jahr, viermal soviel wie in Bedford. Die Höhenunterschiede sind hier ebenfalls größer - weite Teile liegen oberhalb 300 m. Insgesamt führt das zu einer zwölfwachen Leistung pro Quadratmeter, also zu 0,24 W/m². Verteilt man die Wasserkraft der „Highlands“ großzügig unter allen Engländern (zu 1.300 m² pro Person), ergibt das eine obere Schranke von 7 kWh pro Tag pro Person, wie in der „Lowland“-Betrachtung wieder ohne Berücksichtigung von Verdunstung und Verlusten.

Was schätzen wir, ist das plausible praktische Limit? Nehmen wir 20% davon - 1,4 kWh/d und runden es auf, weil ja auch in den „Lowlands“ ein gewisser Anteil möglich ist: **1,5 kWh pro Tag pro Person.**

Aktuell wird Wasserkraft im Umfang von 0,2 kWh/d pro Person in England genutzt, d.h. es wäre eine Versiebenfachung der Kraftwerksanlagen erforderlich, um diese 1,5 kWh/d/p zu realisieren.

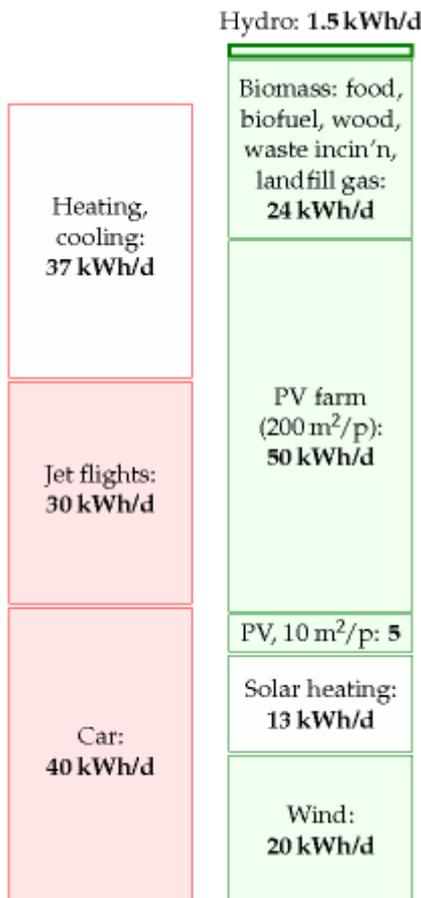


Fig.8.3: Elektrizität aus Wasserkraft



Fig.8.4: Ein 60 kW Wasserrad

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

61 Regen Statistik vom BBC Wetterzentrum

62 **zwölffachen Leistung pro Quadratmeter, also zu 0,24 W/m²:** Das kann man mit den aktuellen Leistungsdichten des Loch Sloy Wasserkraftwerks nachprüfen (Ross, 2008). Das Einzugsgebiet von Loch Sloy ist etwa 83 km², der Regen hier liegt etwa bei 2.900 mm pro Jahr (etwas höher als die 2.278 mm/y von Kinlochewe); und der Elektrizitäts-Output im Jahr 2006 war 142 GWh im Jahr, was einer Leistungsdichte von **0,2W pro m²** Einzugsgebiet entspricht. Loch Sloy hat eine Wasserfläche von etwa 1,5 km², das Wasserkraftwerk produziert also mit einer Leistungsdichte pro Einheits-Seefläche von **11 W/m²**. Die Hänge, Aquädukte und Tunnel, die das Wasser ins Loch Sloy bringen, wirken also wie ein 55-facher Leistungsverstärker.

62 **Aktuell wird Wasserkraft im Umfang von 0,2 kWh/d pro Person in England genutzt**
Quelle: MacLeay et al. (2007). Im Jahr 2006 erzeugten große Wasserkraftwerke insgesamt 3.515 GWh (Kraftwerkskapazität 1.37 GW); kleine Wasserkraftwerke 212 GWh (0,01 kWh/d/p) (Kapazität 153 MW). Im Jahr 1943, als der Bau von Wasserkraftwerken voll im Gange war, schätzten Ingenieure von North of Scotland Hydroelectricity Board, dass die Schottischen Highlands 6,3 TWh pro Jahr in 102 Anlagen produzieren könnten – das wären 0,3 kWh/d pro Person in England (Ross, 2008). Glendoe, das erste neue große Wasserkraft-Projekt Englands seit 1957, wird zusätzliche Kapazität von 100 MW schaffen und 180 GWh pro Jahr liefern können. Glendoe's Einzugsgebiet umfasst 75 km², seine Leistungsdichte ergibt sich somit zu **0.27 W pro m²** Einzugsgebiet. Glendoe sollte "groß genug sein, um Glasgow zu versorgen". Verteilt man jedoch seine 180 GWh pro Jahr auf die 616 000 Einwohner von Glasgow, erhalten wir nur 0.8 kWh/d pro Person. Das sind nur 5% der benötigten mittleren Energie von kWh/d pro Person. Diese 20-fache Übertreibung kommt daher, dass auf Glendoe's Spitzen-Output statt auf den 5mal kleineren Mittelwert abgestellt und über Haushalte statt Gesamtverbrauch diskutiert wurde (siehe Seite 346).

9. Licht

Zimmerbeleuchtung

Die hellsten Glühbirnen für den Wohnbereich brauchen 250 W, Nachttischlampen brauchen 40 W. In einer altmodischen Glühwendellampe wird das meiste dieser Leistung in Wärme anstatt in Licht verwandelt. Eine Leuchtstoffröhre kann dieselbe Lichtmenge mit einem Viertel der Leistung produzieren.

Wie viel Leistung benötigt ein mäßig wohlhabender Mensch für seine Beleuchtungsanlagen? Meine grobe Abschätzung ist, basierend auf Tabelle 9.2, dass ein typischer Zweipersonenhaushalt mit einem Mix aus Hoch- und Niedrigenergie-Leuchtmitteln um die 5,5 kWh pro Tag bzw. 2,7 kWh/d/p verbraucht. Ich nehme weiter an, dass jeder an seinem Arbeitsplatz eine ähnliche Beleuchtung wie seine Kollegen unterhält; mit der Annahme, dass jeder am Arbeitsplatz 1,3 kWh/d nutzt, kommen wir auf **4 kWh/d pro Person**.

Straßenbeleuchtung und Ampeln

Müssen wir öffentliche Beleuchtung hinzunehmen, um eine adäquate Abschätzung zu erhalten, oder dominiert die Zimmerbeleuchtung das Beleuchtungsbudget? Straßenlampen brauchen in der Tat 0,1 kWh/d/p, und Ampeln nur 0,005 kWh/d/p – beides vernachlässigbar gegen die Zimmerbeleuchtung zu Hause und am Arbeitsplatz.

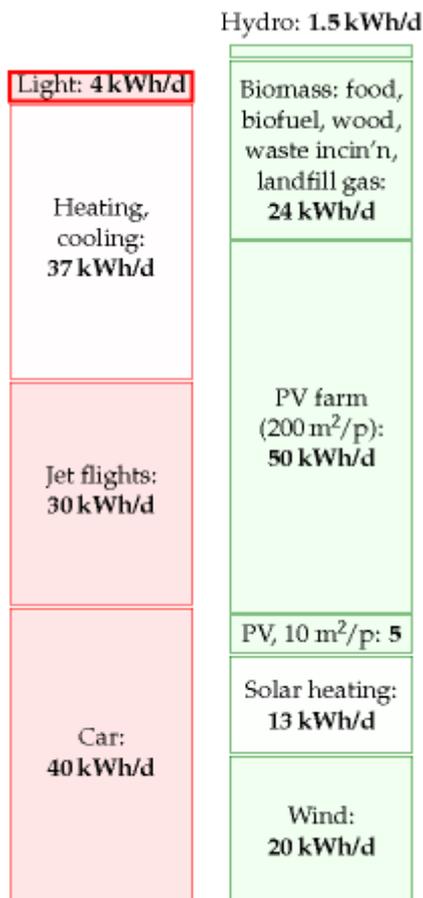


Fig.9.1: (links) Beleuchtung – 4 kWh pro Tag pro Person

Gerät	Leistung	Zeit pro Tag	Energie pro Tag pro Haushalt
10 Glühwendellampen	1 kW	5 h	5 kWh
10 Energiesparlampen	0,1 kW	5 h	0,5 kWh

Tabelle 9.2: Elektrischer Verbrauch für häusliche Beleuchtung. Eine plausible Gesamtsumme ist 5,5 kWh pro Haushalt pro Tag; ein ähnlicher Wert für den Arbeitsplatz; vielleicht 4 kWh pro Tag pro Person.

Was ist mit anderen öffentlichen Beleuchtungen wie Verkehrs- und Hinweisschildern zum Beispiel? Davon gibt es weniger als Ampeln, und diese waren weit unter unserem Radar. Wir müssen also unsere Gesamtschätzung von 4 kWh/d pro Person nicht ändern.

Scheinwerfer im Verkehr

In einigen Ländern ist es Pflicht, auch bei Tag die Scheinwerfer einzuschalten. Wie viel zusätzliche Leistung ist dazu erforderlich, im Vergleich zur ohnehin erforderlichen Leistung für das Fahren selbst? Sagen wir, das Auto hätte insgesamt 100 W mit seinen vier Lichtern. Deren Strom wird erzeugt durch einen 25%-effizienten Motor, der eine 55%-effiziente Lichtmaschine antreibt, also verbrauchen sie **730 W**. Zum Vergleich: Ein typisches Auto, das mit 50 km/h bei 8,5 l/100km Verbrauch unterwegs ist, braucht im Mittel **42.000 W**. Die zusätzliche Beleuchtung benötigt also 2% zusätzliche Leistung.

Wie steht es mit zukünftigen Elektroautos? Diese brauchen typischerweise 5.000 W. Zusätzliche 100 W für Beleuchtung schlagen auch hier mit 2% zu Buche. Die Leistungsaufnahme würde geringer, wenn wir auf LED umrüsten würden, doch wenn wir noch mehr Aufmerksamkeit darauf verwenden, kommen wir schnell auf einen schweren Fall von „Jeder kleine Schritt zählt“-eritis.

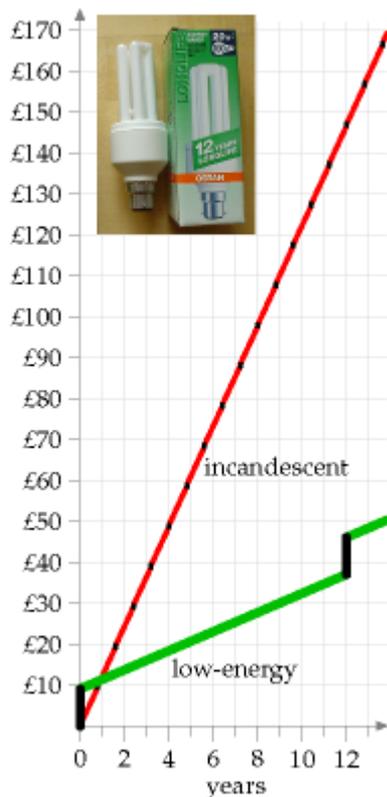


Fig.9.3: Kumulative Gesamtkosten einer traditionellen 100W-Glühbirne (3 Stunden pro Tag) verglichen mit einer Energiesparlampe Typ Osram Dulux Longlife. Annahmen: Stromkosten 10 Pence pro kWh, Leuchtmittel traditionell 45 Cent, Energiesparlampe 9 € (Ich weiß, man kann sie billiger finden, aber die Grafik zeigt, dass sie sogar bei diesem Preis deutlich ökonomischer ist)



Fig.9.4: Philips 11W neben Omicron 1,3W LED

Die Ökonomie von Energiesparlampen

Ich vermeide es generell, über Ökonomie zu diskutieren, aber für Glühbirnen möchte ich eine Ausnahme machen. Osram behauptet, mit seiner 20W Sparlampe dieselbe Lichtausbeute zu erreichen wie eine 100W-Glühwendellampe. Zudem soll die Lebensdauer 15.000 Stunden betragen (oder „12 Jahre“ bei 3 Stunden pro Tag). Dagegen hält eine durchschnittliche Glühwendellampe nur 1.000 Stunden. Innerhalb eines 12-Jahres-

Zeitraums hat man also die Wahl zwischen 15 Glühwendellampen und 1500 kWh Strom (Kosten etwa 150€) oder einer Sparlampe und 300 kWh Strom (Kosten etwa 30€).

Sollte ich warten, bis die alte Lampe kaputt ist, bevor ich umstelle?

Es fühlt sich nach Vergeudung an, oder? Jemand steckte Ressourcen in die Herstellung der Glühwendellampe; sollten wir diese Investition nicht amortisieren, indem wir die Lampe benutzen bis sie verbraucht ist? Doch die ökonomische Antwort ist eindeutig: *Eine alte Glühbirne weiterzubedenutzen heißt, gutes Geld dem schlechten hinterher zu werfen.* Wenn Sie eine zufriedenstellende Energiesparlampe finden, sollten sie damit sofort eine alte Glühbirne ersetzen.

Wie steht es mit dem Quecksilber in den Sparlampen? Sind LEDs besser als Halogenlampen?

Forscher sagen, dass bald LEDs energieeffizienter sein werden als Kompakt-Halogenlampen. Die Effizienz von Lampen wird in Lumen pro Watt gemessen. Ich verglich die Zahlen bei meinen letzten Einkäufen: Die Helligkeit einer Philips Genie 11W Halogenlampe (Fig.9.4) beträgt 600 Lumen, das ist eine Effizienz von 55 Lumen pro Watt; Glühwendellampen liefern 10 Lumen pro Watt; die Omicron 1,3W, die aus 20 LEDs zusammengesetzt ist, liegt bei 46 Lumen, also 35 Lumen pro Watt. Sie ist damit nahezu so effizient wie die Halogenlampe. Die LED-Produzenten müssen aber noch etwas aufholen. Die Lebensdauer einer LED-Lampe liegt bei 50.000 Stunden, achtmal höher als bei Halogen. Während ich das schreibe, sehe ich bei www.cree.com LEDs mit 100 Lumen pro Watt im Angebot. Zukünftige LEDs sollen planmäßig über 150 Lumen pro Watt liefern [ynjzej]. Ich erwarte, dass innerhalb weniger Jahre sowohl wegen der besseren Energieeffizienz als auch wegen der Vermeidung von Quecksilber-Verschmutzung LEDs die erste Wahl sein werden.

Lampentyp	Effizienz (Lumen/W)
Glühwendel	10
Halogen	16-24
Weißer LED	35
Kompakt-Energiesparlampe	55
Große Energiesparlampe	94
Natrium-Straßenlampe	150

Tabelle 9.5: Lichtausbeute kommerziell verfügbarer Leuchtmittel. Für zukünftige LEDs wird eine Effizienz von 150 Lumen/W erwartet.

Sagen und Mythen

Ich sehe keinen Grund auf Energiesparlampen umzustellen. Die „vergeudete“ Energie heizt mein Haus, darum ist sie nicht vergeudet.

Dieser Mythos wird in Kapitel 11 auf Seite 80 behandelt.

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 64 **Straßenlampen brauchen 0,1 kWh/d/p:** Es kommt grob eine Natrium-Straßenlampe auf 10 Einwohner; jede Lampe hat 100 W, eingeschaltet 10 Stunden pro Tag. Das sind 0,1 kWh/d/p.
- 64 **und Ampeln nur 0,005 kWh/d/p:** England hat 420.000 Verkehrs- und Fußgänger-Ampel-Lichter, die 100 Millionen kWh Elektrizität jährlich verbrauchen. Verteilt auf 60 Millionen Menschen, sind 100 Millionen kWh pro Jahr umgerechnet 0,005 kWh/d pro Person.
- 65 **Was ist mit anderen öffentlichen Beleuchtungen wie Verkehrs- und Hinweisschildern:** [www.highwayelectrical.org.uk]. Insgesamt gibt es 7.7 Millionen Lichtanlagen (Straßenbeleuchtung, beleuchtete Verkehrszeichen und Boller) in England. Davon sind rund 7 Millionen Straßenbeleuchtung, 1 Million Straßenschilder. Es gibt 210.000 Verkehrszeichen. Nach DUKES 2005 liegt die Gesamtleistung für öffentliche Beleuchtung bei 2.095 GWh/y, das ist 0,1 kWh/d/p,
- 65 **eine 55%-effiziente Lichtmaschine:** Quelle: en.wikipedia.org/wiki/Alternator. Generatoren in Kraftwerken sind viel effizienter bei der Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie.

10. off-shore Wind

The London Array offshore wind farm will make a crucial contribution to the UK's renewable energy targets.

James Smith, chairman of Shell UK

Electric power is too vital a commodity to be used as a job-creation programme for the wind turbine industry.

David J. White

Auf dem Meer sind die Winde stärker und stetiger als an Land, deshalb liefern off-shore Windfarmen höhere Leistung pro Flächeneinheit als on-shore. Die Kentish Flats Windfarm in der Themsemündung, etwa 8,5 km vor der Küste von Whitstable und Herne Bay, wurde 2005 in Betrieb genommen. Die Planungsvorhersage beinhaltete eine mittlere Leistung von 3,2 W/m², die tatsächliche Leistung im Jahre 2006 lag bei 2,6 W/m².



Fig.10.1: (links) Kentish Flats – eine off-shore Windfarm in seichtem Wasser. Jeder Rotor hat einen Durchmesser von 90 m, Achshöhe 70 m. Jede „3 MW“-Turbine wiegt 500 Tonnen, die Hälfte davon das Fundament. Foto mit freundlicher Genehmigung © Elsam (elsam.com)

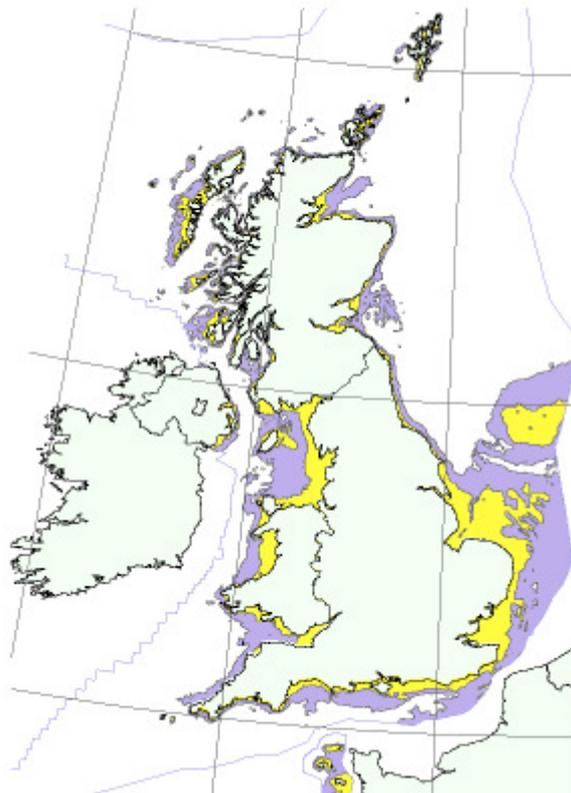


Fig.10.2: britische Gewässer mit Wassertiefen unter 25 m (gelb) und Tiefen zwischen 25 und 50 Metern (lila). Data von DTI Atlas of Renewable Marine Sources © Crown copyright.

Ich werde annehmen, dass eine Leistung pro Flächeneinheit von 3 W/m^2 (50% über unserer on-shore Schätzung) in Windfarmen off-shore um ganz England herum erzielbar ist.

Nun brauchen wir noch eine Abschätzung, wie viel Fläche auf See realistisch mit Windturbinen bedeckt werden kann. Üblicherweise unterscheidet man zwischen Anlagen im seichten Wasser und auf hoher See (vgl. Fig.10.2). Allgemeiner Tenor scheint derzeit zu sein, dass Windparks im seichten Wasser (Tiefe weniger als 25-30 m), die etwa das doppelte von on-shore Windparks kosten, mit moderater Förderung ökonomisch machbar sind, Windparks auf hoher See jedoch nicht. Aktuell (2008) gibt es nur eine Hochsee-Windfarm in englischen Gewässern, einen experimentellen Prototypen, der all seine Energie an eine nahegelegene Ölplattform namens Beatrice sendet.



Off-shore im seichten Wasser

In britischen Gewässern liegen rund 40.000 km^2 seichte Gebiete, zumeist vor England und Wales. Die Fläche entspricht zweimal dem Gebiet von Wales.

Die mittlere verfügbare Leistung von Windfarmen, die das gesamte Gebiet belegen, wäre 120 GW oder 48 kWh/d pro Person. Doch es ist nicht zu erwarten, dass eine solche Anordnung für die Schifffahrt akzeptabel wäre. Nennenswerte Anteile des Gebietes würden sicherlich nicht in Frage kommen, weil auf die Anforderungen von Schifffahrt und Fischerei Rücksicht zu nehmen wäre. Ich schlage vor, die tatsächlich verfügbare Fläche auf ein Drittel zu schätzen (siehe die Anmerkungen dieses Kapitels für einen noch pessimistischeren Ansatz). Damit erhalten wir für die maximal mögliche Ausbeute von off-shore Windparks (in seichtem Wasser) **16 kWh/d pro Person**.

Bevor es weitergeht, möchte ich nochmals auf die immense Fläche hinweisen - zwei Drittel von Wales - die erforderlich ist, um diese 16 kWh/d/p zu erzeugen. Wenn wir die gesamte britische Küstenlinie (Länge 3.000 km) nehmen und einen Gürtel von 4 km Breite mit Turbinen füllen, hätte dieser Gürtel eine Fläche von 13.000 km^2 . Damit kann man die 16 kWh/d pro Person erzeugen. Oder andersherum, betrachten wir die Anzahl der benötigten Turbinen: 16 kWh/d pro Person werden erzeugt durch 44.000 „3MW“-Turbinen, was 15 Stück pro Kilometer Küstenlinie entspricht.

Off-shore Windkraft ist schwer zu realisieren wegen der korrosiven Wirkung des Meerwassers. In der großen dänischen Windfarm Horns Reef mussten deswegen bereits nach 18 Monaten alle 80 Turbinen ausgebaut und repariert werden. Die Turbinen in Kentish Flats scheinen ähnliche Probleme mit ihren Getriebegehäusen zu haben, ein Drittel war innerhalb der ersten 18 Monate defekt.

Off-shore auf hoher See

Die Fläche mit Wassertiefen zwischen 25 m und 50 m beträgt etwa 80.000 km^2 - die Größe von Schottland. Geht man wieder von 3 W/m^2 aus, könnten Windfarmen dort weitere 240 GW oder 96 kWh/d pro Person liefern, wenn die gesamte Fläche genutzt würde. Wieder machen wir Korridore für Schiffe und beschränken uns auf ein Drittel der Fläche, das ist etwa 30% mehr als Wales, und ein großer Teil davon ist weiter als 50 km

vom Land entfernt. Ergebnis: Wenn die Fläche eines 9 km breiten Streifens rings um die Küstenlinie mit Windturbinen gefüllt ist, könnte man damit 32 kWh/d pro Person erzeugen. Eine Menge Leistung, zugegeben, aber noch kein Vergleich mit unserem riesigen Verbrauch. Und wir haben das Problem der Intermittenz des Windes noch nicht angesprochen. Darauf werden wir in Kapitel 26 zurückkommen.

Ich möchte dieses Potenzial als Beitrag der Windkraft auf hoher See in unseren Stapel mit aufnehmen, mit der Einschränkung, dass Wind-Experten diesen Beitrag aus Kostengründen als zum Scheitern verurteilt betrachten.

Einige Vergleiche und Kosten

Wie steht es nun in unserem Rennen zwischen Aufwand und Ertrag? Addieren wir off-shore Windkraft im seichten Wasser und auf hoher See zu unserem Produktionsstapel, so geht dieser in Führung. Was ich noch zu diesem Rennen sagen wollte: Wie leicht ist es doch, ein größeres Scheit auf das Feuer des Verbrauchs zu werfen, und wie schwierig, den Produktionsstapel wachsen zu lassen. Während ich so schreibe, ist mir etwas kalt und ich gehe hinüber zum Thermostaten, um diesen etwas höher zu drehen. So einfach ist es, 30 kWh pro Tag extra zu verbrauchen. Aber 30 kWh pro Tag pro Person aus erneuerbaren Ressourcen zu quetschen, erfordert eine Industrialisierung der Umwelt, die in ihrem Umfang kaum vorstellbar ist.

Die genannten 48 kWh/d/p off-shore Windleistung um England zu bauen, erfordert **60 Millionen Tonnen Beton und Stahl** – eine Tonne pro Person. Die Weltproduktion an Stahl liegt bei 1200 Millionen Tonnen jährlich, das sind 0,2 Tonnen pro Person weltweit. Während des zweiten Weltkrieges bauten die Amerikaner 2751 Liberty-Frachter mit je 7000 Tonnen Stahl, das waren 0,2 Tonnen pro Amerikaner. Also sind 60 Millionen Tonnen Windturbinen nicht technisch unerreichbar; doch machen Sie sich nicht vor, es wäre einfach. So viele Windmühlen zu bauen ist ein genauso großes Unternehmen wie die Liberty-Frachter.

Zum Vergleich: Um die Leistung von 48 kWh/d pro Person an Atomkraftwerken zu installieren, würde England lediglich **8 Millionen Tonnen Stahl** und **0,14 Millionen Tonnen Beton**¹³ benötigen. Wir können die 60 Millionen Tonnen off-shore Wind-Hardware auch mit den bereits existierenden Plattformen und Anlagen des Fossilbrennstoff-Sektors in und um die Nordsee vergleichen (Fig.10.4): Um 1997 enthielten die 200 Anlagen und 7000 km Pipeline in englischen Gewässern **8 Millionen Tonnen Stahl und Beton**. Die neue Langede Gaspipeline von Norwegen nach England, die Gas für eine Leistung von 25 GW (10 kWh/d/p) transportiert, benötigte weitere **1 Million Tonnen Stahl** und **1 Million Tonnen Beton** (Fig.10.5).

Am 10.12.2007 gab die englische Regierung bekannt, dass sie den Bau eines 33 GW off-shore Windparks genehmigt hätte (der im Mittel 10 GW oder 4,4 kWh/d/p nach England liefern würde), ein Plan, der von einigen aus der Windindustrie als „Luftschloss“ bezeichnet wurde. Rechnen wir mit 4 kWh/d/p, das ist ein Viertel meines Ansatzes von 16 kWh/d/p für seichte Gewässer. Um diese mittlere Leistung zu realisieren, braucht man etwa 10.000 „3MW“-Turbinen wie die aus Fig.10.1. (Sie haben eine Kapazität von „3MW“ Spitze, aber liefern im Durchschnitt 1 MW, zur Kennzeichnung setze ich hier und im folgenden Spitzenleistungs-Angaben in Anführungszeichen.)

¹³ Diese Zahl ist nach Angabe des Autors falsch, in seinen Errata gibt es als korrekten Wert 140 Millionen Tonnen an, der m.E. jedoch auch nicht plausibel ist.

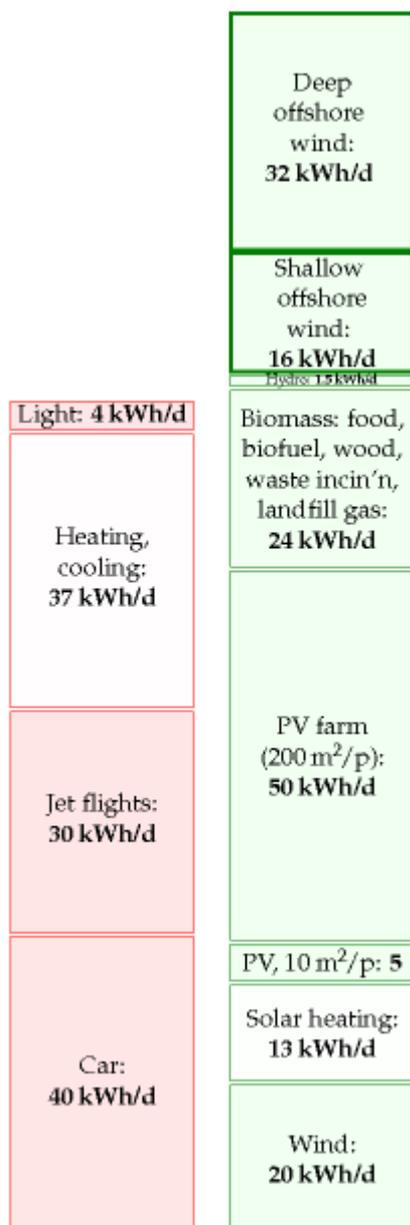


Fig.10.3: off-shore Wind

Was würden diese „33GW“ in der Herstellung kosten? Die „90MW“ Kentish Flat Farm kostete 105 Millionen Euro¹⁴, also kosten „33GW“ um die 33 Milliarden Euro. Um sich diese 33 Milliarden Kosten der 4 kWh/d/p besser vorstellen zu können, kann man sie auf die Bevölkerung verteilen: 550 Euro pro Person. Das ist, nebenbei gesagt, ein erheblich besseres Geschäft als Kleinwindanlagen. Solche Kleinanlagen zur Dachmontage kosten derzeit um die 1.500 € und liefern auch bei optimistisch angenommenen 6 m/s Windgeschwindigkeit nur 1,6 kWh/d. In Wirklichkeit liefern existierende kleine Windturbinen in typischen englischen Stadtlagen 0,2 kWh pro Tag.

Eine andere Engstelle beim Aufbau dieser off-shore Windturbinen ist die Erfordernis von Spezialschiffen. Um 10.000 Turbinen („33GW“) innerhalb von 10 Jahren zu errichten, bräuchte man etwa 50 große Jackup-Bargen (hydraulische Pontons). Diese kosten je 60 Mio €, was ein zusätzliches Investment von 3 Milliarden € erforderlich macht. Sicher ist

¹⁴ Die Originalangaben sind in englischen Pfund, die ich mit 1:1 umgerechnet habe (beim derzeitigen Wechselkurs von 1:1,098 kein großer Genauigkeitsverlust).

das kein K.O.-Kriterium im Vergleich zu den Gesamtkosten von 33 Milliarden €, doch ist es schon ein Detail, das besondere Planung erfordert.



Fig.10.4: Die Magnus-Plattform im nördlichen englischen Sektor der Nordsee enthält 71.000 Tonnen Stahl. Im Jahr 2000 lieferte diese Plattform 3,8 Millionen Tonnen Öl und Gas – eine Leistung von 5 GW. Kosten der Plattform: 1,1 Milliarden €. Foto von Terry Cavner.



Fig.10.5: Pipeline-Rohre für Langeded. Von Bredero-Shaw [brederoshaw.com]



Verluste bei Vögeln

Töten Windräder „riesige Mengen“ von Vögeln? Windfarmen gerieten jüngst in die norwegischen Schlagzeilen, weil Turbinen auf Smola, einer Inselgruppe vor der Nordwestküste, neun Weißschwanz-Adler in 10 Monaten getötet hatten. Ich teile die Besorgnis von BirdLife International um das Wohlergehen seltener Vögel. Doch denke ich, wie immer, sollte man die Zahlen ansehen. Es wurde abgeschätzt, dass an die 30.000 Vögel jährlich durch Windturbinen in Dänemark sterben, wo Windmühlen 9% des Strombedarfs decken. Horror! Ächtet die Windmühlen! Wir erfahren darüber hinaus, dass der Straßenverkehr eine Million Vögel in Dänemark jährlich tötet. Dreißigmal-größerer-Horror! Dreißigmal mehr Veranlassung, Autos zu ächten! Und in England werden 55 Millionen Vögel jährlich durch Katzen getötet (Fig.10.6) ¹⁵.

Rein gefühlsmäßig würde ich am liebsten in einem Land leben, wo es virtuell keine Autos und keine Windmühlen gibt und mit vielen, vielen Katzen und Vögeln (wo die Katzen die Vögel jagen und vielleicht von Weißschwanz-Adlern gejagt werden, um das natürliche Gleichgewicht zu erhalten). Doch was ich wirklich hoffe ist, dass Entscheidungen über Autos und Windmühlen nach sorgfältigem rationalem Nachdenken getroffen werden, nicht rein gefühlsmäßig. Möglicherweise brauchen wir die Windmühlen!

¹⁵ Dieser Vergleich ist nicht allzu ernst zu nehmen, insbesondere da die Datenbasis (Dänemark einerseits England andererseits) nicht dieselbe ist.

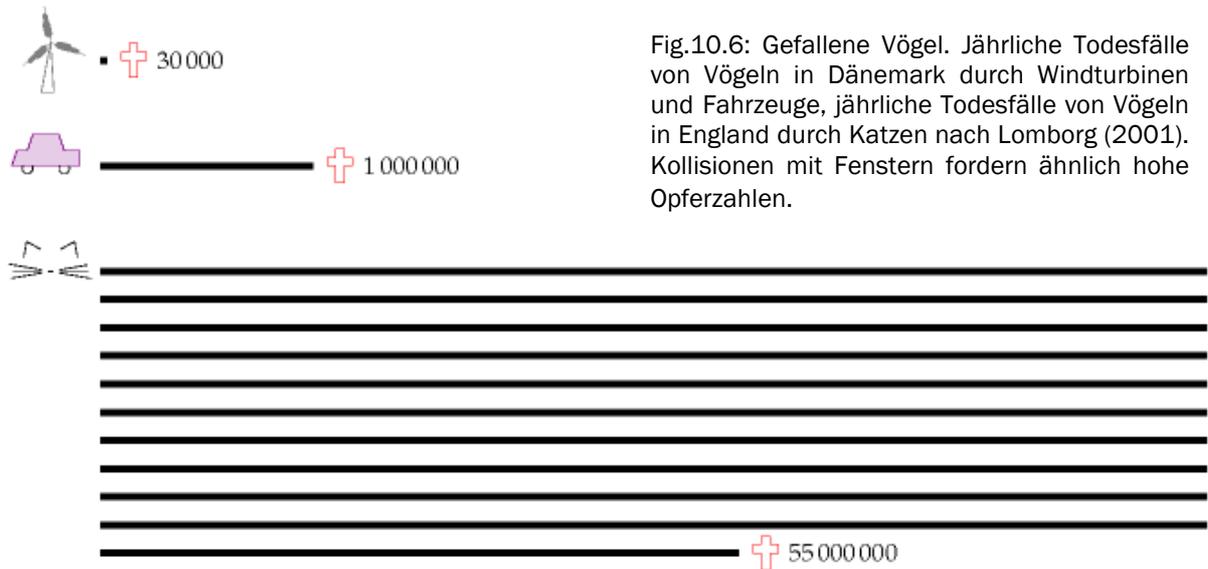


Fig.10.6: Gefallene Vögel. Jährliche Todesfälle von Vögeln in Dänemark durch Windturbinen und Fahrzeuge, jährliche Todesfälle von Vögeln in England durch Katzen nach Lomborg (2001). Kollisionen mit Fenstern fordern ähnlich hohe Opferzahlen.

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

68 Kentish Flats Windfarm: Siehe www.kentishflats.co.uk. Die 30 Vestas V90 Windturbinen haben insgesamt einen Spitzen-Output von 90 MW, die vorhergesagte mittlere Leistung ist 32 MW (bei Load Faktor 36 %). Die mittlere Windgeschwindigkeit in Achshöhe ist 8.7 m/s. Die Turbinen stehen in 5 m tiefem Wasser, voneinander 700 m entfernt, verteilt über eine Fläche von 10 km². Die Leistungsdichte war mit 3,2 W/m² vorhergesagt. Tatsächlich war der Output 26 MW, der Load-Faktor im Jahr 2006 also 29% [wbd80]. Daraus ergibt sich eine Leistungsdichte von 2,6 W/m². Die North Hoyle Windfarm vor Prestatyn, North Wales, hatte 2006 einen höheren Load-Faktor von 36%. Ihre dreißig 2MW Turbinen belegen 8,2 km². Also hatten sie eine Leistungsdichte von 2,6 W/m².

68 dass Windparks im seichten Wasser (Tiefe weniger als 25-30 m), die etwa das doppelte von on-shore Windparks kosten, mit moderater Förderung ökonomisch machbar sind: Quelle: Danish wind association windpower.org. „Windparks auf hoher See jedoch nicht“ Quelle: British Wind Energy Association briefing document, September 2005, www.bwea.com. Trotzdem wurden für ein Demonstrationsprojekt in tiefen Gewässern 2007 zwei Turbinen nahe dem Ölfeld Beatrice 22 km vor der Küste Schottlands aufgestellt (Fig.10.8). Jede Turbine hat eine „Kapazität“ von 5MW und sitzt in 45 m tiefem Wasser. Achshöhe: 107m; Durchmesser 126m. Alle erzeugte Elektrizität wird auf den Ölplattformen verwendet. Ist das nicht witzig? Das 10MW Projekt kostet 30 Millionen, diese Preisklasse von 3€ pro Watt(peak) kann mit Kentish Flats verglichen werden, dort sind es 1,2 € pro Watt (105 Millionen für 90 MW). www.beatricewind.co.uk

Es ist möglich, dass schwimmende Turbinen die Ökonomie der Windkraft in tiefen Gewässern verändern werden.

Region	Tiefe 5-30 m		Tiefe 30-50 m	
	Fläche (km ²)	Potenzial (kWh/d/p)	Fläche (km ²)	Potenzial (kWh/d/p)
Nord-West	3.300	6	2.000	4
Greater Wash	7.400	14	950	2
Themsemündung	2.100	4	850	2
Sonstige	14.000	28	45.000	87
Summe	27.000	52	49.000	94

Tabelle 10.7: Potenzielle off-shore Windressourcen in den dargestellten strategischen Regionen, wenn diese Regionen vollständig mit Turbinen gefüllt würden. Dept. Of Trade and Industry (2002b)

69 **Die verfügbare Fläche für off-shore Windkraft:** Das Dokument „Future Offshore“ des DTI (2002) gibt eine detaillierte Aufstellung über Flächen, die für off-shore Windkraft nutzbar sind. Tabelle 10.7. zeigt die abgeschätzten Ressourcen in 76.000 km² seichtem Wasser. Die vom DTI geschätzte Leistung, wenn die ganze Fläche mit Windmühlen gefüllt würde, beträgt 146 kWh/d pro Person (davon 52 kWh/d/p im seichten, 94 kWh/d/p im tiefen Wasser erzeugt). Die realistische Abschätzung des DTI für potenzielle off-shore Windkraft nennt aber lediglich 4,6 kWh/d/p. Interessant ist der Weg, auf dem das DTI von 146 kWh auf 4,6 kWh pro Tag und Person herunterrechnet. Wieso liegen die letztendlichen DTI-Schätzungen so weit unter unseren? Zuerst schränken sie ein: bis 30 km Küstenabstand, Wassertiefe maximal 40 m, der Meeresgrund darf nicht steiler als 5° abschüssig sein. Militärische Sperrzonen, Pipelines, Fischfanggründe, und Naturreservate wurden ausgeschlossen. Zweitens nahmen sie an, nur 5% der potenziellen Plätze würden entwickelt werden (wegen der Beschaffenheit des Meeresbodens oder aus planerischen Randbedingungen), sie reduzierten die Kapazität im küstennahen Bereich bis 10 Meilen um 50% aus Gründen der öffentlichen Akzeptanz. Sie reduzierten weiter die Kapazität um 95% für Gebiete, in denen die Windgeschwindigkeit über 9 m/s liegt, und um 5% für Gegenden mit Windgeschwindigkeiten von 8 - 9 m/s, wegen „Entwicklungsbarrieren durch eine feindselige Umwelt“.

69 **Wenn wir die gesamte britische Küstenlinie (Länge 3.000 km) nehmen und einen Gürtel von 4 km Breite:** Pedanten mögen sagen, dass die Küstenlinie keine wohldefinierte Länge hat, da sie fraktal ist. Ja sie ist fraktal, aber, lieber Pedant, nehmen Sie eine Karte und einen Streifen von Turbinen 4 km breit um die britische Hauptinsel, und sehen Sie ob der nicht doch 3.000 km lang ist.



Fig.10.8: Errichtung der Beatrice Demonstrations-off-shore-Windfarm in tiefem Wasser. Foto mit freundlicher Unterstützung von Talisman Energy (UK) Limited.

- 69 **Horns Reef** (Horns Rev). Die Probleme dieser dänischen “160MW” Windfarm vor Jütland [www.hornsrev.dk] wurden beschrieben von Halkema (2006).
- 70 **Liberty ships** –www.liberty-ship.com/html/yards/introduction.html
- 70 **200 Anlagen und 7000 km Pipeline in englischen Gewässern 8 Millionen Tonnen Stahl und Beton** – Rice and Owen (1999).
- 70 **gab die englische Regierung bekannt, dass sie den Bau eines 33 GW off-shore Windparks genehmigt hätte** [25e59w].
- 70 **„Luftschloss“** Quelle: Guardian [2t2vjq].
- 71 **Was würden diese „33GW“ in der Herstellung kosten?** Nach Veröffentlichungen des DTI vom November 2002 kostet Strom von off-shore Windfarmen an die 50€ pro MWh (5 ct/kWh) (Dept. of Trade and Industry, 2002b, p21). Ökonomische Fakten ändern sich jedoch, und im April 2007 lagen die geschätzten Kosten bei bis zu 92 € pro MWh (Dept. of Trade and Industry, 2007, p7). Im April 2008 kletterte der Preis für off-shore Windenergie noch höher: Shell zog seine Zusage zum Bau des London Array zurück. Weil off-shore Windkraft so teuer ist, musste die Regierung die Anzahl der ROCs (renewable obligation certificates) pro Einheit off-shore Windenergie erhöhen. Das ROC ist die Einheit der Förderung, die für bestimmte Formen erneuerbarer Energieproduktion ausgegeben wird. Der übliche Wert eines ROC ist £45, mit 1 ROC pro MWh; mit dem Verkaufspreis von etwa £40/MWh werden Erneuerbare Generatoren also mit £85 pro MWh bezahlt. Also ist 1 ROC pro MWh nicht genug Subvention um die Kosten von £92 pro MWh zu decken. In demselben Dokument werden für andere Erneuerbare folgende Kosten genannt (mittlere Kosten für 2010). On-shore Wind: £65–89/MWh; Kraftwärmekopplung von Biomasse: £53/MWh; große Wasserkraftwerke: £63/MWh; Deponiegas: £38/MWh; Solar PV: £571/MWh; Wellenkraft: £196/MWh; Gezeitenkraft: £177/MWh. “Dale Vince, Chief Executive des grünen Energieversorgers Ecotricity, der sich im Aufbau von Windfarmen engagiert, sagte dass er die off-shore Wind-Pläne der Regierung unterstütze, doch nur wenn sie nicht auf Kosten der on-shore Windkraft gingen. ‚Es ist gefährlich, die fantastischen Ressourcen zu übersehen, die wir in diesem Lande haben ... Nach unserer Schätzung wird es etwa in der Gegend von 40 Milliarden € kosten, die 33 GW die Hutton propagiert, off-shore zu bauen. Wir könnten dasselbe on-shore für 20 Milliarden € leisten.‘ “ [57984r]



Fig.10.9: Kentish Flats, Fotos mit freundlicher Genehmigung © Elsam (elsam.com)

- 71 **kleine Windturbinen in typischen englischen Stadtlagen 0,2 kWh pro Tag:** Quelle: *Third Interim Report*, www.warwickwindtrials.org.uk/2.html. Mit die besten Ergebnisse in der Warwick Wind Trials Studie liefert der Windsave WS1000 (eine 1-kW Maschine) in Daventry. Aufgestellt in einer Höhe von 15m über Grund leistet er 0.6 kWh/d im Mittel. Doch einige Mikroturbinen liefern nur 0.05 kWh pro Tag – Quelle: Donnachadh McCarthy: “My carbonfree year,” *The Independent*, Dezember 2007 [6oc3ja]. Die Windsave WS1000 Windturbine, in England in B&Q’s shops verkauft, gewann den Eco-Bollocks award des *Housebuilder’s Bible* Autors Mark Brinkley: “Come on, it’s time to admit that the roof-mounted wind turbine industry is a complete fiasco. Good money is being thrown at an invention that doesn’t work. This is the Sinclair C5 of the Noughties.” [5soql2]. The Met Office and Carbon Trust veröffentlichte im Juli 2008 einen Bericht [6g2jm5], der abschätzt, dass kleine Turbinen, wenn sie auf Hausdächern in UK installiert werden, wo dies ökonomisch ist, insgesamt etwa **0.7 kWh/d/p** liefern. Sie warnen, dass dachmontierte Turbinen in Städten gewöhnlich schlechter als nutzlos sind: „in vielen Stadtlagen können Dachturbinen nicht so viel CO₂ einsparen, wie ihr Herstellungsprozess verschlang“.
- 71 **Jackup-Bargen (hydraulische Pontons) kosten je 60 Mio €:** Quelle: news.bbc.co.uk/1/hi/magazine/7206780.stm. Ich schätzte, wir würden rund 50 davon benötigen unter der Annahme, dass jedes Jahr 60 arbeitsfreie Tage hätte und das Aufstellen einer Turbine 3 Tage benötigte.

Weiterführende Literatur: UK wind energy database [www.bwea.com/ukwed/].

11. Kleinelektronik – Gadgets

Eine der größten Gefahren für die Gesellschaft ist das Handyladegerät. Die BBC Nachrichten warnen davor seit 2005:

„Die AKWs werden in ein paar Jahren abgeschaltet. Was tun, damit in England nicht bald die Lichter ausgehen? ... Stecken Sie ihr Handyladegerät aus, wenn Sie es nicht brauchen.“

Leider hat England diese Botschaft Jahre später immer noch nicht verstanden, und die BBC musste berichten

„England führt die Liga der Energievergeuder an“

Und wie kam es dazu? Die BBC bringt uns die Botschaft nach Hause:

„65% der englischen Verbraucher lassen ihre Ladegeräte an.“

Bei solchen Berichten über diese planetenzerstörenden Objekte wird uns klar, dass sie gerade so gefährlich sein müssen wie Darth Vader. Doch wie übel sind sie tatsächlich?

In diesem Kapitel finden wir die Wahrheit über die Ladegeräte. Wir sehen uns auch ihre Vettern in der Unterhaltungselektronik an: Computer, Telefon und TV-Geräte, Digital-Receiver, Kabelmodems. Hier schätzten wir die Leistung ab, die wir verbrauchen, wenn wir sie betreiben und aufladen, doch nicht die zu ihrer Herstellung verwendete – das geschieht unten im Kapitel 15.

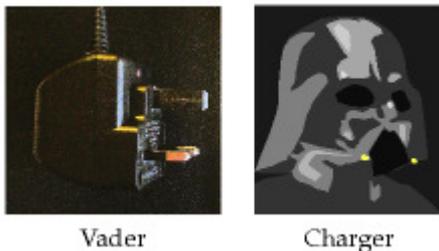


Fig.11.1: Planetenzerstörer, kaum ein Unterschied



Fig.11.2: Diese fünf Ladegeräte – drei für Handys, eines für einen Handheld PC, eines für einen Laptop – zeigten weniger als ein Watt auf meinem Messgerät.

Die Wahrheit über Ladegeräte

Moderne Handyladegeräte, wenn sie in der Steckdose bleiben während das Handy abgestöpselt ist, verbrauchen etwa ein halbes Watt. In unseren bevorzugten Einheiten ist das ein Energieverbrauch von **0,01 kWh/d**. Alle, deren Energieverbrauch um die 100 kWh/d liegt, könnten den Rat der BBC „Handyladegeräte immer ausstecken“ befolgen

und damit ihren Verbrauch um ein Hundertstel Prozent senken (wenn sie es nur endlich tun würden).

Jeder kleine Schritt zählt!

So denke ich nicht. Wie besessen Handyladegeräte auszustecken ist, als wolle man die Titanic mit einer Teetasse ausschöpfen. Stecken Sie aus, doch bitte seien Sie sich klar, welche winzige Geste das ist. Lassen Sie es mich so sagen:

All die Energie, die Sie an einem Tag durch Ausstecken von Ladegeräten sparen können, ist mit einer Sekunde Auto fahren wieder zunichte gemacht.

Die Energieeinsparung durch Ausstecken von Ladegeräten über ein ganzes Jahr entspricht der Energie eines einzigen heißen Bades.

Zugegeben, einige alte Ladegeräte verbrauchen mehr als ein halbes Watt – wenn es sich warm anfühlt, verbraucht es wahrscheinlich ein Watt oder sogar drei (Fig.11.3). Ein 3 Watt schluckendes Ladegerät braucht 0,07 kWh pro Tag. Ich denke, da ist es eine gute Idee, es auszuschalten, das wird Ihnen etwa 3€ jährlich sparen. Aber belügen Sie sich nicht und glauben, dass sie damit ihren Beitrag schon geleistet hätten, 3 W ist nur ein winziger Bruchteil des Gesamtverbrauchs.

OK, genug der Titanic-Rettung mit der Teetasse. Schauen wir, wo elektrischer Strom wirklich verbraucht wird.



Fig.11.3: Dieses verschwenderische kabellose Telefon und sein Ladegerät brauchen 3 W wenn sie eingesteckt bleiben. Das sind 0,07 kWh/d. Bei Stromkosten von 10 Cent pro kWh kostete das 3W-Tröpfeln 3€ pro Jahr.

Gadgets, die wirklich Strom fressen

Tabelle 11.4 zeigt die Leistungsaufnahmen, in Watt, der beliebtesten Geräte im Haushalt. Die erste Spalte beinhaltet die Leistung, wenn das Gerät in Betrieb ist – etwa eine Stereoanlage, die gerade spielt. Die zweite Spalte zeigt den Verbrauch, wenn das Gerät gerade nichts zu tun hat. Ich war ziemlich geschockt als ich herausfand, dass ein Laserdrucker im Bereitschaftsmodus 17 W benötigt, dasselbe wie eine durchschnittliche Gefriertruhe. Die dritte Spalte zeigt den Verbrauch des Gerätes, wenn es explizit auf Sleep oder Standby geschaltet ist. Die vierte zeigt den Verbrauch im ausgeschalteten Zustand, wenn der Stecker aber in der Steckdose bleibt. Alle Angaben sind in Watt – um in unsere Standardeinheiten umzurechnen, erinnern Sie sich, dass 40 W ziemlich genau 1 kWh/d entspricht. Eine nette Eselsbrücke ist übrigens, dass ein Watt ungefähr einen Euro pro Jahr kostet (bei angenommenen Stromkosten von 10 Cent pro kWh).

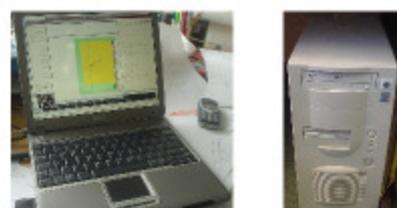
Die größten Schlucker sind der Computer, sein Bildschirm und der Fernseher; sie verbrauchen einige hundert Watt ist, wenn sie eingeschaltet sind. Unterhaltungssysteme wie Stereoanlagen oder DVD-Player schwimmen im Kielwasser des Computers, mit 10 W oder so. Ein DVD-Player mag für 20 € im Geschäft zu haben sein, doch wenn Sie ihn dauernd eingeschaltet lassen, kostet er Sie weitere 10 € jährlich. Einige Stereoanlagen

und Computer-Peripherie brauchen einige Watt, auch wenn sie ausgeschaltet sind, wegen ihrer Netzteile. Wollen Sie sichergehen, dass ein Gerät wirklich aus ist, müssen Sie es an der Wand ausstecken.

Der versteckte Verbrauch des Informationszeitalters

Nach Jonathan Koomwey (2007) brauchen die Rechner in US-amerikanischen Rechenzentren und deren erforderliche Klimatisierung insgesamt **0,4 kWh pro Tag pro Person**, etwas über 1 % des Landesverbrauchs. Er betrachtete den Verbrauch im Jahr 2005, der doppelt so hoch sein dürfte wie der in 2000, da die Zahl der Server in diesem Zeitraum von 5,6 Millionen auf 10 Millionen stieg.

Verbraucher	Leistungsaufnahme (W)			
	An und aktiv	An und inaktiv	Stand by	Aus
Computer und Peripherie:				
PC	80	55		2
Röhren-Monitor	110		3	0
LCD-Monitor	34		2	1
Beamer	150		5	
Laserdrucker	500	17		
Wlan- oder Kabelmodem	9			
Laptop	16	9		0,5
<hr/>				
Tragbarer CD-Player	2			
Radiowecker	1,1	1		
Radiowecker	1,9	1,4		
Digitalradio	9,1		3	
Radio-Cassettenrekorder	3	1,2		1,2
Stereoanlage	6			6
Stereoanlage II	13			0
Home Cinema Sound	7	7	4	
DVD Player	7	6		
DVD Player II	12	10	5	
Fernsehgerät	100		10	
Videorekorder	13		1	
Digital TV Set Top Box	6		5	
Uhr an der Mikrowelle	2			
<hr/>				
Xbox	160		2,4	
Sony Playstation3	190		2	
Nintendo Wii	18		2	
<hr/>				
Anrufbeantworter		2		
Anrufbeantworter II		3		
Schnurloses Telefon		1,7		
Handyladegerät	5	0,5		
<hr/>				
Staubsauger	1600			



Laptop: 16W Computer: 80W



LCD 31 W CRT 108 W Printer: 17 W (on, idle)



Projector: 150W Digital radio: 8W

Tabelle 11.4: Leistungsaufnahme verschiedener Kleingeräte, in Watt. 40 W ist 1 kWh/d.

Andere Kleingeräte

Ein Staubsauger, wenn er ein paar Stunden pro Woche benutzt wird, ist äquivalent zu etwa **0,2 kWh/d**. Rasenmähen braucht etwa **0,6 kWh**. Wir könnten so weitermachen, doch ich vermute, dass Computer und Unterhaltungselektronik die großen Schlucker in der Energiebilanz der meisten Menschen sind.

Das Fazit des Kapitels: es hängt sehr davon ab, wie viele Geräte jemand benutzt, aber ein gesundes Maß an häuslicher und beruflicher Elektronik kann bei regelmäßiger Nutzung leicht **5 kWh/d** ausmachen.

Sagen und Mythen

Es gibt keinen Grund, Licht, Fernseher oder Ladegeräte im Winter auszuschalten. Die „vergeudete“ Energie heizt meine Wohnung, deshalb ist sie nicht vergeudet.

Dieser Mythos ist *wahr* für einige wenige Menschen, aber nur im Winter, für die meisten aber *falsch*.

Wenn Ihr Haus elektrisch beheizt wird, mit normalen Speicheröfen oder Heizlüftern, dann, ja, dann ist das praktisch genauso wie das Heizen über die Abwärme von Elektrogeräten. Doch sollten Sie in dieser Situation dringend die Heizung Ihres Hauses erneuern. Elektrizität ist hochwertige Energie und Wärme ist niederwertige Energie. Es ist eine Verschwendung, Elektrizität in Wärme zu verwandeln. Genauer gesagt, ist es Verschwendung, nur eine Einheit Wärmeenergie aus einer Einheit elektrischer Energie zu machen. Heizgeräte, genannt Luft-Wärmepumpen oder Grundwasser-Wärmepumpen, können das viel besser, den sie liefern 3 bis 4 Einheiten Wärmeenergie für eine Einheit eingesetzter elektrischer Energie. Sie arbeiten wie ein umgekehrter Kühlschrank und pumpen Wärme aus der Umgebung in Ihr Haus (siehe Kapitel 21).

Für den Rest, dessen Häuser mit fossilen oder biologischen Brennstoffen beheizt werden, ist es eine gute Idee, Elektrogeräte als Wärmequellen zu vermeiden – jedenfalls so lange unser Elektrizitätsbedarf durch fossile Brennstoffe gedeckt wird. Da ist es besser, fossile Brennstoffe direkt zu Hause zu verbrennen. Der Punkt ist: Wenn Sie Elektrizität aus fossil befeuerten Kraftwerken beziehen, geht die Hälfte der Brennstoffenergie leider durch den Kühlturm. Von der so gewonnenen Elektrizität gehen weitere etwa 8% auf dem Weg im Versorgungsnetz verloren. Wenn Sie den Brennstoff zu Hause verbrennen, wird viel mehr Energie direkt fürs Aufheizen Ihrer Warmluft verwendet.

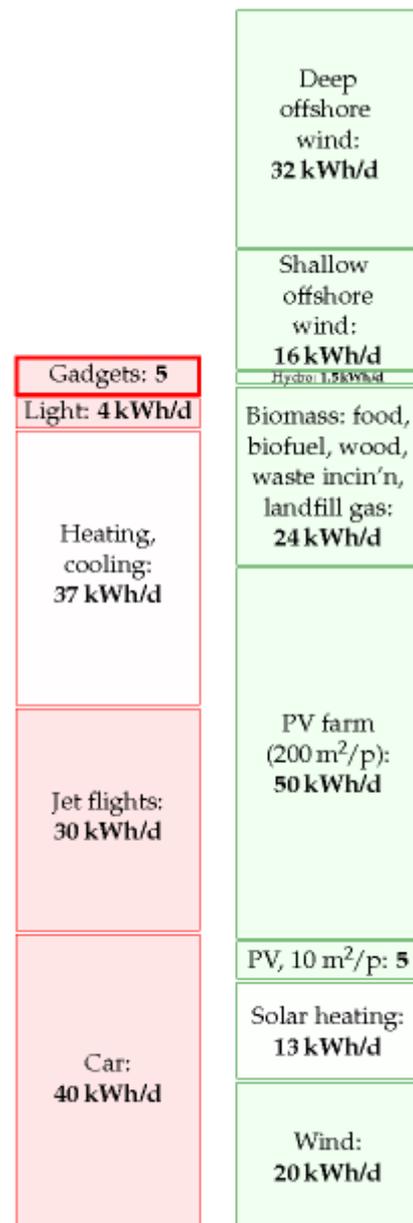


Fig.11.5: Informationssysteme und andere Geräte

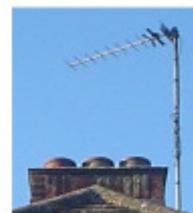
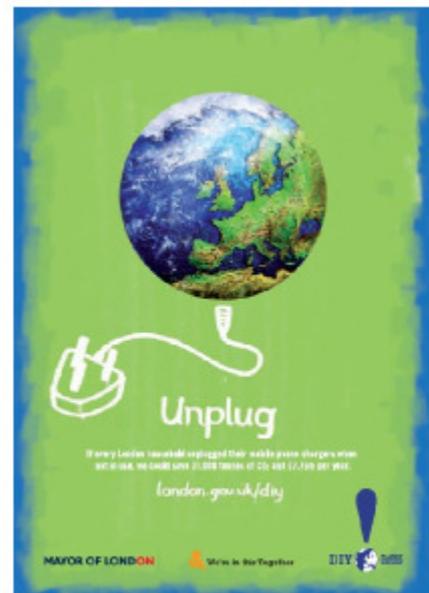
Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 77 **Die BBC Nachrichten warnen davor seit 2005:** Der BBC-Artikel von 2005 lautete: „Die Atomkraftwerke werden alle in ein paar Jahren abgeschaltet. Wie kann England seine Lichter an behalten? Hier sind drei Möglichkeiten, wie Sie Energie sparen können: Schalten Sie ihre Videorecorder aus, wenn sie nicht in Betrieb sind, lassen Sie keine Fernsehgeräte im Standby; stecken Sie ihr Handyladegerät ab, wenn es nicht gebraucht wird“
- 77 **Moderne Handyladegeräte, wenn sie in der Steckdose bleiben während das Handy abgestöpselt ist, verbrauchen etwa ein halbes Watt.:** Das Maplin Messgerät aus Fig.11.2 ist nicht genau genug, um diese Leistung zu messen. Ich danke Sven Weier und Richard McMahon of Cambridge University Engineering Department, die ein handelsübliches Nokia Ladegerät mit einem hochgenauen Kalorimeter vermessen haben. Sie fanden, dass das Gerät ohne angeschlossenes Handy 0,472 W vergeudet. Sie machten weitere interessante Messungen: Mit einem vollgeladenen Handy angeschlossen vergeudet es 0,845 W und im Regelbetrieb, mit einem teilentladenen Handy angeschlossen, vergeudet er 4,146 W als Hitze. Pedanten fragen manchmal „was ist mit der Blindleistung des Ladegeräts?“ Das ist eine technische Spielerei, nicht wirklich die Zeit wert. Fürs Protokoll: Ich habe die Blindleistung gemessen (mit einem schäbigen Messgerät) und fand etwa 2 VA. Mit einem Leistungsverlust im nationalen Netz von 8% berechne ich den Leistungsverlust auf Grund von Blindleistung zu 0,16 W. Beim Telefonieren braucht das Handy 1W.

Weiterführende Literatur: Kuehr (2003)

Fig.11.6: Werbung für die „DIY planet repairs“ Kampagne. Der Text bedeutet: „Ausstecken. Wenn jeder Londoner Haushalt seine unbenutzten Ladegeräte aussteckte, könnten wir 31.000 Tonnen CO₂ und 7,75 Mio £ pro Jahr sparen“ london.gov.uk/diy/



12. Wellen

Wenn Wellenenergie irgendeinem Land hoffnungsvolle Möglichkeiten eröffnet, dann muss das England oder Irland sein – flankiert einerseits vom Atlantik und andererseits von der Nordsee.



Fig.12.1: Ein Pelamis Wellenenergie-Kollektor ist eine Seeschlange mit vier Sektionen. Er wird mit der Nase in Richtung der einlaufenden Wellen ausgerichtet. Die Wellen biegen die Schlange, und diese Bewegungen treiben hydraulische Generatoren. Die Spitzenleistung einer Schlange ist 750 kW. In bester Atlantiklage könnte eine Schlange 300 kW mittlere Leistung abgeben. Foto von Pelamis Wave Power www.pelamiswave.com

Lassen Sie uns zunächst klarstellen, woher die Wellen kommen: *Sonne erzeugt Wind und Wind erzeugt Wellen.*

Ein Großteil des Sonnenlichts, das unseren Planeten trifft, erwärmt die Meere. Das erwärmte Wasser erwärmt die Luftschichten darüber und erzeugt Wasserdampf. Die erwärmte Luft steigt auf, dabei kühlt sie sich ab und das Wasser kondensiert eventuell wieder zu Wolken und Regen. Am höchsten Punkt wird die Luft weiter gekühlt durch die frostige Dunkelheit des Weltalls. Die kalte Luft sinkt wieder ab. Diese große solarbetriebene Umwälzpumpe treibt die Luft rundherum in großen Konvektionsrollen. Aus unserer Sicht von der Oberfläche aus produzieren diese Konvektionsrollen Wind. Wind ist Solarenergie aus zweiter Hand. Weht der Wind übers Wasser, erzeugt er Wellen. Wellen sind sozusagen Solarenergie aus dritter Hand (Wellen, die ans Ufer branden, haben nichts zu tun mit den Gezeiten).

Auf offener See werden Wellen immer dann erzeugt, wenn die Windgeschwindigkeit über etwa 0,5 m/s liegt. Die Wellenkämme bewegen sich etwa so schnell wie der Wind, der sie erzeugte, und in dieselbe Richtung. Die *Wellenlänge* (Abstand zwischen den Wellenkämmen) und die *Periode* (die Zeit zwischen zwei Kämmen) hängen ebenfalls von der Windgeschwindigkeit ab. Je länger der Wind bläst und je größer die überstrichene Fläche ist, um so größer ist die *Höhe* der Wellen, die der Wind auftürmt. Da über dem Atlantik der Wind vorrangig von West nach Ost bläst, sind die Wellen an der europäischen

Atlantikküste oft besonders hoch. (Die Wellen an Englands Ostküste sind gewöhnlich viel kleiner, deshalb wird sich meine Abschätzung des Potenzials an verfügbarer Wellenenergie auf Ressourcen im Atlantik fokussieren.)

Wellen haben ein gutes Gedächtnis und laufen tagelang in dieselbe Richtung weiter, auch wenn der Wind bereits aufgehört hat zu wehen, bis sie an ein Hindernis stoßen. In Meeren, in denen die Windrichtung häufig wechselt, bilden die Wellen, die an verschiedenen Tagen geboren werden, ein superponiertes (überlagertes) Durcheinander, indem sie in verschiedene Richtungen laufen.

Wenn Wellen einer bestimmten Laufrichtung Objekte treffen, die ihre Energie aufnehmen – etwa eine Inselkette mit Sandstränden – dann ist die See hinter dem Objekt ruhiger. Die Objekte werfen einen Schatten und in den Wellen, die weiterlaufen, ist weniger Energie. Im Gegensatz zur Sonne, die Energie pro *Flächeneinheit* liefert, liefern Wellen Energie pro *Längeneinheit* der Küste. Man kann einen Kuchen nicht essen und aufheben. Man kann nicht Wellenenergie zwei Meilen vor der Küste sammeln *und* eine Meile vor der Küste. Oder besser, man kann es schon versuchen, aber die Anlage bei 2 Meilen wird Energie absorbieren, die nicht ersetzt wird, bis die Welle auf die zweite Anlage trifft. Die Entstehungsflächen für große Wellen liegen bei Tausenden von Meilen.

Wir können ein oberes Limit bestimmen für die maximal aus diesen Wellen erhältliche Leistung, indem wir die ankommende Leistung pro Einheitslänge der Küstenlinie bestimmen und diese mit der Länge der Küstenlinie multiplizieren. Wir ignorieren die Frage, welcher Mechanismus diese Leistung sammeln könnte und fragen zunächst, wie viel Leistung das eigentlich ist.

Die Leistung von Atlantikwellen wurde gemessen: Sie ist etwa 40 kW pro Meter Küstenlinie. Das klingt nach einer ganzen Menge. Wenn jeder ein Meter Küste besäße und die gesamten 40 kW abgreifen könnte, dann wäre das genug Leistung, um die moderne Nachfrage zu decken. Jedoch ist dafür *unsere Bevölkerung zu groß*. Es gibt nicht genug Atlantikküste, das jeder einen Meter davon haben könnte.

Wie obige Karte auf Seite 82 zeigt, hat England etwa 1000 km Atlantikküste (1 Million Meter), das ist 1/60 Meter pro Person. Das ergibt eine Wellenleistung von 16 kWh/d pro Person. Würden wir all diese Energie extrahieren, wäre der Atlantik an der Küste flach wie ein Mühlstein. In der Praxis kann kein System die ganze Leistung extrahieren, und dazu kommen Verluste bei der Umwandlung der mechanischen in elektrische Energie. Nehmen wir an, die brillanten Wellenmaschinen könnten 50%-effizient hereinrollende Wellenenergie in Elektrizität wandeln und wir könnten solche Wellenmaschinen auf 500 km entlang der Atlantikküste packen. Das hieße, wir könnten 25% des theoretisch Möglichen nutzbar machen. Das sind **4 kWh/d pro Person**. Wie gewöhnlich habe ich ziemlich extreme Annahmen gemacht, um den grünen Stapel wachsen zu lassen – ich erwarte, dass die Annahme, *die Hälfte der gesamten Atlantikküste* könne mit Wellenabsorbieren bestückt werden, für viele Leser recht utopisch klingt.

Wie stehen diese Zahlen zu der Technologie von heute? Derzeit werden drei Wellenmaschinen im tiefen Wasser betrieben: Drei Pelamis Wellenenergie-Kollektoren (Fig.12.1), gebaut in Schottland und aufgestellt vor Portugal. Es gibt keine Veröffentlichung aktueller Betriebsdaten, doch erwarten die Hersteller der Pelamis („die vorrangig auf Lebensdauer und weniger auf Energie-Effizienz optimiert sind“), dass auf einer 2 km langen Wellenfarm aus 40 ihrer „Seeschlangen“ 6 kW/m gewonnen werden können. Nehmen wir diese Zahlen in unserer obigen Rechnung, müssten wir die Leistung, die wir aus unseren 500 km erzeugen, auf **1,2 kWh/d pro Person** reduzieren. Wenn auch Wellenkraft für kleinere Siedlungen auf abgelegenen Inseln nützlich sein kann, vermute

ich doch, dass diese Technologie keine signifikante Rolle bei der Lösung des englischen Energieproblems spielen kann.

Was wiegt ein Pelamis, wie viel Stahl verbraucht es? Eine Schlange mit einer Maximalleistung von 750 kW wiegt 700 Tonnen, einschließlich 350 Tonnen Ballast. Es besteht aus 350 Tonnen Stahl. Das ist ein Gewicht-zu-Leistung-Verhältnis von rund 500 kg pro kW (Spitze). Vergleichen wir das mit dem Materialverbrauch von off-shore Windmühlen: Die wiegen 500 Tonnen bei einer Maximalleistung von 3 MW, das ist ein Verhältnis von 170 kg pro kW, ein Drittel der Wellenmaschine. Pelamis ist ein erster Prototyp; vermutlich wird sich dieses Verhältnis mit weiteren Investitionen und Entwicklungen der Wellentechnologie noch deutlich verbessern lassen.

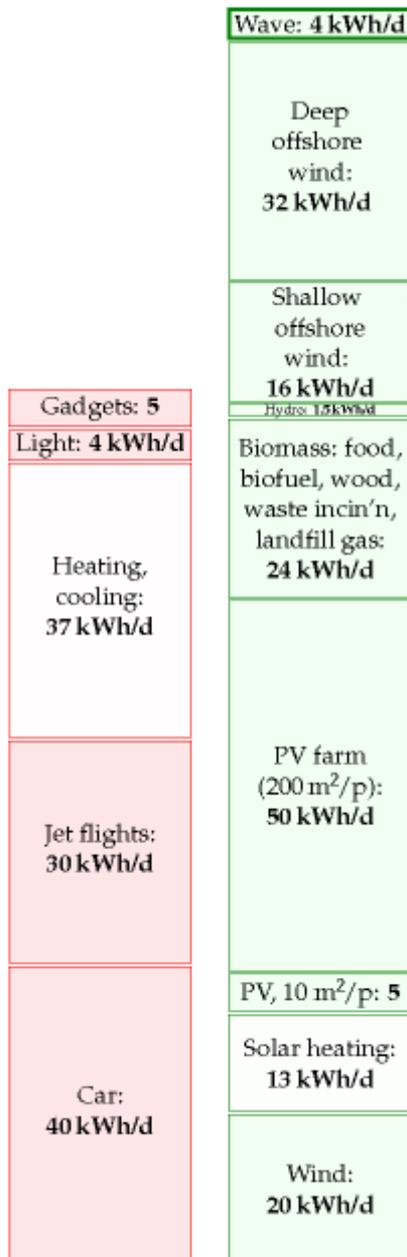


Foto von Terry Cavner



Fig.12.2: Wellen

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 82 **Auf offener See werden Wellen immer dann erzeugt, wenn die Windgeschwindigkeit über etwa 0,5 m/s liegt.** 73¹⁶ Waves are generated whenever the wind speed is greater than about 0.5m/s. The wave crests move at about the speed of the wind that creates them. The simplest theory of wave-production (Faber, 1995, p. 337) suggests that (for small waves) the wave crests move at about half the speed of the wind that creates them. It's found empirically however that, the longer the wind blows for, the longer the wavelength of the dominant waves present, and the greater their velocity. The characteristic speed of fully-developed seas is almost exactly equal to the wind-speed 20 metres above the sea surface (Mollison, 1986).
- 83 **Wellen an Englands Ostküste sind gewöhnlich viel kleiner** – The waves on the east coast of the British Isles are usually much smaller. Whereas the wave power at Lewis (Atlantic) is 42 kW/m, the powers at the east-coast sites are: Peterhead: 4 kW/m; Scarborough: 8 kW/m; Cromer: 5 kW/m. Source: Sinden (2005). Sinden says: “The North Sea Region experiences a very low energy wave environment.”
- 83 **Die Leistung von Atlantikwellen wurde gemessen: Sie ist etwa 40 kW pro Meter Küstenlinie.** 74 Atlantic wave power is 40 kW per metre of exposed coastline. (Chapter F explains how we can estimate this power using a few facts about waves.) This number has a firm basis in the literature on Atlantic wave power (Mollison et al., 1976; Mollison, 1986, 1991). From Mollison (1986), for example: “the large scale resource of the NE Atlantic, from Iceland to North Portugal, has a net resource of 40–50MW/km, of which 20–30MW/km is potentially economically extractable.” At any point in the open ocean, three powers per unit length can be distinguished: the total power passing through that point in all directions (63 kW/m on average at the Isles of Scilly and 67 kW/m off Uist); the net power intercepted by a directional collecting device oriented in the optimal direction (47 kW/m and 45 kW/m respectively); and the power per unit coastline, which takes into account the misalignment between the optimal orientation of a directional collector and the coastline (for example in Portugal the optimal orientation faces northwest and the coastline faces west).
- 83 **In der Praxis kann kein System die ganze Leistung extrahieren** – Practical systems won't manage to extract all the power, and some of the power will inevitably be lost during conversion from mechanical energy to electricity. The UK's first grid-connected wave machine, the Limpet on Islay, provides a striking example of these losses. When it was designed its conversion efficiency from wave power to grid power was estimated to be 48%, and the average power output was predicted to be 200 kW. However losses in the capture system, flywheels and electrical components mean the actual average output is 21 kW – just 5% of the predicted output (Wavegen, 2002).

¹⁶ Zur Vereinfachung des Übersetzungsprozesses wurden die Anmerkungen und Quellenangaben ab hier größtenteils (noch) nicht ins Deutsche übertragen. Zur Kenntlichmachung der Textstelle im deutschen Text, auf die sich die Anmerkung bezieht, ist hier die Seite und das Zitat (wie bisher in rot) angegeben. Es folgt der englische Originaltext der Anmerkung. Dieser beginnt ebenfalls mit einer Seitenzahl, jedoch bezieht sich diese auf die (abweichende) Nummerierung im Originaltext. (Ein Gedankenstich bedeutet hier, dass die Seitenzahl mit derjenigen der vorangehenden Anmerkung identisch ist.) Dahinter steht das entsprechende englische Textzitat, gefolgt von weiteren Anmerkungen oder Quellenangaben des Autors.

13. Lebensmittel und Landwirtschaft

Modern agriculture is the use of land to convert petroleum into food.

Albert Bartlett

In Kapitel 6 haben wir bereits behandelt, wie viel erneuerbare Energie durch Pflanzen erzeugt werden kann, hier diskutieren wir, wie viel Leistung derzeit *verbraucht* wird, um uns unser tägliches Brot zu geben.

Eine mittelmäßig aktive Person mit 65 kg Körpergewicht benötigt Nahrung mit einem Energiegehalt von etwa 2600 „Kalorien“¹⁷ täglich. Die Bezeichnung „Kalorie“ in Nahrungsmittelkreisen steht eigentlich für 1 Kilokalorie (1 kcal), also 1000 Kalorien nach der chemischen Definition. 2600 „Kalorien“ pro Tag entsprechen etwa 3 kWh pro Tag. Das meiste dieser Energie verlässt den Körper als Wärme, also wirkt eine typische Person als Raumheizung mit etwas über 100 W, ähnlich einer Glühbirne. Stecken Sie 10 Personen in einen kleinen kalten Raum und Sie können den 1kW-Heizlüfter abstellen.

Wie viel Energie verbrauchen wir tatsächlich, um diese 3 kWh pro Tag zu bekommen? Wenn wir unseren Blickwinkel erweitern und auch die unausweichlichen Kosten für die Nahrungsmittelproduktion mit berücksichtigen, ist unser energetischer Fußabdruck nennenswert größer. Es hängt davon ab, ob wir Veganer, Vegetarier oder Fleischesser sind.



Fig.13.1: Ein Salat Nicoise

Minimum: 3 kWh/d



Fig.13.2: Mindestenergieverbrauch einer Person

Der Veganer hat den kleinstmöglichen Fußabdruck: **3 kWh pro Tag** von den Pflanzen, die er isst.

Die Energiekosten von Trinkmilch

Ich liebe Milch. Wenn ich jeden Tag ein Glas Milch trinke, welche Energie benötigt das? Eine typische Milchkuh gibt 16 Liter Milch am Tag. Mein tägliches Glas Milch (1/2 Liter) benötigt also 1/32 Kuh. Ich liebe außerdem Käse. Und für 1 kg irischen Cheddar braucht man etwa 9 kg Milch. Jeden Tag 50 g Käse zu essen erfordert also weitere 450 g Milch. OK: Mein Milch- und Käsekonsum erfordert also 1/16 Kuh. Und wie hoch ist nun der Energieverbrauch einer Kuh? Wenn eine Kuh mit 450 kg denselben Energiebedarf pro Körpergewicht wie ein Mensch hat (dessen 65 kg ja 3 kWh täglich verbrennen), braucht die Kuh 21 kWh/d. Fühlen Sie sich unwohl bei der Extrapolation vom Mensch zur Kuh? Überprüfen wir die Daten: www.dairyaustralia.com sagt, dass die Haltung einer Kuh mit 450 kg Gewicht 85 MJ/d erfordert, das sind 24 kWh/d. Großartig, unsere Näherung war nicht weit daneben! Mein 1/16-Anteil der Kuh braucht also **1,5 kWh pro Tag**. Unberücksichtigt bleiben dabei weitere Energiekosten, etwa um die Kuh zu melken, aus der Milch Käse zu produzieren oder Milch und Käse von der Kuh zu mir zu transportieren.

¹⁷ Die alte „Kalorie“ ist in deutschsprachigen Veröffentlichungen auch im Lebensmittelbereich bereits weitgehend durch die SI-Einheit Joule (1 kcal=4,2 kJ) ersetzt.

Wir berücksichtigen einige dieser Kosten in Kapitel 15, wenn wir Fracht und Supermärkte diskutieren.

Milk, cheese: 1.5 kWh/d



Fig.13.3: Milch und Käse

Eier

Eine Legehennen frisst etwa 110 g Hühnerfutter pro Tag. Bei einem angenommenen metabolisierbaren Energieinhalt des Hühnerfutters von 3,3 kWh pro kg ist das ein Energiebedarf von 0,4 kWh pro Tag pro Huhn. Legehühner liefern im Mittel 290 Eier pro Jahr. Zwei Eier täglich zu essen erfordert **1 kWh/d**. Das Ei selbst hat 80 kcal, das sind etwa 0,1 kWh. Aus energetischer Sicht ist Eierproduktion also 25% effizient.

Eggs: 1 kWh/d



Fig.13.4: Zwei Eier pro Tag

Die Energiekosten von Fleisch

Sagen wir, ein enthusiastischer Fleischesser verzehrt ein halbes Pfund Fleisch am Tag, oder 227 g (das ist der Mittelwert bei den Amerikanern). Um die erforderliche Energie für die Haltung und Mast der Schlachttiere abzuschätzen, müssen wir wissen, wie lang diese Tiere leben und Energie verbrauchen. Hähnchen, Schwein oder Rind?

Hähnchen, der Herr? Jedes Hähnchen, das Sie essen lief etwa 50 Tage lang als Hahn herum. Der regelmäßige Verzehr von einem halben Pfund Hähnchen täglich erfordert also 25 Pfund Masthähnchen, die herumlaufen und sich aufs Gegessenwerden vorbereiten. Und diese 25 Pfund konsumieren Energie.

Schwein, Madam? Schweine laufen länger herum – vielleicht 400 Tag von Geburt bis zum Schinken, darum benötigt der regelmäßige Verzehr von einem halben Pfund Schwein am Tag etwa 200 Pfund lebende Schweine, die auf die Schlachtung warten.

Rind? Rindfleischproduktion erfordert die längste Vorlaufzeit. Es braucht etwa 1000 Tage Kuh-Lebenszeit, um ein Steak zu werden. Der regelmäßige Verzehr eines halben Pfunds Rindfleisch benötigt also 500 Pfund Lebendfleisch auf den Kuhweiden.

Carnivory: 8 kWh/d



Fig.13.5: Fleischverzehr verbraucht mehr Energie, da wir die Schlange von Tieren ernähren müssen, die sich zum späteren Verzehr anstellen.

Um aus all diesen Ansätzen eine einzige Zahl zu erhalten, nehmen wir an, das halbe Pfund Fleisch täglich setze sich aus gleichen Anteilen Hähnchen, Rind und Schwein zusammen. Dieses Konsumverhalten benötigt eine laufende Tierhaltung von 8 Pfund Hähnchen, 70 Pfund Schwein und 170 Pfund Rind. Das ist eine Summe von 110 kg Fleisch, oder 170 kg Tier (denn etwa 2/3 des Lebendgewichtes eines Tieres kann zu Fleisch verarbeitet werden). Und wenn nun diese 170 kg Tiere einen ähnlichen Energiebedarf wie Menschen haben (deren 65 kg ja 3 kWh/d verbrennen), ergibt das einen Energiefluss von

$$170 \text{ kg} \times \frac{3 \text{ kWh/d}}{65 \text{ kg}} \approx 8 \text{ kWh/d.}$$

Wieder benutzte ich die physiologische Analogie „Tiere sind wie Menschen“; eine genauere Abschätzung zur Hähnchenproduktion findet sich in den Anmerkungen am Ende dieses Kapitels. Macht nichts, ich wollte nur die Größenordnung abschätzen, und

das haben wir hier. Die Energie, die zur Herstellung des Essens eines typischen Konsumenten von Gemüse, Milchprodukten, Eiern und Fleisch erforderlich ist, liegt bei $1,5 + 1,5 + 1 + 8 = 12 \text{ kWh pro Tag}$. Die tägliche Ernährungsbilanz dieser Diät ist 1,5 kWh aus Gemüse, 0,7 kWh aus Milcherzeugnissen, 0,2 kWh aus Eiern und 0,5 kWh aus Fleisch – insgesamt 2,9 kWh pro Tag.

Diese Zahl enthält keine Anteile aus Energieverbrauch im Zusammenhang mit Ackerbau, Mast, Verarbeitung, Kühlung und Transport der Lebensmittel. Einige dieser Kosten werden wir unten in Kapitel 15 abschätzen.

Gibt uns diese Berechnung ein Argument, aus energetischen Gründen Vegetarismus zu bevorzugen? Das kommt darauf an, wo die Tiere aufwachsen. Nehmen sie die steilen Hügel und Berge von Wales als Beispiel. Könnte man das Land anders als zum Beweiden verwenden? Entweder nutzt man diese Gegenden zur Schafzucht, oder sie tragen nichts zur Nahrungsversorgung von Menschen bei. Man kann sich also diese natürlichen Grünstreifen vorstellen als wartungsfreie Biotreibstoff-Plantage, und die Schafe als automatisierte selbst-replizierende Biotreibstoff-Erntemaschinen. Die Energieverluste vom Sonnenlicht bis zum Schafsfleisch sind gravierend, doch gibt es wahrscheinlich keine effizientere Möglichkeit, Sonnenenergie in solch unwirtlichen Gegenden einzusammeln. (Ich bin nicht sicher, ob dieses Argument für walisische Schaffarmen tatsächlich Sinn macht: Während des schlechtern Wetters werden die walisischen Schafe in tiefergelegene Felder geführt und ihre Kost mit Soja und anderen Futtermitteln, die unter Verwendung energieintensiver Dünger angebaut werden, aufgebessert. Was sind da die wahren Energiekosten? Ich weiß es nicht.) Ähnliche Argumente kann man zur Verteidigung des Fleischverzehr in den Steppen Afrikas oder Australiens anführen oder für Milchverzehr in Indien, wo Millionen von Kühen durch Nebenprodukte des Reis- und Maisanbaus ernährt werden.



Fig.13.6: Erntet Energiepflanzen als Futter

Wo andererseits Tiere in Käfigen gehalten werden und mit Korn gefüttert werden, das auch Menschen hätten essen können, dort ist es fraglos energetisch günstiger, die Henne oder die Sau dazwischen auszulassen und das Korn direkt an die Menschen zu verfüttern.

Dünger und andere Energiekosten der Landwirtschaft

Die in europäische Düngemittel eingebrachte Energie ist etwa **2 kWh pro Tag pro Person**. Nach einer Veröffentlichung der DEFRA durch die Universität von Warwick wurden in der englischen Landwirtschaft **0,9 kWh pro Tag pro Person** für Traktoren und Maschinen, Heizung (insbesondere Gewächshäuser), Beleuchtung, Belüftung und Kühlung aufgewendet.

Die Energiekosten von Minka, Rex und Flicka

Haustiere! Sind Sie der Sklave eines Hundes, einer Katze oder eines Pferdes?

Es gibt vermutlich 8 Millionen Katzen in England. Nehmen wir an, Sie kümmern sich um eine davon. Die Energiekosten von Minka? Wenn sie 50g Fleisch am Tag bekommt (Hähnchen, Schwein, Rind), so sagt unsere Kalkulation aus dem letzten Abschnitt, entspricht das einer Energie von **2 kWh pro Tag**. Eine vegetarische Katze käme günstiger.

Wenn ihr Hund Rex täglich 200g Fleisch frisst und dazu Kohlehydrate mit 1 kWh pro Tag, dann verbraucht sein Futter **9 kWh pro Tag**.

Die Stute Flicka wiegt 400 kg und braucht **17 kWh pro Tag**.

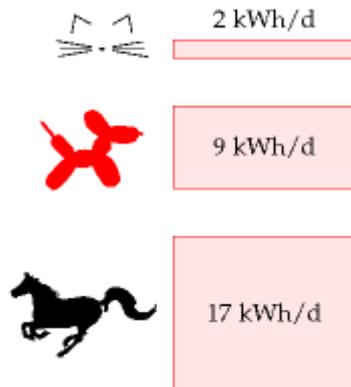


Fig.13.7: Die Energie im Futter von Haustieren

Sagen und Mythen

Ich hörte, dass der energetische Fußabdruck unserer Nahrung so groß ist, dass „es besser ist zu fahren als zu Fuß zu gehen.“

Ob das stimmt, hängt von Ihrer Ernährung ab. Sicher kann man Nahrung finden, deren Fußabdruck an fossiler Energie höher ist als ihr Nährwert für den Menschen. Eine Tüte Crisps hat beispielsweise eine eingebrachte Energie aus fossilen Brennstoffen von 1,4 kWh pro kWh Nährwert. Die in Fleisch eingebrachte Energie ist höher. Nach einer Studie der Universität von Exeter hat ein typischer Nahrungsmix etwa 6 kWh eingebrachte Energie pro kWh Nährwert. Um herauszufinden, ob eine Autofahrt oder ein Fußmarsch mehr Energie verbraucht, müssen wir die Transport-Effizienz beider Fortbewegungsmodi abschätzen. Das typische Auto aus Kapitel 3 brauchte 80 kWh auf 100 km. Ein Fußmarsch braucht dagegen 3,6 kWh pro 100 km – 22 mal weniger. Leben Sie also ausschließlich von Nahrung, deren Fußabdruck größer ist als 22 kWh pro kWh Nährwert, ja, dann ist der Energieverbrauch eines Fahrzeugs, das Sie von A nach B bringt, geringer als wenn Sie die Strecke aus eigener Kraft bewältigen. Wenn Sie sich aber durchschnittlich ernähren (3 kWh pro kWh) dann ist „besser fahren als gehen“ ein Mythos. Gehen braucht etwa ein Viertel der Energie.

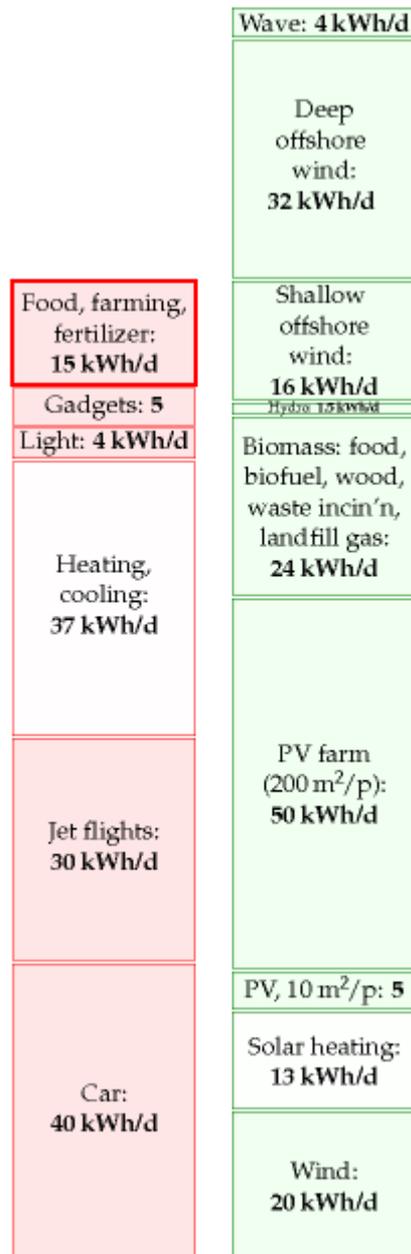


Fig.13.8: Nahrungsmittel und Ackerbau

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 86 **Eine typische Milchkuh gibt 16 Liter Milch am Tag.** A typical dairy cow produces 16 litres of milk per day. There are 2.3 million dairy cows in the UK, each producing around 5900 litres per year. Half of all milk produced by cows is sold as liquid milk. www.ukagriculture.com, www.vegsoc.org/info/cattle.html
- 87 **Es braucht etwa 1000 Tage Kuh-Lebenszeit,** 77 It takes about 1000 days of cow-time to create a steak. 33 months from conception to slaughterhouse: 9 months' gestation and 24 months' rearing. www.shabdenparkfarm.com/farming/cattle.htm
- 87 **Hühnchen:** – Chicken. A full-grown (20-week old) layer weighs 1.5 or 1.6 kg. Its feed has an energy content of 2850 kcal per kg, which is 3.3 kWh per kg, and its feed consumption rises to 340 g per week when 6 weeks old, and to 500 g per week when aged 20 weeks. Once laying, the typical feed required is 110 g per day. Meat

chickens' feed has an energy content of 3.7 kWh per kg. Energy consumption is 400–450 kcal per day per hen (0.5 kWh/d per hen), with 2 kg being a typical body weight. A meat chicken weighing 2.95 kg consumes a total of 5.32 kg of feed [5h69fm]. So the embodied energy of a meat chicken is about 6.7 kWh per kg of animal, or 10 kWh per kg of eaten meat. If I'd used this number instead of my rough guess, the energy contribution of the chicken would have been bumped up a little. But given that the mixed-meat diet's energy footprint is dominated by the beef, it really doesn't matter that I underestimated the chickens.

Sources: Subcommittee on Poultry Nutrition, National Research Council (1994), www.nap.edu/openbook.php?isbn=0309048923, MacDonald (2008), and www.statistics.gov.uk/statbase/datasets2.asp.

- 87 **nehmen wir an, das halbe Pfund Fleisch täglich setze sich aus gleichen Anteilen Hühnchen, Rind und Schwein zusammen.** 77 let's assume you eat half a pound (227 g) a day of meat, made up of equal quantities of chicken, pork, and beef. This is close to the average meat consumption in America, which is 251 g per day – made up of 108 g chicken, 81 g beef, and 62 g pork (MacDonald, 2008).
- 88 **Die in europäische Düngemittel eingebrachte Energie ist etwa 2 kWh pro Tag pro Person.** 78 The embodied energy in Europe's fertilizers is about 2 kWh per day per person. In 1998–9, Western Europe used 17.6Mt per year of fertilizers: 10Mt of nitrates, 3.5Mt of phosphate and 4.1Mt potash. These fertilizers have energy footprints of 21.7, 4.9, and 3.8 kWh per kg respectively. Sharing this energy out between 375 million people, we find a total footprint of 1.8 kWh per day per person. Sources: Gellings and Parmenter (2004), International Fertilizer Industry Association [5pwojp].
- 88 **wurden in der englischen Landwirtschaft 0,9 kWh pro Tag pro Person aufgewendet.**– Farming in the UK in 2005 used an energy of 0.9 kWh per day per person. Source: Warwick HRI (2007).
- 89 **Eine Tüte Crisps hat beispielsweise eine eingebrachte Energie aus fossilen Brennstoffen von 1,4 kWh pro kWh Nährwert.** 79 A bag of crisps has an embodied energy of 1.4 kWh of fossil fuel per kWh of chemical energy eaten. I estimated this energy from the carbon footprint of a bag of crisps: 75 g CO₂ for a standard 35 g bag [5bj8k3]. Of this footprint, 44% is associated with farming, 30% with processing, 15% packaging, and 11% transport and disposal. The chemical energy delivered to the consumer is 770 kJ. So this food has a carbon footprint of 350 g per kWh. Assuming that most of this carbon footprint is from fossil fuels at 250 g CO₂ per kWh, the energy footprint of the crisps is 1.4 kWh of fossil fuel per kWh of chemical energy eaten.
- 89 **hat ein typischer Nahrungsmix etwa 6 kWh eingebrachte Energie pro kWh Nährwert.**– The typical diet has an embodied energy of roughly 6 kWh per kWh eaten. Coley (2001) estimates the embodied energy in a typical diet is 5.75 times the derived energy. Walking has a CO footprint of 42 g/km; cycling, 30 g/km. For comparison, driving an average car emits 183 g/km.
- 89 **Ein Fußmarsch braucht dagegen 3,6 kWh pro 100 km** – Walking uses 3.6 kWh per 100 km. A walking human uses a total of 6.6 kWh per 100 km [3s576h]; we subtract off the resting energy to get the energy footprint of walking (Coley, 2001).

Weiterführende Literatur: Weber and Matthews (2008).

14. Gezeiten

Mond und Erde tanzen verschlungene Pirouetten um die Sonne. Zusammen umkreisen sie die Sonne einmal pro Jahr und zugleich umkreisen sie einander alle 28 Tage. Der Mond dreht sich auch noch einmal in 28 Tagen um sich selbst, so dass er seiner Tanzpartnerin, der Erde, immer dasselbe Gesicht zeigt. Die Primadonna Erde erwidert dieses Kompliment nicht; sie dreht sich einmal am Tag. Der Tanz wird zusammengehalten durch die Gravitation: Jedes Masseteilchen der Erde, des Mondes, der Sonne zieht es zu jedem anderen Masseteilchen in der Erde, dem Mond und der Sonne hin. Die Summe dieser Kräfte ist nahezu exakt das, was erforderlich ist, um diesen Kreiseltanz aufrecht zu erhalten. Doch es gibt ganz kleine Ungleichgewichte zwischen diesen Gravitationskräften und den zur Aufrechterhaltung der Tanzbewegung erforderlichen Kräften. Diese Ungleichgewichte sind der Grund für Gezeiten.

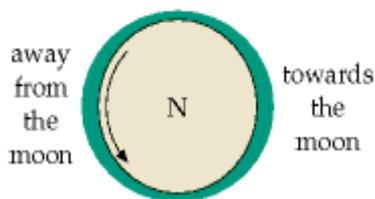


Fig.14.1: Ein Ozean um eine Billardkugel-Erde. Blick auf den Nordpol, der Mond ist rechts 60 cm außerhalb der Seite. Die Erde dreht sich einmal pro Tag innerhalb der Rugbyball-förmigen Hülle aus Wasser. Die Ozeane werden zum Mond hin und vom Mond weg verformt, weil die Gravitationskräfte des Mondes nicht 100%ig mit den erforderlichen Zentripetalkräften übereinstimmen, die zur Aufrechterhaltung der Drehbewegung erforderlich wären, die der Mond und die Erde um den gemeinsamen Schwerpunkt vollführen. Ein Beobachter am Äquator (der in Pfeilrichtung rotiert) erlebt zwei Hoch- und zwei Niedrigwasser pro täglicher Umdrehung.

Die Ungleichgewichte im Zusammenhang mit der Drehbewegung von Mond und Erde umeinander sind etwa dreimal höher als die aus dem langsameren Tanz der Erde um die Sonne, darum variiert die Höhe der Gezeitenbewegung (der Tidenhub) mit der Mondphase, je nach dem, ob Sonne und Mond gleich- oder gegengerichtet wirken. Bei Vollmond und Neumond (wenn Mond und Sonne in einer Linie miteinander sind) verstärken sich die Ungleichgewichte und der resultierende große Tidenhub wird Springflut genannt. Bei den dazwischenliegenden Halbmonden heben sich die Ungleichgewichte teilweise auf und der Tidenhub ist geringer. Diese geringeren Tiden werden Nipptiden (Nippflut) genannt. Springtiden haben etwa die doppelte Höhe von Nipptiden. Die Springflut ist etwa doppelt so weit über dem mittleren Seelevel wie Nippflut, Springebbe etwa doppelt so tief unter mittlerem Seelevel wie Nippebbe; die Gezeitenströme sind ebenfalls bei Springtide doppelt so hoch wie bei Nipptide.

Warum gibt es zweimal am Tag Flut und zweimal Ebbe? Wäre die Erde perfekt sphärisch, eine glatte Billardkugel umgeben mit Ozean, würde der Gezeiteneffekt der Erde-Mond-Bewegung das Wasser ein wenig zum Mond hin und vom Mond weg deformieren, in eine leichte Rugbyball-Form (Fig.14.1). Ein Bewohner am Äquator dieser Billardkugel-Erde, der sich ja einmal pro Tag in diesem Wasserkokon rundherum bewegt, würde das Wasser zweimal am Tag auf und ab gehen sehen: Hochwasser sähe er einmal unter der „Nase“ des Rugbyballs und ein zweites mal unter dem „Schwanz“. Diese vereinfachte Erklärung ist ein Stück von der Realität entfernt. In der Realität ist die Erde nicht glatt und auch nicht gleichmäßig von Wasser umgeben (wie Sie vielleicht schon bemerkt haben). Die beiden Wasserbäuche können nicht einmal pro Tag um die Erde brausen, weil ihnen die Kontinente im Wege stehen. Deswegen ist das wahre Verhalten der Gezeiten etwas komplizierter. In großen Wasserkörpern wie dem Atlantik formen sich Gezeitenkämme und -tröge, die jedoch nicht um die Erde brausen können und daher das Nächstbeste machen: sie brausen um den Umfang des Ozeans herum. Im Nordatlantik sind zwei Kämme und zwei Tröge, die alle den Atlantik im Gegenuhrzeigersinn einmal

täglich umkreisen. Hier in England sehen wir diese Kämme und Täler nicht direkt, vom Kern des Atlantiks sind wir ein Stück zurückgesetzt, getrennt durch ein paar hundert Meilen Planschbecken genannt Kontinentalschelf. Immer wenn im Kern des Atlantiks einer der Kämme vorbeibraust, schickt er auch einen Kamm in unser Planschbecken. Genauso sendet jeder atlantische Trog einen kleinen Trog ins Planschbecken. Zwischen aufeinanderfolgenden Kämmen und Trögen liegen jeweils sechs Stunden, genauer gesagt $6\frac{1}{4}$ Stunden, da die Zeit zwischen zwei Mondaufgängen 25 und nicht 24 Stunden beträgt.



Fig.14.2: Woodbridge Gezeitenbecken und Gezeiten-Mühle. Foto mit freundlicher Genehmigung von Ted Evans.

Die Geschwindigkeit, mit der diese Kämme und Tröge sich fortbewegen, hängt von der Tiefe des Planschbeckens ab. Je seichter das Wasser wird, um so langsamer bewegen sich die Kämme und Tröge vorwärts und um so höher werden sie auch. Draußen im Ozean beträgt der Tidenhub gerade mal ein oder zwei Fuß¹⁸. Treffen die Gezeiten auf europäische Gefilde, ist der Tidenhub oft bis zu 4 Meter. Auf der Nordhalbkugel sorgt die Corioliskraft (eine Kraft im Zusammenhang mit der Erdrotation, die nur auf bewegte Objekte wirkt) dafür, dass die Kämme und Tröge nach rechts abdriften. Beispielsweise sind die Tiden, die in den Ärmelkanal vom Atlantik her einströmen, an der Küste Frankreichs höher als an der englischen. Genauso nehmen Tiden, die bei den Orkneyinseln in die Nordsee einströmen, zuerst den Weg Richtung Themsemündung, um dann bei den Niederlanden links abzubiegen und Dänemark ihren Respekt zu erweisen.

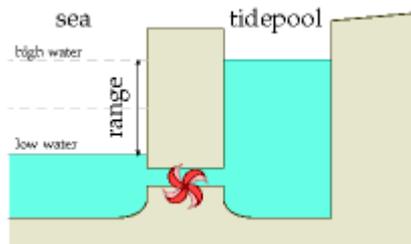


Fig.14.3: Ein künstliches Gezeitenbecken. Es füllt sich bei Flut, gezeitigt ist Ebbe. Das Wasser wird nun durch den Generator hindurch gelassen, um die potenzielle Energie des Wassers in Elektrizität zu verwandeln.

Gezeitenenergie wird manchmal auch lunare Energie genannt, da es hauptsächlich dem Mond zu verdanken ist, dass das Wasser so herumströmt. Das meiste der Gezeitenenergie kommt aber in Wirklichkeit aus der Rotationsenergie der sich drehenden Erde. Die Erde wird ganz langsam langsamer.

Wie können wir nun die Gezeitenenergie nutzen und wie viel Leistung können wir herausholen?

¹⁸ Ein Fuß entspricht 30,48 cm

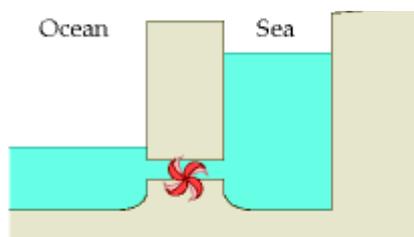
Tidenhub	Leistungsdichte
2 m	1 W/m ²
4 m	3 W/m ²
6 m	7 W/m ²
8 m	13 W/m ²

Tabelle 14.4: Leistungsdichte (Leistung pro Flächeneinheit) eines Gezeitenbeckens, bei Nutzung von steigender und fallender Tide.

Grobe Leistungsabschätzung der Gezeitenkraft

Unter einem Gezeitenkraftwerk stellt man sich ein Becken nahe am Meer vor, mit einem Wasserrad, das sich dreht, wenn das Becken sich füllt oder leert (Fig.14.2 und 14.3). Anhang G zeigt, wie man die verfügbare Leistung an so einem Gezeitenbecken (Tide Pool) abschätzen kann. Bei einer angenommenen Höhe von 4 m, typisch für viele europäische Küsten, liegt die maximal erzielbare Leistung eines künstlichen Beckens, das sich bei Flut schnell füllt und bei Ebbe auch schnell wieder leert, und dessen Turbine in beiden Flussrichtungen Energie erzeugt, bei 3 W/m². Das ist dieselbe Leistungsdichte wie bei off-shore Windanlagen. Wir wissen bereits, dass Windfarmen Landesgröße haben müssen, wenn sie zur Energieversorgung nennenswert beitragen wollen. Analog muss also auch die Fläche von Gezeitenbecken, wenn sie nennenswerte Beiträge liefern sollen, eine ähnliche Größe wie England aufweisen.

Fig.14.5: Die britischen Inseln sind in einer glücklichen Lage: Die Nordsee wirkt wie ein natürliches Gezeitenbecken, in und aus dem zweimal am Tag große Ströme Wasser fließen.



Glücklicherweise ist ja England bereits mit einem derartigen natürlichen Gezeitenbecken ausgestattet: der Nordsee. (Fig.14.5). Wenn wir nur Generatoren an passende Stellen setzen, können wir nennenswerte Leistung extrahieren. Die Generatoren könnten wie Unterwasser-Windmühlen konstruiert sein. Weil die Dichte von Wasser etwa 1000mal höher ist als die von Luft, ist auch die Leistung eines Wasserstroms 1000mal höher als die von Wind gleicher Geschwindigkeit. Wir kommen gleich auf Gezeitenfarmen zurück, doch lassen Sie uns zuerst diskutieren, wie viel Gezeitenenergie England täglich umstreicht.

Ankommende Gezeitenkraft

Ebbe und Flut um England sind echte Gezeitenwellen – nicht wie die Tsunamis, die auch oft Flutwellen genannt werden, aber nichts mit Gezeiten zu tun haben. Folgen wir eine Flutwelle aus dem Atlantik. Der Zeitpunkt des höchsten Wasserstandes kommt immer später, je weiter wir nach Osten den Ärmelkanal entlanggehen von den Isles of

Scilly über Portsmouth nach Dover. Der Kamm der Flutwelle läuft den Kanal mit etwa 70 km/h hoch (Der Wellenkamm läuft schneller als das Wasser selbst, wie auch normale Wellen auf See schneller laufen als das Wasser strömt.) Gleichzeitig läuft eine Flutwelle im Uhrzeigersinn um Schottland die Nordsee herunter von Wick über Barwick nach Hull mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h. Die beiden Fluten treffen im Themse-Mündungstrichter aufeinander. Zufälligerweise trifft die schottische Welle 12 Stunden später als die zugehörige Welle aus Richtung Dover ein. Deswegen trifft sie nahezu synchron mit der nächstfolgenden Flutwelle aus Dover zusammen und London erhält die normalen zwei Fluten täglich.



Fig.14.6: Die mittlere ankommende Leistung der lunaren Gezeitenwellen senkrecht zu diesen beiden Linien wurde vermessen: 250 GW. Verteilt auf 60 Millionen Menschen sind das 100 kWh pro Tag pro Person.

Die Leistung, die wir aus den Gezeiten gewinnen können, kann nie höher sein als die Gesamtleistung dieser Flutwellen aus dem Atlantik. Die Gesamtleistung, die die beiden in Fig.14.6 eingezeichneten Linien überquert, wurde gemessen; im Mittel beträgt sie 100 kWh/d pro Person. Wenn wir uns vorstellen, 10% dieser ankommenden Energie abzugreifen und das mit einem 50%-effizienten Prozess (für Konversion und Übertragung), ergäbe das eine mittlere Leistung **von 5 kWh pro Tag pro Person**.

Das ist eine gefühlsmäßige erste Schätzung, ohne spezielle technische Details ausgearbeitet zu haben. Lassen Sie uns nun die mögliche Leistung dreier spezieller Lösungen untersuchen: Gezeitenfarmen, Sperrwerke und off-shore Tiden-Lagunen.

Geschwindigkeit		Leistungsdichte
(m/s)	(Knoten)	(W/m ²)
0,5	1	1
1	2	8
2	4	60
3	6	200
4	8	500
5	10	1000

Tabelle 14.7: Leistungsdichte von Gezeitenfarmen (in Watt pro qm Meeresgrund) als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit (1 Knoten = 1 nautische Meile pro Stunde = 0,514 m/s)

Gezeitenfarmen

Eine Möglichkeit, die Energie aus dem Gezeitenstrom zu extrahieren, ist der Bau einer Gezeitenfarm, ähnlich einer Windfarm. Die erste Unterwasser-Windmühle, die ans Netz

ging, war eine „300kW“-Turbine, installiert 2003 nahe der nördlich gelegenen Stadt Hammerfest in Norwegen. Ausführliche Ergebnisse wurden dazu nicht veröffentlicht und niemand hat bisher eine Gezeitenfarm mit mehr als einer Turbine installiert, daher müssen wir uns auf die Physik und die Kunst des Abschätzens verlassen, um vorauszusagen, wie viel Leistung solche Gezeitenfarmen produzieren könnten. Unter der Annahme, die Regeln zum Aufbau einer Gezeitenfarm wären ähnlich denen einer Windfarm, und die Turbinen seien in ihrer Effizienz vergleichbar mit den besten Windmühlen, erhält man gemäß Tabelle 14.7 die Leistung einer Gezeitenfarm bei einigen Gezeitenstromstärken.

Bei den üblichen Gezeitenströmen von 2-3 Knoten gibt es viele Plätze rund um England, wo Gezeitenfarmen 6 W/m² und mehr erzeugen können. Das kann man nun vergleichen mit Windfarmen (2-3 W/m²) und PV-Freiflächenanlagen (5-10 W/m²).

Gezeitenkraft muss man nicht verachten! Was trüge sie bei, würde man alle ökonomischen Hindernisse zu ihrer Ausbeutung ausblenden, wenn wir alle vielversprechenden Stellen um England ausstatten würden? Anhang G stellt eine Liste der Flussgeschwindigkeiten zusammen und schätzt den Beitrag auf **9 kWh/d pro Person** ab.



Fig.14.8: Das geplante Severn Stauwerk (unten links) und Strangford Lough in Nordirland (oben links) im Maßstabsvergleich mit dem Stauwerk bei La Rance (unten rechts). Die Karte zeigt zwei mögliche Stellen für das Severn-Stauwerk. Die Variante bei Weston-super-Mare würde im Mittel 2 GW (0,8 kWh/d/p) liefern, die äußere Variante doppelt so viel. Eine große Gezeitenkraft-Ressource liegt in Nordirland: Strangford Lough hat eine Fläche von 150 km², der Tidenhub dort liegt bei etwa 4,5 m (Springflut) bzw. 1,5 m (Nippflut) – leider nicht so hoch wie bei La Rance oder am Severn. Die Gezeitenleistung beträgt grob 150 MW, aufgeteilt auf die 1,7 Millionen Menschen in Nordirland sind das 2 kWh/d/p. Bei Strangford Lough ging der erste Gezeitenstrom-Generator Englands ans Netz.

Stauwerke

Gezeitenkraft-Stauwerke sind eine bewährte Technologie. Das berühmte Stauwerk La Rance in Frankreich, wo der mittlere Tidenhub 8 m beträgt, produziert seit 1966 eine mittlere Leistung von 60 MW. Auch im Mündungstrichter des Severn ist der Tidenhub ungewöhnlich hoch. Bei Cardiff beträgt der Hub 11,3 m bei Springflut, 5,8 m bei Nippflut. Würde man ein Sperrwerk über den Mündungstrichter ziehen (von Weston-super-Mare nach Cardiff), ergäbe das ein 500 km² Gezeitenbecken (Fig.14.8). Man beachte, um wie viel größer dieses Becken ist als La Rance. Welche Leistung könnte man hier gewinnen, würde man das Wasser zu den geeigneten Zeiten ein- und ausströmen lassen und Generatoren bei Ebbe und bei Flut beschicken? Nach den theoretischen Werten aus Tabelle 14.4. wären bei einem Hub von 11,3 m (bei 30 W/m²) maximal 14,5 GW oder 5,8 kWh/d pro Person, bei 5,8 m Hub (8 W/m²) immerhin noch 3,9 GW oder 1,6 kWh/d/p möglich. Diesen Zahlen liegt die Annahme zu Grunde, dass das Wasser bei Flut in einem einzigen Schwall eingelassen wird und bei Ebbe wiederum in einem einzigen Schwall ausströmt. In der Praxis ziehen sich Füll- und Entleerungsvorgang über mehrere Stunden hin, was den Leistungsertrag ein wenig mindert. Die aktuellen Pläne für das Stauwerk sehen nur in einer Richtung Stromgewinnung vor, was den Ertrag um 50% reduziert. Die Berichte der Ingenieure über das geplante Severn-Stauwerk nennen einen Ertrag von **0,8 kWh/d pro Person** nur aus der Ebbe-Strömungsrichtung. Das Stauwerk würde zudem Hochwasserschutz bieten, der mit 120 Millionen € jährlich bewertet wird.

Tidenlagunen

Tidenlagunen erzeugt man durch Mauern im Meer; sie werden dann wie künstliche Gezeitenbecken benutzt. Gute Randbedingungen für Tidenlagunen sind: Das Wasser ist seicht und der Tidenhub ist hoch. Die Ökonomie der Größenverhältnisse gilt: Große Tidenlagunen können billigere Elektrizität machen als kleine. Zwei Hauptkandidaten für Tidenlagunen in England sind The Wash an der Ostküste und die Gewässer vor Blackpool an der Westküste (Fig.14.9). Kleinere Anlagen könnten in Nord-Wales, Lincolnshire, Südwest-Wales und Ost-Sussex entstehen.



Fig.14.9: Zwei Tidenlagunen mit einer Fläche von 400 km², eine vor Blackpool, die andere in The Wash. Die Severn-Mündung ist zum Vergleich ebenfalls hervorgehoben.

Werden zwei Lagunen an derselben Stelle errichtet, gibt es einen netten Trick, mit dem man die Leistung erhöhen kann und der es ermöglicht, Leistung „auf Bestellung“ jederzeit abzugeben, unabhängig vom Wasserstand. Eine Lagune kann als „Flutlagune“, die andere als „Ebbelagune“ benutzt werden. Bei Ebbe kann ein Teil der Leistung, die

beim Ausströmen aus der Flutlagune gewonnen wird, dazu benutzt werden, die Ebbe lagune weiter auszupumpen und deren Level so unter den Ebbelevel abzusenken. Die dazu verwendete Energie wird später mit Zinsen zurückgewonnen, wenn Stromerzeugung durch Füllen der Ebbe lagune gewonnen wird. In gleicher Weise kann bei Flut zusätzliches Wasser in die Flutlagune gepumpt werden. In welcher Gezeitenphase man sich auch befindet, immer kann eine der beiden Lagunen Leistung abgeben. Ein solches Tidenlagunenpaar kann darüber hinaus als Pumpspeicheranlage dienen, die überschüssige Energie aus dem Stromnetz speichern kann.

Die mittlere Leistung pro Flächeneinheit, die Tidenlagunen in britischen Gewässern erreichen können, liegt bei $4,5 \text{ W/m}^2$, somit könnten Tidenlagunen auf einer Fläche von 800 km^2 (wie in Fig.14.9 eingezeichnet) eine Leistung von $1,5 \text{ kWh/d pro Person}$ erzeugen,

Vorzüge der Gezeiten

Alles in Allem könnten Sperrwerke, Tidenlagunen und Gezeitenfarmen zusammen um die $11 \text{ kWh/d pro Person}$ liefern (Fig.14.10).

Gezeitenkraft wurde in England nie in industriellem Umfang genutzt, darum ist es schwer einzuschätzen, welche ökonomischen und technischen Herausforderungen zu meistern sein werden, wenn wir Gezeitenturbinen errichten und betreiben – Korrosion, Sedimentablagerungen, Verstopfung durch Treibgut? Doch es gibt sieben Gründe für Wasserkraft in England:

1. Gezeitenleistung ist völlig vorhersagbar; im Gegensatz zu Sonne und Wind sind Gezeiten eine erneuerbare Energieressource, auf die man sich verlassen kann; Gezeitenkraftwerke laufen Tag und Nacht das ganze Jahr hindurch; in Tidenlagunen kann Energie gespeichert und bei Bedarf wieder eingespeist werden.
2. Aufeinanderfolgende Hoch- und Niedrigwasser brauchen etwa 12 Stunden, bis sie um die britischen Inseln herum gelaufen sind. Die stärksten Ströme in Anglesay, Islay, Orkney und Dover treten zu verschiedenen Zeiten auf; eine Vielzahl von Gezeitenfarmen könnte so eine relative konstante Leistungsabgabe ins Stromnetz darstellen (im Vergleich zu einem großen Gezeitenkraftwerk), obwohl auch diese Gesamtleistung mit der Mondphase variiert.
3. Gezeitenkraft ist für Millionen von Jahren verfügbar.
4. Sie benötigt keine kostenintensive Ausstattung, wie etwa Photovoltaik.
5. Weil die Leistungsdichte des typischen Tidenstroms größer ist als die typische Leistungsdichte von Wind, ist eine typische 1MW -Gezeitenturbine kleiner als eine typische 1MW -Windturbine; deshalb könnten Gezeitenturbinen vielleicht auch billiger werden als Windräder.
6. Das Leben unter den Wellen ist friedlich; es gibt keine verheerenden Tiden-„Stürme“ unter Wasser; im Gegensatz zu Windturbinen, die einigen technischen Aufwand erfordern, um auch selten auftretenden Orkanen standzuhalten, benötigen Unterwasserturbinen keinen großen Sicherheitsfaktor in ihrem Design.
7. Menschen leben hauptsächlich an Land und können nicht unters Meer sehen, also sollten Einwände gegen die optische und ästhetische Wirkung von Gezeitenturbinen wohl weniger scharf ausfallen als bei den Windturbinen.

Sagen und Mythen

Gezeitenkraft, sicherlich sauber und grün, sollte nicht erneuerbar genannt werden. Energie aus den Gezeiten zu ziehen bremst die Erdrotation. Also kann man Gezeiten definitiv nicht auf lange Sicht nutzen.

Falsch. Schon die natürlichen Gezeiten bremsen die Erdrotation. Der natürliche Energieverlust beträgt etwa 3 TW (Shepherd, 2003)¹⁹. Wegen der Gezeitenreibung wird der Tag jedes Jahrhundert um 2,3 Millisekunden²⁰ länger. Viele Gezeitenkraftanlagen extrahieren Strömungsenergie, die ohnehin durch Reibung verloren ginge. Doch selbst wenn wir die dem Erde-Mond-System durch Gezeiten entzogene Leistung verdoppeln würden, sollte die Energie für mindestens eine Milliarde Jahre reichen.

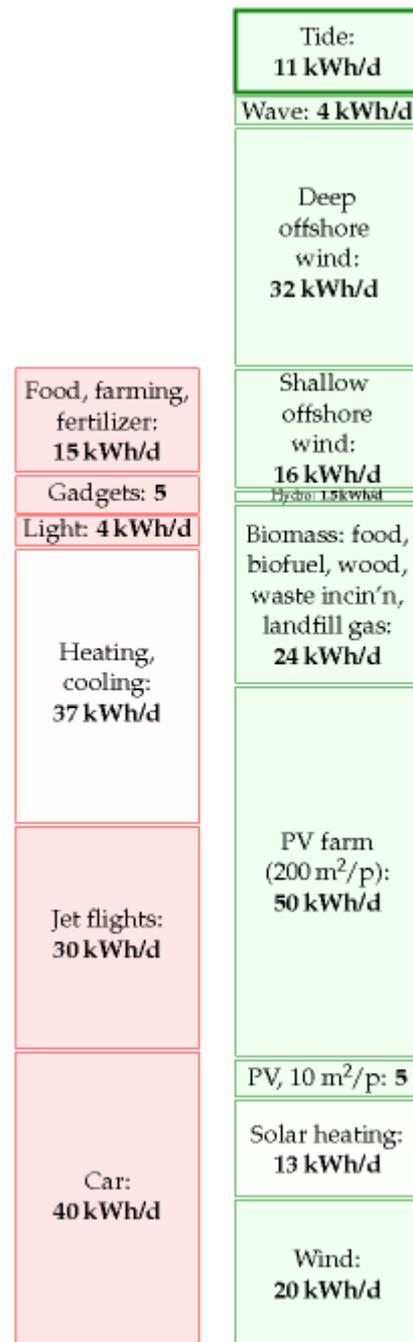


Fig.14.10: Gezeiten

¹⁹ Das entspricht 3000 GW, also 72.000 GWh/d, also 12 kWh/d/p weltweit.

²⁰ Das sind $2,6 \cdot 10^{-6}$ % Energieverlust pro Jahrhundert, was einer Halbwertszeit von über einer Milliarde Jahren entspricht.

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 94 **die maximal erzielbare Leistung eines künstlichen Beckens** 82 *The power of an artificial tide-pool.* The power per unit area of a tide-pool is derived in Chapter G, p311.
- 94 **England bereits mit einem derartigen natürlichen Gezeitenbecken ausgestattet: der Nordsee** – *Britain is already supplied with a natural tide-pool . . . known as the North Sea.* I should not give the impression that the North Sea fills and empties just like a tide-pool on the English coast. The flows in the North Sea are more complex because the time taken for a bump in water level to propagate across the Sea is similar to the time between tides. Nevertheless, there are whopping tidal currents in and out of the North Sea, and within it too.
- 95 **Die Gesamtleistung wurde gemessen; im Mittel beträgt sie 100 kWh/d pro Person** 83 *The total incoming power of lunar tidal waves crossing these lines has been measured to be 100 kWh per day per person.* Source: Cartwright et al. (1980). For readers who like back-of-envelope models, Chapter G shows how to estimate this power from first principles.
- 97 **Das berühmte Stauwerk La Rance in Frankreich** 84 *La Rance generated 16 TWh over 30 years. That's an average power of 60 MW. (Its peak power is 240 MW.) The tidal range is up to 13.5 m; the impounded area is 22 km²; the barrage 750 m long. Average power density: 2.7 W/m².* Source: [6xrm5q].
- 97 **Die Berichte der Ingenieure über das geplante Severn-Stauwerk** 85 *The engineers' reports on the Severn barrage...say 17 TWh/year.* (Taylor, 2002b). This (2 GW) corresponds to 5% of current UK total electricity consumption, on average.
- 98 **Die mittlere Leistung der Tidenlagunen in britischen Gewässern liegt bei 4,5 W/m²** 86 *Power per unit area of tidal lagoons could be 4.5 W/m².* MacKay (2007a).

15. Dinge des täglichen Gebrauchs

Ein riesiger Energieverbrauch in der „entwickelten“ Welt ist die Herstellung von „Dingen“. In ihrem natürlichen Lebenszyklus durchlaufen diese drei Phasen: Zuerst wird das neugeborene Ding in einer Hochglanzverpackung im Regal eines Geschäftes angeboten. In dieser Phase heißt das Ding „Ware“. Sobald das Ding gekauft und ausgepackt ist, transformiert es sich in seine zweite Form: „Zeug“. Dieses Zeug lebt nun mit seinem Besitzer für ein paar Monate oder Jahre. Währenddessen wird das Zeug größtenteils vom Besitzer ignoriert, weil der ja in den Geschäften ist und neue Waren einkauft. Gelegentlich wird das Zeug dann, wie durch ein Wunder moderner Alchemie, in seine finale Form transformiert: „Abfall“. Für das ungeübte Auge kann es oft schwierig sein, „Abfall“ und „Waren“ voneinander zu unterscheiden. Wie auch immer, hat der Besitzer diese Erkenntnis gewonnen, bezahlt er den Müllmann, damit er dieses Ding entsorgt.



Fig.15.1: Müll-Werbung von Selfridge

Sagen wir, wir wollten die vollen Energiekosten dieser Dinge des täglichen Gebrauchs verstehen, vielleicht um noch bessere Dinge zu entwickeln. Das heißt dann Lebenszyklus-Analyse. Es ist üblich, dabei die Energie-Kosten eines Dings – vom Haarföhn bis zum Kreuzfahrtschiff – in vier Abschnitte zu gliedern:

Phase R: Herstellung der Rohmaterialien. Dazu gehört der Bergbau der Minerale, das Schmelzen und Reinigen, und die Umwandlung in die Bausteine, die der Hersteller benötigt: Plastik, Glas, Metall, Keramik etc. Die Energiekosten dieser Phase beinhalten auch die Lieferung der Rohstoffe zu ihrer nächsten Verarbeitungsstelle.

Phase P: Produktion: Dabei werden die Rohstoffe nun in ein fertiges Produkt verwandelt. Die Fabriken, in denen die Spulen des Haarföhns gewickelt werden, sein ansprechendes Gehäuse gegossen wird oder seine Komponenten sorgfältig ineinandergesetzt werden, benutzen Wärme und Licht. Diese Phase beinhaltet auch Verpackung und Weitertransport.

Phase U: Use – Benutzung: Haarföhns und Kreuzfahrtschiffe verbrauchen Energie, wenn sie bestimmungsgemäß verwendet werden.

Phase D: Entsorgung: Dazu gehört der Energiebedarf für das Verbringen in Deponien, oder die Rückverwandlung in Rohmaterialien (Recycling). Und das Reinigen all der Verschmutzung, die in Zusammenhang mit diesen Dingen entstand.

Um zu verstehen, wie viel Energie der Lebenszyklus eines „Dings“ erfordert, sollten wir die Kosten all dieser vier Phasen einzeln abschätzen und dann addieren. Gewöhnlich dominiert eine Phase die Energiekosten. Für eine vernünftige Abschätzung muss also insbesondere die dominante Phase relativ genau abgeschätzt werden. Wenn wir Dinge energieschonender designen wollen, sollten wir uns gewöhnlich auf die dominante Phase konzentrieren. Dabei ist zu beachten, dass Einsparungen in der dominanten Phase nicht durch zusätzlichen Aufwand in den anderen drei Phasen wieder aufgehoben werden.

Anstatt im Detail den Energiebedarf abzuschätzen, den die fortwährende Gesamtproduktion aller Dinge des täglichen Bedarfs hat, wollen wir zuerst ein paar allgemein bekannte Beispiele abhandeln: Getränkebehälter, Computer, Batterien, Werbung, Autos und Häuser. Dieses Kapitel fokussiert sich auf die Phasen R und P. Diese Energiekosten sind oft als „Graue Energie“ (embodied energy) eines Gegenstandes bezeichnet.

Graue Energie (embodied energy) (kWh pro kg)	
fossile Brennstoffe	10
Holz	5
Papier	10
Glas	7
PET Plastik	30
Aluminium	40
Stahl	6

Tabelle 15.2: Graue Energie in Materialien, in kWh pro kg

Getränkebehälter

Nehmen wir folgendes Coke-Verbraucherverhalten an: Sie trinken täglich fünf Dosen einer multinationalen Chemikalie und werfen die Alubüchse weg. Für dieses Ding dominiert die Rohmaterial-Phase die Energiekosten. Die Metallproduktion ist energieintensiv, vor allem die Aluminiumproduktion. Eine Aludose verbraucht in der Herstellung 0,6 kWh. Ein 5-Dosen-pro-Tag Verbraucherverhalten benötigt Energie in Höhe von **3 kWh/d**.

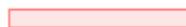
Eine 0,5l-PET-Wasserflasche (25 g Gewicht) hat 0,7 kWh Graue Energie – auch nicht besser als Aluminium.

Andere Verpackung

Der durchschnittliche Brite wirft 400 g Verpackung täglich weg – hauptsächlich Lebensmittelverpackung. Die Graue Energie von Verpackung liegt zwischen 7 und 20 kWh pro kg, wenn wir das Spektrum von Glas und Papier bis zu Plastik und Metallkannen durchlaufen. Nimmt man den Durchschnitt bei 10 kWh/kg an, liegt der energetische Fußabdruck von Verpackung bei **4 kWh/d**. Ein kleiner Teil dieser Energie ist recyclebar durch Müllverbrennung, wie wir in Kapitel 27 diskutieren werden.



Aluminium: 3 kWh/d



Packaging:
4 kWh/d



Fig.15.3: (links) Fünf Aludosen pro Tag sind 3 kWh/d. Die Graue Energie in anderen Verpackungen, die ein durchschnittlicher Engländer wegwirft, beträgt 4 kWh/d.

Chips: 2.5 kWh/d

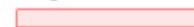


Fig.15.4: (rechts) Sie macht Chips. Foto: ABB. Herstellung eines PC alle 2 Jahre kostet 2,5 kWh pro Tag.

Computer

Die Herstellung eines PC kostet 1800 kWh. Kauft man alle 2 Jahre einen neuen Rechner, ergibt das einen Energieverbrauch von **2,5 kWh/d**.

Batterien

Die Energiekosten der Herstellung eines AA Nickel-Cadmium-Akkus, der 0,001 kWh speichern kann und 25 g wiegt, liegt bei 1,4 kWh (Phasen R und P). Wenn die Energiekosten von Wegwerf-Batterien ähnlich sind, schlagen zwei AA-Batterien pro Monat mit **0,1 kWh/d** zu Buche. Die Energiekosten sind deshalb vermutlich ein vernachlässigbarer Punkt in Ihrer Energiebilanz.

Zeitungen, Zeitschriften und Werbepost

Ein 36-Seiten-Wochenblatt, gratis verteilt an den U-Bahn-Stationen, wiegt 90 g, eine Tageszeitung (56 Seiten) 150 g. „The Independent“ (56 Seiten) 200 g. Eine 56-seitige Werbe-Illustrierte und das Cambridgshire Pride Magazine (32 Seiten), beide kostenlos nach Hause verteilt, wiegen jeweils 100 g und 125 g.



Newspapers,
junk mail,
magazines:
2 kWh/d

House-building: **1 kWh/d**

Dieser Strom von Lesestoff und Werbebotschaften, der durch unsere Briefkästen fließt, enthält Energie. Außerdem braucht man Energie für die Herstellung und Auslieferung. Papier hat einen Grauen Energieanteil von 10 kWh/kg. Also liegt die gesamte Graue Energie der Flut von Werbung, Magazinen und Zeitungen bei angenommenen 200 g pro Tag und Person (das ist äquivalent mit einem „Independent“ pro Tag) bei etwa **2 kWh pro Tag**.

Car-making:
14 kWh/d

Road-building: **2 kWh/d**



Papier-Recycling rettet etwa die Hälfte dieser Energie. Müllverbrennung rettet auch einen Teil dieser Energie, oder wenn ich das Papier zu Hause in meinem offenen Kamin verbrenne.

Größere Dinge

Für viele ist das größte Ding, das sie jemals kaufen, ein Haus.

In Kapitel H schätze ich die Energiekosten eines Neubaus ab. Angenommen, wir ersetzen jedes Haus nach 100 Jahren, wäre das ein energetischer Beitrag von 2,3 kWh/d. Dabei ist nur die Gebäudehülle berücksichtigt – Grundfest, Steine, Fliesen, Dachziegel. Wird ein Haus durchschnittlich von 2,3 Leuten bewohnt, ist der durchschnittliche Energieverbrauch, den eine Person durch das Gebäude verursacht, **1 kWh/d pro Person**.

Wie sieht es mit einem Auto aus, einer Straße? Einige von uns besitzen ersteres, aber alle benutzen letzteres. Die Graue Energie eines Neuwagens ist 76 000 kWh, wird er alle 15 Jahre ersetzt, sind das im Mittel **14 kWh pro Tag**. Eine Lebenszyklus-Analyse von Treloar, Love und Crawford schätzt den Bau einer australischen Straße auf 7600 kWh pro Meter (eine verbundbewehrte Betonstraße) und die Gesamtkosten einschließlich Unterhalt über 40 Jahre auf 35.000 kWh pro Meter. Schätzen wir damit die Größenordnung für britische Straßen ab. Es gibt 28.000 Meilen²¹ Fern- und Landstraßen (ohne Autobahnen). Mit 35.000 kWh pro Meter in 40 Jahren kostet uns dieses Straßennetz **2 kWh/d pro Person**.



Fig.15.5: Lebensmittel-Meilen: Pastetchen, handgemacht in Cornwall, 580 km transportiert zum Verbrauch in Cambridge

Der Transport der „Dinge“

Bisher versuchte ich, personenbezogenen Verbrauch abzuschätzen. „Wenn Sie 5 Coladosen wegwerfen, sind das 3 kWh, wenn Sie den „Independent“ kaufen, sind das 2 kWh“. Im folgenden werden die Dinge jedoch etwas weniger persönlich. Wenn es um Transport von Gütern im Land und um den Globus geht, werde ich nationale Gesamtzahlen verwenden und diese durch die Bevölkerung teilen.

Frachttransport wird gemessen in Tonnen-Kilometern (t-km). Wenn eine Tonne Cornwall-Pastetchen 580 km transportiert werden, sind das 580 t-km. Die Energieintensität des Straßentransports in England liegt bei **1 kWh pro t-km**.

Wenn ein Containerschiff wie in Fig.15.6 50.000 Tonnen Ladung über 10.000 km transportiert, sind das 500 Millionen t-km Frachttransport. Die Energieintensität dieses Containerschiffs liegt bei **0,015 kWh pro t-km**. Bemerkenswert, um wie viel günstiger die Verschiffung im Vergleich mit der Straßenfracht ist. Diese und weitere Energieintensitäten sind in Fig.15.8. dargestellt.

Transport auf der Straße

Im Jahr 2006 lag der gesamte Straßentransport durch LKWs in England bei 156 Milliarden t-km. Auf 60 Millionen Briten verteilt sind das 7 t-km pro Tag pro Person, was **7 kWh pro Tag pro Person** kostet (bei 1 kWh pro t-km). Ein Viertel dieses Transports beinhaltet übrigens Lebensmittel, Getränke und Tabak.

²¹ entspricht 45.000 km (1 Meile = 1,6 km)

Road freight: 7 kWh/d

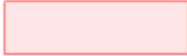


Fig.15.7: Der Lastwagen hat's gegeben und der Lastwagen hat's genommen. Energiekosten der englischen LKW-Fracht: 7 kWh/d pro Person.

Transport auf dem Wasser

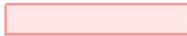
Im Jahr 2002 wurden in britischen Häfen 560 Millionen Tonnen Güter umgeschlagen. Tyndall-Centre berechnete, dass der britische Anteil am internationalen Schiffsverkehr **4 kWh/d pro Person** ausmacht.



Fig.15.6: (unten) Das Containerschiff Ever Liberty am Thamesport Container Terminal. Foto von Ian Boyle www.simplonpc.co.uk



Shipping: 4 kWh/d



Transport auf dem Wasser verbraucht Energie, weil das Boot Wellen erzeugt. Dennoch ist Schifffracht überraschend energieeffizient.

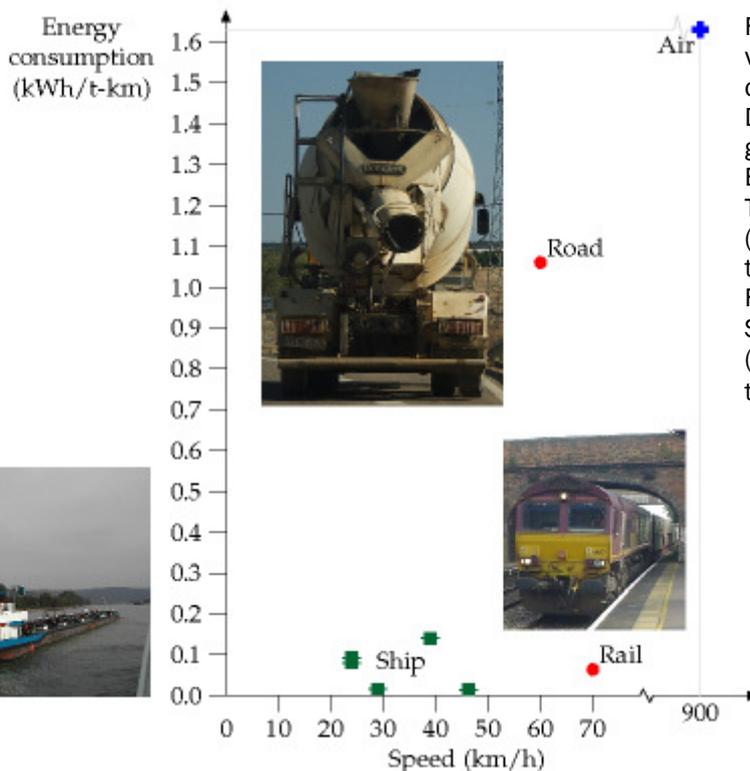


Fig.15.8: Energie für verschiedene Formen des Frachttransports. Die Vertikalkoordinate gibt die verbrauchte Energie pro Netto Tonnen-km in kWh an (das ist die Energie pro t-km Fracht ohne das Fahrzeuggewicht). Siehe auch Fig. 20.23 (Energie für Passagiertransport)

Transport von Wasser und Abwasser

Wasser ist kein besonderer Stoff, doch wir benutzen viel davon – etwa 160 Liter pro Tag pro Person. In der Folge produzieren wir auch an die 160 Liter Abwasser pro Tag pro

Person, das wir an die Entsorger weitergeben. Die Kosten für Wasserversorgung und Abwasserentsorgung liegen bei etwa **0,4 kWh/d pro Person**.

Water delivery
and removal:
0.4 kWh/d

Fig.15.9: Wasserlieferung 0,3 kWh/d,
Abwasserentsorgung 0,1 kWh/d

Meerwasserentsalzung

Derzeit verwendet England keine Energie zur Meerwasserentsalzung. Es wird aber die Errichtung einer Entsalzungsanlage in London diskutiert. Welche Energiekosten fallen an, wenn man Salzwasser in Trinkwasser verwandelt? Die energiesparendste Methode ist die reverse Osmose. Nehmen Sie eine Membran, die nur Wasser durchlässt, dann geben Sie Salzwasser auf eine Seite davon und setzen es unter Druck. Das Wasser sickert langsam durch die Membrane, und wird zu reinem Wasser – langsam, weil das reine Wasser getrennt vom Salz eine niedrigere Entropie hat, und die Natur einen Zustand höherer Entropie, in dem alles durcheinandergemischt ist, bevorzugt. Wir müssen Energie hoher Stufe zuführen um eine Entmischung zu erreichen.

Die Insel Jersey hat eine Entsalzungsanlage, die 6000 m³ reines Wasser täglich liefern kann (Fig.15.10). Einschließlich der Pumpen, die das Wasser aus dem Meer und durch eine Reihe von Filtern bringen, benötigt die Anlage eine Leistung von 2 MW. Das sind 8 kWh pro produziertem Kubikmeter Wasser. Bei 8 kWh pro m³ erfordert der tägliche Verbrauch von 160 Litern eine Leistung von **1,3 kWh/d**.



Fig.15.10: Teile der Osmose-Anlage in der Meerwasserentsalzungsanlage auf Jersey. Die Pumpe rechts im Vordergrund hat eine Leistung von 355 kW und schaufelt Seewasser bei einem Druck von 65 Bar in 39 spiralförmige Membranen. Das sind die in Bänken angeordneten waagrechten blauen Röhren (links). Sie liefert 1500 m³ Trinkwasser am Tag. Das Trinkwasser dieser Anlage verursacht Energiekosten von 8 kWh pro m³.

Einzelhandel

Die Supermärkte Englands verbrauchen 11 TWh pro Jahr. Gleichmäßig auf 60 Millionen glücklicher Kunden verteilt ergibt das **0,5 kWh pro Tag pro Person**.

Supermarkets:
0.5 kWh/d

Die Signifikanz von importierten Gütern

In Standard-Zählungen des „Energieverbrauchs in Großbritannien“ oder des „CO₂-Fußabdrucks von Großbritannien“ werden importierte Güter *nicht* mitgerechnet²². England war es gewohnt, sein eigenes Ding zu machen, und unser pro-Kopf-Fußabdruck war 1910 so groß wie der Amerikas heute ist. Heutzutage fertigt England nicht mehr so viel (auch unser Energieverbrauch und unsere CO₂-Emission sanken etwas), aber wir lieben die „Dinge“ immer noch, und wir bekommen sie nun aus anderen Ländern geliefert.

Sollten wir nun die Herstellungs-Energiekosten eines Dinges ignorieren, weil es importiert ist? Ich denke nicht. Dieter Helm und seine Kollegen in Oxford schätzen, dass Englands CO₂-Fußabdruck nahezu doppelt so groß ist wie die offiziellen „11 Tonnen CO₂ pro Person“, nämlich 21 Tonnen. Das impliziert, dass der höchste Beitrag im energetischen Fußabdruck eines durchschnittlichen Engländers die Energiekosten von importierten Waren sind.

In Anhang H erforsche ich diese Idee weiter, im Hinblick auf das Gewicht britischer Importe. Ohne Brennstoffimporte liegen diese bei etwas über 2 Tonnen pro Person und Jahr, wovon 1,3 Tonnen auf verarbeitete und gefertigte Waren wie Fahrzeuge, Maschinen, weiße Ware, elektrisches und elektronisches Equipment entfallen. Das sind etwa 4 kg pro Tag pro Person. Solche Waren sind größtenteils aus Materialien, deren Herstellung mindestens 10 kWh pro kg erfordert. Daher rechne ich diesem Haufen von Autos, Kühlschränken, Mikrowellen, Computern, Fotokopierern und Fernsehern eine Graue Energie von mindestens 40 kWh/d pro Person zu.²³

Um all diese Formen von Dingen des täglichen Gebrauchs und deren Transport zusammenzufassen, werde ich auf den Verbrauchsstapel **48 kWh/p pro Person** legen (40 für Importe, 2 für Zeitungen, 2 für Straßenbau, 1 für Hausbau, 3 für Verpackung) für die Güter selbst und weitere **12 kWh/d pro Person** für den

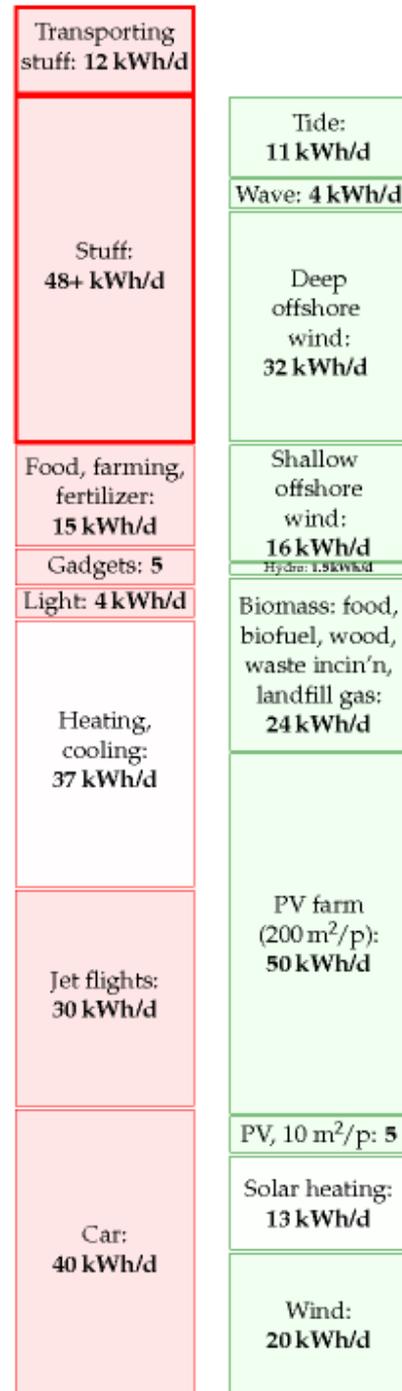


Fig.15.11: Die Herstellung unserer Gebrauchsgegenstände verbraucht mindestens 48 kWh/d, die Auslieferung weitere 12 kWh/d.

²² Zählt man die Graue Energie importierter Waren zum nationalen Zahlenwerk, müsste grundsätzlich auch die Graue Energie exportierter Waren aus den nationalen Zahlen herausrechnen. Dies führt bei landesweiten Statistiken zu größeren Abgrenzungsproblemen (insbesondere wenn der Energiemix des Herstellerlandes und der des Verbraucherlandes deutliche Unterschiede aufweisen, vgl. Anhang H). Die graue Energie in britischen Exporten ist nach Angaben des Autors etwa 50% der importierten grauen Energie.

²³ Diese Zahl ist sehr grob abgeleitet, weil sie gewerbliche Importe nicht von privatem Verbrauch unterscheidet. Aus den gesamten Importen wären zumindest zuerst die Industriegüter (Fertigungsmaschinen, LKWs) oder Importe des Bauwesens, das oben im Hausbau schon einmal berücksichtigt war, herauszurechnen. Ähnliches gilt für importierten Dünger, importierte Lebensmittel, importierte Computer, Aludosen, Autos, Zeitschriften usw., die oben bereits in einer früheren Abschätzung nach ihrer Art mit berücksichtigt wurden.

Transport auf See, auf der Straße und durch Leitungen, und für die Lagerung in den Supermärkten.

Work till you shop.

Traditional saying

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 102 Eine Aludose verbraucht in der Herstellung 0,6 kWh** 89 *One aluminium drinks can costs 0.6 kWh. The mass of one can is 15 g. Estimates of the total energy cost of aluminium manufacture vary from 60 MJ/kg to 300 MJ/kg. [yx7zm4], [r22oz], [yhrest]. The figure I used is from The Aluminum Association [y5as53]: 150 MJ per kg of aluminium (40 kWh/kg).*
- 102 Eine 0,5l-PET-Wasserflasche** –*The embodied energy of a water bottle made of PET. Source: Hammond and Jones (2006) – PET’s embodied energy is 30 kWh per kg.*
- 102 Der durchschnittliche Brite wirft 400 g Verpackung täglich weg** –*The average Brit throws away 400 g of packaging per day. In 1995, Britain used 137 kg of packaging per person (Hird et al., 1999).*
- 103 Die Herstellung eines PC kostet 1800 kWh** –*A personal computer costs 1800 kWh of energy. Manufacture of a PC requires (in energy and raw materials) the equivalent of about 11 times its own weight of fossil fuels. Fridges require 1–2 times their weight. Cars require 1–2 times their weight. Williams (2004); Kuehr (2003).*
- 103 Herstellung eines AA Nickel-Cadmium-Akkus** –*...a rechargeable nickel-cadmium battery. Source: Rydh and Karlström(2002). ...steel... From Swedish Steel, “The consumption of coal and coke is 700 kg per ton of finished steel, equal to approximately 5320 kWh per ton of finished steel. The consumption of oil, LPG and electrical power is 710 kWh per ton finished product. Total [primary] energy consumption is thus approx. 6000 kWh per ton finished steel.” (6 kWh per kg.) [y2ktgg]*
- 103 Die Graue Energie eines Neuwagens ist 76 000 kWh** 90 *A new car’s embodied energy is 76 000 kWh. Source: Treloar et al. (2004). Burnham et al. (2007) give a lower figure: 30 500 kWh for the net life-cycle energy cost of a car. One reason for the difference may be that the latter life-cycle analysis assumes the vehicle is recycled, thus reducing the net materials cost.*
- 103 Papier hat einen Grauen Energieanteil von 10 kWh/kg** 90 *Paper has an embodied energy of 10 kWh per kg. Making newspaper from virgin wood has an energy cost of about 5 kWh/kg, and the paper itself has an energy content similar to that of wood, about 5 kWh/kg. (Source: Ucuncu (1993); Erdinçler and Vesilind (1993); see p284.) Energy costs vary between mills and between countries. 5 kWh/kg is the figure for a Swedish newspaper mill in 1973 from Norrström (1980), who estimated that efficiency measures could reduce the cost to about 3.2 kWh/kg. A more recent full life-cycle analysis (Denison, 1997) estimates the net energy cost of production of newsprint in the USA from virgin wood followed by a typical mix of landfilling and incineration to be 12 kWh/kg; the energy cost of producing newsprint from recycled material and recycling it is 6 kWh/kg.*
- 104 Die Energieintensität des Straßentransports in England liegt bei 1 kWh pro t-km** 91 *The energy intensity of road transport in the UK is about 1 kWh per t-km. Source: www.dft.gov.uk/pgr/statistics/datatablespublications/energyenvironment.*

- 104 Die Energieintensität dieses Containerschiffs liegt bei 0,015 kWh pro t-km – *The energy intensity of freight transport by this container ship is 0.015 kWh per ton-km. The Ever Liberty – length 285 m, breadth 40 m – has a capacity of 4948 TEUs, deadweight 63 000 t, and a service speed of 25 knots; its engine’s normal delivered power is 44 MW. One TEU is the size of a small 20-foot container – about 40 m³. Most containers you see today are 40-foot containers with a size of 2 TEU. A 40-foot container weighs 4 tons and can carry 26 tons of stuff. Assuming its engine is 50%-efficient, this ship’s energy consumption works out to 0.015 kWh of chemical energy per ton-km. www.mhi.co.jp/en/products/detail/container_ship_ever_uberty.html*
- 104 der britische Anteil am internationalen Schiffsverkehr –*Britain’s share of international shipping...* Source: Anderson et al. (2006).
- 106 Fig.15.8: 92 **Figure 15.8. Energy consumptions of ships.** The five points in the figure are a container ship (46 km/h), a dry cargo vessel (24 km/h), an oil tanker (29 km/h), an inland marine ship (24 km/h), and the NS Savannah (39 km/h).
Dry cargo vessel 0.08 kWh/t-km. A vessel with a grain capacity of 5200 m³ carries 3360 deadweight tons. (Dead-weight tonnage is the mass of cargo that the ship can carry.) It travels at speed 13 kn (24 km/h); its one engine with 2 MW delivered power consumes 186 g of fuel-oil per kWh of delivered energy (42% efficiency). conoship.com/uk/vessels/detailed/page7.htm
Oil tanker A modern oil tanker uses 0.017 kWh/t-km [6lbrab]. Cargo weight 40 000 t. Capacity: 47 000 m³. Main engine: 11.2 MW maximum delivered power. Speed at 8.2 MW: 15.5 kn (29 km/h). The energy contained in the oil cargo is 520 million kWh. So 1% of the energy in the oil is used in transporting the oil one-quarter of the way round the earth (10 000 km).
Roll-on, roll-off carriers The ships of Wilh. Wilhelmsen shipping company deliver freight-transport with an energy cost between 0.028 and 0.05 kWh/t-km [5ctx4k].
- 111 Die Kosten für Wasserversorgung und Abwasserentsorgung liegen bei etwa 0,4 kWh/d pro Person 92 *Water delivery and sewage treatment costs 0.4 kWh/d per person.* The total energy use of the water industry in 2005–6 was 7703 GWh. Supplying 1 m³ of water has an energy cost of 0.59 kWh. Treating 1 m³ of sewage has an energy cost of 0.63 kWh. For anyone interested in greenhouse-gas emissions, water supply has a footprint of 289 g CO₂ per m³ of water delivered, and wastewater treatment, 406 g CO₂ per m³ of wastewater. Domestic water consumption is 151 litres per day per person. Total water consumption is 221 l/d per person. Leakage amounts to 57 litres per day per person. Sources: Parliamentary Office of Science and Technology, [www.parliament.uk/documents/upload/postpn282.pdf], Water UK (2006).
- 106 Supermärkte Englands verbrauchen 11 TWh pro Jahr 93 *Supermarkets in the UK consume 11 TWh/y.* [yqbz13]
- 107 Helm und seine Kollegen schätzen, dass Englands CO₂-Fußabdruck nahezu doppelt so groß ist, nämlich 21 Tonnen – *Helm et al. suggest that, allowing for imports and exports, Britain’s carbon footprint is nearly **doubled** to about 21 tons.* Helm et al. (2007).



16. Geothermie

Geothermische Energie entsteht aus zwei Quellen: aus radioaktivem Zerfall in der Erdkruste und durch Wärme des Erdkerns, die durch dessen Mantel leckt. Die Hitze im Kern ist da, weil die Erde früher rotglühend war und sich immer noch in einem Prozess der Abkühlung und Aushärtung befindet. Die Wärme im Erdkern wird zudem noch durch Gezeitenreibung erhöht: Die Erde verformt sich als Antwort auf die Gravitationskräfte von Mond und Sonne, ähnlich wie eine Orange, wenn Sie sie drücken und zwischen den Händen rollen.

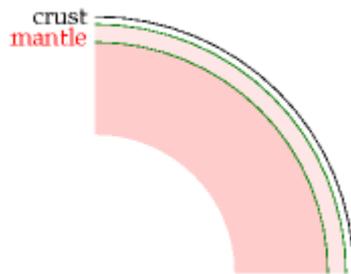


Fig.16.1: ein Ausschnitt der Erde



Fig.16.2: etwas Granit

Geothermie ist eine attraktive Erneuerbare Energie, weil sie „immer an“ ist, unabhängig vom Wetter. Geothermiekraftwerke können wir an- und ausschalten, wie es die Nachfrage erfordert.

Doch wie viel geothermische Leistung ist möglich? Wir können diese für zwei Fälle abschätzen: die verfügbare Leistung an einem gewöhnliche Ort der Erdkruste, oder die verfügbare Leistung an besonderen heißen Stellen, wie Island (Fig.16.3). Wenn auch der richtige Ort für erste Entwicklungen der Geothermie sicherlich eine solche besonders heiße Stelle sein wird, werde ich dennoch annehmen, de größere Gesamt-Ressource komme von gewöhnlichen Orten, da diese weitaus häufiger sind.

Die Schwierigkeit, nachhaltig geothermische Leistung zu erzeugen, liegt in der begrenzten Geschwindigkeit, mit der Wärme durch festes Gestein fließt. Diese begrenzt die Rate, mit der nachhaltig Wärme aus dem rotglühenden Erdinneren gezogen werden kann. Es ist als würde man versuchen, ein Crunch-Eis-Getränk mit einem Strohhalm zu trinken: Sie stecken den Strohhalm hinein und saugen und bekommen einen schönen Schluck erfrischender Flüssigkeit. Doch nach etwas längerem Saugen, saugen sie plötzlich Luft. Sie haben die Flüssigkeit um ihre Strohhalmspitze herum abgesaugt. Ihre anfängliche Saugrate war nicht aufrechtzuerhalten, nicht nachhaltig.

Wenn Sie einen 15-km Strohhalm in die Erde stecken, werden Sie es dort schön warm finden, leicht warm genug um Wasser zu kochen. Sie können jetzt zwei Strohhalm nehmen, kaltes Wasser durch den einen hinunterpumpen und mit dem anderen saugen. Sie werden Wasserdampf saugen, und können damit ein Kraftwerk betreiben. Unbegrenzte Leistung? Nein. Nach einiger Zeit wird das Herausaugen von Wärme die Temperatur des Felses reduzieren. Sie haben nicht aufrecht erhaltbar, nicht nachhaltig gesaugt. Sie müssen jetzt eine lange Zeit warten, bis der Fels an der Strohhalmspitze sich wieder erwärmt hat. Eine mögliche Lösung dieses Problems ist es, geothermische Energie in derselben Weise zu nutzen wie fossile Lagerstätten: als abbaubare Ressource, statt als

nachhaltige Quelle. Doch wahrscheinlich wäre das nur ein Zwischenstopp, der uns weitere hundert Jahre nicht-nachhaltiges Leben ermöglicht? In diesem Buch bin ich, wie der Titel vermuten lässt, an nachhaltigen Energiequellen interessiert. Rechnen wir also nach.



Fig.16.3: Geothermie in Island. Die Mittlere geothermische Energieproduktion in Island (Bevölkerung: 300.000) war 2006 bei 300 MW (24 kWh/d/p). Mehr als die Hälfte der isländischen Elektrizität wird für Aluminiumproduktion verwendet. Foto von Gretar Ivarsson.

Geothermie auf nachhaltiger Basis – für ewig aufrechtzuerhalten

Wir wollen also Geothermie nutzen, indem wir Strohhalm bis zu einer angemessenen Tiefe in die Erde stecken und *moderat* saugen. Saugen mit einer Rate, dass der Fels am Ende unseres Strohhalms nicht kälter und kälter wird. Das heißt saugen mit einer Rate, die dem natürlichen Wärmefluss der Erde entspricht.

Wie eingangs dargestellt, entsteht Geothermie aus zwei Quellen: aus radioaktivem Zerfall in der Erdkruste und durch Wärme des Erdkerns, die durch dessen Mantel leckt. In einem typischen Kontinent ist der Wärmestrom vom Mantel zur Kruste um die 10 mW/m². Der Wärmestrom an der Oberfläche liegt bei 50 mW/m². Der radioaktive Zerfall hat also zusätzliche 40 mW/m² beigetragen.

An einer typischen Stelle können wir also maximal 50 mW/m² erhalten. Doch diese Leistung ist keine hochstufige Energie, es ist niederstufige Wärme, die durchsickert bei der gegebenen Umgebungstemperatur. Wir wollen wahrscheinlich aber Strom erzeugen, und deswegen müssen wir bohren. Wärme ist nur dann nutzbar, wenn sie mit nennenswert höherer Temperatur als die der Umgebung zur Verfügung steht. Die Temperatur steigt mit der Tiefe, wie in Fig.16.4 dargestellt, bis 500 °C bei 40 km. Zwischen 0 km Tiefe, wo der Wärmefluss am größten aber die Temperatur niedrig sind, und 40 km Tiefe, wo der Fels am heißesten ist aber der Wärmefluss 5 mal kleiner (weil uns dort der Anteil aus der Radioaktivität der Kruste fehlt), liegt ein Optimum, bei dem wir saugen sollten. Die exakte Optimaltiefe hängt von der Art des Saugens ab und der Energieanlage, die wir benutzen. Wir können eine Grenze abschätzen für die maximale nachhaltig erzeugbare Leistung. Dazu suchen wir die optimale Tiefe unter der Annahme, wir hätten a) eine perfekte Maschine zur Umwandlung der Wärme in Elektrizität und könnten b) kostenlos in jede beliebige Tiefe bohren.

Für ein Temperaturprofil wie in Fig.16.4 errechne ich als optimale Tiefe 15 km. Eine ideale Wärmemaschine würde dann 17 mW/m² liefern. Bei der weltweiten Bevölkerungsdichte von 43 Menschen pro km² sind das 10 kWh pro Tag pro Person,

wenn *alle* Landflächen genutzt wären. In England, wo die Bevölkerungsdichte 5 mal größer ist, wären das maximal **2 kWh/d pro Person**.

Das ist ein ewig aufrecht erhaltbares Szenario, unter Vernachlässigung von Hot Spots, mit der Annahme von perfekten Kraftwerken, wenn jeder Quadratmeter des Kontinents ausgebeutet würde und die Bohrkosten vernachlässigbar sind. Und dass es möglich ist, 15 km tiefe Löcher zu bohren.

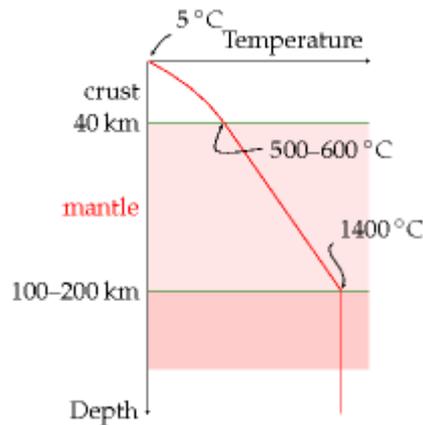


Fig.16.4: Temperaturprofil in einem typischen Kontinent

Geothermische Leistung als Abbauprodukt

Eine andere geothermische Strategie baut die Hitze als Ressource ab. Bei der „erweiterten geothermischen Extraktion“ aus heißem trockenem Gestein (Fig.16.5) bohren wir zuerst ein Loch bis in 5-10 km Tiefe und brechen diesen Fels, indem wir Wasser in ihn pumpen. (Dieser Schritt kann Erdbeben auslösen, die von den Ortsansässigen oft nicht gut aufgenommen werden.) Dann bohren wir ein zweites Loch in die Bruchzone. Wir pumpen dann Wasser durch eines der Bohrlöcher und extrahieren überhitztes Wasser oder Dampf aus dem anderen. Dieser Dampf kann zur Elektrizitätsgewinnung oder als Wärmequelle genutzt werden.

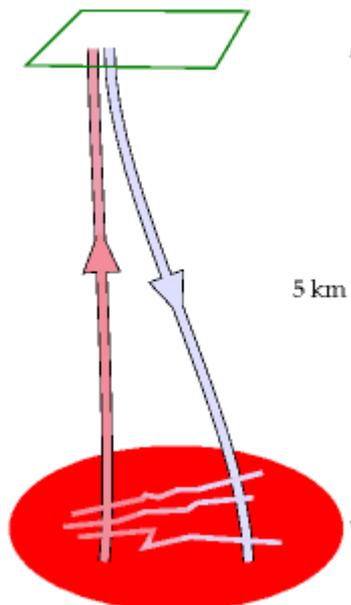


Fig.16.5: Erweiterte geothermische Extraktion aus heißem trockenem Fels. Ein Bohrung wird niedergebracht und unter Druck gesetzt, um Brüche im Fels zu erzeugen. Eine zweite Bohrung schafft einen Zugang zu einer entfernten Stelle der Bruchzone. Kaltes Wasser wird in eine der Bohrungen gepumpt und heißes Wasser (tatsächlich Dampf) in der andern hochgesaugt.

Welche Ressourcen an heißem trockenem Fels hat England? Leider ist England nicht besonders gesegnet damit. Die meisten Vorkommen konzentrieren sich auf Cornwall, wo in einer Forschungsanlage bei Rosemanowes, die mittlerweile geschlossen ist, bereits 1985 geothermische Experimente durchgeführt wurden. Berater, die diese Experimente begleiteten, konstatierten, dass „Erzeugung von elektrischer Leistung aus heißem

trockenen Fels kurz oder mittelfristig wohl technisch und kommerziell nicht durchführbar wäre, sowohl in Cornwall als auch anderswo in England.“ Dennoch, welche Ressourcen sind vorhanden? Das größte Vorkommen von heißem trockenem Fels enthält eine Gesamtenergie von 130.000 TWh, das nach Expertenmeinung einen realistischen Beitrag von 1,1 kWh/d/p an Elektrizität über 800 Jahre leisten könnte.

Andere Gegenden der Welt mögen vielversprechende heiße trockene Felsvorkommen haben, daher muss man geothermische Optionen lokal untersuchen. Doch für England wird Geothermie leider immer nur eine untergeordnete Rolle spielen können.

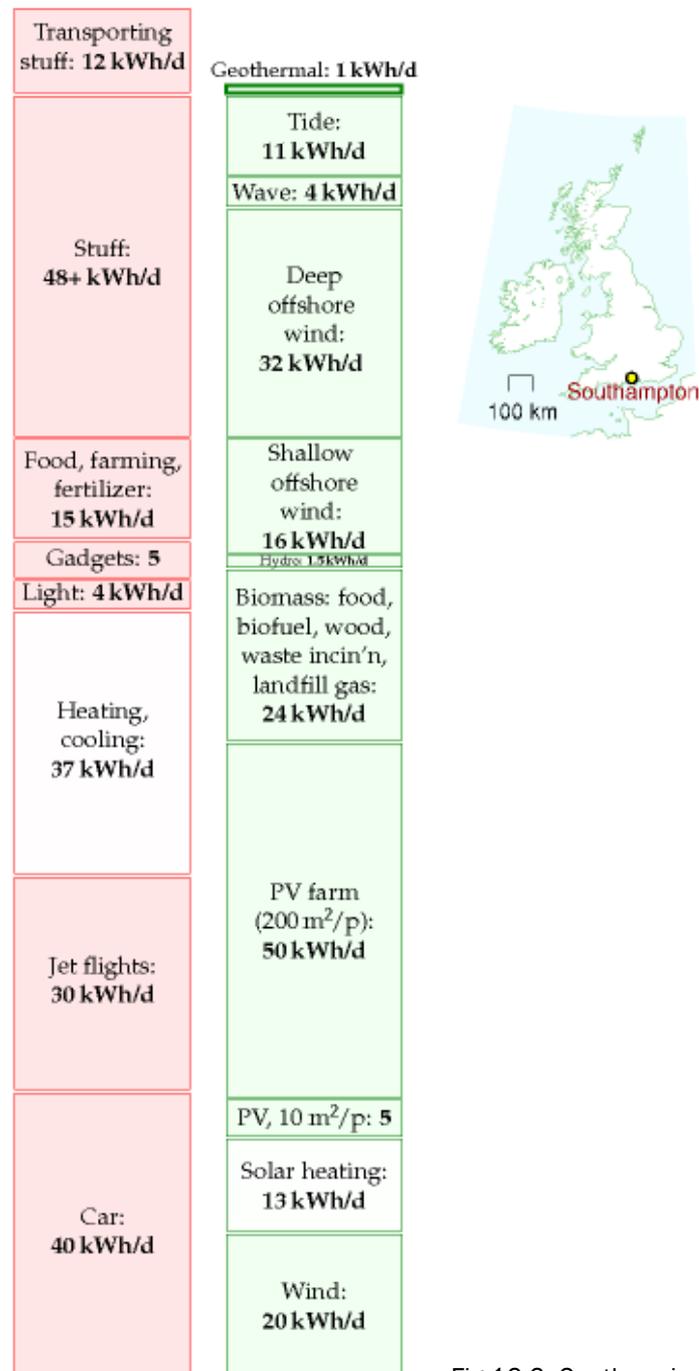


Fig.16.6: Geothermie

Benutzt nicht Southampton bereits geothermische Energie? Wie viel leistet das?

Ja, „Southampton Geothermal District Heating Scheme“ war, wenigstens im Jahr 2004, das einzige geothermische Heizwerk in England. Es versorgt die Stadt mit heißem Wasser. Die Geothermiebohrung ist Teil eines kombinierten Heiz-, Elektrizitäts- und Kühlsystem. Es liefert heißes und kaltes Wasser an die Abnehmer und speist Elektrizität ins Netz. Der Geothermieanteil an den 70 GWh Wärme, die das System jährlich liefert, liegt bei etwa 15 %. Die Bevölkerung von Southampton liegt laut der letzten Zählung bei 217445 Personen, also wird 0,13 kWh/d pro Person in Southampton durch Geothermie erzeugt.

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 111** *Der Wärmestrom an der Oberfläche liegt bei 50 mW/m²* 97 *The heat flow at the surface is 50 mW/m²*. Das Massachusetts Institute of Technology (2006) gibt 59 mW/m² im Mittel für die USA an, in einem Bereich von 25 mW bis 150 mW. Shepherd (2003) gibt 63 mW/m² an.
- 113** *Erzeugung von elektrischer Leistung aus heißem trockenem Fels kurz oder mittelfristig wohl technisch und kommerziell nicht durchführbar wäre* 98 *“Generation of electrical power from hot dry rock was unlikely to be technically or commercially viable in the UK”*. Quelle: MacDonald et al. (1992). Siehe auch Richards et al. (1994).
- 113** *Das größte Vorkommen von heißem trockenem Fels – The biggest estimate of the hot dry rock resource in the UK ... could conceivably contribute 1.1 kWh per day per person of electricity for about 800 years*. Quelle: MacDonald et al. (1992).
- 113** *Andere Gegenden der Welt mögen vielversprechende heiße trockene Felsvorkommen haben – Other places in the world have more promising hot dry rocks*. Es gibt eine hervorragende Studie (Massachusetts Institute of Technology, 2006) die die Hot-Dry-Rock-Ressourcen der USA beschreibt. Ein anderer, spekulativerer Ansatz, der von den Sandia National Laboratories in den 1970ern untersucht wurde, ist ein Loch bis zur Magma mit 600-1200 °C zu bohren, etwa 15 km tief, und die Leistung von dort zu gewinnen. Die Website www.magma-power.com rechnet damit, dass die Leistung in Magma-Pools unter den USA den US-Energieverbrauch für 500 bis 5000 Jahre decken könnte und dass sie ökonomisch extrahierbar wäre.
- 114** *Southampton Geothermal District Heating Scheme – Southampton Geothermal District Heating Scheme*. www.southampton.gov.uk.

17. Öffentlicher Dienst

Every gun that is made, every warship launched, every rocket fired signifies, in the final sense, a theft from those who hunger and are not fed, those who are cold and are not clothed.

This world in arms is not spending money alone. It is spending the sweat of its laborers, the genius of its scientists, the hopes of its children.

Präsident Dwight D. Eisenhower – April, 1953

Die Energiekosten der Verteidigung

Wir wollen die Energie abschätzen, die unser Militär benötigt.

Im 2007-8 lag der Anteil des Verteidigungsbudgets an den Gesamtausgaben der britischen Regierung bei 33 Milliarden £ / 587 Milliarden £ = 6 %. Schließen wir die Aufwendungen für Terrorabwehr und Geheimdienste mit ein (2,5 Milliarden £, Tendenz steigend). Eine grobe Abschätzung könnte sein, dass 6% dieser Kosten für Energie aufgewendet werden (6% ist der Anteil am BSP, der für Energie verwendet wird) und die Energiekosten bei 2,7 Pence pro kWh liegen (2,7 Pence ist der Durchschnittspreis für Energie). Daraus berechnet man: 80 TWh pro Jahr gehen in die Verteidigung, in die Herstellung von Munition, Bomben und Nuklearwaffen, in die Herstellung von Geräten zur Auslieferung von Munition, Bomben und Nuklearwaffen und in Kasernengeschrei um fit zu bleiben für die nächste Runde Gut-gegen-Böse. In unseren bevorzugten Einheiten sind das **4 kWh/d pro Person**.



Die Kosten der nuklearen Verteidigung

Der finanzielle Aufwand der USA für Entwicklung und Herstellung nuklearer Waffen von 1945 bis 1996 waren 5,5 Billionen \$ (in 1996-Dollar gerechnet).

Die Ausgaben für Nuklearwaffen überstiegen in diesem Zeitraum die staatlichen Ausgaben für Bildung, Landwirtschaft, Arbeit und Soziales, Naturschutz und Umwelt, allgemeine Wissenschaften und Raumfahrt, kommunale und regionale Entwicklung (einschließlich Katastrophenschutz), Polizeiwesen und Energiewirtschaft zusammen.

Wenn wir auch hier wieder annehmen, dass 6% davon in Energie mit 5 US-Cent pro kWh ging, ergeben sich 26.000 kWh pro Amerikaner allein für deren Nuklearwaffenbesitz, oder **1,4 kWh/d pro Amerikaner** (verteilt auf 250 Millionen Amerikaner über 51 Jahre).

Welche Energie wäre den glücklichen Empfängern zuteil geworden, wenn alle diese Nuklearwaffen Einsatz gefunden hätten? Die Energie der großen thermonuklearen

Bomben der USA und der UdSSR werden in Megatonnen TNT gemessen. Eine Tonne TNT sind 1200 kWh. Die Atombombe, die Hiroshima zerstörte hatte eine Energie von 15.000 Tonnen TNT (18 Millionen kWh). Eine Megatonnen-Bombe liefert eine Energie von 1,2 Milliarden kWh. Auf eine Stadt mit einer Million Einwohner geworfen ergibt eine solche Bombe ein Energiegeschenk von 1200 kWh pro Person, äquivalent zu 120 Liter Benzin pro Person. Die Gesamtsprengkraft des US-amerikanischen Nukleararsenals ist heute 2400 Megatonnen, in 10.000 Sprengköpfen. In der guten alten Zeit, als die Leute Verteidigung noch wirklich ernst nahmen, waren es 20.000 Megatonnen. Diese Bomben hätten bei ihrer Anwendung eine Energie von 100.000 kWh pro Amerikaner geliefert. Das sind 7 kWh/d pro Person über 40 Jahre – ähnlich der gesamten elektrischen Energie, die in Amerika durch Kernkraft erzeugt wird.

Energiekosten im Nuklearmaterial für Bomben

Die meistbenutzten Bombenmaterialien sind Plutonium, wovon die USA 104 t produzierte, und hochangereichertes Uran (HEU), wovon die USA 994 t produzierten. Deren Herstellung benötigt Energie.

Die effizientesten Plutoniumfabriken benutzen 24.000 kWh Wärmeenergie für die Herstellung von 1 g Plutonium. Die direkten Energiekosten für die 104 t Plutonium (1945-1996) waren also mindestens 2,5 Billionen kWh, was 0,5 kWh/d pro Person (verteilt auf 250 Millionen Amerikaner) bedeutet.

Die Hauptbeitrag an Energie bei der Produktion von HEU sind die Kosten der Anreicherung. Die Arbeit liegt darin, das ^{235}U vom ^{238}U in natürlichem Uran zu trennen, um ein Endprodukt zu erhalten, das reicher an ^{235}U ist. Die US-Produktion von 994 Tonnen hochangereichertem Uran (Gesamtmenge 1945-1996) verursachte Energiekosten von 0,1 kWh/d pro Person.

“Trident creates jobs.”²⁴ Well, so does relining our schools with asbestos, but that doesn't mean we should do it!

Marcus Brigstocke



Universitäten

Nach der „Times Higher Education Supplement“ (vom 30.3.2007) verbrauchen britische Universitäten 5,2 Milliarden kWh pro Jahr. Über die gesamte Bevölkerung sind das **0,24 kWh/d pro Person**.

²⁴ Trident ist ein amerikanisch-englisches Nuklearwaffenprojekt mit U-Boot-gestützten Sprengköpfen.

Die höhere Erziehung scheint also erheblich weniger Energiebedarf zu haben als Verteidigungs-Kriegsspiele.

Es mag noch weitere energierelevante öffentliche Dienste geben, über die man sprechen könnte, doch will ich hier unser Rennen zwischen dem roten und dem grünen Stapel abrechnen.

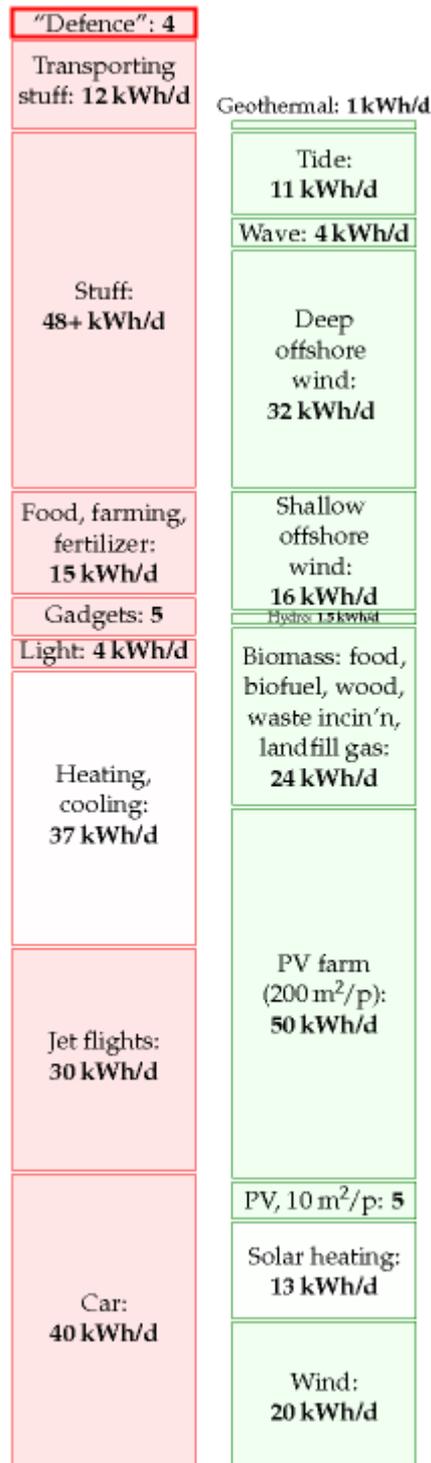


Fig.17.1: Die Energiekosten der Verteidigung in England: geschätzt 4 kWh pro Tag pro Person

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 115 Verteidigungsbudget der britischen Regierung** 100 *military energy budget*. The UK budget can be found at [yttg7p]; defence gets £33.4 billion [fcqfw] and intelligence and counter-terrorism £2.5 billion per year [2e4fcs]. According to p14 of the Government's Expenditure Plans 2007/08 [33x5kc], the "total resource budget" of the Department of Defence is a bigger sum, £39 billion, of which £33.5 billion goes for "provision of defence capability" and £6 billion for armed forces pay and pensions and war pensions. A breakdown of this budget can be found here: [35ab2c]. See also [yg5fsj], [yfgjna], and www.conscienceonline.org.uk. The US military's energy consumption is published: "The Department of Defense is the largest single consumer of energy in the United States. In 2006, it spent \$13.6 billion to buy 110 million barrels of petroleum fuel [roughly 190 billion kWh] and 3.8 billion kWh of electricity" (Dept. of Defense, 2008). This figure describes the direct use of fuel and electricity and doesn't include the embodied energy in the military's toys. Dividing by the US population of 300 million, it comes to 1.7 kWh/d per person.
- 115 Der finanzielle Aufwand der USA für Entwicklung und Herstellung nuklearer Waffen von 1945 bis 1996 waren 5,5 Billionen \$** – *The financial expenditure by the USA on manufacturing and deploying nuclear weapons from 1945 to 1996 was \$5.5 trillion (in 1996 dollars)*. Source: Schwartz (1998).
- 116 Die direkten Energiekosten für Plutonium** 101 *Energy cost of plutonium production*. [slbae].
- 116 hochangereichertes Uran (HEU), wovon die USA 994 t produzierten.** – *The USA's production of 994 tons of HEU...* Material enriched to between 4% and 5% ²³⁵U is called low-enriched uranium (LEU). 90%-enriched uranium is called high-enriched uranium (HEU). It takes three times as much work to enrich uranium from its natural state to 5% LEU as it does to enrich LEU to 90% HEU. The nuclear power industry measures these energy requirements in a unit called the separative work unit (SWU). To produce a kilogram of ²³⁵U as HEU takes 232 SWU. To make 1 kg of ²³⁵U as LEU (in 22.7 kg of LEU) takes about 151 SWU. In both cases one starts from natural uranium (0.71% ²³⁵U) and discards depleted uranium containing 0.25% ²³⁵U. The commercial nuclear fuel market values an SWU at about \$100. It takes about 100 000 SWU of enriched uranium to fuel a typical 1000 MW commercial nuclear reactor for a year. Two uranium enrichment methods are currently in commercial use: gaseous diffusion and gas centrifuge. The gaseous diffusion process consumes about 2500 kWh per SWU, while modern gas centrifuge plants require only about 50 kWh per SWU. [yh45h8], [t2948], [2ywzee]. A modern centrifuge produces about 3 SWU per year. The USA's production of 994 tons of highly-enriched uranium (the USA's total, 1945–1996) cost 230 million SWU, which works out to 0.1 kWh/d per person (assuming 250 million Americans, and using 2500 kWh/SWU as the cost of diffusion enrichment).

18. Können wir von Erneuerbaren Energien leben?

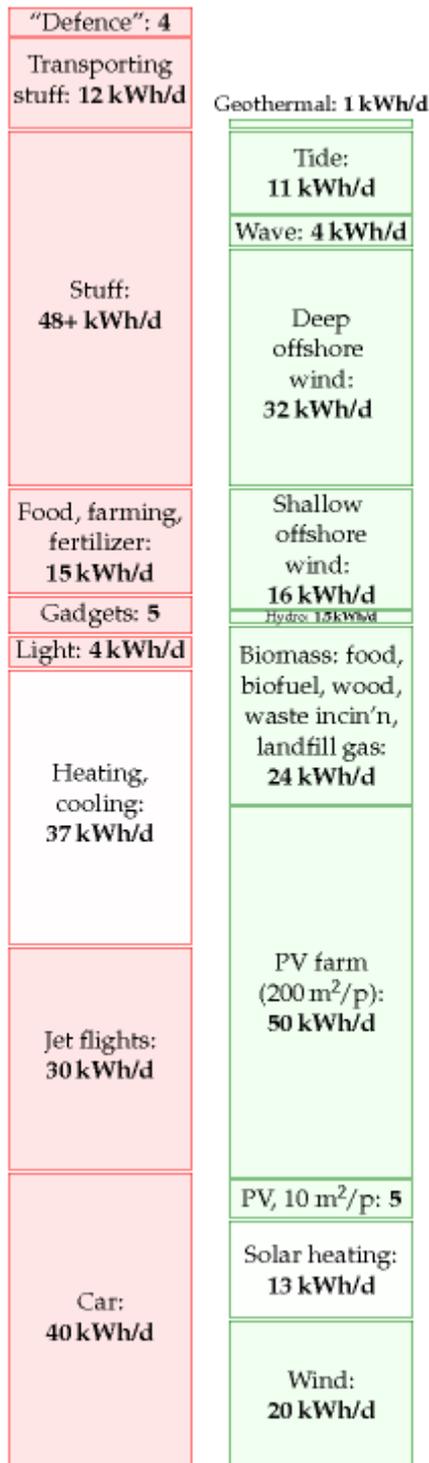


Fig.18.1: Der Stand des Spiels, mit allen traditionellen Erneuerbaren

Der rote Stapel in Fig.18.1 zählt **195 kWh pro Tag pro Person**. Der grüne Stapel zählt **180 kWh/d/p**. Ein knappes Rennen! Doch erinnern Sie sich: Beim Berechnen des grünen Stapels schossen wir alle ökonomischen, sozialen und umweltschützerischen Randbedingungen in den Wind. Außerdem sind manche unserer grünen Beiträge möglicherweise inkompatibel mit andern: Unsere PV-Module und Warmwasserkollektoren konkurrieren um unsere Dächer, unsere PV-Farmen auf 5 % unseres Landes könnten in Konkurrenz treten mit Energiepflanzen, die wir auf 75 % unserer Landfläche angesetzt hatten. Wenn wir nur einen unserer größeren grünen Beiträge verlieren – etwa wenn wir entscheiden, dass off-shore in tiefen Gewässern keine Option ist, oder dass 5% des Landes mit PV-Farmen zu füllen für 200.000 € pro Person nicht finanzierbar ist – dann würde die Produktion nicht mehr adäquat der Nachfrageseite vergleichbar bleiben.

Selbst wenn unser roter Verbrauchsstapel nun kleiner als unser grüner Produktionsstapel wäre, würde das noch nicht notwendigerweise bedeuten, dass die Energiesummen zusammenpassen. Sie können keine Videokamera mit Katzenfutter betreiben, und keine Katze aus einer Windturbine ernähren. Energie existiert in verschiedenen Formen – chemisch, elektrisch, kinetisch, thermisch etc. Damit ein nachhaltiger Energieplan aufgeht, müssen sowohl die Formen als auch die Summen bereitgestellter und benötigter Energie zusammenpassen. Energieformen ineinander umzuwandeln – von chemisch nach elektrisch in einem Gaskraftwerk, von elektrisch in chemisch in einer Wasserstofffabrik – beinhaltet gewöhnlich substantielle Verluste nutzbarer Energie. Wir werden auf dieses wichtige Detail in Kapitel 27 zurückkommen, das einige Energiepläne beschreibt, die aufgehen könnten.

Hier wollen wir nochmals auf unsere Abschätzungen von Verbrauch und Produktion zurückschauen, sie mit offiziellen Mittelwerten vergleichen und mit Schätzungen anderer Leute, und diskutieren, wie viel Energie erneuerbare Ressourcen plausibel in einem Land wie England liefern können.

Mit den folgenden Fragen wollen wir uns in diesem Kapitel beschäftigen:

1. Ist die Größe des roten Stapels einigermaßen korrekt? Was ist der Durchschnittsverbrauch in England? Wir werden uns die offiziellen Verbrauchszahlen Englands vornehmen und die einiger anderer Länder.

2. War ich unfair gegenüber den Erneuerbaren, indem ich ihr Potenzial unterschätzt habe? Wir werden die Abschätzungen im grünen Stapel mit veröffentlichten Abschätzungen von anerkannten Organisationen und Instituten vergleichen.
3. Was passiert mit dem grünen Stapel, wenn wir auch soziale und ökonomische Effekte berücksichtigen?

Reflexionen zu Rot

Unsere Abschätzung des Energieverbrauchs einer typischen wohlhabenden Person (Fig.18.1) belief sich auf **195 kWh/d**. In der Tat brauchen viele Menschen so viel Energie, und viele weitere streben danach. Der Durchschnittsamerikaner verbraucht **250 kWh/d**. Würden wir alle unseren Konsumstandard auf amerikanisches Niveau heben, würde der grüne Produktionsstapel dagegen definitiv wie ein Zwerg aussehen.

Was ist mit dem Durchschnittseuropäer und dem Durchschnitts Briten? Der mittlere Primärenergieverbrauch (d.h. Brennstoffe plus Wind und Wasserkraft) liegt in Europa bei **125 kWh/d pro Person**. Der britische Durchschnitt ist auch **125 kWh/d/p**.

Diese offiziellen Zahlen beinhalten zwei Energieströme gar nicht. Zum einen ist die Graue Energie von Importgütern (die zur Herstellung dieser Güter aufgewendete Energie) überhaupt nicht berücksichtigt. Wir hatten dagegen diesen Anteil in Kapitel 15 mit 40 kWh/d/p abgeschätzt. Zum zweiten berücksichtigt die „Primärenergie“ nur industrielle Energieflüsse und berücksichtigt nicht die natürliche immanente Energie in der Nahrung: Energie, die ursprünglich durch Photosynthese eingefangen wurde.

Eine andere Differenz zwischen dem roten Stapel, wie wir ihn zusammengetragen haben, und den nationalen Gesamtstatistiken ist, dass wir in den meisten Kapiteln dazu tendierten, Energieverluste bei Umwandlung von einer Energieform in eine andere ebenso zu vernachlässigen wie den Aufwand, der mit dem Transport der Energie verbunden ist. Die Auto-Abschätzung etwa berücksichtigte nur die Energie im Benzin, nicht aber die Energie, die in der Raffinerie verbraucht wurde, um Benzin aus Rohöl herzustellen oder die für den Transport des Öls in die Raffinerie oder des Benzins an die Tankstelle. Die nationale Statistik aber berücksichtigt den gesamten Verbrauch vor irgendwelchen Verlusten. Umwandlungsverluste machen etwa 22% des nationalen Energiebedarfs aus. Das meiste davon passiert in den Kraftwerken. Transmissionsverluste im Stromnetz schlucken 1% der nationalen Gesamtenergie.

Beim Aufbau des roten Stapels hatten wir uns gefragt, wie viel Energie eine typische wohlhabende Person benötigt. Hat diese Vorgehensweise unsere Vorstellung von der Wichtigkeit einzelner Aktivitäten beeinflusst? Sehen wir uns wieder einige offizielle Zahlen an. Fig.18.2 zeigt die Aufteilung des Energieverbrauchs nach Endnutzen. Die beiden führenden Kategorien sind Transport und Heizen (Warmluft und Warmwasser). Diese beiden Kategorien dominieren auch unseren Stapel. Das ist schon mal gut.

Schauen wir uns den Transport genauer an. In unserem roten Stapel fanden wir, dass Autofahren (bei 50 km täglich) und Fliegen (nach Cape Town einmal pro Jahr) etwa gleich



Fig.18.2: Energieverbrauch, unterteilt nach Verwendung, nach „Dept. For Trade and Industry“

Wie sieht die englische Verbrauchsstatistik im internationalen Vergleich aus? Fig.18.4 zeigt den Energieverbrauch vieler Länder und Regionen, gegen ihr Bruttonationalprodukt (BSP): je höher das BSP eines Staates (pro Kopf), um so höher ist auch sein Verbrauch pro Kopf. England ist ein recht typisches hoch-BSP Land, umgeben von Deutschland, Frankreich, Japan, Australien, Irland, Schweiz und Dänemark. Die einzig erwähnenswerte Ausnahme von der Regel „großes BSP = großer Energieverbrauch“ ist Hong Kong: Dessen BSP pro Kopf ist vergleichbar mit dem britischen, doch der Energieverbrauch liegt bei **80 kWh/d/p.**



Fig.18.5: Hong Kong. Foto von Samuel Louie und Carol Spears.

Die Botschaft, die ich diesen Zahlen entnehme ist, dass England ein ziemlich typisches europäisches Land ist, deshalb ist es auch ein gutes Studienobjekt für die Frage: “Wie kann ein Land mit hohem Lebensstandard sein Energiewesen nachhaltig gestalten?”

Reflexionen zu Grün

Die Leute sagen oft, England hätte Erneuerbare in Hülle und Fülle. War ich gemein zu Grün? Sind meine Zahlen ein Haufen Müll? Habe ich die nachhaltige Produktion zu gering angesetzt? Lassen Sie mich zuerst meine grünen Zahlen mit einigen Abschätzungen vergleichen, die ich in der Publikation „*The role of nuclear power in a low carbon economy. Reducing CO₂ emissions – nuclear and the alternatives*“ der “Sustainable Development Commission” fand. Beachtenswert: Obwohl die SDC erneuerbaren Energien sehr positiv gegenübersteht (“Wir haben große Gezeiten-, Wellen-, Biomasse- und Solar-Ressourcen”) sind *alle Schätzungen in der SDC-Publikation kleiner als meine.* (Genauer gesagt: die geschätzte Summe aller Erneuerbaren in der SDC-Publikation ist geringer als meine Summe.) Die SDC-Publikation zitiert Schätzungen aus vier Quellen (IEE, Tyndall, IAG und PIU, siehe unten). Fig.18.6 vergleicht meine Schätzungen mit diesen vier Quellen und den Zahlen von „Centre for Alternative Technology“ (CAT). Hier eine Beschreibung jeder einzelnen Quelle:

IEE Das Institute of Electrical Engineers veröffentlichte einen Bericht über erneuerbare Energie 2002 – eine Zusammenfassung möglicher Beiträge Erneuerbarer in England. Die zweite Spalte in Fig.18.6 zeigt das “technische Potenzial” einer Vielzahl von erneuerbaren Technologien zur Elektrizitätsgewinnung in England – “eine Obergrenze, die wahrscheinlich nie überschritten werden kann, auch nicht mit dramatischen Veränderungen in der Struktur unserer Gesellschaft und Ökonomie“. Nach Aussage der IEE ist das technische Gesamtpotenzial aller Erneuerbaren um die 27 kWh/d pro Person.

Tyndall Die Schätzung des Tyndall Centre der gesamten praktikablen EE-Ressourcen ist 15 kWh pro Tag pro Person.

IAG Die Interdepartmental Analysts Group schätzt die Erneuerbaren ab mit Blick auf ökonomische Randbedingungen. Deren gesamte praktische und ökonomische Ressourcen (bei einem Verkaufspreis von 7 ct/kWh) ist 12 kWh pro Tag pro Person.

PIU Die "PIU" Spalte zeigt das "indicative resource potential for renewable electricity generation options" vom Beitrag des DTI zum PIU review im Jahr 2001. Für jede Technologie ist das „praktische Maximum“ dargestellt, oder wenn kein praktisches Maximum angegeben war, das „theoretische Maximum“.

CAT Die letzte Spalte zeigt die Zahlen vom "Island Britain" Plan des Centre for Alternative Technology, Helweg-Larsen and Bull (2007).

My estimates	IEE	Tyndall	IAG	PIU	CAT
Geothermal: 1 kWh/d	Geothermal: 10 kWh/d				
Tide: 11 kWh/d	Tide: 2.4	Tide: 3.9	Tide: 0.09	Tide: 3.9	Tide: 3.4
Wave: 4 kWh/d	Wave: 2.3	Wave: 2.4	Wave: 1.5	Wave: 2.4	Wave: 11.4
Deep offshore wind: 32 kWh/d					
Shallow offshore wind: 16 kWh/d	Offshore: 6.4	Offshore: 4.6	Offshore: 4.6	Offshore: 4.6	Offshore: 21 kWh/d
Hydro: 1.8 kWh/d		Hydro: 0.08			Hydro: 0.5
Biomass: food, biofuel, wood, waste incin'n, landfill gas: 24 kWh/d	Wastes: 4	Energy crops, waste: 2	Energy crops, waste, landfill gas: 3	Energy crops, waste incin'n, landfill gas: 31 kWh/d	Biomass fuel, waste: 8
PV farm (200 m ² /p): 50 kWh/d					
PV, 10 m ² /p: 5		PV: 0.3	PV: 0.02	PV: 12	PV: 1.4
Solar heating: 13 kWh/d					Solar heating: 1.3
Wind: 20 kWh/d	Wind: 2	Wind: 2.6	Wind: 2.6	Wind: 2.5	Wind: 1

Fig.18.6: Abschätzungen theoretischer oder praktischer Erneuerbarer Ressourcen in England von verschiedenen Quellen.

Bio-betriebenes Europa

Manchmal fragen mich Leute: "Haben wir nicht vor der Industriellen Revolution auch wunderbar von Erneuerbaren gelebt?" Ja, aber zwei wesentliche Dinge waren damals anders: Der Lebensstil und die Bevölkerungsdichte.

Drehen wir die Uhren 400 Jahre zurück: Europa lebt fast ausschließlich von nachhaltigen Quellen: Vorrangig Holz und Ackerbau, etwas verstärkt durch Wind-, Gezeiten- und Wasserkraft. Man schätzt, dass der damalige Lebensstil einer Durchschnittsperson einen Energiebedarf von 20 kWh/d hatte. Das Holz, das pro Person verbraucht wurde, waren 4 kg, was einen Hektar (10.000 m²) Wald pro Person erforderte. Die Landfläche pro Person betrug in den 1700ern 52.000 m², Ackerland, Weiden und Wälder. Heute kommt auf einen Briten nur noch eine Fläche von 4000 m², daher könnten wir, selbst wenn wir unseren Lebensstil auf Mittelalter-Niveau senken und England komplett aufforsten, hier nicht mehr nachhaltig leben. Unsere Bevölkerungsdichte ist viel zu hoch.

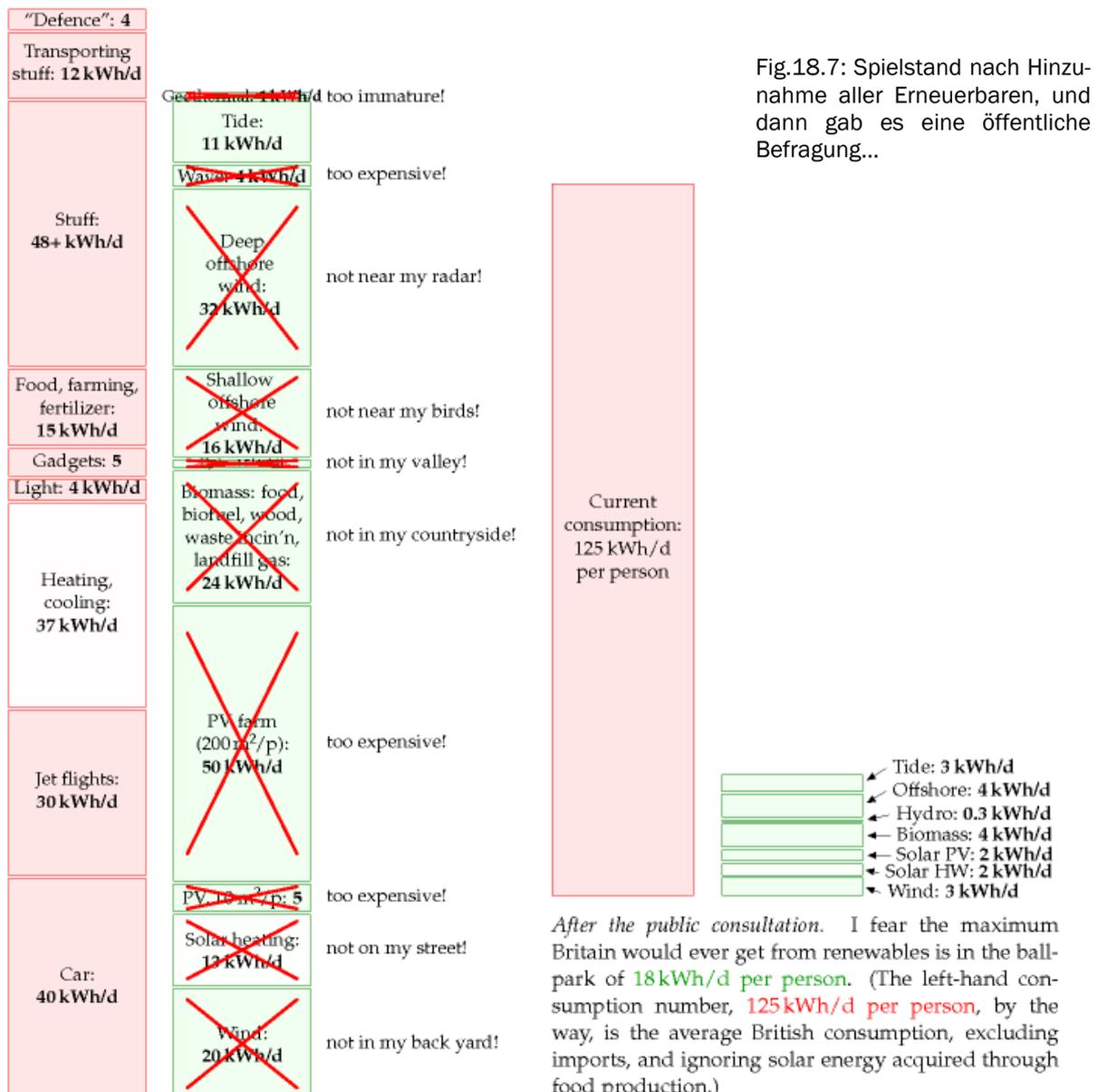


Fig.18.7: Spielstand nach Hinzunahme aller Erneuerbaren, und dann gab es eine öffentliche Befragung...

Grüne Ambitionen treffen auf soziale Wirklichkeit

Fig.18.1 ist eine öde Neuigkeit. Ja, technisch gesehen hat England „große“ Erneuerbare. Aber realistisch gesehen denke ich nicht, dass England von eigenen Erneuerbaren leben kann – wenigstens nicht in der Art, wie wir jetzt leben. Ich bin teilweise zu diesem Schluss auch getrieben durch den Chor von Gegnern, der jedes größere Vorhaben zu Erneuerbaren Energien begrüßt. Die Leute mögen Erneuerbare Energien, so lange sie nicht größer als ein Feigenblatt sind. Wenn die Briten in einem gut sind, dann im „Nein“-Sagen.

Wind-Farmen? „Nein, das sind hässliche laute Dinger“

Solarmodule auf Dächern? „Nein, sie verschandeln die optische Gefälligkeit der Straße“

Mehr Aufforstung? „Nein, das ruiniert die Landschaft“

Müllverbrennung? „Nein, ich Sorge mich um Gesundheitsrisiken, Verkehrszunahme, Abgase und Lärm“

Wasserkraft? „Ja, aber keine großen Anlagen – die zerstören die Umwelt“

Off-shore Wind? „Nein, die hässlichen Stromleitungen, die über die Küste hereinbrechen, beunruhigen mich noch mehr als damals eine Nazi-Invasion“

Wellen oder Geothermie? „Nein, viel zu teuer“

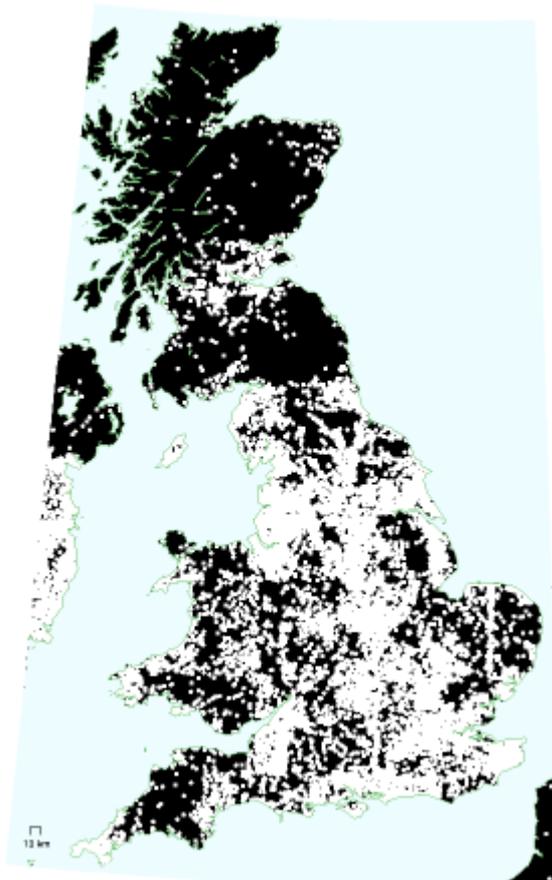


Fig.18.8: Wo die Wildnis ist. Einer der Gründe gegen Windfarmen ist der Lärm, den sie verursachen. Ich habe deswegen alle Gebiete in einem 2-km-Radius um jede Siedlung weiß gefärbt. Die schwarzen Flächen sind vermutlich weitgehend ausgeschlossen, weil man derart ruhige Orte von der Industrialisierung verschonen sollte. Siedlungsdaten von www.openstreetmap.org

Nach all diesen Einwänden fürchte ich, dass England maximal das an Erneuerbaren bekommen wird, was in Fig.18.7 rechts unten zu sehen ist.

Fig.18.8 bietet eine Anleitung für jeden, der in England eine Windfarm errichten will. Auf der Landkarte habe ich in Weiß eine Ausschlusszone mit 2 km Radius um jede Stadt, jedes Dorf und jeden Weiler gezogen. Diese weißen Flächen wären vermutlich nicht geeignet für Windfarm-Entwicklungen, weil sie zu nah an Menschen liegen. Schwarz habe ich all die Gegenden markiert, die weiter als 2 km von Siedlungen entfernt liegen. Diese Gegenden sind größtenteils für Windfarm-Entwicklungen ausgeschlossen, weil sie zu ruhig sind, und es ist wichtig, ruhige Orte vor der Industrialisierung zu bewahren. Wenn Sie also Einwände gegen ihre Windfarm vermeiden wollen, wählen Sie ein Stück Land, das weder weiß noch schwarz ist.

Some of these environmentalists who have good hearts but confused minds are almost a barrier to tackling climate change.

Malcolm Wicks, Minister of State for Energy

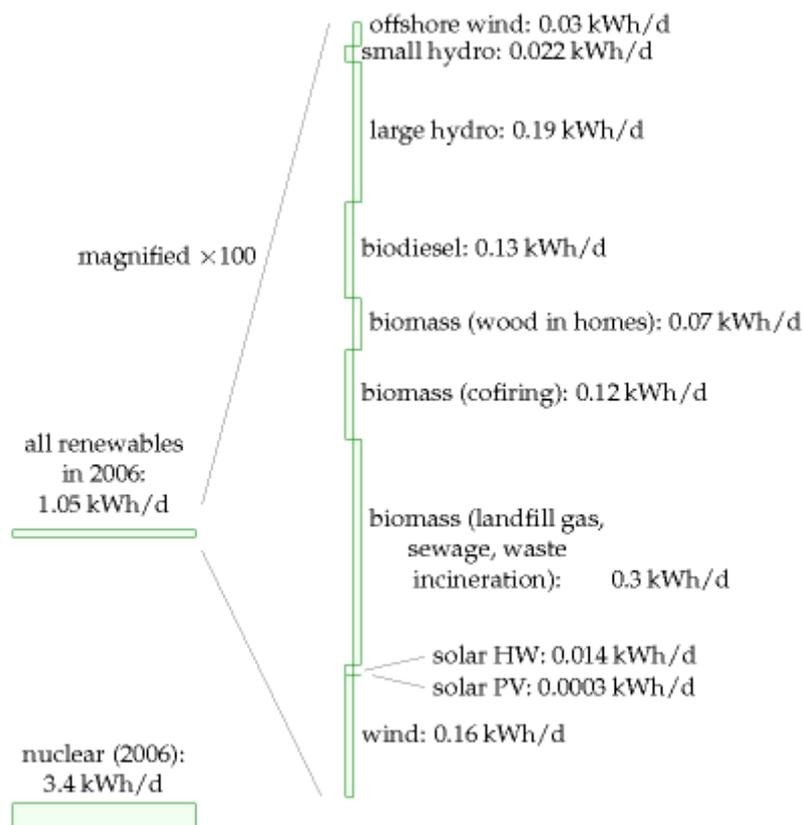


Fig.18.9: Produktion der Erneuerbaren und der Nuklearenergie in England 2006. Alle Leistungen ausgedrückt pro Person, wie gewohnt. Die Aufschlüsselung der Erneuerbaren rechts ist in der Senkrechten 100-fach vergrößert.

Wir kommen zum Ende des Teils I. Die Annahme war, dass wir den Ausstieg aus fossilen Brennstoffen wollen, aus einem oder mehreren Gründen, die ich in Kapitel 1 genannt habe – Klimawandel, Versorgungssicherheit usw. Fig.18.9 zeigt, wie viel Leistung wir derzeit von Erneuerbaren Energien und Atomkraft bekommen. Es sind gerade 4 % des Gesamtbedarfs.

Zwei Lehren können wir aus diesem Teil I ziehen:

1. *Um etwas zu verändern, müssen Anlagen für Erneuerbare Energien etwa die Größe eines Landes haben.*

Jede betrachtete Anlage kann einen Beitrag in der Größenordnung unseres derzeitigen Verbrauchs leisten, muss dazu aber etwa Landesgröße haben. Um einen nennenswerten Windenergie-Anteil zu bekommen, benutzten wir Windfarmen in der Größe von Wales. Um einen großen Anteil an Photovoltaik zu erzielen, brauchten wir die Hälfte von Wales. Um einen großen Anteil Wellenenergie beizusteuern, skizzierten wir Wellenfarmen über 500 km

Küstenlinie. Um Energiepflanzen mit einem großen Beitrag zu ernten, nahmen wir 75 % des gesamten Landes an.

Die Anlagen für Erneuerbare müssen in Landesgröße designed werden, weil die Erneuerbaren so diffus sind. Tabelle 18.10 fasst die meisten Leistungsdichten zusammen, auf die wir in Teil I gestoßen sind.

Den englischen Lebensstil aufrechtzuerhalten allein aus Erneuerbaren wäre sehr schwierig. Eine auf Erneuerbaren basierende Lösung wäre notwendigerweise großflächig und aufdringlich.

2. *Es wird nicht einfach werden, einen vernünftigen Plan aufzustellen, der allein auf Erneuerbaren basiert. Wenn wir ernsthaft fossile Brennstoffe los werden wollen, werden die Briten lernen müssen, „ja“ zu etwas zu sagen. In der Tat nicht nur zu etwas, sondern zu vielem.*

Im Teil II frage ich, „Angenommen, wir können durch Erneuerbare unseren Bedarf nicht decken, welche anderen Optionen haben wir?“

Leistung pro Land- oder Wasserflächeneinheit	
Wind	2 W/m ²
Off-shore Wind	3 W/m ²
Gezeitenbecken	3 W/m ²
Gezeitenstrom	6 W/m ²
Photovoltaik	5-20 W/m ²
Regenwasser (Highlands)	0,24 W/m ²
Hydroelektrik	11 W/m ²
Geothermie	0,017 W/m ²

Tabelle 18.10: Anlagen der Erneuerbaren müssen Landesdimensionen erreichen, weil die Erneuerbaren so diffus sind.

Anmerkungen und Literaturhinweise

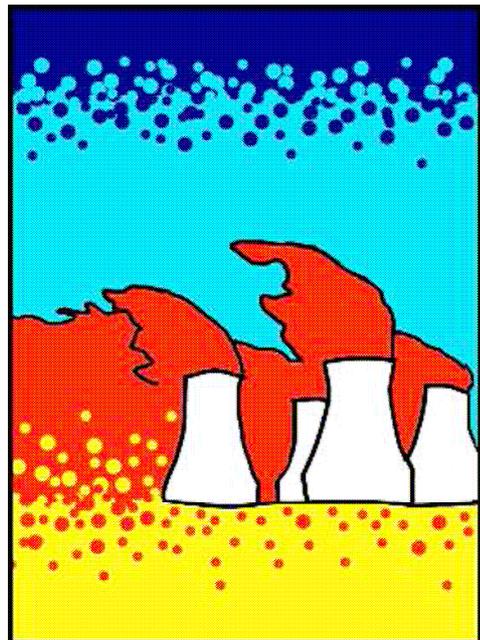
Seite

120 Der britische Durchschnitt ist auch 125 kWh/d/p. 104 UK average energy consumption is 125 kWh per day per person. Diese Zahl stammt aus dem UNDP Human Development Report, 2007. Das DTI (jetzt DBERR) veröffentlicht jährlich das Digest of United Kingdom Energy Statistics [uzek2]. Im Jahr 2006 war nach DUKES der gesamte Primärenergieverbrauch 244 Millionen Tonnen Öl-Äquivalent, was 130 kWh pro Tag pro Person entspricht. Ich kenne die Ursache für die kleine Differenz zwischen dem UNDP- und dem DUKES-Wert nicht, doch kann ich erklären, wieso ich die etwas kleinere der beiden Zahlen gewählt habe: DUKES benutzt zwar dieselbe Energie-Umrechnungskonvention wie ich sie auf Seite 29 erwähne und setzt eine kWh chemischer Energie mit einer kWh elektrischer Energie gleich, doch gibt es eine kleine Ausnahme: DUKES definiert die „Primärenergie“ aus AKWs als deren thermische Energie, die im Jahr 2006 etwa 9 kWh/d/p betrug; diese wurde mit (38% Effizienz) zu 3,4 kWh/d/p Elektrizität umgewandelt. In meiner Zählweise habe ich auf die Stromproduktion aus Wasserkraft, Erneuerbaren und AKWs abgestellt;

diese kleine Unterschied in der Konvention reduzierte den nuklearen Anteil auf etwa 5 kWh/d/p.

- 120 **Transmissionsverluste im Stromnetz schlucken 1% der nationalen Gesamtenergie** – *Losses in the electricity transmission network chuck away 1% of total national energy consumption.* Anders ausgedrückt betragen die Verluste 8% der generierten Elektrizität. Diese 8% setzen sich folgendermaßen zusammen: Etwa 1,5% verliert man im Hochspannungssystem über weite Strecken und 6% in lokalen öffentlichen Versorgungssystemen. Quelle: MacLeay et al. (2007).
- 121 **Fig.18.4: 105***Figure 18.4.* Daten aus UNDP Human Development Report, 2007. [3av4s9]
- 124 **Man schätzt, dass der damalige Lebensstil einer Durchschnittsperson einen Energiebedarf von 20 kWh/d hatte** 108 *In the Middle Ages, the average person's lifestyle consumed a power of 20 kWh per day.* Quelle: Malanima (2006).
- 125 **die hässlichen Stromleitungen, die über die Küste hereinbrechen, beunruhigen mich noch mehr als damals eine Nazi-Invasion** 110 *"I'm more worried about the ugly powerlines coming ashore than I was about a Nazi invasion."* Quelle: [6frj55].

Teil II: Die Energiewende - Making a Difference



19. Jeder große Schritt zählt

Wir haben herausgefunden, dass die Briten ihren derzeitigen Lebensstil nicht mit Hilfe ihrer eigenen Erneuerbaren Energien aufrechterhalten können (außer wenn sie landesgroße Bereiche des Landes oder der See industrialisieren). Doch was sind nun unsere Optionen, wenn wir aus den fossilen Brennstoffen aussteigen und nachhaltig leben wollen? Wir können die Energiebilanz entweder durch Reduktion des Verbrauches ausgleichen oder durch Erhöhen der Angebotes, oder natürlich durch beides zusammen.

Wir sollten uns keine Illusionen machen. Um unser Ziel, den Ausstieg aus den fossilen Brennstoffen, zu erreichen, müssen unsere Reduktionen im Verbrauch und unsere Zuwächse im Angebot *groß* sein. Lassen Sie sich nicht fehlleiten vom Mythos „Jeder kleine Schritt zählt“. Wenn jeder einen kleinen Schritt macht, werden wir auch nur einen kleinen Schritt vorwärtskommen. Wir müssen viel tun. Was erforderlich ist, sind große Veränderungen im Verbrauch und in der Versorgung.

„Doch sicherlich, wenn 60 Millionen Menschen alle einen kleinen Beitrag leisten, wird das sich nicht zu etwas Großem summieren?“ Nein. Diese „wenn-jeder“ Multiplikatormaschine ist nur ein Instrument, um etwas Kleines groß klingen zu lassen. Die „wenn-jeder“ Multiplikatormaschine spuckt inspirierende Aussagen der Form aus „wenn jeder X machte, dann gäbe es genug Energie/Wasser/Gas für Y“ wobei Y beeindruckend klingt. Verwundert es, dass Y groß klingt? Natürlich nicht. Wir erhielten ja Y durch Multiplikation von X mit der Anzahl von Menschen – 60 Millionen oder so. Hier ein Beispiel aus dem sonst sehr sachlichen *Blueprint for a Green Economy* der Konservativen Partei:

„Die Handyladegeräte haben eine Leerlaufleistung von nur etwa 1 W, doch wenn alle 25 Millionen Ladegeräte im Land ungenutzt eingesteckt und angeschaltet bleiben, verbrauchen sie 219 GWh Elektrizität, genug um 66.000 Haushalte für ein Jahr zu versorgen.“

66.000? Wow, so viele Haushalte! Schaltet Eure Ladegeräte aus! 66.000 klingt nach viel, doch der sensible Punkt, mit dem wir das vergleichen müssen, ist die Anzahl der Haushalte, die an dieser Einsparung unserer Meinung nach teilnehmen müssten, nämlich *25 Millionen*. 66.000 ist gerade *ein Viertel Prozent* von 25 Millionen. Obwohl also obige Aussage wahr ist, wäre folgendes eine besonnenere Formulierung desselben Sachverhaltes:

Wenn Sie Ihr Handyladegerät ungenutzt eingesteckt lassen, wird das ein Viertel Prozent Ihres Haushaltsverbrauchs an Energie zusätzlich verbrauchen.

Und wenn jeder das macht?

Wenn *jeder* sein Handyladegerät ungenutzt eingesteckt lässt, wird das ein Viertel Prozent *allen* Haushaltsverbrauchs an Energie zusätzlich verbrauchen.



“We were going to have a wind turbine but they’re not very efficient”

Fig.19.1: Abdruck mit freundlicher Genehmigung v. PRIVATE EYE / Robert Thompson www.private-eye.co.uk

Die „wenn-jeder“ Multiplikatormaschine ist eine ärgerliche Sache, weil sie die Aufmerksamkeit der Leute auf 25 Millionen Goldfische statt auf 25 Millionen Haie lenkt. Das Mantra „Kleine Veränderungen können große Unterschiede bewirken“ ist Quatsch, wenn es auf Klimawechsel oder Energie angewendet wird. Es mag schon zutreffen, dass „vieler Leute kleiner Beitrag sich zu etwas Großem addiert“, wenn all diese „kleinen Beiträge“ irgendwie zu einem einzelnen „Großen“ gebündelt werden – etwa, wenn eine Million Leute 10 € für ein Unfallopfer spenden, dann erhält das Opfer 10 Millionen. Das ist schon etwas „Großes“. Doch Energie ist etwas anderes. Wir alle benutzen Energie. Wenn wir also eine „große Veränderung“ im Gesamtverbrauch erreichen wollen, muss praktisch jeder eine „große“ Veränderung seines eigenen Verbrauchs beitragen.

Darum sind *große* Veränderungen im Verbrauch und in der Versorgung erforderlich. Der Energieverbrauch kann auf drei Arten gesenkt werden:

1. Durch Verringerung der Bevölkerung (vgl. Fig.19.2)
2. durch Verändern unseres Lebensstils
3. durch Beibehaltung unseres Lebensstils, doch Verringerung seiner Energieintensität durch „Effizienz“ und „Technologie“.

Die Versorgung könnte auf drei Arten erhöht werden:

1. Wir könnten aus den fossilen Brennstoffen aussteigen und in „Clean Coal“ Technologie investieren. Oops! Kohle (Coal) ist ein fossiler Brennstoff. Egal - lassen Sie uns diese Idee ansehen. Wenn wir Kohle „nachhaltig“ nutzen (diese Bezeichnung werden wir gleich genauer definieren), wie viel Energie würde das bringen können? Wenn wir die Nachhaltigkeit nicht betrachten und nur „Versorgungssicherheit“ wollen, könnte Kohle das gewährleisten?
2. Wir könnten in Kernspaltung investieren. Ist die gegenwärtige Nukleartechnologie „nachhaltig“? Ist sie wenigstens eine Brückentechnologie, die 100 Jahre hält?
3. Wir könnten Erneuerbare Energie von anderen Ländern kaufen, erbitten oder stehlen – sollten dabei aber nicht vergessen, dass die meisten Länder in derselben Situation wie England sind und keine Erneuerbaren übrig haben und dass außerdem dadurch der Umfang der erforderlichen Energieversorgung nicht auf magische Weise schrumpft. Wenn wir Erneuerbare importieren, um Energiefarmen im Umfang der Größe von Wales in *unserem* Land zu vermeiden, wird jemand eine Energiefarm etwa in der Größe von Wales in einem anderen Land errichten müssen.

Die folgenden sieben Kapitel diskutieren zuerst, wie man den Verbrauch substantiell verringern kann, und dann wie man das Versorgungsangebot so weit erhöht, dass es diesen verringerten, und doch weiterhin „großen“, Verbrauch deckt. In diesen Kapiteln werde ich nicht alle guten Ideen erwähnen, sondern nur die größten diskutieren.



Fig.19.2: Bevölkerungswachstum und Emissionen ...

Cartoon mit freundlicher Genehmigung von Colin Wheeler.

While the footprint of each individual cannot be reduced to zero, the absence of an individual does so.

Chris Rapley, ehemaliger Direktor des British Antarctic Survey

We need fewer people, not greener ones.

Daily Telegraph, 24. Juli 2007

Democracy cannot survive overpopulation. Human dignity cannot survive overpopulation.

Isaac Asimov

Das vereinfachte England

Um unsere Diskussion auf den wesentlichen Strang der Verbrauchsreduktion zu vereinfachen, führe ich als Arbeitshypothese das „vereinfachte England“ und seinen Verbrauch ein. Dabei vernachlässige ich viele Details und konzentriere mich auf das große Gesamtbild. Mein vereinfachtes England verbraucht Energie nur in drei Formen: Heizung, Transport und Elektrizität. Der Heizungsverbrauch im vereinfachten England ist 40 kWh pro Tag pro Person (gegenwärtig vollständig durch fossile Brennstoffe gedeckt); der Transportverbrauch liegt ebenfalls bei 40 kWh/d/p (gegenwärtig vollständig durch fossile Brennstoffe gedeckt); der Elektrizitätsverbrauch liegt bei 18 kWh/d/p; die Elektrizität ist derzeit fast vollständig durch fossile Brennstoffe generiert, die Konversion von fossiler Energie in Elektrizität ist 40%-effizient, also benötigt das vereinfachte England für seine 18 kWh/d/p Elektrizitätsverbrauch gegenwärtig 45 kWh fossilen Brennstoff pro Tag pro Person. Diese Vereinfachung ignoriert einige wirklich nennenswerte Details, etwa Ackerbau und Industrie, und die Graue Energie importierter Waren! Doch sie sollte eine schnelle Verständigung ermöglichen über die wesentlichen Dinge, die erforderlich sind, um aus den fossilen Energien auszusteigen. Heizung, Transport und Elektrizität machen mehr als die Hälfte unseres Energiebedarfs aus. Wenn wir also einen Plan erarbeiten könnten, der diese drei Bereiche nachhaltig abdeckt, haben wir schon einen großen Schritt getan in Richtung eines detaillierteren Plans, der auch in der Praxis aufgeht.

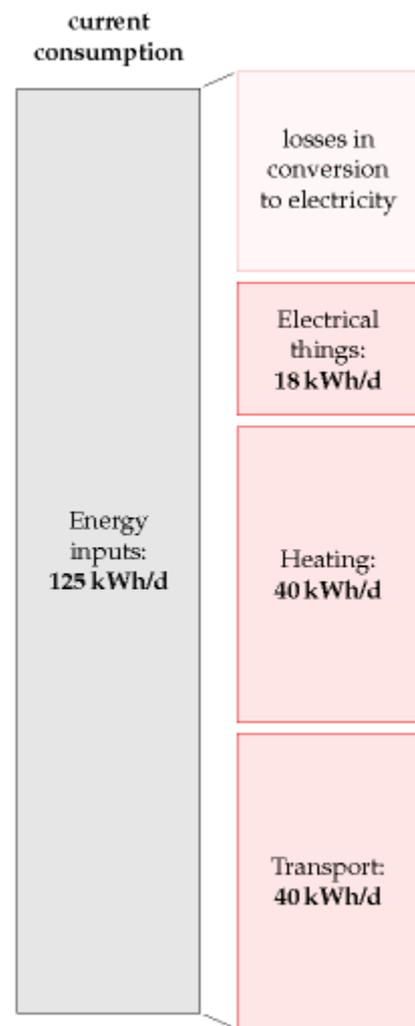


Fig.19.3: Aktueller Verbrauch im „Vereinfachten England 2008“

Wenn wir dieses vereinfachte England zum Ausgangspunkt nehmen, wird unsere Diskussion des Verbrauchs nur drei Gesichtspunkte enthalten. Erstens:

Wie können wir den Energiebedarf für Transport verringern und fossile Brennstoffe aus dem Transportwesen eliminieren? Das ist das Thema des Kapitels 20. Zweitens: Wie können wir den Energiebedarf für Heizen verringern und fossile Brennstoffe aus dem Heizungsbereich eliminieren? Das ist das Thema des Kapitels 21. Drittens: Wie steht es um die Elektrizität? Kapitel 22 behandelt die Effizienz im Elektrizitätsverbrauch.

Drei Optionen für die Versorgung – Clean Coal, Atomkraft und Erneuerbare aus anderen Ländern – werden dann in den Kapiteln 23, 24 und 25 behandelt. In Kapitel 26 sehen wir uns zum Schluss noch die Auswirkungen von Fluktuationen im Verbrauch und von Fluktuationen in der Verfügbarkeit der Erneuerbaren an.

Nachdem die Optionen zu Verbrauchsreduktionen und Versorgungsverbesserungen aufgezeigt sind, diskutieren wir in den Kapiteln 27 und 28 verschiedene Möglichkeiten, diese Optionen zu verschiedenen Gesamtkonzepten zu kombinieren, die wirkungsvoll Transport, Heizung und Elektrizität in diesem vereinfachten England gewährleisten.

Ich könnte unzählige Seiten füllen mit „50 Tipps, wie jeder einzelne zur Energiewende beitragen kann“, doch finde ich, der Ansatz der Vereinfachung, nur die drei dicksten Fische auszusuchen, sollte zu effizienteren Strategien führen.

Doch was ist mit den Dingen des täglichen Gebrauchs? Wie wir in Teil I sahen, könnte die Graue Energie in importierten Dingen der größte Fisch von allen sein! Ja, vielleicht ist dieser Fisch tatsächlich das „Mammut“. Doch lassen Sie mich die Bearbeitung des Mammut beiseite lassen, und unser Augenmerk auf die Dinge richten, über die wir direkte Kontrolle haben.

Also, los geht's: Sprechen wir über Transport, Heizung und Elektrizität.

Für den ungeduldigen Leser

Wollen Sie unbedingt schon jetzt das Ende der Geschichte wissen? Hier ist eine kurze Zusammenfassung, ein Ausblick auf Teil II.

Zuerst elektrifizieren wir den Transport. Die Umstellung auf Elektrizität macht das Transportwesen unabhängig von fossilen Brennstoffen und steigert auch dessen Energie-Effizienz. (Natürlich steigert das auch unseren Bedarf an grüner Elektrizität).

Als Zweites elektrifizieren wir, als Ergänzung zu solar-thermischen Heizungen, die meisten Heizanlagen für Wasser und Luft in Gebäuden, indem wir sie auf Wärmepumpen umstellen. Wärmepumpen heizen mit Elektrizität, sind dabei allerdings viermal effizienter als herkömmliche elektrische Öfen. Diese Elektrifizierung der Gebäudeheizungen erhöht unseren Bedarf an grüner Elektrizität noch weiter.

Im dritten Schritt erzeugen wir all die erforderliche grüne Elektrizität durch einen Mix aus vier Quellen: aus unseren eigenen Erneuerbaren, vielleicht aus Clean Coal, vielleicht aus Atomkraft und zuletzt - und das mit größter Höflichkeit - aus den Erneuerbaren anderer Länder.

Von den Erneuerbaren anderer Länder ist Sonnenkraft in Wüstengebieten die reichhaltigste Option. So lange wir friedliche internationale Kollaborationen bilden können hat Solarenergie in Wüsten anderer Länder sicherlich das Potenzial, um uns, diese anderen Länder und jeden mit 125 kWh pro Tag pro Person zu versorgen.

Noch Fragen? Lesen Sie weiter.

20. Besserer Transport

Modern vehicle technology can reduce climate change emissions without changing the look, feel or performance that owners have come to expect.

California Air Resources Board

Etwa ein Drittel unserer Energie wird für Transport verbraucht. Kann Technologie diesen Verbrauch reduzieren? In diesem Kapitel behandeln wir die Möglichkeiten, um folgende zwei Ziele zu erreichen: Die größtmögliche Reduktion des Verbrauches zu erzielen und fossile Treibstoffe aus dem Transportwesen zu eliminieren.

Fig.20.1: Der Ausgangspunkt: ein Luxus-Traktor. Der durchschnittliche englische Wagen verbraucht 8,5 l/100km, das sind 80 kWh pro 100km. Geht es besser?



Den Transport haben wir bereits in drei der Verbrauchs-Kapitel von Teil I behandelt: Kapitel 3 (Autos), Kapitel 5 (Flugzeuge) und Kapitel 15 (Straßen- und Seefracht). Es gilt, zwei Arten des Transports zu unterscheiden: Passagiertransport und Fracht. Unsere Einheit für Passagiertransport ist der Passagier-Kilometer (p-km). Wenn ein Auto eine Person 100 km weit trägt, leistet es 100 p-km Transport. Trägt es vier Personen dieselbe Strecke, leistet es 400 p-km. Analog ist unsere Einheit des Frachttransports der Tonnen-Kilometer (t-km). Wenn ein LKW 5t Ladung 100 km befördert, dann leistet er 500 t-km Frachttransport. Wir werden den Energieverbrauch des Passagiertransports in „kWh pro 100 p-km“ und den Verbrauch der Fracht in „kWh pro t-km“ messen. (Diese Messungen sind gerade anders herum als die in England gebräuchliche Angabe „miles per gallon“ (mpg): Während wir Fahrzeuge bevorzugen, die *viele* mpg liefern, wollen wir für den Energieverbrauch *wenige* kWh pro 100 p-km.)

Wir wollen dieses Kapitel mit der Diskussion des Transportes an Land beginnen. Um zu verstehen, wie man dabei Energie sparen kann, müssen wir verstehen, wohin die Energie beim Transport an Land geht. Hier sind drei Schlüsselkonzepte wichtig, die in Anhang A ausführlicher beschrieben sind.

1. Im Kurzstreckenverkehr mit vielen Starts und Stopps geht die Energie vorrangig in das Beschleunigen des Fahrzeugs und seines Inhalts. Die Schlüsselstrategie zum Energiesparen in dieser Art des Transports ist daher, *wenig zu wiegen* und *weite Strecken zwischen den Stopps* zurückzulegen. Regeneratives Bremsen, das beim Verlangsamen Energie zurückgewinnt, kann zudem helfen. Allgemein hilft es, *langsamer* und *weniger* zu fahren.

2. Im Langstreckenverkehr bei konstanter Geschwindigkeit, mit Zug oder Automobil, verbraucht man die meiste Energie durch das Verwirbeln von Luft, denn Sie müssen das Fahrzeug ja nur einmal beschleunigen. Bei dieser Art des Verkehrs sind daher die Schlüsselstrategien zum Energiesparen, *langsamer zu fahren, weniger zu fahren und lange, dünne Fahrzeuge zu verwenden*.
3. In allen Arten der Fortbewegung gibt es eine Energie-Umwandlungs-Kette, die Energie aus einer Art von Treibstoff entnimmt und sie zum Anschieben des Fahrzeugs benutzt. Diese Energiekette hat unausweichlich Ineffizienzen. In einem normalen Benzinauto werden z.B. nur 25% der Energie zum Antrieb verwendet, etwa 75% gehen verloren und heizen nur Motor und Kühler. Eine letzte Strategie zur Verbrauchsreduktion ist also, diese Energie-Umwandlungs-Kette effizienter zu machen.

Diese Betrachtungen führen uns zu sechs Prinzipien für Fahrzeugdesign und Fahrzeugeinsatz, die die Energieeffizienz des Transports an Land verbessern: a) reduziere die Aufstandsfläche pro Person; b) reduziere das Fahrzeuggewicht pro Person; c) reise bei konstanter Geschwindigkeit und vermeide Bremsen; d) fahre langsamer; e) fahre weniger; f) mach die Energie-Umwandlungs-Kette effizienter. Wir werden jetzt eine Vielzahl von Anwendungen dieser Prinzipien diskutieren.

Wie man besser rollt

Eine oft zitierte Statistik sagt in etwa „nur ein Prozent der verbrauchten Energie geht in die Bewegung des Fahrers“ - was impliziert, dass wir sicherlich, wenn wir es nur klug genug anstellten, Autos 100 mal effizienter machen könnten? Die Antwort ist ja, fast, doch nur, wenn wir die oben genannten Prinzipien für Fahrzeugdesign und Fahrzeugeinsatz in *extremer* Weise anwenden.

Ein Vorbild extremen Fahrzeugdesigns ist das Eco-Auto, das eine kleine Aufstandsfläche und eine geringe Höhe ausweist und – sofern es um das Aufstellen neuer Rekorde geht – vorsichtig bei einer geringen und gleichmäßigen Geschwindigkeit gefahren wird. Das *Team Crocodile Eco-Auto* (Fig.20.2) braucht bei 24 km/h gerade mal 0,13 l/100km (1,3 kWh pro 100 km). Mit 50 kg Gewicht und weniger Höhe als ein Verkehrshütchen bietet es komfortabel Platz für einen jugendlichen Fahrer.

Hmmm. Ich denke, der Fahrer des City-Traktors aus Fig.20.1 würde eine Veränderung im „Look and Feel“ und in der Performance bemerken, wenn wir ihn in ein Eco-Auto setzen würden und ihn anweisen, seine Geschwindigkeit auf maximal 24 km/h zu beschränken. So gesehen ist es ein Märchen, dass Autos leicht 100mal energie-



Fig.20.2: Das Team Crocodile Eco-Auto verbraucht **1,3 kWh pro 100 km**. Foto mit freundlicher Genehmigung von Team Crocodile www.teamcrocodile.com



Fig.20.3: „Baby an Bord“ Diese Art des Transports hat Energiekosten von **1 kWh pro 100 Personen-km**.



Fig.20.4: Dieser 8-Waggon-Zug verbraucht bei seiner Höchstgeschwindigkeit von 161 km/h **1,6 kWh pro 100 Passagier-km**, wenn er voll ist.

effizienter sein könnten. Wir werden auf die Herausforderung, energieeffiziente Autos zu bauen, in Kürze zurückkommen. Doch lassen Sie mich zuerst noch andere Ansätze ansehen, die den Prinzipien des effizienteren Transports an Land genügen.

Fig.20.3 zeigt ein Mehrpersonenfahrzeug, das mindestens 25mal effizienter als das Standard-Auto ist: das Fahrrad. Die Performance des Fahrrads (in Energie pro Strecke) ist etwa dieselbe wie die des Eco-Autos. Seine Geschwindigkeit ist die gleiche, seine Masse geringer (weil der Mensch Tank und Motor ersetzt), und seine effektive Aufstandsfläche ist höher, weil der Radfahrer nicht so stromlinienförmig ist wie das Eco-Auto.

Fig.20.4 zeigt einen anderen möglichen Ersatz für das Benzinauto: ein Zug, dessen Energiekosten, wenn er voll besetzt ist, bei **1,6 kWh pro 100 Passagier-km** liegen. Im Gegensatz zu Eco-Auto und Radfahrer erreichen Züge ihre hervorragende Effizienz nicht durch geringe Geschwindigkeit und nicht durch geringes Fahrzeuggewicht pro Person. Züge machen ihre hohe Geschwindigkeit und ihr hohes Gewicht durch Anwendung des Prinzips kleiner Aufstandsfläche pro Person wieder wett. Wo ein Radfahrer oder ein Standard-Auto Aufstandsfläche von 0,8 m² bzw. 0,5 m² pro Person besitzen, bringt es ein voll besetzter Pendlerzug von Cambridge nach London auf eine Fläche von 0,02 m² pro Person.

Doch, oh weh, jetzt haben wir ein böses Thema angestoßen – die Aussicht, ein Fahrzeug mit „all diesen schrecklichen Menschen“ zu teilen. Doch Schwamm drüber, und lassen Sie uns fragen: Um wie viel könnte man den Verbrauch reduzieren, wenn man von privaten Spritschluckern auf exzellent integrierte öffentliche Verkehrsmittel wechseln würde?



4.4 kWh per 100 p-km, if full



3-9 kWh per 100 seat-km, if full

Fig.20.5: Einige öffentliche Transportmittel und ihre Energie-Effizienz, im besten Fall. U-Bahnen, von außen und von innen. Zwei Hochgeschwindigkeitszüge. Der elektrische benötigt **3 kWh pro 100 Sitz-km**, der Diesel **9 kWh**. Oberleitungsbusse in San Francisco. Vancouver SeaBus. Foto von Latty.



7 kWh per 100 p-km, if full



21 kWh per 100 p-km, if full

Öffentliche Verkehrsmittel

Im besten Fall ist öffentlicher Transport weitaus energieeffizienter als der Individualverkehr. Ein **Diesel-Reisebus**, der 49 Passagiere bei 100 km/h mit 28 l/100km befördert, braucht **6 kWh pro 100 p-km** – 13mal besser als ein Einpersonenkraftwagen.

Die **Oberleitungsbusse** von Vancouver brauchen 270 kWh pro 100 Fahrzeug-km bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 15 km/h. Hat ein solcher Bus 40 Passagiere an Bord, kostet eine Fahrt mit ihm **7 kWh pro 100 p-km**. Der **SeaBus** in Vancouver braucht 83 kWh pro Fahrzeug-km bei 13,5 km/h. Er kann 400 Menschen befördern, also kostet

der Personentransport bei Vollbesetzung **21 kWh pro 100 p-km**. Die Londoner **U-Bahnen** fahren in Spitzenzeiten mit **4,4 kWh pro 100 p-km** – 18mal besser als Individualautos. Auch **Hochgeschwindigkeitszüge**, die zwei Prinzipien verletzen, da sie doppelt so schnell wie ein Auto fahren und eine Menge wiegen, sind viel effizienter: Wenn ein elektrisch betriebener Hochgeschwindigkeitszug voll besetzt ist, liegen seine Energiekosten bei **3 kWh pro 100 p-km** – das ist 27 mal geringer als beim Auto.

Aber wir sollten schon realistisch bleiben bei unseren Planungen. Einige Züge oder Busse sind nicht voll (Fig.20.6). Daher ist der mittlere Energieverbrauch der öffentlichen Transportmittel größer als das oben erwähnte Best-Case-Szenario. Wo liegen die mittleren Energiekosten der öffentlichen Transportsysteme und was ist eine realistische Abschätzung dessen, wie gut sie sein könnten?



32 kWh per 100p-km



9 kWh per 100p-km

Fig.20.7: Einige öffentliche Transportmittel und ihr mittlerer Energieverbrauch. Links: Rote Busse, Rechts: Croydon Tramlink. Foto von Stephen Parascandolo

Energieverbrauch (kWh pro 100 p-km)	
Auto	68
Bus	19
Eisenbahn	6
Luft	51
Schiff	57

Fig.20.6: (rechts) Einige Züge sind nicht voll. Drei Männer und ein Cello – die einzigen Reisenden in diesem Waggon des 10:30 Hochgeschwindigkeitszugs von Edinburgh nach Kings Cross.

Tabelle 20.8: (links) Gesamt-Transport-Effizienz nach Transportarten in Japan (1999)



Im Zeitraum 2006-7 lagen die gesamten Energiekosten der Londoner U-Bahnen einschließlich Beleuchtung, Aufzüge, Depots und Wartung bei **15 kWh pro 100p-km** – fünfmal besser als unser Vergleichs-Auto. Die Energiekosten der Londoner Busse in demselben Zeitraum waren **32 kWh pro 100p-km**. Natürlich sind Energiekosten nicht das einzig Ausschlaggebende. Passagiere wissen Geschwindigkeit zu schätzen: und die U-Bahnen liefern höhere Geschwindigkeiten (33 km/h im Mittel) als Busse (18 km/h). Die Manager haben die finanziellen Kosten im Blick: die Kosten für die Belegschaft, pro Passagier-km, sind bei U-Bahnen geringer als bei Bussen.

Die gesamte Energie (einschließlich Depot und Haltestellenbetrieb), die das Croydon Tramlink System (Fig.20.7) im Zeitraum 2006-7 verbrauchte, lag bei **9 kWh pro 100 p-km**, bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 25 km/h.

Wie gut könnte der öffentliche Transport sein? Vielleicht können wir einen groben Hinweis aus den Daten von Japan (Tabelle 20.8) erhalten. Bus mit **19 kWh pro 100p-km** und Bahn mit **6 kWh pro 100p-km** sehen vielversprechend aus. Die Bahn hat den netten Vorteil, dass sie unsere beiden Aufgaben löst – Reduktion des Energieverbrauchs und Unabhängigkeit von fossilen Brennstoffen. Busse haben offensichtliche Vorteile in Einfachheit und Flexibilität. Doch diese Flexibilität zu erhalten, wenn man Busse von fossilen Brennstoffen unabhängig machen will, das könnte eine Herausforderung sein.

Zusammenfassend scheinen öffentliche Verkehrsmittel (insbesondere elektrische Züge, Straßenbahnen und Busse) ein vielversprechender Weg für den Personentransport zu sein – besser im Sinne von Energie pro Passagier-km, vielleicht 5 oder 10 mal besser als Autos. Wenn Leute jedoch auf der Flexibilität des privaten Fahrzeugs bestehen, was sind dann unsere anderen Optionen?

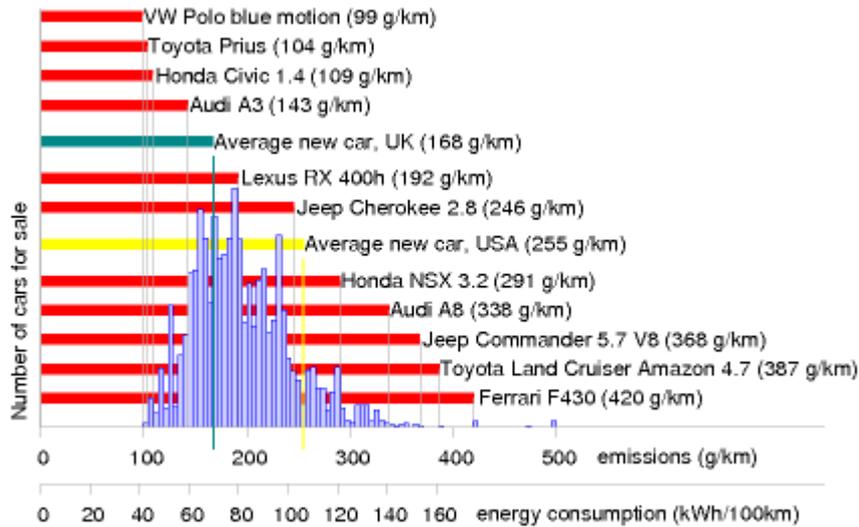


Fig.20.9: CO₂-Ausstoß, in g pro km, ausgewählter Autos, die in England verkauft werden. Die waagrechte Achse zeigt die Emissionsrate und die Höhe des blauen Histogramms zeigt die Verkäufe in 2006 für das entsprechende Modell. Quelle: www.newcarnet.co.uk. Die zweite waagrechte Achse zeigt den ungefähren Energieverbrauch, unter der Annahme, dass 240 g CO₂ etwa 1 kWh chemischer Energie entsprechen.

Privatfahrzeuge: Technologie, Vorschriften und Anreize

Der Energieverbrauch im Individualverkehr kann reduziert werden. Der weite Bereich der Energieeffizienz der angebotenen Autos beweist das. In ein und demselben Ausstellungsraum konnten Sie 2006 entweder einen Honda Civic 1.4, der etwa **44 kWh pro 100 km** verbraucht, oder einen Honda NSX 3.2, der **116 kWh pro 100 km** verbraucht (Fig. 20.9), besichtigen.



Fig.20.10: Besondere Parkplatz-Privilegien für Elektroautos in Ann Arbor, Michigan



Fig.20.11: Monsterautos sind groß genug, um die Sicht und die Sichtbarkeit von Fußgängern völlig abzudecken

Die Tatsache, dass Leute munter aus diesem breiten Angebot kaufen, beweist, dass wir zusätzlichen Ansporn und Gesetzgebung brauchen, um den geschätzten Konsumenten zu ermutigen, energie-effizientere Autos zu wählen. Es gibt verschiedene Arten, dem Konsumenten zu helfen, den Honda Civic dem Benzinverschwender NSX 3.2 vorzuziehen: Erhöhung der Treibstoffpreise; Anheben der Steuer auf Neuwagen im Verhältnis zum vorausgesagten Lebensverbrauch des Fahrzeugs; Anheben der Kraftfahrzeugsteuer auf Benzinverschwender; Parkplatz-Privilegien für wirtschaftliche Autos (Fig.20.10); oder die Kraftstoffrationierung. Alle diese Maßnahmen sind bei zumindest einigen Stimmberech-

tigten unpopulär. Vielleicht wäre es eine bessere gesetzgeberische Taktik, vernünftige Energieeffizienz zu erzwingen, statt weiter die freie Wahl zu erlauben; zum Beispiel könnten wir von einem bestimmten Datum an den Verkauf eines Autos einfach verbieten, dessen Energieverbrauch mehr als 80 kWh pro 100 km ist; und dann im Laufe der Zeit dieses Limit reduzieren auf 60 kWh pro 100 km, dann weiter auf 40 kWh pro 100 km, und darüber hinaus. Um den Verbrauchern mehr Wahlfreiheit zu lassen, könnten die Regulierungen auch die Autohersteller zwingen, den durchschnittlichen Energieverbrauch aller ihrer verkauften Autos zu reduzieren. Zusätzliche Gesetzgebung, die das Gewicht und die Aufstandsfläche von Fahrzeugen beschränkt, würde gleichzeitig den Treibstoffverbrauch senken und die Sicherheit anderer Verkehrsteilnehmer erhöhen (siehe Fig.20.11). Menschen machen heute modische Statements mit der Wahl ihres Autos. Mit strenger Effizienz-Gesetzgebung könnte es immer noch eine weitgehende Wahl nach Modeaspekten geben, nur wären alle Varianten zufällig auch energieeffizient. Sie könnten jede Farbe wählen, vorausgesetzt, sie wäre grün.

Solange wir noch darauf warten, dass sich Wähler und Politiker auf effiziente Autos einigen, welche weiteren Möglichkeiten bleiben uns?



Fig.20.12: Ein Kreisverkehr in Enschede, Niederlande



Fig.20.13: Einige holländische Fahrräder

Fahrräder

Mein Lieblingsvorschlag ist die Bereitstellung exzellenter Fahrradwege, flankiert mit geeigneter Gesetzgebung (niedrigere Geschwindigkeitsbeschränkung oder Unfallregelungen, die Radfahrer bevorzugen, zum Beispiel). Fig.20.12 zeigt einen Kreisverkehr in Enschede, Niederlande. Er besteht aus zwei Kreisen, der eine für die Autos liegt innerhalb des anderen für die Radfahrer, getrennt durch eine gute Autolänge. Die Vorfahrtsregeln sind dieselben wie in England, jedoch müssen die Autos beim Ausfahren aus dem inneren Kreis den umfahrenden Radfahrern Vorfahrt gewähren (wie gegenüber Fußgängern an einem Zebrastreifen). Wo es hervorragende Radwege gibt, werden die Leute sie auch benutzen, wie die Unmengen von Fahrrädern vor dem Bahnhof von Enschede beweisen (Fig.20.13).

Irgendwie erreichen jedoch englische Radwege den holländischen Standard noch nicht ganz (Fig.20.14).

In der französischen Stadt Lyon wurde ein privater Fahrradverleih, Vélo'v, populär, der 2005 gegründet wurde. Für die 470.000 Einwohner von Lyon stehen 2000 Fahrräder in etwa 175 Stationen innerhalb einer Stadtfläche von 50 km² bereit (Fig.20.15). Im Stadtzentrum ist man üblicherweise nie weiter als 400 m von einer Fahrradstation entfernt. Benutzer können sich für 10€ pro Jahr registrieren und dann Fahrräder frei mieten für alle Fahrten unter 30 Minuten. Für längere Fahrten muss extra bis zu 1 € pro Stunde bezahlt werden. Besucher können sich für 1€ eine Woche registrieren lassen.



Fig.20.14: Inzwischen, zurück in England.
Foto rechts von Mike Armstrong

Weitere Möglichkeiten der Gesetzgebung

Geschwindigkeitsbeschränkungen sind ein einfacher Knopf, den man drücken kann. In der Regel brauchen Autos, die langsamer fahren, weniger Energie (Anhang A). Mit der nötigen Übung können Autofahrer lernen, wie man ökonomischer fährt: Weniger Beschleunigen und Bremsen und immer im höchstmöglichen Gang zu fahren kann eine 20%ige Verringerung des Treibstoffverbrauchs bewirken.

Eine andere Möglichkeit der Verbrauchsreduktion ist das Vermeiden von Staus. Stop-and-Go Verkehr, Beschleunigen und wieder Bremsen, ist eine viel weniger effiziente Art des Fahrens als ruhig dahinzurollen. Mit laufendem Motor im Stau zu stehen, ist eine besonders ineffiziente Weise, Treibstoff zu verbrauchen.

Fig.20.16: (rechts) Bei so einem Stau ist man zu Fuß noch schneller

Fig.20.15: (unten) Eine Vélu'v Station in Lyon



Staus entstehen, wenn zu viele Autos auf der Straße sind. Also ist es eine einfache Möglichkeit, Staus zu vermeiden, wenn man die Reisenden in weniger Autos gruppiert. Ein bestechendes Argument für den Umstieg von Autos auf Busse ist die Berechnung der Straßenfläche, die in beiden Modi benötigt wird. Nehmen wir eine Fernstraße kurz vor Entstehung eines Staus, mit Richtgeschwindigkeit 100 km/h. Der Sicherheitsabstand zwischen den Fahrzeugen beträgt 77 m. Nehmen wir an, alle 80 m fahre ein Auto, jeweils mit 1,6 Personen besetzt. 40 Leute in einen Bus zu kondensieren würde dann 2 km Straße leerfegen!

Stau kann verringert werden, indem man gute Alternativen bietet (Radwege, öffentliche Transportmittel), und indem man die Straßenbenutzer zur Kasse bittet, wenn

sie zum Stau beitragen. In den Anmerkungen am Ende dieses Kapitels beschreibe ich eine faire und einfache Methode der Stau-Gebührenerhebung.

Die Verbesserung von Autos

Nehmen wir an, die alte Liebe der Welt zu den Autos kann nicht zerbrochen werden, welche Technologien können dann signifikante Energieeinsparungen bewirken? Einsparungen von 10% oder 20% sind einfach – wir diskutierten bereits einige Wege, dies zu erreichen, etwa Autos kleiner und leichter zu bauen. Eine andere Möglichkeit ist die Umstellung von Benzin auf Diesel. Dieselmotoren sind aufwändiger zu bauen, doch sind sie tendenziell sparsamer. Doch gibt es Technologien, die die Effizienz der Energiekette wirklich radikal verbessern können? (Erinnern Sie sich, dass im Standard-PKW 75% der Energie als Wärme über den Kühler in die Luft geblasen wird!) Und wie steht es mit der Vorgabe, fossile Treibstoffe los zu werden? In diesem Abschnitt sehen wir uns fünf Technologien an: Regeneratives Bremsen; Hybridautos; Elektroautos; Autos mit Wasserstoffantrieb und den Pressluftantrieb.

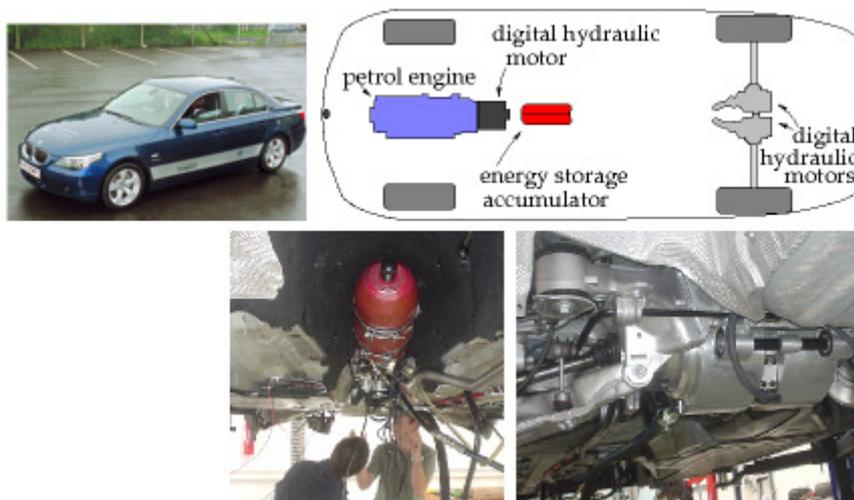


Fig.20.17: Ein BMW 520i umgerüstet von Artemis Intelligent Power auf digitale Hydraulik. Links unten: Ein 6l Speichertank (roter Kanister) kann etwa 0,05 kWh Energie in komprimiertem Stickstoff speichern. Rechts unten: Zwei 200kW Hydraulikmotoren, einer für jedes Hinterrad, die das Auto sowohl antreiben als auch abbremesen. Das Auto ist nach wie vor durch seinen 190 kW Benzinmotor angetrieben, doch dank der digitalen Hydraulik und der regenerativen Bremsen verbraucht es 30% weniger Treibstoff.

Regeneratives Bremsen

Es gibt vier Wege Energie einzufangen, wenn ein Fahrzeug abgebremst wird:

1. Ein elektrischer Generator, der mit den Rädern gekoppelt ist, kann eine Batterie oder einen Superkondensator aufladen.
2. Hydraulikpumpen, die mit den Rädern angetrieben werden, können Pressluft erzeugen, die in kleinen Kanistern gespeichert wird.
3. Energie kann in einem Schwungrad gespeichert werden
4. Bremsenergie kann als Gravitationsenergie gespeichert werden, indem man das Fahrzeug eine Rampe hochfährt, wenn man es abbremesen will. Diese gravitative Speichermöglichkeit ist recht unflexibel, weil immer eine Rampe an der richtigen Stelle bereitstehen muss. Diese Option ist hauptsächlich für Züge interessant, was etwa die Viktoria-Linie der Londoner U-Bahn zeigt, die Buckel für die Stationen hat. Jede Haltestelle liegt auf einem Hügel entlang der Strecke. Ankommende Züge werden automatisch durch den Hügel verlangsamt, abfahrende Züge werden beschleunigt, wenn sie das Gefälle des Hügels hinunterlaufen. Dieses Streckendesign erzeugt 5% Energieeinsparung und macht die Züge um 9% schneller.

Elektrisches regeneratives Bremsen (mit einer Batterie als Energiespeicher) rettet etwa 50% der Bewegungsenergie bei einem Bremsvorgang, was zu vielleicht 20% Energieeinsparung im Stadtverkehr führt.



Fig.20.18: (links) Ein regeneratives Bremssystem mit Schwungrad. Fotos mit freundlicher Genehmigung von Flybrid Systems

Fig.20.19: (unten) Toyota Prius – nach Jeremy Clarkson „eine sehr teure, sehr komplizierte, nicht besonders grüne, langsame, billig gefertigte und witzlose Art sich fortzubewegen“



Regenerative Bremssysteme mit Schwungrädern oder Hydraulik scheinen etwas besser zu arbeiten als batteriegestützte Systeme und retten etwa 70% der Bremsenergie. Fig.20.17 beschreibt ein Hybridauto mit einem Benzinmotor, der eine digital gesteuerte Hydraulik antreibt. Im Standard-Fahrzyklus verbraucht dieses Auto um 30% weniger Treibstoff als der Original-Benziner. Im Stadtverkehr ist sein Energieverbrauch halbiert von **131 kWh pro 100km** auf **62 kWh pro 100km**. (Dieser Erfolg geht halb auf das Konto der regenerativen Bremse und halb auf das der Hybridtechnologie.) Hydraulik und Schwungrad sind beides vielversprechende Ansätze für regeneratives Bremsen, da hier kleine Aggregate mit großen Energien umgehen können. Ein Schwungrad-System mit nur 24 kg Gewicht (Fig.20.18), konstruiert für einen Rennwagen, kann 400 kJ (0,1 kWh) speichern – genug Energie, um ein normales Auto auf ca. 100 km/h zu beschleunigen; und es kann 60 kW Leistung aufnehmen oder abgeben. Batterien in diesem Leistungsbereich wiegen um die 200 kg. Wenn nicht ohnehin schon Batterien in diesem Umfang an Bord sind, sollten daher auch elektrische regenerative Bremsen vielleicht besser Kondensatoren zum Speichern der Bremsenergie verwenden. Superkondensatoren haben ähnliche Energiespeicher- und Leistungsabgabe-Parameter wie Schwungräder.

Hybridautos

Hybridautos wie der Toyota Prius (Fig.20.19) haben effizientere Motoren und regenerative Bremsen, aber um ehrlich zu sein, stechen sie nicht wirklich aus der Menge hervor (Fig.20.9).

Die waagrechten Balken in Fig.20.9 zeigen einige Autos einschließlich zweier Hybridautos. Gegenüber dem durchschnittlichen Neuwagen in England mit 168 g CO₂ pro km, emittiert der Hybrid Prius 100 g CO₂, wie auch viele nicht-hybride Fahrzeuge – die VW Polo blue motion emittiert 99 g/km, und es gibt einen Smart mit 88 g/km.

Der Lexus RX 400h ist der zweite Hybrid, angepriesen mit dem Slogan: „LOW POLLUTION, ZERO GUILT.²⁵“ Doch seine CO₂-Emissionen liegen bei 192 g/km – schlechter als der englische Durchschnitt! Die Wettbewerbsaufsicht verfügte, dass diese Werbung gegen die Grundsätze Wahrheit, Vergleichbarkeit und Umweltaussagen verstößt. „Wir denken, ... der Leser soll hierbei zur Annahme geführt werden, dass dieses Auto keine oder wenig Umweltzerstörung verursachen würde, was nicht der Fall war, und

²⁵ Wörtlich: „Kaum Verschmutzung, keine Schuld“

dass dieses Auto wenig Emissionen im Vergleich zu anderen Autos hätte, was ebenfalls nicht der Fall war.“

In der Praxis scheinen Hybridtechnologien Einsparungen von 20% oder 30% zu erzielen. Deshalb scheinen für mich weder die Benzin/Elektro-Hybride noch die Benzin/Hydraulik-Hybride aus Fig.20.17 das Transport-Problem wirklich geknackt zu haben. Eine 30% Einsparung an fossilen Treibstoffen ist durchaus beeindruckend, aber nicht genug auf der Skala, die wir in diesem Buch betrachten. Unsere anfängliche Annahme war ja, dass wir aus den fossilen Treibstoffen aussteigen oder diese um wenigstens 90% reduzieren. Können wir dieses Ziel erreichen, ohne auf Fahrräder zurückzukehren?



Fig.20.20: Elektrofahrzeuge. V.l.n.r: der G-Wiz; die verfallenen Überreste eines Sinclair C5; ein Citroën Berlingo; ein Elettrica

Elektroautos

Das Elektroauto REVA wurde im Juni 2001 in Bangalore vorgestellt und wird nach England unter der Marke G-Wiz exportiert. Sein Elektromotor hat eine Spitzenleistung von 13 kW und eine Dauerleistung von 4,8 kW. Der Motor unterstützt regeneratives Bremsen. Er wird über acht 6-Volt Blei-Säure-Akkus versorgt, die voll aufgeladen eine Reichweite von „bis zu 77 km“ ermöglichen. Eine Aufladung erfordert 9,7 kWh Elektrizität. Diese Zahlen ergeben Transportkosten von 13 kWh pro 100 km.

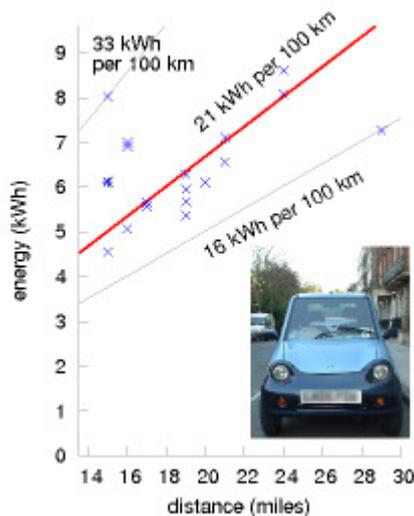


Fig.20.21: (links) benötigte Elektrizität zum Wiederaufladen eines G-Wiz versus gefahrene Strecke. Gemessen wurde an der Steckdose.

Fig.20.22: (unten) Tesla Roadster: 15 kWh pro 100 km. www.teslamotors.com.



Herstellerangaben beinhalten immer die beste mögliche Performance der Produkte. Was aber passiert im wirklichen Leben? Die reale Performance eines G-Wiz in London zeigt Fig.20.21. Im Laufe von 19 Ladezyklen lagen die mittleren Transportkosten dieses G-Wiz bei 21 kWh pro 100 km – etwa viermal besser als das Durchschnittsauto. Das beste Ergebnis war 16 kWh pro 100 km, das schlechteste 33 kWh pro 100 km. Oder wenn Sie sich für CO₂-Emission interessieren: 21 kWh pro 100 km ist äquivalent mit

105 g CO₂ pro km, wenn man annimmt, dass Elektrizität einen Fußabdruck von 500 g CO₂ pro kWh hinterlässt.

Nun, der G-Wiz sitzt auf dem einen Ende des Performance-Spektrums. Was wenn wir mehr fordern - mehr Beschleunigung, mehr Geschwindigkeit, mehr Reichweite? Am anderen Ende des Spektrums ist der Tesla Roadster. Der Tesla Roadster 2008 hat eine Reichweite von 345 km; sein Lithium-Ionen-Akku speichert 53 kWh und wiegt 450 kg (120 Wh/kg). Das Fahrzeug wiegt 1220 kg und die Maximalleistung des Motors liegt bei 185 kW. Welchen Energieverbrauch hat dieses Kraftpaket? Bemerkenswert, es ist besser als der G-Wiz: **15 kWh pro 100 km**. Ein Hinweis, dass 345 km Reichweite für die meisten Menschen und in den meisten Fällen genug sein sollte, ist die Tatsache, dass nur 8,3 % der Pendler mehr als 30 km zu ihren Arbeitsplätzen fahren.

Ich habe die Kennzahlen der Performance für Unmengen von Elektroautos nachgeschlagen - sie sind in den Anmerkungen am Ende des Kapitels aufgelistet - und sie scheinen konsistent zu sein mit folgender Zusammenfassung: Elektroautos können den Transport für etwa **15 kWh pro 100 km** gewährleisten. Das ist fünfmal besser als unser Vergleichsfahrzeug mit fossilem Treibstoff, und signifikant besser als jedes Hybridauto. Hurra! Um ökonomischen Transport zu erreichen, müssen wir uns nicht in öffentlichen Verkehrsmitteln zusammenpferchen - wir können weiter herumrasen und die Freuden und Freiheiten des individuellen Fahrens genießen, dank der Elektroautos.

Dieser Augenblick des Feierns ist ein guter Zeitpunkt, das große Zusammenfassungsdiagramm dieses Kapitels zu enthüllen, Fig.20.23, das die Energieerfordernisse des Passagiertransports zeigt für alle seine Formen, die wir behandelt hatten und für einige, die noch kommen werden.

OK, das Rennen ist gelaufen und ich habe zwei Gewinner verkündet - öffentliche Verkehrsmittel und Elektroautos. Doch kamen auch noch andere Optionen über die Ziellinie? Wir müssen uns noch die pressluftbetriebenen Autos und die Wasserstoffantriebstechnik vornehmen. Wenn eines dieser beiden Konzepte sich als besser als Elektroautos herausstellt, wird das aber das langfristige Bild nicht grundlegend verändern: Welche dieser drei Technologien wir auch verwirklichen, die Fahrzeuge wären aufzuladen über Energie aus einer „grünen“ Quelle.

Pressluftantrieb

Luftbetriebene Fahrzeuge sind keine neue Idee. Hunderte von Trambahnen, angetrieben durch Pressluft und Heißwasser, bevölkerten die Straßen von Nantes und Paris von 1879 bis 1911. Fig.20.24 zeigt eine deutsche pneumatische Lokomotive von 1958. Ich denke, im Hinblick auf Energieeffizienz ist die Presslufttechnologie zur Energiespeicherung nicht so geeignet wie elektrische Batterien. Das Problem liegt darin, dass das Komprimieren von Luft Wärme erzeugt, die wahrscheinlich nicht sinnvoll genutzt werden kann, und

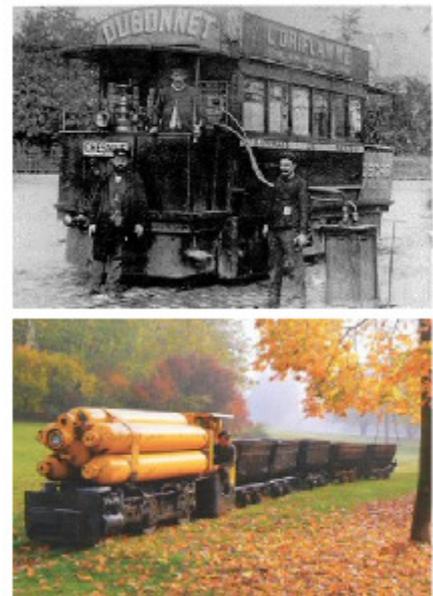


Fig.20.24: (oben) Eine Pressluft-Tram in Nantes nimmt Luft und Dampf auf. Der Betrieb der Trambahnen in Nantes brauchte 4,4 kg Kohle (36 kWh) pro Fahrzeug-km, oder **115 kWh pro 100p-km**, wenn die Tram voll war. [5qhvcb] (unten) Eine Pressluft-Lokomotive, Gewicht 9,2t, Druck 175 Bar, Leistung 26 kW. Foto mit freundlicher Genehmigung von Rüdiger Fach, Rolf-Dieter Reichert und vom Frankfurter Feldbahnmuseum.

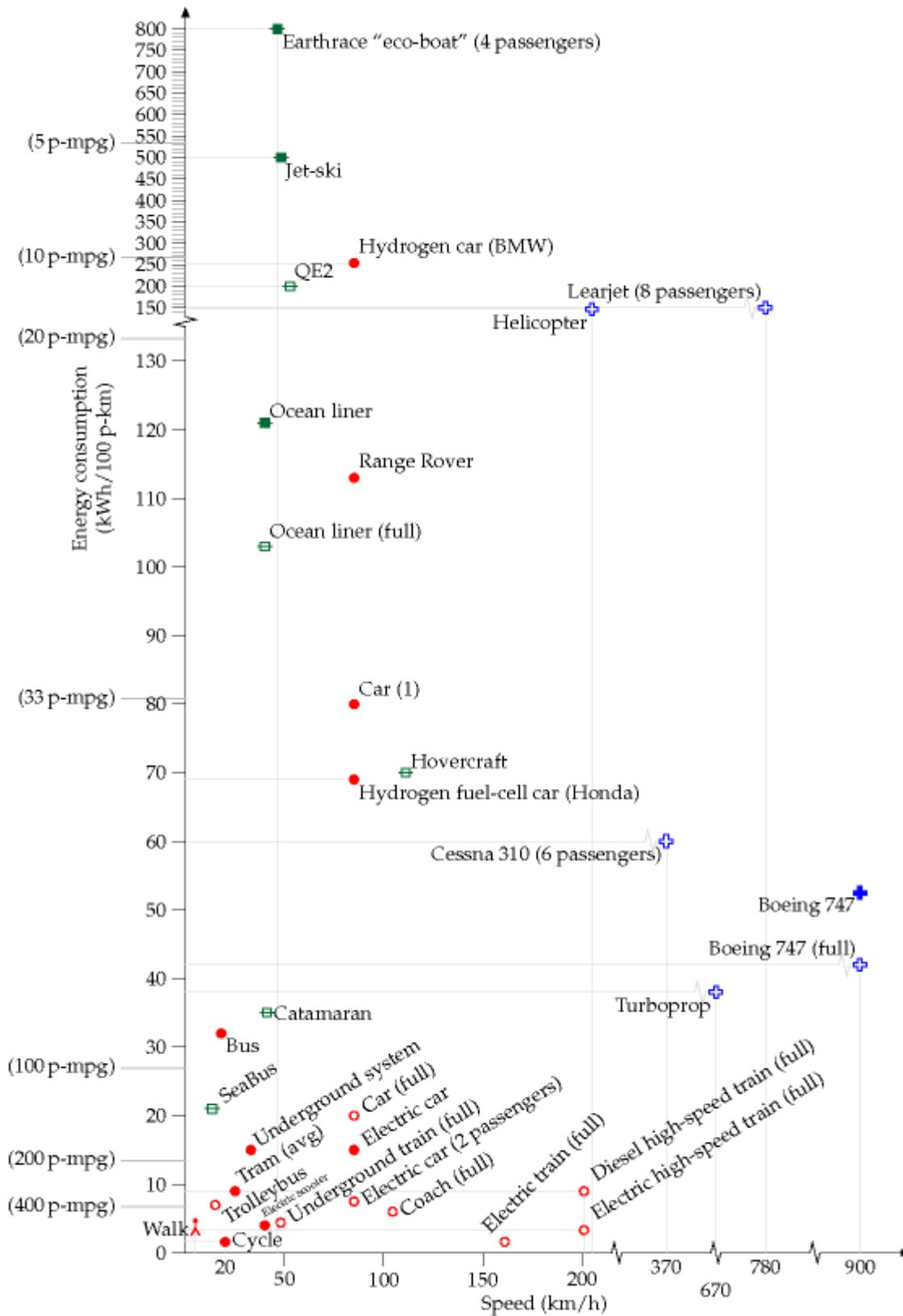


Fig. 20.23: Energieverbrauch verschiedener Formen des Passagiertransports. Die senkrechte Koordinate zeigt den Energieverbrauch in kWh pro 100p-km. Die horizontale Koordinate zeigt die Geschwindigkeit des Transportes. Das englische Durchschnittsauto mit einem Insassen „Car(1)“ verbraucht 33 mpg (8,5 l/100km). „Bus“ ist der Performance-Durchschnitt aller Londoner Busse. „Underground System“ steht für den Durchschnitt des Londoner U-Bahn-Netzes. Der „Catamaran“ ist ein dieselbetriebenes Boot. Links sind zum Vergleich noch die Treibstoff-Effizienzen in Meilen per (UK) Gallone pro Passagier (p-mpg). Hohle Punktmarkierungen stehen für Performance unter optimalen Praxisbedingungen, unter der Annahme, dass alle Sitzplätze belegt sind. Gefüllte Punktmarkierungen stehen für tatsächliche Performance unter typischen Bedingungen. Siehe auch Fig.15.8 (Energieverbrauch für Frachttransport).

das Expandieren der Luft mit Kühlung verbunden ist, die ebenfalls wohl nicht effizient genutzt werden kann. In anderer Hinsicht ist die Pressluft der Batterie wieder überlegen. So kann Luft tausende Male komprimiert werden, ohne sich zu verbrauchen! Eine interessante Erwähnung am Rande: Das erste Produkt, das die Firma Aircar verkaufte, war ein Elektroroller. [www.theaircar.com/acf]

Es gibt Gerüchte, dass Tata Motors in Indien luftbetriebene Autos herstellt, doch es ist schwer zu sagen, ob es ein Comeback der pressluftbetriebenen Fahrzeuge geben wird, weil niemand Spezifikationen aktueller Prototypen veröffentlicht. Hier ist die fundamentale Begrenzung: Die Energiedichte von Pressluftspeichern ist nur um die 11-28 Wh/kg, was etwa Blei-Säure-Akkus entspricht. (Siehe auch Fig.26.13 auf Seite 218 zu Einzelheiten anderer Speichertechniken) Also wird die Reichweite eines Pressluftautos niemals besser sein können als bei den ersten Elektroautos. Pressluftspeichersysteme haben drei Vorteile gegenüber Batterien: Längere Lebensdauer, billigere Herstellung und weniger lästige Chemikalien.

Wasserstoffbetriebene Autos – wie mit dem Zeppelin

Ich denke, Wasserstoff ist bloß ein Medien-Hype mit vielen Mitläufern. Ich wäre froh, wenn man mich widerlegen würde, aber ich kann nicht sehen, wie Wasserstoff uns bei der Lösung unserer Energieprobleme helfen sollte. Wasserstoff ist keine wundersame Energiequelle, sondern lediglich ein Energieträger, wie eine wiederaufladbare Batterie. Und er ist ein sehr ineffizienter Energieträger mit einem ganzen Bündel praktischer Einschränkungen.



Fig.20.25: Der Hummer H2H: Die grüne Revolution auf amerikanische Art. Foto mit freundlicher Genehmigung von General Motors



Fig.20.26: Der BMW Hydrogen 7. Energieverbrauch: 254 kWh pro 100 km. Foto von BMW.

Die „Wasserstoff-Ökonomie“ erhielt Unterstützung vom Nature Magazin in einem Artikel, der den Gouverneur von Kalifornien, Arnold Schwarzenegger, preist, wie er einen wasserstoffbetriebenen Hummer auffüllt (Fig.20.25). Der Nature-Artikel lobte Arnolds Vision von wasserstoffbetriebenen Autos, die „umweltverschmutzende Modelle“ ersetzen sollen, mit der Bemerkung: „Der Gouverneur ist ein Klima-Actionheld im wirklichen Leben.“ Doch die kritische Frage, die bei solchermaßen zur Schau gestelltem Wasserstoff-Heldentum unbedingt gestellt werden muss, lautet: „Woher kommt die Energie, die man braucht, um den Wasserstoff zu machen?“ Zudem kann die Konversion von Energie in und aus Wasserstoff nur ineffizient geschehen – zumindest mit heutiger Technologie.

Hierzu einige Zahlen:

- Im Rahmen des CUTE Projekts (Clean Urban Transport for Europe), das die Machbarkeit und Zuverlässigkeit von Brennstoffzellen-Bussen und Wasserstofftechnologie zeigen sollte, brauchte man zum Betanken der Wasserstoffbusse

zwischen 80% und 200% *mehr* Energie als für das Vergleichsfahrzeug, einen Diesel-Bus.

- Das Tanken des *Hydrogen 7*, dem Wasserstoffauto von BMW, erfordert **254 kWh pro 100 km** – *220% mehr* Energie als der europäische Durchschnittswagen.

Wäre unsere Aufgabe: „Bitte stoppt die Verwendung fossiler Brennstoffe im Transportwesen, auch unter der Annahme, dass eine *unbegrenzte* Menge grüner Energie umsonst verfügbar ist“, dann wäre natürlich eine energieverschwenderische Lösung wie Wasserstoff schon zu überlegen (obwohl Wasserstoff noch andere Probleme hat). Aber *grüne Elektrizität ist nicht umsonst*. In der Tat ist die Erzeugung grüner Elektrizität in dem Umfang unseres derzeitigen Verbrauchs schon eine echte Herausforderung. Das Problem fossiler Brennstoffe ist ein Energieproblem. Das Klimawandel-Problem ist ein Energieproblem. Wir müssen uns auf Lösungen konzentrieren, die weniger Energie verbrauchen, nicht „Lösungen“, die mehr verbrauchen. Ich kenne keine Form des Transports an Land dessen Energiebilanz schlechter ist als beim Wasserstoffauto. (Die einzigen schlechteren Transportformen sind Jet-Skis – mit etwa **500 kWh pro 100 km** – und ein mit Biodiesel betriebenes Schnellboot namens *Earthrace*, absurderweise als Eco-Boot bezeichnet, das **800 kWh pro 100 p-km** verbraucht.)



Fig.20.27: Das „eco-Boot“ Earthrace. Foto von David Castor



Fig.20.28: Honda FCX Clarity Limousine mit Wasserstoff-Brennstoffzelle, mit Jamie Lee Curtis als Maßstabsvergleich. Foto mit freundlicher Genehmigung von automobiles.honda.com

Wasserstoffbefürworter sagen „der BMW Hydrogen 7 ist nur ein früher Prototyp, er ist ein Luxusauto, ein Kraftpaket – die Technologie wird noch effizienter werden.“ Ja, das hoffe ich, denn sie hat noch eine Menge aufzuholen. Der Tesla Roadster (Fig.20.22) ist auch ein früher Prototyp, ein Luxusauto, ein Kraftpaket. Und er ist über zehnmals energieeffizienter als der Hydrogen 7! Gerne könne Sie Ihr Geld auf das Pferd Wasserstoff setzen wenn Sie wollen, und wenn es am Ende gewinnt, super! Doch es scheint wenig aussichtsreich, ein Pferd zu favorisieren, das bereits im Rennen so weit zurückliegt. Sehen Sie sich Fig.20.23 an – wenn ich die Spitze der senkrechten Achse nicht gestaucht hätte, hätte das Wasserstoffauto gar nicht mehr auf die Seite gepasst!

Zugegeben, das Honda Brennstoffzellen-Auto, der FCX Clarity, macht es besser – er fährt mit 69 kWh pro 100 km – doch ist meine Vorhersage: Wenn sich das „Zero-Emission“ Getöse gelegt hat, werden wir erkennen, dass Wasserstoffautos genauso viel Energie verbrauchen wie unsere durchschnittlichen Benzinautos heute.

Hier sind einige weitere Probleme mit dem Wasserstoff. Wasserstoff ist als Energiespeicher weniger geeignet als die meisten Flüssigtreibstoffe, wegen seines Volumens, egal ob als hochkomprimiertes Gas oder als Flüssigkeit (was eine Temperatur unter -253 °C erfordert). Selbst bei einem Druck von 700 bar (was ein stabiles Druckgefäß erfordert) ist seine Energiedichte (Energie pro Volumeneinheit) nur bei 22% derer von Benzin. Der Kryo-Tank des BMW Hydrogen 7 wiegt 120 kg und speichert 8 kg Wasserstoff. Außerdem leckt Wasserstoff nach und nach aus praktisch jedem Behälter.

Wenn Sie Ihr Wasserstoffauto am Bahnhof parken und eine Woche später zurückkommen, sollten Sie darauf vorbereitet sein, dass der meiste Wasserstoff verflüchtigt ist.

Einige Fragen zu Elektrofahrzeugen

Wir haben gezeigt, dass Elektroautos energieeffizienter sind als Autos mit fossilem Treibstoff. Doch sind sie auch besser zur Vermeidung von CO₂, wenn die Elektrizität weiterhin durch fossil befeuerte Kraftwerke erzeugt wird?

Das ist eine einfache Rechnung. Nehmen wir an, die Elektroautos verbrauchen 20 kWh(el) auf 100 km. (Ich denke, 15 kWh(el) auf 100 km ist perfekt machbar, doch lassen Sie uns in dieser Rechnung auf der skeptischen Seite bleiben.) Wenn die Elektrizität aus dem Netz einen CO₂-Fußabdruck von 500 g pro kWh(el) hinterlässt, dann liegen die effektiven CO₂-Emissionen dieses Fahrzeugs bei 100 g CO₂ pro km, das mit den besseren fossil betriebenen Autos vergleichbar ist (Fig.20.9). Ich folgere daraus, dass der Umstieg auf Elektroautos bereits jetzt eine gute Idee ist, bevor wir noch unsere Elektrizitätsversorgung auf grüne Energien umgestellt haben.

Elektroautos haben, wie Benzinautos, Kosten sowohl für die Herstellung als auch für den Betrieb. Elektroautos mögen im Betrieb weniger kosten, doch wenn die Batterien nicht sehr lange halten, sollte man dann nicht mehr Augenmerk auf die Herstellungskosten legen?

Ja, das ist ein guter Punkt. Das Transport-Diagramm zeigt nur die Betriebskosten. Wenn Elektroautos alle paar Jahre neue Batterien brauchen, dürften meine Zahlen Unterschätzungen sein. Die Batterien im Prius sollen 10 Jahre halten und der Austausch 3.500 € kosten. Wird jemand einen 10 Jahre alten Prius wollen und diese Kosten tragen? Man könnte vorhersagen, dass die Meisten Prius nach 10 Jahren verschrottet sein werden. Das ist sicherlich ein Einwand, der für alle Elektroautos mit Batterien gilt. Doch bin ich optimistisch, dass die Batterietechnologie verbessert werden wird, wenn wir auf Elektrofahrzeuge umsteigen.

Ich lebe in einer heißen Gegend. Wie könnte ich ein Elektroauto fahren? Ich benötige eine leistungsstarke Klimaanlage!

Für diesen Einwand gibt es eine elegante Erwiderung: Montieren Sie 4 m² Photovoltaik-Module in den himmelwärts gerichteten Oberflächen des Autos. Wenn die Klimaanlage benötigt wird, scheint sicherlich die Sonne. Module mit 20% Effizienz erzeugen bis zu 800W, die zum Betrieb der Klimaanlage ausreichen. Die Module könnten auch zum Wiederaufladen des Autos dienen, wenn es geparkt ist. Solarbetriebene Autokühlung gab es bei Mazda schon 1993, die Solarzellen waren im gläsernen Sonnendach integriert.

Ich lebe in einer kalten Gegend. Wie könnte ich ein Elektroauto fahren? Ich benötige leistungsstarke Innenraumheizung!

Der Motor eines Elektrofahrzeugs verbraucht im Betrieb im Mittel etwas um die 10 kW mit einer Effizienz von 90-90%. Einiges der verlorenen Leistung, die anderen 5-10%, verteilen sich als Wärme im Motor. Vielleicht könnten Elektroautos für kalte Gegenden sorgfältig so designed werden, dass die Abwärme des Motors, die um die 250 oder 500W betragen mag, vom Motor in den Innenraum geleitet werden kann. So viel Leistung könnte gut die Scheiben enteisen oder den Fahrer wärmen.

Sind Lithium-Ionen-Batterien sicher bei einem Unfall?

Einige Lithium-Ionen-Batterien sind unsicher wenn sie kurzgeschlossen oder überhitzt werden, doch die Batterie-Hersteller produzieren bereits sicherere Batterien etwa aus Lithium-Phosphat. Es gibt ein lustiges Video dazu auf www.valence.com.

Gibt es genug Lithium für all die Batterien einer großen Elektroautoflotte?

Die Weltreserven an Lithium in Erzgruben werden auf 9,5 Millionen Tonnen geschätzt (Seite 196). Eine Lithium-Ionen-Batterie besteht zu 3% aus Lithium. Nehmen wir an, jedes Fahrzeug hätte eine 200 kg schwere Batterie, dann wären das 6 g Lithium pro Fahrzeug. Die Lithiumreserven würden also ausreichen, um Batterien für 1,6 Milliarden Fahrzeuge herzustellen. Das ist mehr als die Anzahl der Autos auf der Welt (etwa 1 Milliarde) – aber nicht sehr viel mehr, also mag die Menge des Lithium schon eine Rolle spielen, besonders wenn wir in Betracht ziehen, dass es widerstreitende Ambitionen aus der nuklearen Fusionsreaktortechnik gibt (Kapitel 24), die Lithium in ihren Reaktoren verwenden will. Es gibt aber viele tausendmal mehr Lithium im Meerwasser, daher werden die Ozeane vielleicht einen brauchbaren Zusatzbeitrag liefern. Lithiumspezialist R. Keith Evans sagt: „Bedenken wegen der Lithium-Verfügbarkeit für Batterien von Hybrid- oder Elektroautos oder andere vorhersehbare Anwendungen sind unbegründet.“ Und überdies werden andere, lithiumfreie Batterietechnologien erforscht, etwa Zink-Luft-Akkus [www.revoltechnology.com]. Ich denke, das Elektroauto klappt!

Die Zukunft des Fliegens?

Der Superjumbo A380 wird ein „höchst treibstoff-effizientes Flugzeug“ genannt. In der Tat verbrennt er 12% weniger Treibstoff pro Passagier als eine 747.



Fig.20.29: (links) Airbus A380.

Fig.20.30: (unten) TSS Rijndam.



Boeing vermeldete einen ähnlichen Durchbruch: Ihr neuer 747-8 Intercontinental, gerühmt für seine planetenrettenden Eigenschaften, ist (nach Angaben von Boeing) auch nur 15% treibstoff-effizienter als eine 747-400.

Diese langsame Rate des Fortschritts (im Vergleich zu Autos, wo technologische Veränderungen zweifach oder sogar zehnfach verbesserte Effizienz liefern) wird detailliert in Anhang C beschrieben. Flugzeuge sind nahe an ihrem fundamentalen Limit, das die Gesetz der Physik vorgeben. Jedes Flugzeug, unabhängig von seiner Größe, muss notgedrungen eine Energie von etwa 0,4 kWh pro Tonne und km aufwenden, um oben und in Bewegung zu bleiben. Flugzeuge sind bereits fantastisch optimiert und es besteht keine Aussicht auf weitere Verbesserungen in ihrer Effizienz.

Eine Zeitlang dachte ich, dass ein gangbarer Weg zur Lösung des Langstrecken-Transportproblems die Rückkehr zum Status vor den Flugzeugen wäre, zu den

Ozeanschiffen. Dann sah ich mir die Zahlen an. Die traurige Wahrheit ist, dass Ozeanschiffe mehr Energie pro Passagier verbrauchen als Jumbos. Die QE2 verbraucht viermal so viel Energie pro Passagier wie ein Jumbo. OK, das ist ein Luxussschiff, können wir das mit langsameren Touristen-Linienschiffen verbessern? Von 1952 bis 1968 waren ein ökonomischer Weg der Atlantiküberquerung die „Economy Twins“, zwei holländische Linienschiffe, die Maasdam und die Rijndam. Sie fuhren mit 16,5 Knoten (30,5 km/h) und die Überfahrt dauerte 8 Tage. Ihr Energieverbrauch, voll besetzt mit 893 Passagieren, lag bei 103 kWh pro 100p-km. Bei einer typischen Auslastung von 85% sind das **121 kWh pro 100p-km** – mehr als das Doppelte eines Jumbo Jets. Um fair zu den Schiffen zu bleiben: Sie liefern nicht nur Transport: Sie heizen auch die Raumluft für Passagiere und Crew, liefern heißes Wasser, Licht und Unterhaltung für einige Tage; doch die Energie, die man zu Hause spart, weil man einige Tage an Bord ist, ist winzig gegen den Energieverbrauch des Schiffes, der im Fall der QE2 um die 3000 kWh pro Tag pro Passagier beträgt.

Leider werden die Schiffe wohl nie die Flugzeuge auf der Langstrecke schlagen können, was Energieverbrauch betrifft. Wenn man dennoch die Langstreckenreisen unabhängig von fossilen Brennstoffen machen will, sind vielleicht atombetriebene Schiffe eine interessante Option (Fig.20.31 und 20.32).

Was ist mit dem Frachttransport?

Die internationale Schifffahrt ist ein überraschend effizienter Verbraucher fossiler Brennstoffe; es ist also viel wichtiger, beim Straßentransport von fossilen Brennstoffen auszusteigen als bei der Schifffahrt. Doch sind fossile Brennstoffe eine begrenzte Ressource und deshalb müssen auch Schiffe möglicherweise irgendwann von etwas anderem angetrieben werden. Biotreibstoffe *könnten* das übernehmen. Eine andere Option ist Atomkraft. Das erste atomgetriebene Schiff für Fracht- und Personentransport war die NS Savannah (Fig.20.31), die 1962 als Teil der von Präsident Dwight D. Eisenhower unterstützten „Atom for peace“-Initiative vom Stapel lief. Angetrieben von einem 74 MW Atomreaktor und einem 15 MW Motor erreichte die Savannah eine Reisegeschwindigkeit von 21 Knoten (39 km/h) und konnte 60 Passagiere und 14.000 t Ladung aufnehmen. Das ist eine Transport-Effizienz für Ladung von 0,14 kWh pro t-km. Sie konnte 500.000 km ohne Nachtanken fahren. Gegenwärtig gibt es viele atombetriebene Schiffe, sowohl im militärischen als auch im zivilen Bereich. Russland hat z.B. zehn nuklearbetriebene Eisbrecher, von denen noch sieben aktiv sind. Fig.20.32 zeigt den nuklearen Eisbrecher Yamal, der zwei 171 MW Reaktoren und Motoren mit 55 MW Leistung beherbergt.



Fig.20.31: NS Savannah, das erste kommerzielle nuklearbetriebene Frachtschiff bei einer Durchfahrt unter der Golden Gate Bridge 1962.



Fig.20.32: Der nuklearbetriebene Eisbrecher Yamal fährt 100 Touristen zum Nordpol, 2001. Foto von Wofratz.

„Hey, Sie haben die magnetische Schwebetechnik noch nicht erwähnt“

Die deutsche Firma Transrapid, die die Magnetschwebebahn für Shanghai, China (Fig.20.33), gebaut hat, sagt: „Das Transrapid Superspeed Magnetschwebesystem ist unerreicht in Punkto Lärmemission, Energieverbrauch und Flächenverbrauch. Das innovative kontaktlose Transportsystem garantiert Mobilität, ohne dass die Umwelt auf der Strecke bleibt.“

Magnetschwebetechnik ist einer der vielen Ansätze, die groß herausgestellt werden wenn die Leute Energiethemen diskutieren. Im Hinblick auf den Energieverbrauch ist der Vergleich mit anderen Hochgeschwindigkeitszügen in Wirklichkeit nicht so gravierend, wie es der Hype glauben machen will. Die Transrapid-Homepage vergleicht den Transrapid mit dem ICE, einem elektrischen Hochgeschwindigkeitszug:

Schnellzüge verglichen bei 200 km/h	
Transrapid	2,2 kWh pro 100 Sitz-km
ICE	2,9 kWh pro 100 Sitz-km

Die wesentlichen Ursachen, weshalb Magnetbahnen etwas besser sind als der ICE sind: Der magnetische Antriebsmotor hat einen hohen Wirkungsgrad; der Zug selbst hat weniger Masse, weil der Großteil des Antriebssystems in den Schienen liegt anstatt im Zug; und es passen mehr Passagiere in den Zug, weil der Platz nicht für Motoren benötigt wird. Oh und vielleicht, weil die Daten von der Magnetbahn-Herstellerfirma kommen und so ausgewählt sind, dass die Magnetbahn besser herauskommt!

Fig.20.34 (rechts) Neun von zehn Fahrzeugen in London sind G-Wizes (und 95% aller Statistiken sind gefälscht)



Fig.20.33: (unten) eine Magnetschwebebahn am Flughafen von Pudong, Shanghai. „Fahren ohne Räder, Fliegen ohne Flügel.“ Foto von Alex Needharn.



Leute, die den Transrapid in Shanghai gesehen haben, erzählten mir zudem, dass er bei Höchstgeschwindigkeit „etwa so leise wie ein Düsenflugzeug“ sei.

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

135 Eine oft zitierte Statistik sagt in etwa „nur ein Prozent der verbrauchten Energie geht in die Bewegung des Fahrers“ 119 A widely quoted statistic says “Only 1% of fuel energy in a car goes into moving the driver.” In fact the percentage in this myth varies in size as it commutes around the urban community. Some people say “5% of

the energy goes into moving the driver.” Others say “A mere *three tenths of 1 percent* of fuel energy goes into moving the driver.” [4qgg8q] My take, by the way, is that none of these statistics is correct or helpful.

- 136 **Die Performance des Fahrrads ist etwa dieselbe wie die des Eco-Autos.** – The bicycle’s performance is about the same as the eco-car’s. Cycling on a single-person bike costs about 1.6 kWh per 100 km, assuming a speed of 20 km/h. For details and references, see Chapter A, p262.
- 160 **Fig.20.4: Dieser 8-Waggon-Zug** The 8-carriage stopping train from Cambridge to London (figure 20.4) weighs 275 tonnes, and can carry 584 passengers seated. Its maximum speed is 100mph (161 km/h), and the power output is 1.5MW. If all the seats are occupied, this train at top speed consumes at most **1.6 kWh per 100 passenger-km**.
- 137 **Die Londoner U-Bahnen** 120 London Underground. A Victoria-line train consists of four 30.5-ton and four 20.5-ton cars (the former carrying the motors). Laden, an average train weighs 228 tons. The maximum speed is 45 mile/h. The average speed is 31mph. A train with most seats occupied carries about 350 passengers; crush-loaded, the train takes about 620. The energy consumption at peak times is about **4.4 kWh per 100 passenger-km** (Catling, 1966).
- 137 **Hochgeschwindigkeitszüge**, 121 High-speed train. A diesel-powered intercity 125 train (on the right in figure 20.5) weighs 410 tons. When travelling at 125mph, the power delivered “at the rail” is 2.6MW. The number of passengers in a full train is about 500. The average fuel consumption is about 0.84 litres of diesel per 100 seat-km [5o5x5m], which is a transport cost of about **9 kWh per 100 seat-km**. The Class 91 electric train (on the left in figure 20.5) travels at 140mph (225 km/h) and uses 4.5MW. According to Roger Kemp, this train’s average energy consumption is **3 kWh per 100 seat-km** [5o5x5m]. The government document [5fbeg9] says that east-coast mainline and west-coast mainline trains both consume about 15 kWh per km (whole train). The number of seats in each train is 526 or 470 respectively. So that’s **2.9–3.2 kWh per 100 seat-km**.
- 137 **Im Zeitraum 2006-7 lagen die gesamten Energiekosten** – the total energy cost of all London’s underground trains, was 15 kWh per 100 p-km. . . . The energy cost of all London buses was 32 kWh per 100 pkm. Source: [679rpc]. Source for train speeds and bus speeds: Ridley and Catling (1982).
- 137 **das Croydon Tramlink System** – Croydon Tramlink. www.tfl.gov.uk/assets/downloads/corporate/TfL-environment-report-2007.pdf, www.tfl.gov.uk/assets/downloads/corporate/London-Travel-Report-2007-final.pdf, www.croydon-tramlink.co.uk.
- 139 **die Bereitstellung exzellenter Fahrradwege** 123 . . . provision of excellent cycle facilities . . . The UK street design guide [www.manualforstreets.org.uk] encourages designing streets to make 20 miles per hour the natural speed. See also Franklin (2007).
- 141 **eine faire und einfache Methode der Stau-Gebührenerhebung** 124 A fair and simple method for handling congestion-charging. I learnt a brilliant way to automate congestion-charging from Stephen Salter. A simple daily congestion charge, as levied in London, sends only a crude signal to drivers; once a car-owner has decided to pay the day’s charge and drive into a congestion zone, he has no incentive to drive *little* in the zone. Nor is he rewarded with any rebate if he carefully chooses routes in the zone that are not congested. Instead of having a centralized authority

that decides in advance when and where the congestion-charge zones are, with expensive and intrusive monitoring and recording of vehicle movements into and within all those zones, Salter has a simpler, decentralized, anonymous method of charging drivers for driving in heavy, slow traffic, wherever and whenever it actually exists. The system would operate nationwide. Here's how it works. We want a device that answers the question "how congested is the traffic I am driving in?" A good measure of congestion is "how many other active vehicles are close to mine?" In fast-moving traffic, the spacing between vehicles is larger than slow-moving traffic. Traffic that's trundling in tedious queues is the most densely packed. The number of nearby vehicles that are active can be sensed anonymously by fitting in every vehicle a radio transmitter/receiver (like a very cheap mobile phone) that transmits little radio-bleeps at a steady rate whenever the engine is running, and that counts the number of bleeps it hears from other vehicles. The congestion charge would be proportional to the number of bleeps received; this charge could be paid at refuelling stations whenever the vehicle is refuelled. The radio transmitter/receiver would replace the current UK road tax disc.

- 142 Schwungräder oder Hydraulik retten etwa 70% der Bremsenergie 126 hydraulics and flywheels salvage at least 70% of the braking energy. Compressed air is used for regenerative braking in trucks; eaton.com say "hydraulic launch assist" captures 70% of the kinetic energy. [5cp27j] The flywheel system of flybridsystems.com also captures 70% of the kinetic energy. www.flybridsystems.com/F1System.html Electric regenerative braking salvages 50%. Source: E4tech (2007).
- 142 Batterien in diesem Leistungsbereich wiegen um die 200 kg. – Electric batteries capable of delivering 60 kW would weigh about 200 kg. Good lithium-ion batteries have a specific power of 300W/kg (Horie et al., 1997; Mindl, 2003).
- 142 durchschnittlichen Neuwagen in England mit 168 g CO₂ pro km – the average new car in the UK emits 168 g CO₂ per km. This is the figure for the year 2006 (King, 2008). The average emissions of a new passenger vehicle in the USA were 255 g per km (King, 2008).
- 142 Hybridautos wie der Toyota Prius (Fig.20.19) haben effizientere Motoren – The Toyota Prius has a more-efficient engine. The Prius's petrol engine uses the Atkinson cycle, in contrast to the conventional Otto cycle. By cunningly mixing electric power and petrol power as the driver's demands change, the Prius gets by with a smaller engine than is normal in a car of its weight, and converts petrol to work more efficiently than a conventional petrol engine.
- 143 In der Praxis scheinen Hybridtechnologien Einsparungen von 20% oder 30% zu erzielen – Hybrid technologies give fuel savings of 20% or 30%. For example, from Hitachi's research report describing hybrid trains (Kaneko et al., 2004): highefficiency power generation and regenerative braking are "expected to give fuel savings of approximately 20% compared with conventional diesel-powered trains."
- 144 Tatsache, dass nur 8,3 % der Pendler mehr als 30 km zu ihren Arbeitsplätzen fahren 127 Only 8.3% of commuters travel over 30 km to their workplace. Source: Eddington (2006). The dependence of the range of an electric car on the size of its battery is discussed in Chapter A (p261).
- 144 Kennzahlen der Performance für Unmengen von Elektroautos – Lots of electric vehicles. They are all listed below, in no particular order. Performance figures are mainly from the manufacturers. As we saw on p127, real-life performance doesn't always match manufacturers' claims.

Th!nk Electric cars from Norway. The five-door Th!nk Ox has a range of 200 km. Its batteries weigh 350 kg, and the car weighs 1500 kg in total. Its energy consumption is approximately **20 kWh per 100 km**. www.think.no Electric Smart Car "The electric version is powered by a 40 bhp motor, can go up to 70 miles, and has a top speed of 70mph. Recharging is done through a standard electrical power point and costs about £1.20, producing the equivalent of 60 g/km of carbon dioxide emissions at the power station. [cf. the equivalent petrol-powered Smart: 116 g/km.] A full recharge takes about eight hours, but the battery can be topped up from 80%-drained to 80%-charged in about three-and-a-half hours." [www.whatcar.com/newsarticle.aspx?NA=226488]



Fig.20.37: Th!nk Ox. Foto von www.think.no

Berlingo Electrique 500E, an urban delivery van (figure 20.20), has 27 nicad batteries and a 28 kW motor. It can transport a payload of 500 kg. Top speed: 100 km/h; range: 100 km. **25 kWh per 100 km**. (Estimate kindly supplied by a Berlingo owner.) [4wm2w4]



Fig.20.38: Der i MiEV von Mitsubishi Motors Corp. Er hat einen 47 kW Motor, wiegt 1080 kg und läuft 130 km/h Spitze.

i MiEV This electric car is projected to have a range of 160 km with a 16 kWh battery pack. That's **10 kWh per 100 km** – better than the G-Wiz – and whereas it's hard to fit two adult Europeans in a G-Wiz, the Mitsubishi prototype has four doors and four full-size seats (figure 20.38). [658ode]



Fig.20.39: Lightning: **11 kWh pro 100 km**. Foto von www.lightningcarcompany.co.uk

EV1 The two-seater General Motors EV1 had a range of 120 to 240 km per charge, with nickel-metal hydride batteries holding 26.4 kWh. That's an energy consumption of between **11 and 22 kWh per 100 km**.

Lightning (figure 20.39) – has four 120 kW brushless motors, one on each wheel, regenerative braking, and fast-charging Nanosafe lithium titanate batteries. A capacity of 36 kWh gives a range of 200miles (320 km). That's **11 kWh per 100 km**.



Fig.20.40: Der Aptera. **6 kWh auf 100km**. Foto von www.aptera.com

Aptera This fantastic slippery fish is a two-seater vehicle, said to have an energy cost of **6 kWh per 100 km**. It has a drag coefficient of 0.11 (figure 20.40). Electric and hybrid models are being developed.

Loremo Like the Aptera, the Loremo (figure 20.41) has a small frontal area and small drag coefficient (0.2) and it's going to be available in both fossil-fuel and electric versions. It has two adult seats



Fig.20.41: Der Loremo. **6 kWh auf 100 km**. Foto von evolution.loremo.com

and two rear-facing kiddie seats. The Loremo EV will have lithium ion batteries and is predicted to have an energy cost of **6 kWh per 100 km**, a top speed of 170 km/h, and a range of 153 km. It weighs 600 kg.

eBox The eBox has a lithium-ion battery with a capacity of 35 kWh and a weight of 280 kg; and a range of 140–180 miles. Its motor has a peak power of 120 kW and can produce a sustained power of 50 kW. Energy consumption: **12 kWh per 100 km**.

Ze-0 A five-seat, five-door car. Maximum speed: 50mph. Range: 50 miles. Weight, including batteries: 1350 kg. Lead acid batteries with capacity of 18 kWh. Motor: 15 kW. **22.4 kWh per 100 km**.

e500 An Italian Fiat-like car, with two doors and 4 seats. Maximum speed: 60mph. Range in city driving: 75 miles. Battery: lithium-ion polymer.

MyCar The MyCar is an Italian-designed two-seater. Maximum speed: 40mph. Maximum range: 60 miles. Lead-acid battery.

Mega City A two-seater car with a maximum continuous power of 4 kW and maximum speed of 40mph: **11.5 kWh per 100 km**. Weight unladen (including batteries) – 725 kg. The lead batteries have a capacity of 10 kWh.

Xebra Is claimed to have a 40 km range from a 4.75 kWh charge. **12 kWh per 100 km**. Maximum speed 65 km/h. Lead-acid batteries.

TREV The Two-Seater Renewable Energy Vehicle (TREV) is a prototype developed by the University of South Australia (figure 20.42). This three-wheeler has a range of 150 km, a top speed of 120 km/h, a mass of 300 kg, and lithium-ion polymer batteries weighing 45 kg. During a real 3000 km trip, the energy consumption was **6.2 kWh per 100 km**. **Venturi Fetish** Has a 28 kWh battery, weighing 248 kg. The car weighs 1000 kg. Range 160–250 km. That's **11–17 kWh per 100 km**. www.venturifetish.fr/fetish.html



Fig.20.42: Der TREV. **6 kWh pro 100 km**. Foto von www.unisa.edu.au

Toyota RAV4 EV This vehicle – an all-electric mini-SUV – was sold by Toyota between 1997 and 2003 (figure 20.43). The RAV4 EV has 24 12-volt 95Ah NiMH batteries capable of storing 27.4 kWh of energy; and a range of 130 to 190 km. So that's an energy consumption of **14–21 kWh per 100 km**. The RAV4 EV was popular with Jersey Police force.



Fig.20.43: Toyota RAV4 EV. Foto von Kenneth Adelman, www.solarwarrior.com

Phoenix SUT – a five-seat “sport utility truck” made in California – has a range of “up to 130 miles” from a 35 kWh lithium-ion battery pack. (That's **17 kWh per 100 km**.) The batteries can be recharged from a special outlet in 10 minutes. www.gizmag.com/go/7446/

Modec delivery vehicle Modec carries two tons a distance of 100 miles. Kerb weight 3000 kg. www.modec.co.uk

Smith Ampere Smaller delivery van, 24 kWh lithium ion batteries. Range “over 100 miles.” www.smithelectricvehicles.com

Electric minibus From www.smithelectricvehicles.com: 40 kWh lithium ion battery pack. 90 kW motor with regenerative brakes. Range “up to 100 miles.” 15 seats. Vehicle kerb weight 3026 kg. Payload 1224 kg. That’s a vehicle-performance of at best **25 kWh per 100 km**. If the vehicle is fully occupied, it could deliver transportation at an impressive cost of **2 kWh per 100 p-km**.

Electric coach The Thunder Sky bus has a range of 180 miles and a recharge time of three hours. www.thunder-sky.com

Electric scooters The Vectrix is a substantial scooter (figure 20.44). Its battery (nickel metal hydride) has a capacity of 3.7 kWh. It can be driven for up to 68 miles at 25 miles/h (40 km/h), on a two-hour charge from a standard electrical socket. That’s 110 km for 3 kWh, or **2.75 kWh per 100 km**. It has a maximum speed of 62mph (100 km/h). It weighs 210 kg and has a peak power of 20 kW. www.vectrix.com The “Oxygen Cargo” is a smaller scooter. It weighs 121 kg, has a 38 mile range, and takes 2–3 hours to charge. Peak power: 3.5 kW; maximum speed 28mph. It has two lithium-ion batteries and regenerative brakes. The range can be extended by adding extra batteries, which store about 1.2 kWh and weigh 15 kg each. Energy consumption: **4 kWh per 100 km**.



Fig.20.44: Vectrix: **2,75 kWh auf 100 km**. Foto von www.vectrix.com

146 Die Energiedichte von Pressluftspeichern ist nur um die 11-28 Wh/kg 129 the energy-density of compressed-air energy-stores is only about 11–28Wh per kg. The theoretical limit, assuming perfect isothermal compression: if 1m³ of ambient air is slowly compressed into a 5-litre container at 200 bar, the potential energy stored is 0.16 kWh in 1.2 kg of air. In practice, a 5-litre container appropriate for this sort of pressure weighs about 7.5 kg if made from steel or 2 kg using kevlar or carbon fibre, and the overall energy density achieved would be about 11–28Wh per kg. The theoretical energy density is the same, whatever the volume of the container.

146 Arnold Schwarzenegger, preist, wie er einen wasserstoffbetriebenen Hummer auffüllt 130 Arnold Schwarzenegger . . . filling up a hydrogen-powered Hummer. *Nature* **438**, 24 November 2005. I’m not saying that hydrogen will *never* be useful for transportation; but I would hope that such a distinguished journal as *Nature* would address the hydrogen bandwagon with some critical thought, not only euphoria. *Hydrogen and fuel cells are not the way to go. The decision by the Bush administration and the State of California to follow the hydrogen highway is the single worst decision of the past few years.* James Woolsey, Chairman of the Advisory Board of the US Clean Fuels Foundation, 27th November 2007. In September 2008, *The Economist* wrote “Almost nobody disputes that . . . eventually most cars will be powered by batteries alone.” On the other hand, to hear more from advocates of hydrogen-based transport, see the Rocky Mountain Institute’s pages about the “HyperCar” www.rmi.org/hypercar/.

146 CUTE Projekts (Clean Urban Transport for Europe) – In the Clean Urban Transport for Europe project the overall energy required to power the hydrogen buses was between 80% and 200% greater than that of the baseline diesel bus. Source: CUTE (2006); Binder et al. (2006).

- 146 **Das Tanken des Hydrogen 7**– Fuelling the hydrogen-powered car made by BMW requires three times more energy than an average car. Half of the boot of the BMW “Hydrogen 7” car is taken up by its 170-litre hydrogen tank, which holds 8 kg of hydrogen, giving a range of 200 km on hydrogen [news.bbc.co.uk/1/hi/business/6154212.stm]. The calorific value of hydrogen is 39 kWh per kg, and the best-practice energy cost of making hydrogen is 63 kWh per kg (made up of 52 kWh of natural gas and 11 kWh of electricity) (CUTE, 2006). So filling up the 8 kg tank has an energy cost of at least 508 kWh; and if that tank indeed delivers 200 km, then the energy cost is **254 kWh per 100 km**. *The Hydrogen 7 and its hydrogen-fuel-cell cousins are, in many ways, simply flashy distractions.* David Talbot, MIT Technology Review www.technologyreview.com/Energy/18301/
- 147 **das Honda Brennstoffzellen-Auto, der FCX Clarity**, Honda’s fuel-cell car, the FCX Clarity, weighs 1625 kg, stores 4.1 kg of hydrogen at a pressure of 345 bar, and is said to have a range of 280miles, consuming 57 miles of road per kg of hydrogen (91 km per kg) in a standard mix of driving conditions [czjjo], [5a3ryx]. Using the cost for creating hydrogen mentioned above, assuming natural gas is used as the main energy source, this car has a transport cost of **69 kWh per 100 km**. *Honda might be able to kid journalists into thinking that hydrogen cars are “zero emission” but unfortunately they can’t fool the climate.* Merrick Godhaven
- 149 **Eine Lithium-Ionen-Batterie besteht zu 3% aus Lithium** 132 A lithium-ion battery is 3% lithium. Source: Fisher et al. (2006).
- 149 **Lithiumspezialist R. Keith Evans** – Lithium specialist R. Keith Evans says “concerns regarding lithium availability . . . are unfounded.” – Evans (2008).
- 150 **die „Economy Twins“, zwei holländische Linienschiffe** 133 Two Dutch-built liners known as “The Economy Twins.” www.ssmaritime.com/rijndam-maasdam.htm.
- 150 **QE2**: www.qe2.org.uk.
- 151 **Das Transrapid Magnetschwebesystem** 134 Transrapid magnetic levitation train. www.transrapid.de.

21. Intelligente Heizungen

Im letzten Kapitel hatten wir gezeigt, dass die Elektrifizierung im Transport eine Reduktion des Energiebedarfs auf ein Fünftel des gegenwärtigen Levels ermöglicht; und dass öffentliche Verkehrsmittel und Radfahren 40 mal energieeffizienter sein können als Autofahren. Wie ist es nun mit dem Heizen? Welche Arten von Energieeinsparungen können hier die Technologie oder eine Änderung der Lebensgewohnheiten eröffnen?

Die zum Heizen eines Gebäudes erforderliche Leistung ist gegeben durch Multiplikation dreier Größen:

$$\text{Benötigte Leistung} = \frac{\text{mittlere Temperaturdifferenz} \times \text{Leckrate des Gebäudes}}{\text{Effizienz des Heizsystems}} .$$

Lassen Sie mich diese Formel (die im Anhang E detailliert beschrieben ist) mit einem Beispiel erklären. Mein Haus ist eine Doppelhaushälfte mit drei Schlafzimmern, erbaut etwa 1940 (Fig.21.1). Die **mittlere Temperaturdifferenz** zwischen drinnen und draußen hängt ab von der Stellung meines Thermostats und vom Wetter. Steht der Thermostat permanent auf 20°C, sei die mittlere Temperaturdifferenz 9°C. Die **Leckrate des Gebäudes** beschreibt, wie schnell Wärme durch die Wände, Fenster und Risse nach draußen fließt, als Folge des Temperaturunterschiedes. Die Leckrate wird häufig auch als Wärmeverlustkoeffizient des Gebäudes bezeichnet. Sie wird gemessen in kWh pro Tag pro Grad Celsius Temperaturdifferenz. In Anhang E berechne ich, dass 2006 die Leckrate meines Hauses 7,7 kWh/d/°C betrug. Das Produkt



Fig.21.1: Das Haus des Autors

mittlere Temperaturdifferenz x **Leckrate des Gebäudes** ist die Rate, mit der die Wärme auf Grund von Wärmeleitung und Luftaustausch aus dem Haus fließt. Liegt beispielsweise die Temperaturdifferenz bei 9°C, dann ist der Wärmeverlust gerade

$$9^{\circ}\text{C} \times 7,7 \text{ kWh/d/}^{\circ}\text{C} \approx 70 \text{ kWh/d.}$$

Um schließlich die benötigte Leistung zu berechnen, teilen wir diesen Wärmeverlust durch die Effizienz unseres Heizsystems. In meinem Haus hat der Gas-Brennwertkessel eine Effizienz von 90%, also gilt

$$\text{Benötigte Leistung} = \frac{9^{\circ}\text{C} \times 7,7 \text{ kWh/d/}^{\circ}\text{C}}{0,9} = 77 \text{ kWh/d} .$$

Dieser Wert ist höher als unsere Raumheizungs-Abschätzung aus Kapitel 7. Er ist höher aus zwei Gründen. Erstens: Diese Formel geht davon aus, dass all die benötigte Wärme vom Kessel geliefert wird, wogegen in der Praxis einiges an Abwärme aus anderen Quellen dazukommt, etwa von Bewohnern, von Elektrogeräten oder durch Sonneneinstrahlung; zweitens: In Kapitel 7 gingen wir davon aus, dass eine Person nur zwei Zimmer gleichzeitig auf 20°C hält, ein ganzes Haus warm zu halten benötigt natürlich mehr Energie.

OK, wie können wir den Heizenergieverbrauch reduzieren? Offensichtlich gibt es drei Angriffslinien.

1. Reduzieren Sie die **mittlere Temperaturdifferenz**. Das kann man durch Herunterdrehen des Thermostats erreichen (oder, wenn Sie Freunde ganz oben haben, durch Änderung des Wetters).
2. Reduzieren Sie die **Leckrate des Gebäudes**. Das macht man durch Verbesserung der Gebäudeisolierung – denken Sie an Dreifachverglasung, Winddichtigkeitsprüfung, Dachgeschossdämmung – oder noch radikaler, Abriss und Neubau mit optimaler Wärmedämmung; oder vielleicht durch Wohnen in einem Haus mit weniger Fläche pro Person (Die Leckrate ist allgemein um so größer, je größer die Wohnfläche ist, da mit der Wohnfläche auch die Fenster- und Wandflächen größer werden.)
3. Erhöhen Sie die **Effizienz der Heizung**. Sie glauben vielleicht, dass **90%** schwer zu übertreffen sein werden, doch in Wirklichkeit ist da noch einiges mehr drin.

Cooler Technologie: der Thermostat

Der Thermostat (zusammen mit einem warmen Wollpullover) ist kaum zu schlagen, wenn es um Technologien geht, die viel Gewinn für wenig Geld bringen. Sie drehen den Thermostat zurück, und Ihr Haus verbraucht weniger Energie. Magie! In England reduzieren Sie mit jedem Grad, das Sie ihren Thermostat zurückdrehen, den Energieverlust um 10%. Drehen Sie den Thermostat von 20° auf 15° zurück und sie haben Ihren Wärmeverlust nahezu halbiert. Dank der zusätzlichen Gewinne aus Abwärme ist die gesparte Heizenergie sogar noch höher als diese Verlustreduktion.

Doch leider hat diese bemerkenswerte Energiespar-Technologie Nebenwirkungen. Manche Menschen nennen dieses Zurückdrehen des Thermostats Einschränkung der Lebensqualität und sind gar nicht glücklich damit. Ich werde später noch einige Anmerkungen machen, wie man dieses Problem mit der Lebensqualität umgehen kann. Sehen wir in der Zwischenzeit, als ein Beweis dafür, dass „die wichtigste intelligente Komponente in einem Haus mit intelligenter Heizung der Bewohner“ ist, auf Fig.21.2. Sie zeigt eine Studie der Carbon Trust zum Wärmeverbrauch in 12 identischen modernen Häusern. Die Studie läßt uns die Familie in Haus 1 bestaunen, deren Wärmeverbrauch doppelt so hoch ist wie der von Mr. und Mrs. Woolly in Hausnummer 12. Doch sollten wir auch auf die Zahlen achten: Die Familie in Nr. 1 braucht 43 kWh pro Tag. Wenn Ihnen das viel erscheint, erinnern Sie sich – schätzte ich nicht gerade vor einem Moment noch den Verbrauch *meines* eigenen Hauses viel höher ab? In der Tat war mein Gasverbrauch von 1993 bis 2003 etwas höher als 43 kWh pro Tag (Fig.7.10, Seite 59), und ich dachte, ich wäre ein sparsamer Mensch! Das Problem ist das *Haus*. All die modernen Häuser der Carbon Trust Studie hatten Leckraten von **2,7 kWh/d/°C**, mein Haus hatte dagegen **7,7 kWh/d/°C**! Leute die in undichten Häusern leben...

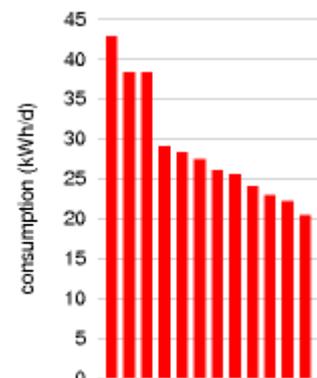


Fig.21.2: Tatsächlicher Wärmeverbrauch in 12 identischen Häusern mit identischen Heizsystemen. Alle Häuser haben eine Wohnfläche von 86 m² und nach Plan eine Leckrate von **2,7 kWh/d/°C**. Quelle: Carbo Trust (2007)

Der Kampf gegen die Leckrate

Was kann man mit alten, undichten Häusern anstellen, außer die Bulldozer zu bestellen? Fig.21.3 zeigt Abschätzungen der benötigten Energie für die Raumheizung in alten Einzel-, Doppel- und Reihenhäusern, wenn mehr und mehr Aufwand für Dämmung betrieben wird. Zusätzliche Dachstuhldämmung und Hohlwanddämmung verringert den

Wärmeverlust eines typischen alten Hauses um etwa 25%. Dank der Gewinne aus Abwärme führt das zu eine Heizenergie-Ersparnis von circa 40%.

Lassen Sie uns diese Ideen einem Test unterziehen.

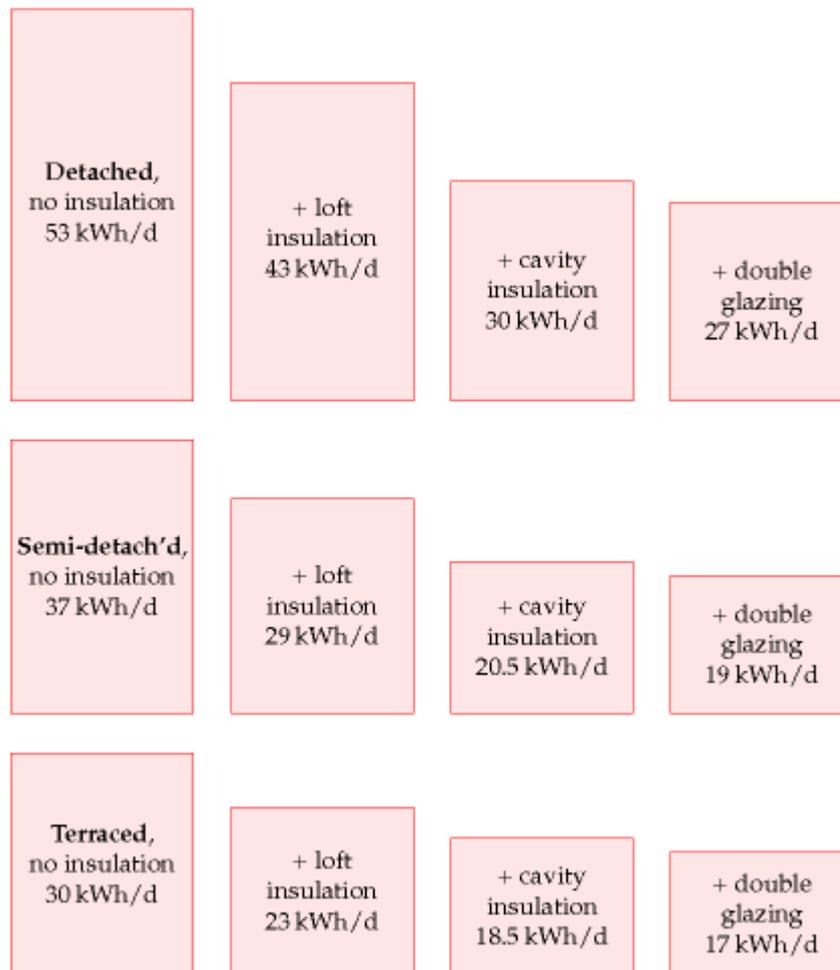


Fig.21.3: Abschätzungen für die Raumheizung in verschiedenen britischen Häusern. (oben: Einzelhaus, Mitte Doppelhaushälfte, unten Reihenhaus; v.l.n.r: ohne Isolierung, mit Dachstuhldämmung, zusätzlich mit Hohlwanddämmung, zusätzlich mit Isolierverglasung). Eden und Bending (1985).

Eine Fallstudie

Ich habe Sie bereits auf Seite 59 (Fig.7.10) mit meinem Haus bekannt gemacht. Lassen Sie uns die Geschichte wieder aufnehmen. Im Jahre 2004 ersetzte ich meinen alten Gaskessel durch einen Gas-Brennwertkessel. (Brennwertkessel benutzen einen Wärmetauscher, um Restwärme des Abgases auf die einströmende Luft zu übertragen.) Gleichzeitig demontierte ich meinen Warmwasserspeicher (warmes Wasser wird jetzt nur bei Bedarf geliefert), und ich installierte Thermostate an die Heizkörper in allen Schlafzimmern. Der neue Brennwertkessel hat auch eine neue Steuerung, die mich tageszeitabhängig verschiedene Solltemperaturen einstellen lässt. Mit diesen Veränderungen reduzierte ich meinen Durchschnittsverbrauch von 50 kWh/d auf 32 kWh/d.

Die Reduktion von 50 auf 32 kWh/d ist recht zufriedenstellend, doch ist sie nicht genug, um den persönlichen Fußabdruck auf unter eine Tonne CO₂ pro Jahr zu senken. 32 kWh/d Gas entsprechen über 2 Tonnen CO₂ pro Jahr. Im Jahr 2007 begann ich, mehr Augenmerk auf meine Energiemesser zu legen. Ich hatte die Hohlwanddämmung installiert (Fig.21.5) und meine Dachstuhlisolierung verbessert. Ich ersetzte meine einfachverglaste Hintertür durch eine doppelverglaste, und setzte eine zusätzliche Doppelglastür vor den Windfang im Eingangsbereich (Fig.21.6). Und das wichtigste: ich schenkte meinen Thermostateinstellungen mehr Aufmerksamkeit. Diese Aufmerksamkeit

fürte zu einer weiteren Halbierung meines Gasverbrauchs. Im letzten Jahr lag der bei 13 kWh/d!

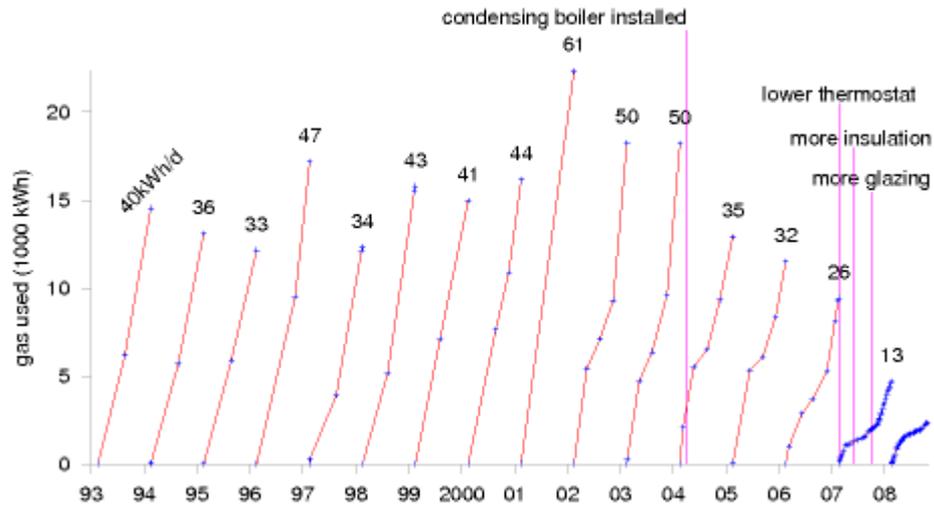


Fig.21.4: (oben) Mein häuslicher Gasverbrauch, jedes Jahr von 1993 bis 2007. Jede Linie zeigt die kumulative Verbrauchskurve übers Jahr in kWh. Die Zahl am Ende ist die mittlere Verbrauchsrate für dieses Jahr, in kWh pro Tag. Zählerablesungen sind durch die blauen Punkte gekennzeichnet. Offensichtlich verbrache ich um so weniger Gas, je öfter ich meinen Zähler ablese!



Fig.21.5: (links) Die Hohlwanddämmung geht voran

Fig.21.6: (rechts) Eine neue Eingangstür

Weil diese Fallstudie so ein Durcheinander von Gebäudesanierungen und Verhaltensänderungen ist, kann man schwer sagen, was davon das gewichtigste war. Nach meinen Berechnungen (in Anhang E) verbesserten meine Isolationsmaßnahmen die Leckrate um 25%, von $7,7 \text{ kWh/d/}^\circ\text{C}$ auf $5,8 \text{ kWh/d/}^\circ\text{C}$. Das ist immer noch viel höher als irgendein Neubau. Es ist frustrierend, wie schwierig die nachträgliche Dämmung eines Altbaus ist!

Daher ist mein Tipp geschicktes Thermostat-Management. Was ist eine vernünftige Thermostateinstellung, die man anstreben sollte? Heutzutage denken viele Menschen, 17°C ist unerträglich kalt. Dennoch lag die mittlere Winter-Temperatur in englischen Häusern 1970 bei 13°C ! Die menschliche Empfindung von Warm hängt davon ab, was man gerade tut und was man in der letzten Stunde oder so getan hat. Mein Rat ist, *nicht in Thermostateinstellungen zu denken*. Statt den Thermostat auf eine bestimmte Temperatur festzumachen, versuchen Sie ihn besser die meiste Zeit auf niedriger Temperatur (etwa 13 oder 15°C) zu lassen und nur dann zeitweise hochzudrehen, wenn Ihnen kalt ist. Das ist wie mit der Beleuchtung in einer Bücherei. Wenn Sie sich erlauben, die Frage zu stellen: „Was ist die richtige Beleuchtung in den Regalen?“ dann wird die Antwort zweifellos sein „Hell genug um die Buchtitel lesen zu können,“ und Sie werden helle Lichter die ganze Zeit angeschaltet haben. Doch die eingangs gestellte Frage impliziert, dass wir die Helligkeit konstant machen müssen; aber das muss gar nicht sein. Wir können Lichtschalter installieren, die der Leser betätigen kann, und die sich selbst

wieder ausschalten nach einer angemessenen Zeit. In gleicher Weise müssen auch Thermostate nicht zwingend die ganze Zeit bei 20 °C stehen.

Bevor wir das Thema Thermostateinstellungen verlassen, sollte ich noch die Klimaanlage erwähnen. Macht es Sie nicht verrückt, im Sommer in ein Gebäude zu gehen, dessen Klimaanlage auf 18 °C gestellt ist? Diese verrückten Gebäudeverwalter konfrontieren jeden mit Temperaturen, die sie im Winter als viel zu kalt bejammern würden! Die „Cool-Biz“ Richtlinien der japanischen Regierung schlagen vor, Klimatisierung auf 28 °C anzusetzen.

Bessere Häuser

Wenn Sie die Chance haben, ein neues Haus zu bauen, stehen Ihnen eine Menge Möglichkeiten offen, wie Sie sicherstellen können, dass sein Heizbedarf viel geringer ist als der eines alten Hauses. Fig.21.2 gab uns schon den Hinweis, dass moderne Häuser zu erheblich besseren Wärmedämm-Standards gebaut sind als die aus den 1940ern. Doch die Baustandards in England könnten noch besser sein, wie in Anhang E diskutiert. Die drei Grundideen für optimale Ergebnisse sind: (1) Planen Sie wirklich dicke Isolierschichten in Fußböden, Wänden und Dächern; (2) Stellen Sie sicher, dass das Gebäude komplett luftdicht ist und eine aktive Belüftung bekommt, die Frischluft hinein und verbrauchte, feuchte Luft hinausbläst, mit passiven Wärmetauschern, die dabei einen Großteil der Abluftwärme zurückgewinnen. (3) Planen Sie das Gebäude so, dass es so gut wie möglich den Sonnenschein ausnutzt.



Fig.21.7: Eggborough. Not a power station participating in smart heating.

Die Energiekosten des Heizens

Bisher haben wir uns auf Temperaturkontrolle und die Leckrate konzentriert. Jetzt wenden wir uns dem dritten Faktor in der Gleichung zu:

$$\text{Benötigte Leistung} = \frac{\text{mittlere Temperaturdifferenz} \times \text{Leckrate des Gebäudes}}{\text{Effizienz des Heizsystems}}$$

Wie effizient kann Wärme produziert werden? Können wir Wärme auf die billige Tour bekommen? Heutzutage ist Gebäudeheizung in England vorrangig über einen fossilen Brennstoff, das Erdgas, in Kesseln mit Wirkungsgraden von 78%-90%, realisiert. Können wir aus der fossilen Brennstoffabhängigkeit aussteigen und gleichzeitig die Gebäudeheizung effizienter machen?

Eine Technologie, die als Antwort auf das Heizungsproblem bereitsteht, ist die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), oder ihr Ableger, die dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung. Ich werde KWK hier vorstellen, doch bin ich zu der Überzeugung gelangt, dass sie eine schlechte Idee ist, weil wir eine bessere Technologie für das Heizen haben, nämlich die Wärmepumpe, die ich weiter unten beschreiben werde.

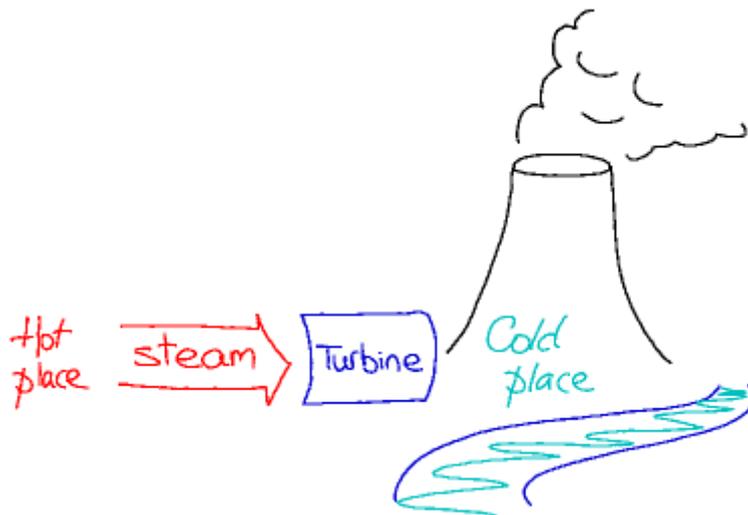


Fig.21.8: Wie ein Kraftwerk funktioniert. Es muss einen kalten Platz geben, an dem der Dampf kondensiert, damit die Turbine läuft. Der kalte Platz ist üblicherweise ein Kühlturm oder ein Fluss.

Kraft-Wärme-Kopplung

Die allgemeine Meinung zu konventionellen, großen zentralen Kraftwerken ist wohl, dass sie schrecklich ineffizient sind und Wärme wohl oder übel durch die Kamine und Kühltürme verblasen. Ein etwas differenzierterer Standpunkt erkennt, dass wir, um thermische Energie in Elektrizität verwandeln zu können, unausweichlich Wärme in einen kalten Platz abgeben müssen (Fig.21.8). So funktionieren Wärmekraftmaschinen. Es muss einen kalten Platz geben. Doch sicherlich, so wird argumentiert, könnten wir Gebäude als Abnehmer für die „verlorene“ Wärme benutzen anstatt Kühltürme oder Meerwasser? Dieses Prinzip nennt man „Kraft-Wärme-Kopplung“ (KWK), die dazu erforderlichen Anlagen Blockheizkraftwerke (BHKW), und es wurde in Europa seit Jahrzehnten angewandt – in vielen Städten ist ein großes Kraftwerk in ein Fernwärmesystem integriert. Befürworter der modernen Inkarnation dieses Prinzips schlagen vor, dass jeweils ein kleines Kraftwerk mit KWK in einem Gebäude (oder für eine kleine Gruppe benachbarter Häuser) errichtet wird, Wärme und Elektrizität für diese(s) Gebäude liefert und überschüssige Elektrizität ins Netz einspeist.

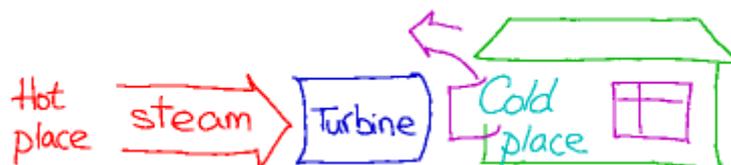


Fig.21.9: Kraft-Wärme-Kopplung. Fernwärme nimmt die Wärme auf, die andernfalls im Kühlturm verblasen würde.

Es ist sicherlich etwas Wahres dran, dass England ziemlich rückständig ist, was Fernwärme und KWK betrifft, doch die Diskussion darüber ist erschwert durch einen Mangel an Zahlen und durch zwei grundlegende Irrtümer. Erstens: Wenn verschiedene Arten des Brennstoffeinsatzes verglichen werden, wird der Begriff „Effizienz“ oft falsch verwendet, nämlich so als ob elektrische Energie gleichwertig mit Wärmeenergie sei. In Wahrheit ist aber Elektrizität wertvoller als Wärme. Zweitens: Es wird weithin angenommen, dass die „verlorene“ Wärme (Abwärme) in einem herkömmlichen Kraftwerk für einen nützlichen Zweck gesammelt werden könnte *ohne dass die Elektrizitätsproduktion des Kraftwerks dadurch verschlechtert würde*. Leider ist das nicht wahr, wie die Zahlen zeigen werden. Nutzbare Wärme an den Kunden zu liefern reduziert immer die Elektrizitätsproduktion zu einem gewissen Grad. Die wahren Nettogewinne der Kraft-Wärme-Kopplung sind oft viel geringer als es der Medienrummel glauben machen will.

Eine weitere Behinderung rationaler Diskussion über KWK ist der unlängst aufgekommene Mythos, dass die Dezentralisierung einer Technologie diese irgendwie

grüner mache. Herden kleiner Blockheizkraftwerke sind also etwas „Gutes“, wo hingegen große zentralisierte Heizkraftwerke „schlecht“ sind. Doch wenn Dezentralisierung eine wirklich gute Idee ist, sollte das auch in den Zahlen evident werden. Dezentralisierung sollte auf ihren eigenen beiden Beinen stehen können. Doch momentan zeigen die Zahlen eher, dass *zentralisierte* Stromerzeugung viele Vorzüge sowohl in ökonomischer als auch in energetischer Hinsicht hat. Nur in sehr großen Gebäuden hat die lokale Erzeugung Vorteile, und die liegen dann im Bereich von 10% oder 20%.

Die Regierung hat das Ziel, bis 2010 die KWK-Leistung auf 10GW zu erhöhen, doch denke ich, dass dieser Ausbau von gasbetriebenen KWK-Anlagen ein Fehler wäre. Solche KWK-Anlagen sind nicht grün: sie benutzen fossilen Brennstoff, und sie legen uns auf fortwährende Benutzung fossilen Brennstoffs fest. Unter der Annahme, dass Wärmepumpen die bessere Technologie sind, sollten wir, denke ich, die Gas-KWK-Anlagen überspringen und direkt die Wärmepumpen angehen.

Wärmepumpen

Wie die Fernwärme und die Kraft-Wärme-Kopplung, so sind auch Wärmepumpen schon weit in Europa verbreitet, doch noch sehr selten in England. Wärmepumpen sind umgedrehte Kühlschränke. Fühlen Sie Ihren Kühlschrank hinten an, er ist *warm*. Ein Kühlschrank bewegt die Wärme von einem Platz (seinem Inneren) zu einem anderen (seiner Rückenfläche). Zum Erwärmen eines Gebäudes wird der Kühlschrank daher umgedreht – sein *Inneres* kommt in den Garten, kühlt also den Garten herunter; seine Rückenfläche bleibt in der Küche, wärmt also das Haus auf. Was nicht offensichtlich ist in diesem Gedankenspiel: Es ist eine wirklich effiziente Methode, sein Haus aufzuwärmen. Für jedes Kilowatt, das dieser umgedrehte Kühlschrank aus dem Stromnetz zieht, kann er drei Kilowatt Wärme aus dem Garten pumpen, also gehen insgesamt vier Kilowatt Wärme in Ihr Haus. Wärmepumpen sind etwa viermal so effizient wie Elektroöfen. Wo die Effizienz eines Elektroofens 100% ist, ist die der Wärmepumpe 400%. Die Effizienz einer Wärmepumpe wird üblicherweise als *Leistungszahl* (Coefficient of Performance, CoP) bezeichnet. Ist die Effizienz 400%, dann ist die Leistungszahl 4.

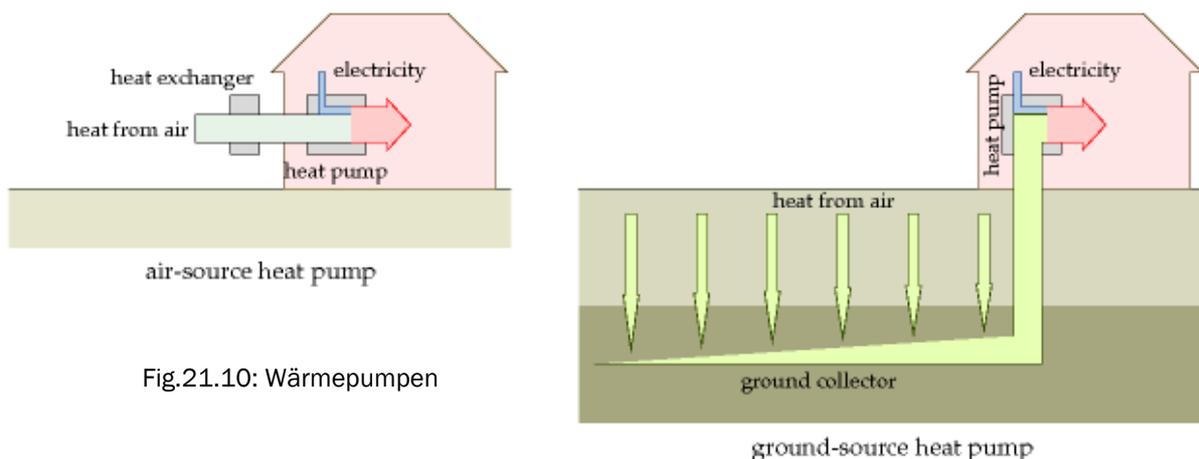


Fig.21.10: Wärmepumpen

Wärmepumpen können auf verschiedene Arten ausgestaltet werden (Fig.21.10). Eine Wärmepumpe kann die *Luft* in Ihrem Garten mit einem Wärmetauscher (typisch ein 1m hoher weißer Kasten, Fig.21.11) kühlen. In diesem Fall nennt man sie eine Luftwärmepumpe. Alternativ kann die Pumpe den *Erdboden* über große Schleifen unterirdischer Verrohrung (mehrere Dutzend Meter lang) kühlen; man nennt sie dann Erdwärmepumpe. Überdies kann Wärme aus Flüssen oder Seen gepumpt werden.

Manche Wärmepumpen können in beide Richtungen pumpen. Wenn eine Luftwärmepumpe umgekehrt läuft, benutzt sie Elektrizität, um die Luft *draußen* zu

erwärmen und die Luft *drinnen* zu kühlen. Das nennt man dann Klimaanlage. Viele Klimaanlage sind in der Tat Wärmepumpen, die genau so arbeiten. Auch Erdwärmepumpen können als Klimaanlage betrieben werden. Derselbe Apparat kann also Heizung im Winter und Kühlung im Sommer erzeugen.

Leute sagen manchmal, Erdwärmepumpen würden „geothermische Energie“ benutzen, doch das ist nicht die richtige Bezeichnung. Wie wir in Kapitel 16 gesehen haben, liefert geothermische Energie in den meisten Gegenden der Erde nur ein kleines Stückchen Energie pro Flächeneinheit (etwa 50 mW/m^2), Wärmepumpen haben nichts zu tun mit diesem kleinen Stückchen, und sie können zur Heizung und zur Kühlung verwendet werden. Wärmepumpen benutzen den Erdboden nur als einen Platz, aus dem sie Wärme heraussaugen, oder in den sie Wärme hineinpumpen. Wenn sie laufend Wärme absaugen, wird diese tatsächlich von der wärmenden Kraft der Sonne wieder aufgefüllt.



Fig.21.11: Das innere und das äußere Bauteil Luftwärmepumpe mit einer Leistungszahl von 4. Am inneren ist ein Kugelschreiber als Größenvergleich angebracht. Eine dieser Fujitsu-Maschinen kann $3,6 \text{ kW}$ Heizleistung mit $0,845 \text{ kW}$ elektrischer Leistung liefern. Sie kann auch umgekehrt laufen und liefert dann $2,6 \text{ kW}$ Kühlleistung mit $0,655 \text{ kW}$ Elektrizität.

Zwei Dinge stehen noch aus für dieses Kapitel. Wir müssen die Wärmepumpe mit der Kraft-Wärme-Kopplung vergleichen und wir müssen die Beschränkungen der Erdwärmepumpen diskutieren.

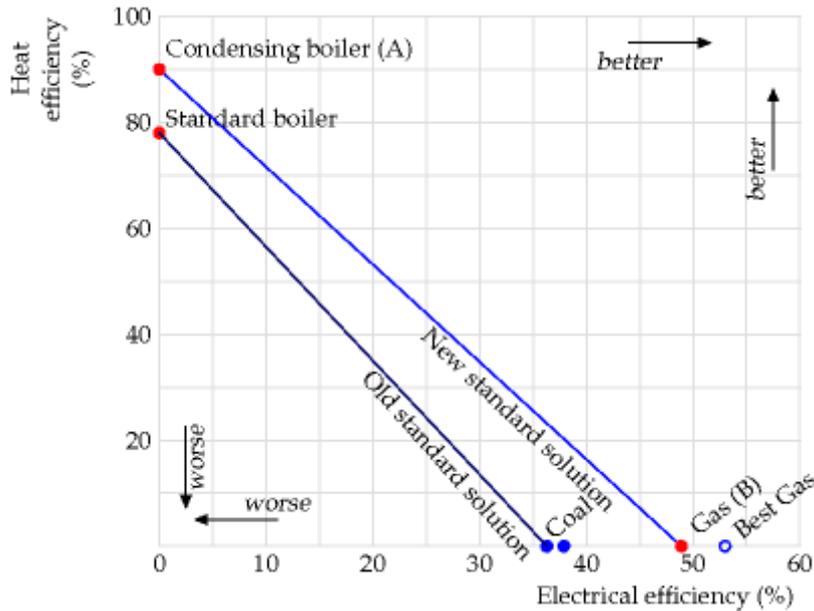
Wärmepumpen im Vergleich mit Kraft-Wärme-Kopplung

Ich hielt ursprünglich das Prinzip der KWK für ein Totschlagargument. „Offensichtlich sollten wir die Abwärme der Kraftwerke zur Gebäudeheizung nutzen anstatt sie durch die Kühltürme zu verblasen!“ Doch schaut man sorgfältig auf die Zahlen die die Performance einer KWK-Anlage beschreiben, kommt man zu dem Schluss, dass es bessere Möglichkeiten gibt, Elektrizität und Gebäudeheizung zur Verfügung zu stellen.

Ich werde in drei Stufen ein Diagramm erstellen. Das Diagramm zeigt, wie viel elektrische Energie oder Wärmeenergie aus chemischer Energie gewonnen werden kann. Die waagrechte Achse steht für die elektrischen Wirkungsgrad, die senkrechte für den Heiz-Wirkungsgrad.

Die Standardlösung ohne KWK

Im ersten Schritt zeichnen wir Standard-Kraftwerke und Heizungen ein, die reine Elektrizität oder reine Wärme liefern.

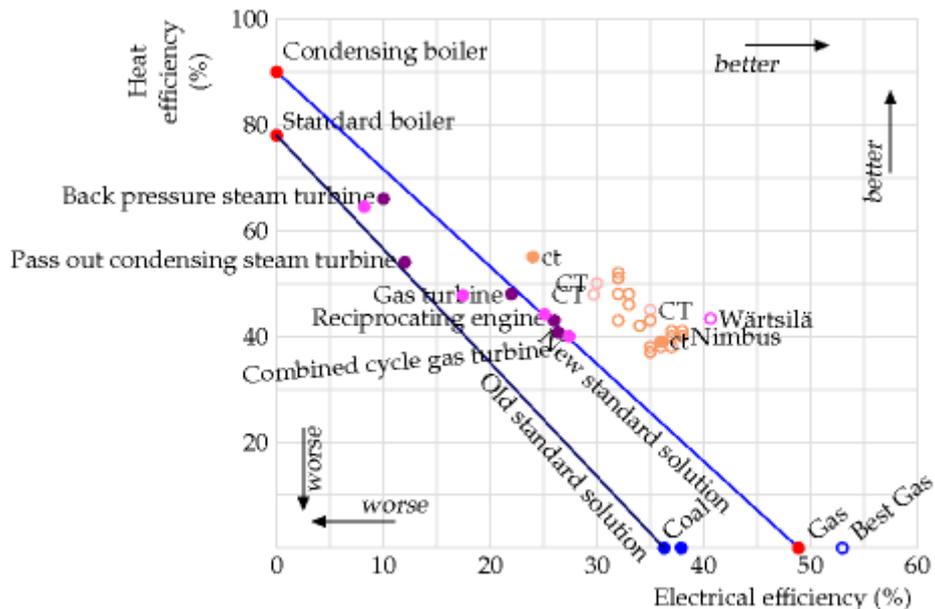


Brennwertkessel (der Punkt A oben links) sind 90% effizient, weil 10% der Wärme durch den Kamin entweicht. Englands Gas-Kraftwerke (der Punkt B rechts unten) sind derzeit 49% effizient bei der Umwandlung von Gas in Elektrizität. Wenn wir irgendein vorgegebenes Mischungsverhältnis von Strom und Wärme aus Erdgas benötigen, können wir das durch Verbrennen entsprechender Mengen von Gas in Gaskraftwerken oder in Heizkesseln liefern. Diese neue Standardlösung erzeugt dann elektrische Energie und Heizenergie zu den Wirkungsgraden, die durch die Strecke A-B gegeben sind, indem sie dafür Strom und Wärme in zwei verschiedenartigen Anlagen produziert.

Zum historischen Vergleich zeichne ich in das Diagramm zudem die alte Standard-Heizung (Gas-Heizkessel ohne Wärmerückgewinnung, Wirkungsgrad 79%) und die vor einigen Jahrzehnten noch übliche Kohleverstromung (elektrischer Wirkungsgrad 37% oder so) ein.

Kraft-Wärme-Kopplung

Als nächstes zeichnen wir KWK-Anlagen in das Diagramm ein. Sie erzeugen aus chemischer Energie gleichzeitig Strom und Wärme.



Jeder ausgefüllte Punkt steht für die tatsächliche Performance eines Typs von KWK-Anlagen, der in England in Betrieb ist. Die Kreise mit „CT“ stehen für die Performance idealisierter Systeme, zitiert aus „Carbon Trust“. Die Kreise bei „Nimbus“ stehen für Herstellerangaben. Die Punkte mit „ct“ bezeichnen zwei reale Systeme aus dem „Carbon Trust“ Papier (Freeman Hospital und Elizabeth House).

In diesem Diagramm sieht man insbesondere, dass die elektrische Effizienz der KWK-Anlagen signifikant unter den 49% des einfachen Nur-Strom-Kraftwerks liegt. Die Wärme ist also kein Gratis-Nebenprodukt. Erhöhen der Wärmeproduktion verschlechtert die Stromproduktion.

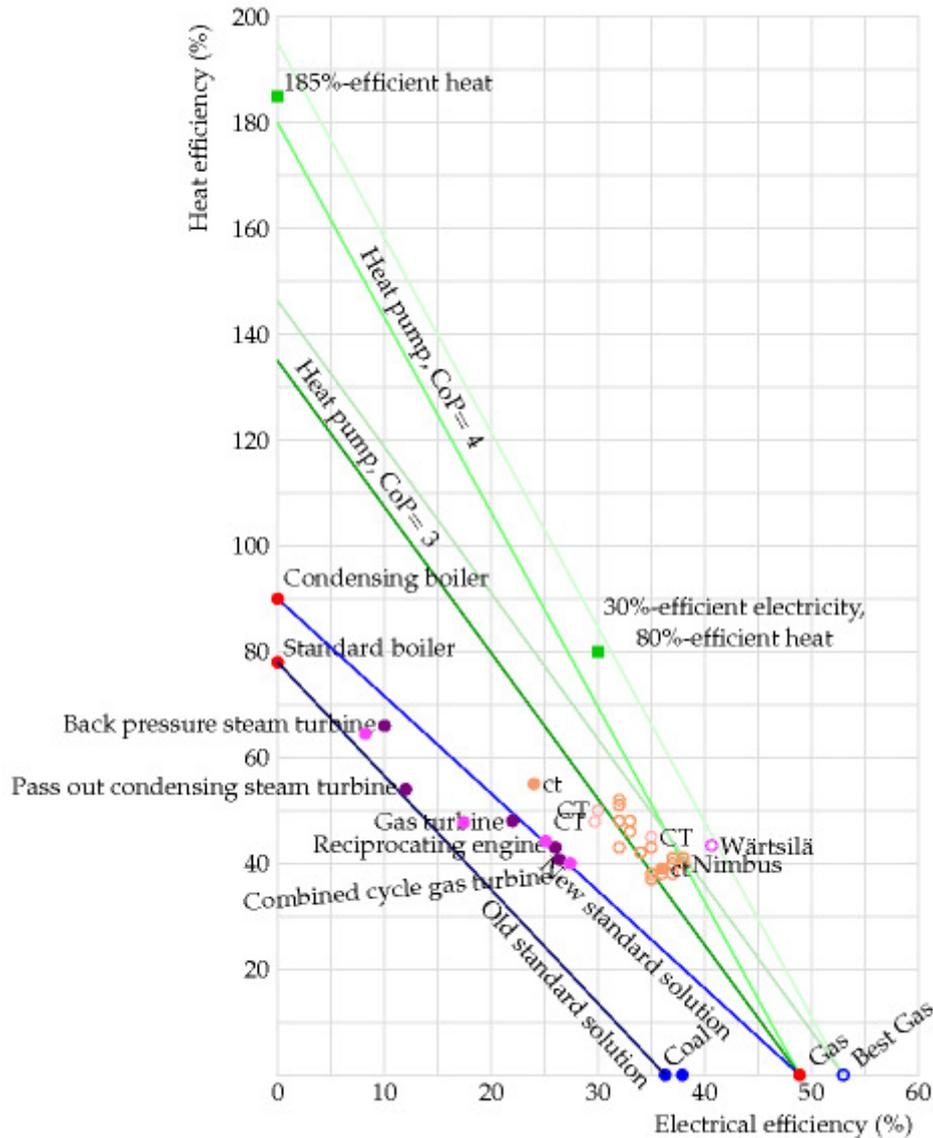
Es ist gängige Praxis, die beiden Zahlen (Effizienz der Stromproduktion und Effizienz der Wärmeproduktion) zusammenzuzählen in eine „Gesamteffizienz“ – beispielsweise Abgasgedruckt-Dampfturbinen mit 10% Elektrizität und 66% Wärme würden dann 76% effizient genannt, doch denke ich, das ist irreführend. Nach dieser Bemessungsgröße müsste der 90%-effiziente Brennwertkessel „besser und effizienter“ sein als jede KWK-Anlage! In der Tat ist aber elektrische Energie wertvoller als Wärme.

Die KWK-Punkte in unserem Diagramm liegen deutlich über dem „alten Standardweg“ (Kohleverstromung + Gasheizkessel) und viele, insbesondere die „CT“-Werte, liegen auch über dem „neuen Standardweg“ (Gaskraftwerk + Brennwertkessel). Doch müssen wir im Hinterkopf behalten, dass diese Effizienz mit einigen Einschränkungen erkaufte wird – eine KWK-Anlage liefert Wärme nur in ihrer Umgebung, wohingegen Brennwertkessel überall aufgestellt werden können, wo eine Gasversorgung besteht; und im Vergleich mit dem Standardweg sind KWK-Systeme nicht so flexibel in dem Mischungsverhältnis von Strom und Wärme, das sie liefern; KWK-Systeme arbeiten optimal nur für ein fest vorgegebenes Strom-zu-Wärme-Verhältnis; diese Inflexibilität führt zu zusätzlichen Ineffizienzen in Zeiten, in denen z.B. überschüssige Wärme erzeugt wird; in einem typischen Haushalt liegt ein Großteil des Elektrizitätsbedarfs in relativ schmalen Zeitfenstern, die kaum in Verbindung mit dem Wärmebedarf stehen. Ein weiteres Problem mit manchen kleinen KWK-Anlagen ist zudem, dass sie überschüssige elektrische Leistung nur schlecht ins Netz einspeisen können.

Zu guter Letzt fügen wir die Wärmepumpen hinzu, die Energie aus dem Stromnetz benutzen, um Umgebungswärme in die Gebäude zu pumpen.

Die steilen grünen Linien zeigen Kombinationen von Elektrizität und Wärme, die durch Wärmepumpen mit Leistungszahl 4 bzw. 3 möglich sind, unter der Annahme, dass die dafür zusätzlich erforderliche Elektrizität in durchschnittlichen oder in höchsteffizienten Gas-Kraftwerken erzeugt wird und dass 8% dieser zusätzlichen Leistung im Stromnetz auf dem Weg vom Kraftwerk zur Wärmepumpe verloren gehen. Die Effizienz des höchsteffizienten Gaskraftwerks ist unter angenommenen optimalen Bedingungen 53%. (Ich denke, dass auch Carbon Trust und Nimbus ähnliche Annahmen bei der Berechnung der hier benutzten Zahlen für KWK-Anlagen machten.) In Zukunft werden Wärmepumpen wahrscheinlich noch besser arbeiten als hier angegeben. Dank massiver gesetzlicher Förderung von Effizienzverbesserungen sind in Japan bereits Wärmepumpen verfügbar, die Leistungszahlen von 4,9 aufweisen.

Wie sie sehen, eröffnen Wärmepumpen ein System, das eine „Gesamteffizienz“ von über 100% aufweist. Wenn unser angenommenes höchsteffizientes Gaskraftwerk Elektrizität für Wärmepumpen liefert, kann damit ein Mix mit 30% elektrischem und 80% thermischem Wirkungsgrad aufgebaut werden, also eine „Gesamteffizienz“ von 110%. Kein denkbare KWK-System könnte jemals diese Performance erreichen.



Lassen Sie mich das näher ausführen. Wärmepumpen sind in ihrer Effizienz den Brennwertkesseln überlegen, selbst wenn sie mit Strom aus Erdgas-Kraftwerken betrieben werden. Wenn Sie viele Häuser mit Erdgas heizen wollen, können Sie diese mit Brennwertkesseln ausstatten, die „90% effizient“ sind, oder Sie können das selbe Gas in ein modernes Gaskraftwerk leiten, Strom damit erzeugen und mit diesem Strom Wärmepumpen in allen Gebäuden betreiben; die Effizienz dieser zweiten Lösung liegt zwischen 140% und 185%. Es ist nicht notwendig, große Löcher im Garten zu graben und Fußbodenheizungen zu installieren, um die Vorzüge der Wärmepumpe nutzen zu können; die besten Luftwärmepumpen (die nur einen kleinen externen Kasten benötigen, ähnlich wie der einer Klimaanlage) können mit einer Leistungszahl über 3 heißes Wasser für gewöhnliche Heizkörper liefern. Die Luftwärmepumpe aus Fig.21.11 liefert Warmluft direkt in ein Büro.

Ich folgere daraus, dass Kraft-Wärme-Kopplung, auch wenn es nach einer guten Idee klingt, wahrscheinlich nicht der beste Weg ist, mit Erdgas Strom und Heizwärme für Gebäude zu erzeugen, sofern auch Luft- oder Erdwärmepumpen in diesen Gebäuden installiert werden können. Die Wärmepumpen-Lösung hat weitere Vorteile, die nicht unerwähnt bleiben sollen: Wärmepumpen können in jedem Gebäude installiert werden,

das eine Stromversorgung hat; sie können von jeder beliebigen Stromquelle betrieben werden, daher laufen sie weiter, wenn das Erdgas ausgeht oder der Gaspreis durch die Decke steigt; und Wärmepumpen sind flexibel: Sie können leicht ein- und ausgeschaltet werden um dem Bedarf der Hausbewohner zu folgen.

Ich möchte betonen, dass dieser kritische Vergleich nicht bedeutet, dass KWK immer eine schlechte Idee sei. Was ich hier vergleiche sind Methoden zum Beheizen einfacher Häuser, die nur niederstufige Wärme benötigen. KWK kann auch höherstufige Wärme für industriellen Einsatz liefern (z.B. bei 200°C). Unter solchen industriellen Bedingungen werden Wärmepumpen sehr wahrscheinlich schlechter abschneiden, weil dann ihre Leistungszahlen niedriger sind.

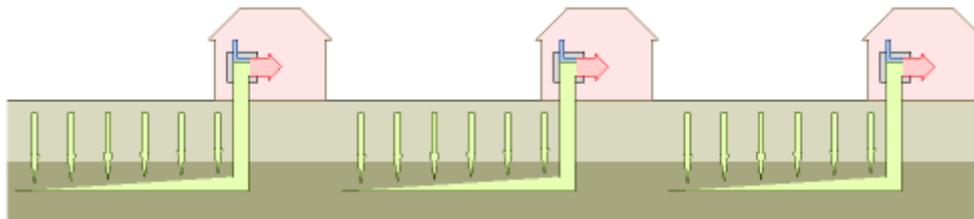


Fig.21.12: Wie eng zusammen kann man Erdwärmepumpen packen?

Schranken des Wachstums (bei Wärmepumpen)

Weil die Bodentemperatur in wenigen Metern Tiefe den jahreszeitlichen Schwankungen nur sehr träge folgt und immer nahe 11°C bleibt, eignet sich der Boden theoretisch besser für die Wärmeentnahme durch eine Wärmepumpe als die Luft, die mitten im Winter 10 oder 15°C kälter ist als der Boden. Wärmepumpen-Berater empfehlen daher Erdwärmepumpen, wo diese möglich sind. (Wärmepumpen arbeiten weniger effizient wenn große Temperaturunterschiede zwischen Innen und Außen bestehen.)

Doch ist der Erdboden keine unbegrenzte Quelle von Wärme. Die Wärme muss irgendwo herkommen, und Erdboden ist kein besonders guter Wärmeleiter. Wenn wir ihm zu viel Wärme entziehen, wird der Boden vereisen und der Vorteil der Erdwärmepumpe wird verringert.

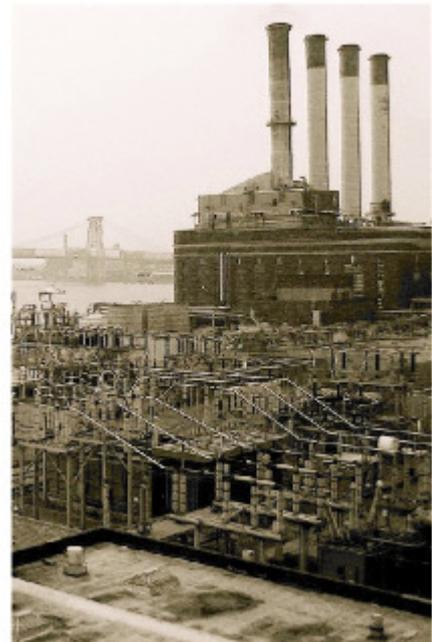
<u>Fläche pro Person (m²)</u>	
Bangalore	37
Manhattan	39
Paris	40
Chelsea	66
Tokio	72
Moskau	97
Taipei	104
The Hague	152
San Francisco	156
Singapur	156
Cambridge MA	164
Sydney	174
Portsmouth	213

Tabelle 21.13: Einige Stadtflächen pro Person

In England wird der Haupteinsatz von Wärmepumpen die Heizung von Gebäuden im Winter sein. Die letztendliche Quelle der dabei gepumpten Wärme ist die Sonne, die dem Boden entzogene Wärme durch direkte Einstrahlung und durch Wärmeleitung über die Luft wieder nachliefert. Die Rate, mit der Wärme dem Boden entzogen wird, muss zwei

Randbedingungen erfüllen: Sie darf keinen zu großen Temperaturabfall des Bodens über den Winter verursachen und die gesamte im Winter entzogene Wärme muss über den Sommer irgendwie wieder nachgeliefert werden können. Wenn ein Risiko besteht, dass der *natürliche* Wärmenachfluss im Sommer nicht ausreicht um die im Winter entzogene Wärme zu ersetzen, dann muss das Wiederauffüllen *aktiv* betrieben werden – etwa indem man das System im Sommer umgekehrt betreibt und Wärme in den Boden pumpt (und damit zusätzlich die Kühlwirkung einer Klimaanlage hat).

Lassen Sie uns diese Diskussion mit Zahlen füttern. Wie viel Erdboden braucht eine Erdwärmepumpe? Nehmen wir eine ziemlich hohe Bevölkerungsdichte in der Nachbarschaft an – sagen wir 6200 Personen pro km² (160 m² pro Person), die Dichte einer typischen englischen Innenstadt. Kann dann *jeder* eine Erdwärmepumpe betreiben, ohne aktives Wiederauffüllen im Sommer? Eine Berechnung in Anhang E gibt eine versuchsweise Antwort „Nein“: Wenn jeder in der Nachbarschaft 48 kWh/d pro Person (meine Abschätzung des winterlichen Heizbedarfs) aus dem Boden zieht, wird der Boden im Winter schließlich einfrieren. Um übermäßige Abkühlung des Bodens zu vermeiden, muss die Saugrate pro Person unter 12 kWh/d bleiben. Wenn wir auf Erdwärmepumpen umstellen, sollten wir nennenswertes Wärmenachfüllen im Sommer mit einplanen, um genug Wärme im Boden für den nächsten Winter zur Verfügung zu haben. Dieses Nachfüllen könnte zum Beispiel die Abwärme von Klimaanlage nutzen oder die Wärme aus solarthermischen Dachmodulen. (Sommerliche Solarwärme wird z.B. in der Drake Landing Solar Community in Kanada [www.dlsc.ca] für den darauffolgenden Winter im Boden gespeichert.) Alternativ sollten wir mit der Notwendigkeit rechnen, zusätzlich auch Luftwärmepumpen einzusetzen, und sollten dann in der Lage sein, mit Wärmepumpen all die benötigte Wärme zu erzeugen – so lange wir genug Elektrizität haben, um sie zu pumpen. In England fallen die Temperaturen nicht sehr weit unter den Gefrierpunkt, so dass Bedenken wegen schlechter Performance der Luftwärmepumpen im Winter, die in Nordamerika und Skandinavien durchaus berechtigt sein mögen, in England wohl nicht bestehen müssen.



Meine Schlussfolgerung: Können wir den Energieverbrauch fürs Heizen reduzieren? Ja. Können wir gleichzeitig fossile Brennstoffe abschaffen? Ja. Wir sollten all unsere Heizungen mit fossilen Brennstoffen ersetzen durch elektrische Wärmepumpen und dabei die tief-hängenden Früchte – Gebäudedämmung und Thermostat-Tricksereien – nicht vergessen; dann können wir die benötigte Energie auf 25% unseres jetzigen Levels reduzieren. Sogar wenn die benötigte zusätzliche Elektrizität aus Gaskraftwerken kommt, wäre das immer noch eine viel effizientere Art zu heizen als wir das derzeit tun, indem wir Gas einfach verbrennen. Wärmepumpen sind zukunftssicher, denn sie erlauben uns effiziente Gebäudeheizung mit Elektrizität aus jeder beliebigen Quelle.

Die Neinsager entgegnen, dass die Leistungszahlen von Luftwärmepumpen lausig seien, nur 2 oder 3. Doch deren Informationen sind veraltet. Wenn wir nur moderne Wärmepumpen kaufen, können wir viel besser sein. Die japanische Regierung legte zehnjährige gesetzliche Anreizprogramme für Effizienz auf, wodurch die Performance von Klimaanlage massiv verbessert wurde; dank dieses Anreizes gibt es nun Luftwärmepumpen mit Leistungszahlen von 4,9; diese Wärmepumpen können sowohl Warmwasser als auch Warmluft erzeugen.

Ein anderes Argument gegen Wärmepumpen ist „Oh, wir können den Leuten nicht effiziente Luftwärmepumpen erlauben, weil sie diese sonst im Sommer zur Klimatisierung missbrauchen!“ Bitte – ich hasse übertriebene Klimatisierung wie jeder andere, doch diese Wärmepumpen sind viermal effizienter als jede andere Heizmethode im Winter! Zeigen Sie mir eine bessere Alternative. Holzpellets? Sicher, ein paar Holzsammler können Holz verbrennen. Doch es gibt nicht genug Holz, wenn jeder das macht. Für Waldbewohner, da gibt es Holz. Für alle anderen, da gibt es Wärmepumpen.

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 160 Dachstuhldämmung und Hohlwanddämmung verringert den Wärmeverlust eines typischen alten Hauses um etwa 25%** 142 Loft and cavity insulation reduces heat loss in a typical old house by about a quarter. Eden und Bending (1985).
- 161 Dennoch lag die mittlere Winter-Temperatur in englischen Häusern 1970 bei 13°C** 143 The average internal temperature in British houses in 1970 was 13°C! Quelle: Dept. of Trade and Industry (2002a, para 3.11)
- 163 dass England ziemlich rückständig ist, was Fernwärme und KWK betrifft** 145 Britain is rather backward when it comes to district heating and combined heat and power. Die Abwärme britischer Kraftwerke könnte die Heizwärme des ganzen Landes liefern (Wood, 1985). In Dänemark lieferten Nah- und Fernwärmesysteme 1985 etwa 42% der Raumheizung, wobei die Wärme über 20 km oder mehr durch Druckdampfleitungen übertragen wurde. In Westdeutschland erhielten 1985 vier Millionen Gebäude Heizenergie aus Fernwärme, bei 7 kW pro Gebäude im Mittel. Zwei Drittel der gelieferten Wärme stammte aus Kraftwerken. In Vasteras, Schweden, wurden 1985 98% des Wärmebedarfs der Stadt aus Kraftwerken gespeist.
- 164 Wärmepumpen sind etwa viermal so effizient wie Elektroöfen** 147 Heat pumps are roughly four times as efficient as a standard electrical barfire. Siehe www.gshp.org.uk. Einige der in England verfügbaren Wärmepumpen haben bereits Leistungszahlen über 4,0 [yok2nw]. Es gibt staatliche Subventionen für Grundwasser-Wärmepumpen nur dann, wenn diese eine Leistungszahl über 4,4 aufweisen [2dtx8z]. Kommerzielle Erdwärmepumpen sind mit Leistungszahlen von 5,4 für Kühlung und 4,9 für Heizung verfügbar [2fd8ar].

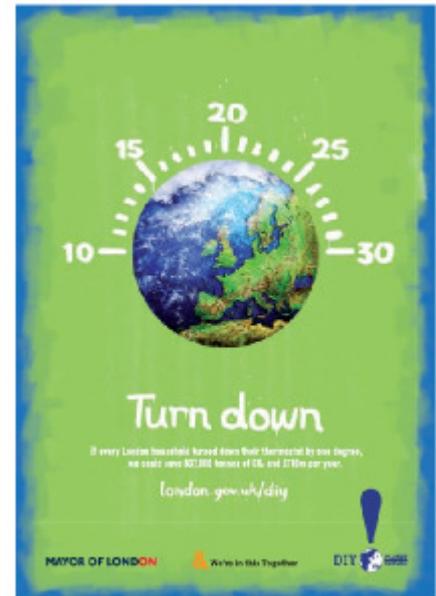


Fig.21.14: Anzeige der Kampagne „DIY Planet Repairs“ des Londoner Bürgermeisters von 2007. Der Text sagt: „Zurückdrehen! Wenn jeder Londoner Haushalt den Thermostat um ein Grad zurückdreht, könnten wir zusammen 837.000 Tonnen CO₂ und 110 Millionen Pfund jährlich sparen“ [london.gov.uk/diy] In Einsparungen pro Person sind das 0,12 t CO₂ pro Jahr pro Person. Das ist etwa 1% der Gesamtemission pro Kopf (11t), also ist das ein guter Rat. Weiter so, Ken!

171 Luftwärmepumpen mit Leistungszahlen von 4,9 153 Air-source heat pumps with a coefficient of performance of 4.9. Nach Veröffentlichungen von HPTCJ (2007), gibt es seit 2006 in Japan Wärmepumpen mit Leistungszahlen von 6,6. Die Effizienz von Wärmepumpen hat sich in Japan dank entsprechender Subventionsprogramme der Regierung innerhalb eines Jahrzehnts von 3 auf 6 verbessert. HPTCJ (2007) beschreibt eine Luft-zu-Wasser-Wärmepumpe namens Eco Cute mit einer Leistungszahl von 4,9. Die Eco Cute kam 2001 auf den Markt. www.ecosystem-japan.com.

Weiterführende Literatur zu Wärmepumpen: European Heat Pump Network

ehpn.fiz-karlsruhe.de/en/,

www.kensaengineering.com,

www.heatking.co.uk,

www.iceenergy.co.uk.

22. Effiziente Verwendung von Elektrizität

Können wir den elektrischen Energieverbrauch reduzieren? Ja, Elektrogeräte auszuschalten wenn sie nicht benutzt werden macht einen deutlichen Unterschied. Energie-effiziente Lampen sparen ebenfalls Strom.

Elektrogeräte haben wir schon in Kapitel 11 untersucht. Einige davon sind unbeachtlich, andere sind erstaunlich stromhungrig. Der Laserdrucker in meinem Büro schluckt – ohne dass er etwas arbeitet – 17 W, nahezu 0,5 kWh täglich! Ein Freund kaufte eine Lampe bei Ikea. Deren Trafoadapter (Fig.22.1) schluckt 10W (0,25 kWh/d), egal ob die Lampe aus oder an ist. Nehmen Sie ein paar Stereoanlagen, DVD-Player, Kabelmodems und drahtlose Geräte, und Sie werden sehen, dass die Hälfte Ihres elektrischen Verbrauchs eingespart werden kann.

Nach Angaben der International Energy Agency trägt der Standby-Strom mit etwa 8% zum häuslichen Strombedarf bei. In England und Frankreich liegt die mittlere Standby-Leistung bei etwa 0,75 kWh/d pro Haushalt. Dabei ist das Problem nicht der Standby-Betrieb selbst - es ist die billige Art seiner Implementation. Standby-Systeme mit weniger als 0,01 W sind perfekt machbar; doch Hersteller, die sich hier einen Cent in den Herstellungskosten sparen wollen, belasten so die Verbraucher mit jährlichen Kosten einiger Euros.



Fig.22.1: Ein schrecklicher Trafoadapter einer Ikea-Lampe, der Adapter verbraucht fast 10 W wenn die Lampe aus ist!

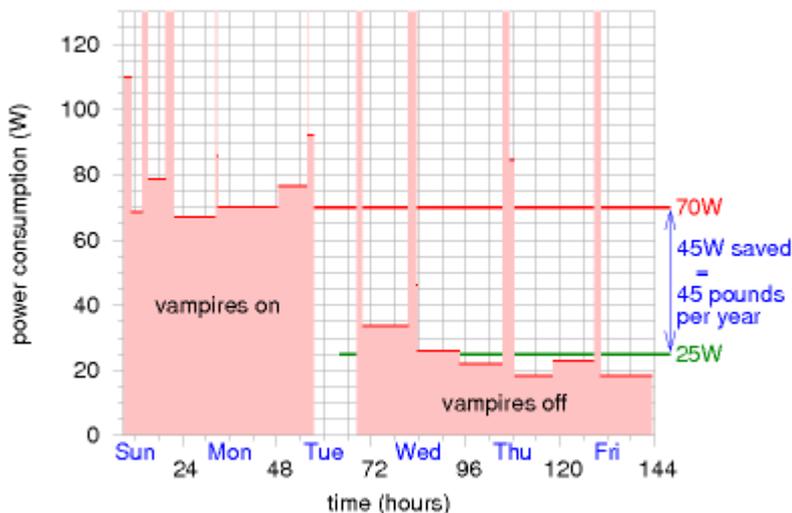


Fig.22.2: Effizienz im „Aus“. Messung der Stromersparnis durch Abschalten der Vampire in einer Woche, in der ich die meiste Zeit außer Haus zur Arbeit war, also Tag und Nacht kaum sinnvolle Stromnutzung stattfand, ausgenommen der Kühlschrank. Die kleinen hohen Spitzen wurden durch Mikrowelle, Toaster, Waschmaschine und Staubsauger verursacht. Am Dienstag schaltete ich fast alle meine Vampire aus: zwei Stereoanlagen, DVD-Player, Modem, WLAN-Router, AB. Die rote Linie zeigt den „Niemand-Zuhause“-Durchschnitt vor, die grüne Linie den nach der Veränderung. Der Abfall dazwischen ist 45 kW, oder 1,1 kWh pro Tag.

Das Vampirjäger-Experiment

Fig.22.2 zeigt ein Experiment, das ich zu Hause durchgeführt habe. Zuerst las ich zwei Tage lang den Stromverbrauch ab, wenn ich außer Haus war oder schlief. Dann schaltete ich alle Elektrogeräte aus, die ich normalerweise an ließ und las drei weitere Tage lang den Zähler ab. Das Ergebnis: Die eingesparte Leistung betrug 45 W, das sind 45€ im Jahr bei einem Strompreis von 11 Cent pro kWh.

Seit ich begann, regelmäßig auf meinen Stromzähler zu schauen, hat sich mein Gesamt-Stromverbrauch halbiert (Fig.22.3). Ich habe dieser Einsparung einen festen Platz eingeräumt, indem ich es mir zur Gewohnheit machte, jede Woche meinen Stromzähler abzulesen, um sicherzustellen, dass die stromsaugenden Vampire gebannt sind. Würde man diesen magischen Trick in allen Wohnhäusern und Arbeitsstätten

wiederholen, führte das offensichtlich zu massiven Einsparungen. Einige Mitarbeiter aus Cambridge haben sich daher zusammengetan und eine Website ins Leben gerufen, die das Ablesen des Stromzählers lustig und informativ gestaltet. Diese Site, ReadYourMeter.org, will den Leuten helfen, ähnliche Experimente durchzuführen, die Resultate zu interpretieren und ein wohliges Gefühl zu verspüren, wenn sie weniger verbrauchen.

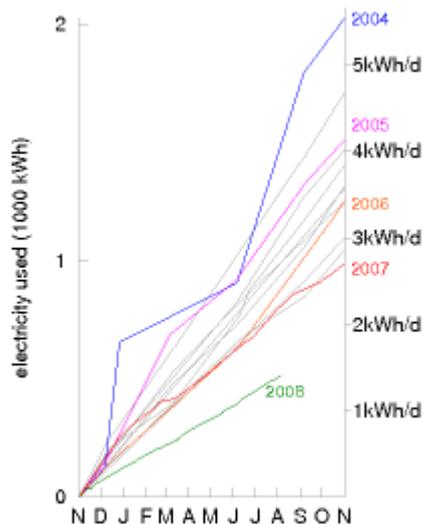


Fig.22.3: Mein kumulativer häuslicher Stromverbrauch, in kWh, jährlich von 1993 bis 2008. Die grauen Linien zeigen die Jahre 1993 bis 2003 (aus Übersichtlichkeitsgründen ohne einzelne Jahresangaben). Die farbigen Linien stehen für die Jahre 2004 ff. Die Skala rechts zeigt die mittlere Verbrauchsrate in kWh pro Tag. Das Vampir-Experiment fand am 2. Oktober 2007 statt. Die Kombination aus Vampir-Verbannung und Energiesparlampen-Installation reduzierte meinen Verbrauch von 4 kWh/d auf 2 kWh/d.

Ich hoffe, dass diese Art des intelligenten Zählereinsatzes einen spürbaren Beitrag leistet. Für die Zukunft meines vereinfachten Englands, 2050, ging ich jedoch davon aus, dass all diese Einsparungen durch das Wunder des Wachstums kompensiert werden. Wachstum ist eine Doktrin unserer Gesellschaft: Leute werden wohlhabender, deshalb spielen sie mit mehr Elektronik. Der Bedarf an immer-schneller-immer-besseren Computerspielen führt zwingend zu höherer Leistungsaufnahme der Rechner. Die Rechner aus dem letzten Jahrzehnt waren ja ganz nett, doch jetzt sind sie nutzlos und müssen durch schnellere, heißere Maschinen ersetzt werden.

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

173 trägt der Standby-Strom mit etwa 8% zum häuslichen Strombedarf bei: Quelle: International Energy Agency (2001). Für weiterführende Literatur zu Standby-Leistung siehe: www.iea.org/textbase/subjectqueries/standby.asp.

23. Nachhaltige fossile Brennstoffe?

It is an inescapable reality that fossil fuels will continue to be an important part of the energy mix for decades to come.

UK government spokesperson, April 2008

Our present happy progressive condition is a thing of limited duration.

William Stanley Jevons, 1865

Wir untersuchten in den letzten drei Kapiteln die Haupttechnologien und Lebensstil-Veränderungen zur Reduktion des Energieverbrauchs. Wir fanden heraus, dass wir den Verbrauch im Transport halbieren (und den Einsatz fossiler Brennstoffe vermeiden) können, indem wir auf Elektrofahrzeuge umsteigen. Wir fanden auch heraus, dass wir den Verbrauch beim Heizen sogar noch deutlicher reduzieren (und ebenfalls fossile Brennstoffe vermeiden) können, indem wir alle Häuser besser isolieren und elektrische Wärmepumpen statt fossiler Brennstoffe verwenden. „Yes, we can“, wir können den Verbrauch reduzieren. Doch diesen reduzierten Verbrauch mit Englands eigenen Erneuerbaren zu decken, ist eine sehr große Herausforderung (siehe Fig.18.7). Also ist es an der

Zeit, die nicht-erneuerbaren Optionen zur Energieversorgung zu diskutieren. Nehmen wir die bekannten Reserven an fossilen Brennstoffen, die überwiegend Kohle sind: 1600 Gt Kohle. Verteilen wir sie gleichmäßig auf sechs Milliarden Menschen und verbrennen sie „nachhaltig“. Doch was bedeutet „nachhaltig“ im Zusammenhang mit endlichen Ressourcen? Hier ist eine willkürliche Definition, die ich benutzen möchte: Die Nutzungsrate einer Ressource sei „nachhaltig“, wenn die Ressource so für **1000 Jahre** ausreicht. Eine Tonne Kohle liefert 8000 kWh chemische Energie, also ergeben 1600 Gt Kohle verteilt auf 6 Milliarden Menschen über 1000 Jahre eine Leistung von **6 kWh pro Tag pro Person**. Ein herkömmliches Kohlekraftwerk verwandelt diese chemische Energie in elektrische mit einem Wirkungsgrad von 37% - das bedeutet **2,2 kWh(el) pro Tag pro Person**. Wenn wir uns jedoch um das Klima sorgen, wollen wir vielleicht keine herkömmlichen Kraftwerke benutzen. Wir würden statt dessen wohl lieber auf „Clean Coal“ Technologie setzen, auch bekannt als CCS oder „Kohleverstromung mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung“ – eine zurzeit kaum benutzte Technologie, die den größten Teil des Kohlendioxids aus den Schornsteingasen einfängt und in ein Erdloch schaufelt. Kraftwerksemissionen solchermaßen zu reinigen erfordert signifikante Energiekosten – die Elektrizitätsausbeute wird um etwa 25% reduziert. Eine „nachhaltige“ Verwendung der bekannten Kohlereserven liefert bei CO₂-neutralem Einsatz daher nur **1,6 kWh(el) pro Tag pro Person**.

Wir können nun diese „nachhaltige“ Kohle-Verbrauchsrate – 1,6 Gt jährlich – mit der aktuellen globalen Kohle-Verbrauchsrate vergleichen: 6,3 Gt pro Jahr mit steigender Tendenz.

Wie sieht es aus, wenn man nur England betrachtet? Die britischen Kohlereserven werden auf 7 Gt geschätzt. OK, wenn wir diese 7 Gt auf 60 Millionen Menschen verteilen, erhalten wir 100 Tonnen pro Person. Wenn wir unsere 100-Jahres-Lösung anstreben,



Fig.23.1: Kohlelieferung für das Kingsnorth Kraftwerk (1940 MW Leistung) in 2005. Foto von Ian Boyle www.simplonpc.co.uk

Coal: 6 kWh/d

Fig.23.2: „Nachhaltige fossile Brennstoffe“

liefert das **2,5 kWh pro Tag pro Person**. In einem Kohlekraftwerk mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung liefert uns dieser „nachhaltige“ Ansatz für britische Kohle 0,7 kWh(e) pro Tag pro Person.

Unsere Schlussfolgerung ist daher klar:

Clean Coal ist nur eine Zwischenlösung:

Wenn wir die „Clean Coal“ Technologie weiterentwickeln um Treibhausgas-Emission zu verringern, müssen wir, während wir uns auf die Schulter klopfen, vorsichtig und korrekt Buch führen. Der Prozess der Kohleverbrennung setzt nicht nur im Kraftwerk Treibhausgase frei, sondern auch im Kohlebergwerk. Kohleabbau setzt meist Methan, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid frei, sowohl direkt aus den Kohleflözen wenn sie geöffnet werden, als auch im weiteren Verlauf aus den abgebauten Schiefen und Tonen; bei einem herkömmlichen Kohlekraftwerk tragen diese Bergwerksgase nur zu 2% zum gesamten CO₂-Fußabdruck bei, doch bei „Clean Coal“ Kraftwerken könnten diese Anteile nennenswert zu Buche schlagen. Ein ähnliches Buchhaltungsproblem gibt es beim Erdgas: wenn – sagen wir – 5% des Erdgases durch Undichtigkeiten auf dem Weg von der Quelle zum Kraftwerk entweichen, dann ist diese Methanbelastung (bezüglich des Treibhauseffektes) äquivalent zu einer 40%igen Erhöhung des Kohlendioxidausstoßes beim Kraftwerk.



Fig.23.3: Ein Caterpillar grast in alten Blättern. Foto von Peter Gunn

Neue Kohletechnologien

Die Firma directcarbon.com in Stanford entwickelt die *Direct Carbon Fuel Cell*, eine Brennstoffzelle, die Treibstoff und Luft direkt in Elektrizität und CO₂ umwandelt, ohne dabei Wasser- oder Dampfturbinen zu verwenden. Sie behaupten, diese Art der Kohleverstromung wäre doppelt so effizient wie herkömmliche Kraftwerkstechnik.

Wann ist das Ende des „business as usual“?

Der Ökonom Jevons stellte 1865 eine einfache Berechnung an. Damals diskutierten die Leute, wie lange wohl die britische Kohle noch reichen würde. Man beantwortete die Frage meist, indem man die geschätzten verbleibenden Kohlereserven durch die Verbrauchsrate teilte, und erhielt Antworten wie „1000 Jahre“. Doch Jevons konstatierte, der Verbrauch sei *nicht* konstant. Er hätte sich alle 20 Jahre verdoppelt und der „Fortschritt“ würde es mit sich bringen, dass er das auch weiterhin tue. Also führt „Kohlereserven durch Verbrauchsrate“ zu falschen Antworten.

Statt dessen extrapolierte Jevons den exponentiell ansteigenden Verbrauch und berechnete die Zeit, bis dessen kumulative Summe die geschätzten Reserven überstieg. Das ergab eine viel kürzere Zeitspanne. Jevons nahm nicht an, dass der Verbrauch tatsächlich mit der selben Wachstumsrate zunähme, er stellte nur fest, dass die Zunahme nicht aufrechterhalten werden kann. Seine Berechnung schätzten für die britische Leserschaft die unausweichlichen Grenzen des Wachstums ab und die kurze Zeit, bis diese Grenzen spürbar würden. Jevons sagte vorher, dass das Ende britischen „Fortschritts“ innerhalb von 100 Jahren ab 1865 kommen würde. Jevons behielt recht. Die britische Kohleproduktion erreichte ihren Höhepunkt 1910, und 1965 war England bereits keine Welt-Supermacht mehr.

Lassen Sie uns diese Berechnung für die gesamte Welt wiederholen. 2006 lag der Kohleverbrauch bei 6,3 Gt pro Jahr. Verglichen mit 1600 Gt übriger Reserven sagen Leute häufig „es sei für weitere **250 Jahre** Kohle vorhanden“. Wenn wir aber annehmen, „business as usual“ impliziere einen steigenden Verbrauch, erhalten wir eine andere Antwort. Wenn die Zuwachsrate des Kohleverbrauchs weiterhin bei 2% pro Jahr bleibt (dies ist ein vernünftiger Mittelwert aus den Daten von 1930 bis 2000), dann wäre die gesamte Kohle bis 2096 verbraucht. Liegt die Zuwachsrate bei 3,4% (der Durchschnitt der letzten zehn Jahre), dann käme das Ende des „business as usual“ vor 2072. Nicht **250 Jahre**, sondern **60!**

Würde Jevons heute leben, ich bin sicher er würde überzeugend vorhersagen, dass wir um 2050 oder 2060 am Ende unserer glücklichen fortschrittlichen Bedingungen angelangt sind, solange wir nicht einen neuen Kurs abseits vom „business as usual“ einschlagen.



Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 175 **eine willkürliche Definition von "nachhaltig" – 1000 Jahre** 157 *1000 years – my arbitrary definition of "sustainable."* Als Vorläufer einer solchen Wahl setzten Hansen et al. (2007) "mehr als 500 Jahre" gleich mit "für immer".
- 175 **Eine Tonne Kohle liefert 8000 kWh chemische Energie – 1 ton of coal equivalent = 29.3GJ = 8000 kWh of chemical energy.** Diese Zahl beinhaltet nicht die Energiekosten für Bergbau, Transport und Kohlenstoff-Sequestrierung.
- 175 **„Kohleverstromung mit CO₂-Abscheidung und –Speicherung“ – Carbon capture and storage (CCS).** Es gibt verschiedene CCS-Technologien. Das CO₂ aus den Abgasen auszufiltern ist eine; eine andere vergast die Kohle und separiert das CO₂ vor der Verbrennung. Siehe Metz et al. (2005). Der erste Prototyp eines Kohlekraftwerks mit CCS wurde am 9. September 2008 durch die schwedische Firma Vattenfall eröffnet [5kpk8].
- 175 **Die britischen Kohlereserven werden auf 7 Gt geschätzt - UK coal.** In December 2005, the reserves and resources at existing mines were estimated to be 350 million tons. In November 2005, potential opencast reserves were estimated to be 620 million tons; and the underground coal gasification potential was estimated to be at least 7 billion tons. [yebuk8]
- 176 **setzt auch im Kohlebergwerk ... Treibhausgase frei** 158 *Coal-mining tends to release greenhouse gases.* Zu Informationen über Methanfreisetzung beim Kohlebergbau siehe www.epa.gov/cmop/, Jackson and Kershaw (1996), Thakur et al. (1996). Weltweite Methan-Emissionen aus dem Kohlebergbau liegen bei etwa 400 Mt CO₂e pro Jahr. Das entspricht etwa 2% der Treibhausgas-Emissionen von der Kohleverbrennung. Der mittlere Methangehalt englischer Kohleflöze ist 4,7 m³

pro Tonne Kohle (Jackson and Kershaw, 1996); dieses Methan hat, wenn es in die Atmosphäre freigesetzt wird, ein globales Erwärmungspotenzial von etwa 5% dessen, was durch die Kohleverbrennung verursacht wird.

176 wenn 5% des Erdgases durch Undichtigkeiten entweichen 158 *If 5% of the natural gas leaks, it's equivalent to a 40% boost in carbon dioxide.* Verschmutzung durch zufällig entweichendes Methan hat einen etwa 8mal höheren Erwärmungseffekt als die bei der Methanverbrennung entstehende CO₂-Freisetzung; Auchmal, nicht die standard "23mal", denn "23mal" ist das Erwärmungs-Verhältnis gleicher Massen von Methan und CO₂. Jede Tonne CH₄ verwandelt sich bei Verbrennung in 2,75 Tonnen CO₂; entweicht es, ist es äquivalent zu 23 Tonnen CO₂. Und 23/2,75 ist 8,4.

Weiterführende Literatur: World Energy Council [yhxf8b]

Weiterführende Literatur über Untertage-Kohlevergasung: [e2m9n]

24. Kernkraft?

We made the mistake of lumping nuclear energy in with nuclear weapons, as if all things nuclear were evil. I think that's as big a mistake as if you lumped nuclear medicine in with nuclear weapons.

Patrick Moore, Ehemaliger Direktor von Greenpeace International

Kernkraft gibt es in zwei Geschmacksrichtungen. Kernspaltung ist diejenige, die wir kennen und in unseren Kraftwerken benutzen; Spaltung benutzt Uran als Brennstoff, ein besonders schweres Element. Kernfusion ist die andere, von der wir noch nicht wissen, wie wir sie in Kraftwerken implementieren könnten; Fusion würde leichte Elemente als Brennstoff benutzen, insbesondere Wasserstoff. Spaltungsreaktionen teilen einen schweren Kern in zwei mittelgroße, wodurch Energie frei wird. Fusionsreaktionen verschmelzen zwei leichte Kerne zu einem mittelgroßen, wodurch Energie frei wird.

Beide Formen der Kernkraft, Spaltung und Fusion, haben eine wichtige Eigenschaft: Die Nuklearenergie, die pro Atom verfügbar ist, ist nahezu eine Million mal größer als die chemische Energie in einem Atom typischer Treibstoffe. Das bedeutet, dass die Menge an Treibstoff und Abfall, mit der man bei einem Kernreaktor zu tun hat, bis zu einer Million mal kleiner sein kann als die Menge an Treibstoff und Abfall, die bei einem vergleichbaren konventionellen Kraftwerk anfällt.

Lassen Sie mich diese Idee personalisieren. Die Masse fossilen Brennstoffs, die der Durchschnittsbrite verbraucht, liegt bei etwa 16 kg pro Tag (4 kg Kohle, 4 kg Öl und 8 kg Gas). Das bedeutet, dass jeden Tag nur Ihre Wege eine Menge fossiler Treibstoffe, die dem Inhalt von ein-einhalb Bierkästen entspricht, aus einem Loch im Boden geholt, transportiert, verarbeitet und irgendwo verbrannt wird. Der fossile Brennstoffverbrauch des Durchschnittsbritten erzeugt 11 Tonnen Abfall an Kohlendioxid pro Jahr, das sind 30 kg pro Tag. Stellen Sie sich vor, jeder wäre verantwortlich für das Sammeln und Verwerten des eigenen Kohlendioxidmülls. 30 kg wäre ein praller Rucksack voll jeden Tag, entsprechend dem Inhalt von drei Bierkästen!

Im Vergleich dazu ist die erforderliche Menge an Natururan, die in einem gängigen Kernkraftwerk dieselbe Energiemenge wie diese 16 kg fossile Brennstoffe erzeugt, gerade mal 2 Gramm; und der entstehende Abfall wiegt ein Viertel Gramm. (Diese 2 g Uran sind übrigens nicht so klein wie ein Millionstel von 16 kg pro Tag, weil heutige Reaktoren weniger als 1% des Urans verbrennen.) Um 2 g Uran pro Tag zu liefern, müssen die Bergleute in den Uranminen etwa 200g Erz pro Tag fördern.



Fig.24.1: Elektrizität aus Kernspaltung in 2007 pro Kopf, in kWh pro Tag pro Person, in jedem Land mit Atomkraftwerken.

Die Materialströme, die in einen Atomreaktor hinein und aus ihm heraus fließen, sind klein gegen die Ströme fossiler Brennstoffe. „Small is beautiful“, Klein ist hübsch, doch nur weil der nukleare Abfallstrom klein ist, heißt das nicht, dass er kein Problem wäre; er ist nur ein „hübsch kleines“ Problem.

„Nachhaltige“ Energie aus Kernspaltung

Fig.24.1 zeigt, wie viel Elektrizität weltweit im Jahr 2007 durch Kernkraft erzeugt wurde, aufgesplittet nach Ländern.

Kann Kernkraft „nachhaltig“ sein? Vergessen wir für einen Moment die üblichen Fragen über Sicherheit und Entsorgung, und stellen wir die Kernfrage, ob die Menschheit über Generationen von der Kernspaltung leben kann. Wie groß sind die weltweiten Reserven von Uran oder anderem spaltbaren Material? Haben wir nur für ein paar Jahrzehnte einen Vorteil vom Uran, oder über Jahrtausende?

Um die „nachhaltige“ Leistung des Urans abzuschätzen, nehme ich das gesamte abbaubare Uran in der Erde und im Meerwasser, teile es fair unter den 6 Milliarden Menschen auf und frage: „Wie schnell dürfen wir es verbrauchen, wenn es 1000 Jahre reichen muss?“

Fast das gesamte abbaubare Uran liegt im Ozean, nicht in der Erde: Meerwasser enthält 3,3 mg Uran pro m³ Wasser, was sich auf 4,5 Milliarden Tonnen weltweit summiert. Ich nannte das Uran in den Ozeanen „abbaubar“, doch das ist etwas ungenau – das meiste Ozeanwasser ist ziemlich unerreichbar und der ozeanische Konvektionsgürtel rotiert nur etwa alle 100 Jahre einmal herum; und niemand hat bisher die Uranextraktion aus Meerwasser im industriellen Maßstab demonstriert. Daher mache ich separate Abschätzungen für zwei Fälle: Erstens wenn man nur Uranerz benutzt und zweitens wenn man das ozeanische Uran hinzunimmt.

	Millionen Tonnen Uran
Australien	1.14
Kasachstan	0.82
Kanada	0.44
USA	0.34
Südafrika	0.34
Namibia	0.28
Brasilien	0.28
Russische Föderation	0.17
Usbekistan	0.12
Welt insgesamt (konventionelle Reserven im Boden)	4.7
Phosphatlager	22
Meerwasser	4 500

Tabelle 24.2: Bekannte abbaubare Reserven von Uran. Oben die „hinreichend gesicherten“ und die „abgeleiteten“ Ressourcen, zu Kosten unter \$130 pro kg Uran, Stand 1.1.2005. Das sind die geschätzten Bestände in Gebieten, in denen die Erkundung bereits stattfand. Außerdem liegen noch 1,3 Millionen Tonnen abgereichertes Uran in Lagerbeständen herum, als Nebenprodukt früherer Uran-Aktivitäten.

Das Uranerz im Boden, das mit einem Aufwand von unter 130\$ pro kg abbaubar ist, ist nur etwa ein Tausendstel davon. Wenn die Preise über 130\$ pro kg steigen, werden Phosphatlager wirtschaftlich, die Uran in kleinen Konzentrationen enthalten. Der Abbau von Uran aus Phosphaten ist problemlos und wurde in Amerika und Belgien bis 1998 durchgeführt. Für meine Schätzung zum Uranerz addiere ich konventionelles Uran und die Phosphate, und erhalte die gesamten Ressourcen von 27 Millionen Tonnen Uran (Tabelle 24.2).

Wir müssen zwei Arten der Urannutzung im Reaktor unterscheiden: (a) die weithin angewandte Once-Through Methode²⁶ holt Energie hauptsächlich aus dem ^{235}U (das nur 0,7 % des natürlichen Uran ausmacht) und wirft das verbleibende ^{238}U weg; (b) Schnelle Brüter Reaktoren, die aufwändiger zu bauen sind, wandeln das ^{238}U in spaltbares Plutonium ^{239}Pu und erhalten so etwa 60 mal mehr Energie aus dem Uran.



Fig.24.3: (oben links) Arbeiter schieben Uranstäbe in den X-10 Grafitreaktor.

Fig.24.4: (oben rechts) Atomkraftwerk Three Mile Island



Fig.24.5: (links) Dounreay Nuclear Power Development Establishment, dessen Hauptaufgabe die Entwicklung der Schneller-Brüter-Reaktortechnologie war. Foto von John Mullen.

Once-Through Reaktoren, die Uran aus dem Boden verwenden

Ein Once-Through 1-Gigawatt-AKW braucht 162 Tonnen Uran pro Jahr. Die bekannten durch Bergbau förderbaren Ressourcen, verteilt auf 6 Milliarden Menschen, würden für 1000 Jahre reichen, wenn wir Atomstrom mit einer Rate von **0,55 kWh pro Tag pro Person** produzierten. Diese „nachhaltige“ Produktionsrate entspricht dem Output von gerade mal 136 AKWs, der Hälfte der heutigen Produktion. Es ist sehr wahrscheinlich, dass das Uranpotenzial dabei unterschätzt wird, denn solange es noch keine Uran-Knappheit gibt, besteht auch keine Veranlassung zu größeren Erkundungen und seit den 1980ern wurden kaum neue Erkundungen durchgeführt; daher wird vielleicht noch mehr Uran entdeckt werden. In der Tat schätzte ein 1980 veröffentlichter Artikel die Ressourcen an niederwertigerem Uran etwa 1000mal höher ab als unsere angenommenen 27 Millionen Tonnen.

Könnte unser derzeitiger Once-Through Umgang mit Bergbau-Uran nachhaltig sein? Das ist schwer zu sagen, weil die Unsicherheiten über zukünftige Erkundungen so hoch sind. Bei der heutigen Verbrauchsrate können Once-Through Reaktoren sicher noch Hunderte Jahre betrieben werden. Wenn wir aber Kernkraft weltweit auf das 40fache

²⁶ Once-Through, wörtlich „einmal durch“, steht hier für die klassische Kernreakorteknik, in der spaltbares Material (ggf. nach Anreicherung) einmal als Kernbrennstoff verwendet und dann der Entsorgung zugeführt wird.

ausbauen wollen, um mit ihr fossile Brennstoffe abzulösen und weiteres Wachstum des Lebensstandards zu sichern, steht zu befürchten, dass die Once-Through Reaktortechnologie nicht „nachhaltig“ ist.

Schnelle Brüter Reaktoren, die Uran aus dem Boden verwenden

Uran kann 60mal effizienter in schnellen Brütern genutzt werden, die das gesamte Uran verbrennen – sowohl ^{238}U als auch ^{235}U (im Gegensatz zu den Once-Through Reaktoren, die fast nur ^{235}U verbrennen). Auch der verbrauchte Treibstoff, den Once-Through Reaktoren übriglassen, das abgereicherte Uran, könnte in Schnellen Brütern genutzt werden, daher muss Uran, das in Once-Through-Reaktoren schon einmal verwendet wurde, nicht Abfall sein. Würden wir all das Uran im Boden (plus die Reste an abgereichertem Uran) in 60mal effizienteren Schnellen Brütern verarbeiten, wäre das eine Leistung von **33 kWh pro Tag pro Person**. Die Einstellungen zum Schnellen Brüter reichen von „Das ist eine gefährliche fehlgeschlagene experimentelle Technologie, über die man gar nicht sprechen sollte“ bis „wir können und sollten sofort beginnen, Schnelle Brüter zu bauen“. Ich bin nicht kompetent, die Risiken der Schnellen Brüter zu bewerten und ich will nicht ethische Aussagen mit faktischen Aussagen vermischen. Mein Ziel ist lediglich, beim Verstehen der Zahlen zu helfen. Die einzige ethische Aussage, die ich hier festhalten will ist: „Wir sollten ein Konzept haben, das aufgeht“.²⁷

Once-Through, mit Uran aus den Ozeanen

Das Uran in den Meeren entspricht, wenn es komplett herausgezogen und in Once-Through Reaktoren verarbeitet werden würde, einer Gesamtenergie von

$$\frac{4,5 \text{ Milliarden Tonnen pro Planet}}{162 \text{ Tonnen Uran pro GW-Jahr}} = 28 \text{ Millionen GW-Jahre pro Planet.}$$

Wie schnell könnte man das Uran aus den Ozeanen extrahieren? Die Ozeane zirkulieren langsam: die Hälfte des Wassers ist im Pazifischen Ozean, und das Wasser aus den pazifischen Tiefen zirkuliert in der großen ozeanischen Konvektion nur etwa alle 1600 Jahre an die Oberfläche. Nehmen wir an, dass 10% des Urans innerhalb einer solchen 1600-Jahres-Periode extrahiert werden könnten. Das wäre eine Extraktionsrate von 280.000 Tonnen pro Jahr. In Once-Through Reaktoren lieferte das eine Leistung von

$$2,8 \text{ Millionen GW-Jahre} / 1600 \text{ Jahre} = 1750 \text{ GW,}$$

was, aufgeteilt auf 6 Milliarden Menschen, **7 kWh pro Tag pro Person** entspricht (Gegenwärtig gibt es weltweit 369GW AKW-Leistung, also entspricht diese Zahl einer Vervierfachung des heutigen Levels). Ich folgere also, dass Uranextraktion aus den Ozeanen die Once-Through-Reaktoren zu einer „nachhaltigen“ Option machen würde – unter der Annahme, dass diese Reaktoren die Energiekosten des Extraktionsprozesses abdecken können.

Schnelle Brüter, die Uran aus den Ozeanen benutzen

Weil „Schnelle Brüter“-Reaktoren 60mal effizienter sind, könnte dieselbe Extraktion von ozeanischem Uran **420 kWh pro Tag pro Person** liefern. Zu guter Letzt ein nachhaltiges Szenario, das den heutigen Verbrauch übertrifft! – doch nur mit Hilfe zweier Technologien, die eine kaum entwickelt, die andere aus der Mode: Extraktion ozeanischen Urans, und Schnelle Brüter.

²⁷ „aufgehen“, engl. to add up, bedeutet hier wie im folgenden, dass etwas Sinn macht, vernünftig und konsistent, in sich stimmig, widerspruchsfrei ist.

Uran aus Flüssen

Der Urangehalt der Ozeane wird noch von dem der Flüsse übertroffen, die Uran mit einer Rate von 32.000 Tonnen pro Jahr mit sich führen. Wenn 10% dieses Zuflusses abgefangen werden, wäre das genügend Brennstoff für 20 GW Once-Through Reaktoren oder 1200 GW Schnelle Brüter. Die Schnellen Brüter würden dann **5 kWh pro Tag pro Person** liefern.

All diese Zahlen sind in Fig.24.6 zusammengefasst.

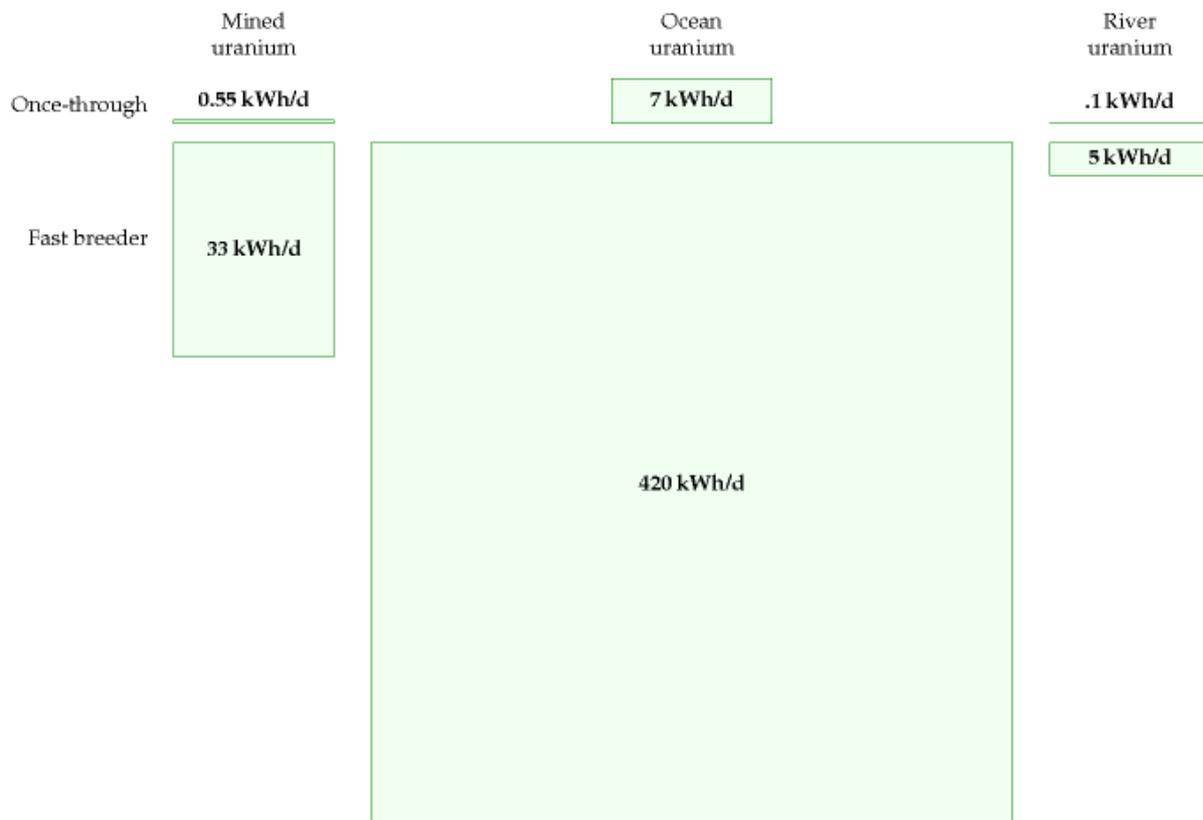


Fig.24.6: "Nachhaltige" Energie aus Uran. Zum Vergleich: die weltweite Atomenergieproduktion ist heute bei 1,2 kWh/d pro Person. Die Britische Atomenergieproduktion liegt bei 4 kWh/d pro Person, Tendenz fallend.

Wie sieht es mit den Kosten aus?

Wie in diesem Buch üblich, schenken die Haupt-Berechnungen der Ökonomie wenig Beachtung. Weil aber dieser potenzielle Beitrag von auf ozeanisches Uran gestützter Energieerzeugung einer der größten in unserer Liste „nachhaltiger“ Produktion ist, scheint es angemessen nachzufragen, ob dieses Uran-Energie-Szenario ökonomisch überhaupt plausibel ist.

Japanische Forscher fanden eine Methode, Uran für etwa \$100-300 pro Kilogramm aus Meerwasser zu extrahieren, die Kosten bei Uranerz liegen dagegen um die \$20/kg. Weil Uran so viel mehr Energie pro Tonne als traditionelle Brennstoffe enthält, hätte dieser 5fache oder 15fache Kostenzuwachs beim Uran wenig Auswirkung auf die Kosten des Atomstroms: Atomstromkosten werden dominiert durch die Kosten für Bau und Rückbau von Kernkraftwerken, nicht durch die Kosten des Brennstoffs. Auch ein Preis von \$300/kg würde auf den Strompreis nur mit etwa 0,3 Cent pro kWh durchschlagen. Der Aufwand für die Uranextraktion aus dem Meerwasser könnte sich verringern, wenn man die Extraktion mit einer anderen Nutzung des Meerwassers verbindet – beispielsweise der Kraftwerkskühlung.

Noch sind wir nicht zu Hause: Lässt sich die japanische Technologie hoch skalieren? Welche Energiekosten verursacht das Verarbeiten des Meerwassers? Im zitierten japanischen Experiment sammelten drei Käfige voll mit 350 kg Uran-anziehendem Adsorbiermaterial „mehr als 1 kg Yellow Cake in 240 Tagen“, dieser Wert entspricht 1,6 kg pro Jahr. Die Käfige hatten eine Querschnittsfläche von 48 m². Um ein Once-Through 1GW-AKW zu betreiben, brauchen wir 160.000 kg pro Jahr, eine Produktionsrate 100.000mal größer als das japanische Experiment. Wenn wir nur die japanische Technologie hoch skalieren, die das Uran passiv aus dem Meerwasser adsorbierte, würde unser 1GW-Kernkraftwerk Adsorber-Käfige mit einer Sammelfläche von 4,8 km² benötigen, die 350.000 Tonnen Adsorbiermaterial beinhalten – mehr als das Gewicht an Stahl im Reaktor selbst. Um diese große Zahlen in menschliche Größen zu bringen: Würde Uran, sagen wir, 22 kWh pro Tag pro Person liefern, dann könnten sich 1 Million Menschen einen Reaktor teilen, und jeder von ihnen benötigte 0,16 kg Uran pro Jahr. Also benötigt jeder Mensch ein Zehntel der im japanischen Experiment benutzten Apparate, mit einem Gewicht von 35 kg und einer Fläche von 5 m² pro Person. Der Vorschlag, dass solche Uran-Extraktionsanlagen gebaut werden, ist also in derselben Größenordnung wie Vorschläge der Art „jeder sollte 10 qm Solarmodule haben“ oder „jeder sollte ein Ein-Tonnen-Auto besitzen und einen zugehörigen Parkplatz“. Eine große Investition, sicher, doch nicht jenseits vernünftiger Skalen. Und das war die Berechnung für Once-Through Reaktoren. Für Schnelle Brüter wäre 60mal weniger Uran nötig, was für die Masse des Urankollektors dann 0,5 kg pro Person ergibt.

Thorium

Thorium ist ein radioaktives Element ähnlich dem Uran. Früher zur Herstellung von Glühstrümpfen verwendet, ist es etwa dreimal häufiger in der Erdkruste vorhanden als Uran. Bodenmaterial enthält gewöhnlich etwa 6 ppm (0,0006%) Thorium und einige Minerale enthalten 12% Thoriumoxid. Thorium kann in einfachen Reaktoren vollständig verbrannt werden (im Gegensatz zu Standard-Uranreaktoren, die nur etwa 1% natürlichen Urans verbrennen). Thorium wird in Kernreaktoren in Indien verwendet. Wenn Uranerz knapp wird, wird Thorium wahrscheinlich der dominante Kernbrennstoff werden.

Land	Reserven (in 1000 t)		Mined Thorium
Türkei	380	Tabelle 24.7: (links) Bekannte weltweite Thorium-Ressourcen in Monazit (ökonomisch abbaubar) Fig.24.8: (rechts) Thorium-Optionen	Conventional reactor
Australien	300		4 kWh/d
Indien	290		"Energy amplifier"
Norwegen	170		
USA	160		
Kanada	100		
Südafrika	35		
Brasilien	16		
Andere Länder	95		
Welt insgesamt	1 580		

Thoriumreaktoren liefern 3,6 Milliarden kWh Wärme pro Tonne Thorium, d.h. ein 1GW Reaktor braucht etwa 6 Tonnen Thorium im Jahr, wenn seine Generatoren 40% effizient sind. Die weltweiten Thoriumvorkommen werden auf 6 Millionen Tonnen geschätzt, viermal mehr als die bekannten Reserven in Tabelle 24.7. Wie schon bei Uran scheint es auch beim Thorium plausibel, dass die Ressourcen unterschätzt sind, weil Thoriumerkundung heutzutage als nicht interessant gilt. Wenn wir wie beim Uran annehmen, dass die Ressourcen 1000 Jahre reichen sollen und auf 6 Milliarden Menschen gleichmäßig verteilt werden, finden wir, dass „nachhaltig“ eine Leistung von **4 kWh/d pro Person** generiert werden kann.

Ein alternativer, sog. beschleunigergetriebener Kernreaktor für Thorium, das „Rubbiatron“²⁸, das vom Nobelpreisträger Carlo Rubbia und seinen Kollegen vorgestellt wurde, könnte nach deren Schätzung 6 Millionen Tonnen Thorium in 15.000 TWh Energie, oder 60 kWh/d pro Person über 1000 Jahre umwandeln. Mit einer 40% effizienten Umwandlung in Elektrizität würde das 24 kWh/d pro Person für 1000 Jahre liefern. Und auch der Abfall aus dem Rubbiatron wäre viel weniger radioaktiv. Es wird argumentiert, dass zu gegebener Zeit viele Male mehr Thorium ökonomisch abbaubar wäre als die gegenwärtige Schätzung von 6 Millionen Tonnen. Sind die Annahmen – 300 mal mehr – korrekt, würden das Thorium und das Rubbiatron 120 kWh/d pro Person für 60.000 Jahre garantieren.

Flächenverbrauch

Stellen wir uns vor, England beschließt ernst zu machen mit dem Ausstieg aus den fossilen Brennstoffen und baut viele neue Kernkraftwerke, auch wenn diese nicht „nachhaltig“ sein mögen. Wenn wir genug AKWs bauen, um eine signifikante CO₂-Reduktion im Transportwesen und beim Heizen möglich zu machen, passen diese AKWs alle in England hinein? Die Zahl, die wir wissen müssen ist die Leistung pro Fläche eines AKWs: etwa 1000 W/m² (Fig.24.10). Stellen wir uns vor, wir erzeugen 22 kWh pro Tag pro Person an Atomstrom – das entspricht etwa 55 GW (ungefähr die AKW-Leistung von Frankreich), die durch 55 AKWs geliefert werden, wobei jedes davon einen Quadratkilometer Fläche beansprucht. Das sind etwa 0,02% des Landes. Windfarmen, die dieselbe Leistung erzeugen, würde etwa 500mal mehr Fläche verbrauchen: 10% des Landes. Wären die AKWs paarweise entlang der Küste (Länge 3000 km bei 5 km Auflösung) aufgestellt, dann wäre es ein Paar je 100 km. Während die Gesamtfläche bescheiden ist, wäre der Anteil an Küstenlinie, die dadurch aufgefressen würde, immerhin 2% (2 Kilometer alle 100 km).



Fig.24.9: Die Kraftwerke bei Sizewell. Sizewell A im Vordergrund hatte eine Kapazität von 420 MW und wurde Ende 2006 geschlossen. Sizewell B, dahinter, hat eine Kapazität von 1,2 GW. Foto von William Connolley.

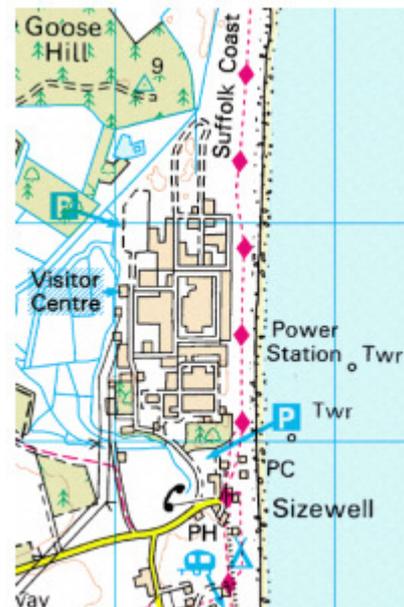


Fig.24.10: Sizewell beansprucht weniger als 1 km² Platz. Der Abstand des blauen Gitters ist 1 km. © Crown Copyright; Ordnance Survey

²⁸ Engl. „energy amplifier“

Die Ökonomie des Rückbaus

Was kostet es, ein AKW rückzubauen? Die Behörde für nukleare Stilllegungen hat ein Jahresbudget von 2 Milliarden € für die nächsten 25 Jahre. Die Atomindustrie verkaufte jedem in England 4 kWh/d seit etwa 25 Jahren, also sind die Kosten der Stilllegungsbehörde 2,3 Cent/kWh²⁹. Das ist eine beträchtliche Subvention – doch bei weitem nicht, das muss man sagen, so beträchtlich wie die Subvention für off-shore Wind (7 Cent/kWh).

Sicherheit

Die Sicherheit von Kernkraftwerken bleibt in England bedenklich. Die Wiederaufbereitungsanlage THORP in Sellafield, erbaut 1994 mit 1,8 Milliarden £, hatte ein wachsendes Leck wegen eines gebrochenen Rohres von August 2004 bis April 2005. Über diese acht Monate flossen insgesamt **85.000 Liter** uranhaltige Flüssigkeit in eine Wanne, die mit Sicherheitssystemen ausgestattet war, dafür ausgelegt, Lecks von **15 Liter** unverzüglich zu erkennen. Doch blieb das Leck unentdeckt, weil die Operateure die Tests nicht durchgeführt hatten, die sicherstellen sollten, dass die Sicherheitssysteme arbeiteten; und weil die Operateure ohnehin gewöhnlich Sicherheitsalarme ignorierten.

Das Sicherheitssystem kam mit Gürtel und Hosenträger. Unabhängig von den nicht funktionierenden Sicherheitsalarmen hätten Routinemessungen der Flüssigkeiten in der Wanne eine abnormale Konzentration von Uran spätestens einen Monat nach der Entstehung des Lecks feststellen müssen; doch die Operateure kümmerten sich oft nicht darum, diese Routinemessungen auch durchzuführen, weil sie sich zu beschäftigt fühlten; und als sie die Messungen vornahmen und eine abnorme Konzentration von Uran in der Wanne feststellten (am 28. August 2004, 26. November 2004 und 24. Februar 2005), hatte diese Feststellung keine Konsequenzen.

Bis April 2005 liefen **22 Tonnen** Uran aus, und doch hatte kein Leck-Detektionssystem ein Leck detektiert. Schlussendlich wurde das Leck durch die *Buchhaltung* entdeckt, als die Erbsenzähler feststellten, dass sie 10% weniger Uran herausbekamen als ihre Klienten nach eigenen Angaben hineingefüllt hatten! Gott sei Dank hatte diese Privatfirma ein Profitmotiv, hey? Die Kritik des *Chief Inspector of Nuclear Installations* war niederschmetternd: „Die Anlage wurde in einer Kultur des Wegsehens

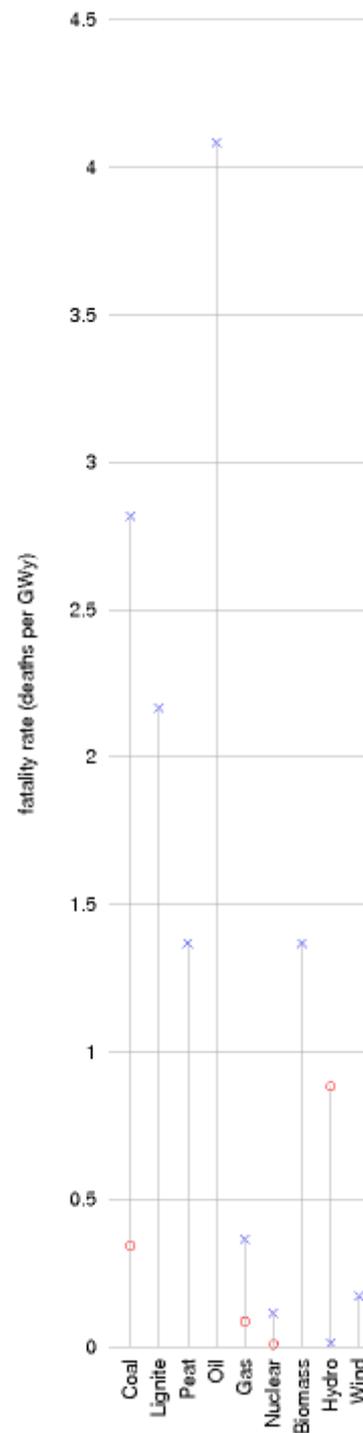


Fig.24.11: Opferraten der Elektrizitätserzeugung nach Technologien. X: Schätzungen der Europäischen Union durch das ExternE Projekt, O: Paul-Scherrer-Institut.

²⁹ Die Stilllegungsbehörde ist nicht nur für die zivilen, sondern auch für die militärischen Nuklearanlagen zuständig. Der Löwenanteil des Budgets fällt somit auf den Rückbau militärischer Anlagen, diese 2,3 Cent/kWh sind damit wohl deutlich überschätzt (David MacKay, Errata).

betrieben, die zuließ, dass Instrumente im Alarmmodus weiterbetrieben werden anstatt dem Alarm nachzugehen und den zugehörigen Fehler zu beheben.“

Wenn wir private Unternehmen neue Reaktoren bauen lassen, wie können wir dann sicherstellen, dass höhere Sicherheitsstandards angewandt werden? Ich weiß es nicht.

Auf der anderen Seite dürfen wir uns aber nicht zu sehr hineinreißen lassen in die Angst vor den Gefahren der Kernkraft. Kernkraft ist nicht unendlich gefährlich. Sie ist einfach gefährlich, wie auch Kohlebergwerke, Ölplattformen, Wasserkraftwerke und Windturbinen gefährlich sind. Auch wenn wir keine Garantie gegen zukünftige Nuklearunfälle haben, ist es, denke ich, der richtige Weg Kernkraft zu bewerten, wenn man sie objektiv mit anderen Energiequellen vergleicht.

Kohlekraftwerke setzen zum Beispiel die Bevölkerung radioaktiver Strahlung aus, weil Kohlenasche üblicherweise Uran enthält. Nach einem Artikel im *Science Journal* sind in Amerika Menschen in der Umgebung von Kohlekraftwerken höheren Strahlungsdosen ausgesetzt als in der Umgebung von Kernkraftwerken.

Wenn wir die öffentlichen Risiken der verschiedenen Energiequellen quantitativ bewerten wollen, brauchen wir eine neue Einheit. Ich will die Einheit „Todesopfer pro GWy (Gigawatt-Jahr)“ einführen. Lassen Sie mich erläutern, was es bedeutet, wenn eine Energiequelle eine Opferrate von 1 Toten pro GWy hat. Ein Gigawatt-Jahr ist die Energie, die ein 1GW-Kraftwerk produziert, wenn es ein Jahr durchgehend in Betrieb ist. Englands Elektrizitätsbedarf ist um die 45 GW oder, wenn Sie so wollen, 45 GWy pro Jahr. Erhalten wir also unsere Elektrizität von einer Quelle mit 1 Toten pro GWy, würde das bedeuten, dass das britische Elektrizitätsversorgungssystem 45 Leute pro Jahr tötet. Zum Vergleich: 3000 Menschen sterben jährlich auf Englands Straßen. So lange Sie also *nicht* eine Kampagne zur Abschaffung der Straßen führen, werden Sie zugeben, dass „1 Toter pro GWy“ eine Opferrate ist, die zwar traurig stimmt, mit der man aber zufrieden leben kann. Natürlich wären 0,1 Tote pro GWy vorzuziehen, doch es braucht nur einen kurzen Moment des Nachdenkens um sich klar zu machen, dass, leider, fossile Brennstoffe eine höhere Opferrate haben müssen als 0,1 Tote pro GWy – denken sie nur an die Unglücke an Bohrtürmen; Hubschrauberabstürze im Meer; Feuer an Pipelines; explodierende Raffinerien; Grubenunglücke im Kohlebergbau: es gibt in England Dutzende Unglücksfälle pro Jahr im Umfeld der Brennstoffkette.

Lassen Sie uns also die aktuellen Opferraten einer Reihe von Elektrizitätsquellen ansehen. Die Opferraten schwanken weit von Land zu Land. In China ist etwa die Opferrate im Kohlebergbau, pro Tonne geförderte Kohle, ungefähr 50mal höher als in



Fig.24.12: Kraftwerk Tschernobyl (oben), die verlassene Stadt Prypiat, die zum Support des Kraftwerks gegründet wurde (unten). Foto von Nik Stanbridge

den meisten anderen Nationen. Fig.24.11 zeigt Zahlen aus Studien des Paul-Scherrer-Instituts (PSI) und eines EU-Projektes namens ExternE, das umfassende Abschätzungen aller Auswirkungen der Energieproduktion durchführte. Nach den EU-Zahlen haben Stein- und Braunkohle und Öl die höchsten Opferraten, gefolgt von Torf und Biomasse, mit Opferraten über 1 pro GWy. Atom und Wind sind die besten, mit Opferraten unter 0,2 pro GWy. Wasserkraft ist nach EU-Angaben die sicherste, nach der PSI-Studie jedoch die schlechteste, weil letztere eine andere Auswahl von Ländern untersuchte.



Inhärente Sicherheit der Kernenergie

Angespornt von Bedenken wegen nuklearer Unfälle haben Ingenieure viele neue Reaktoren mit verbesserten Sicherheitsausrüstungen ersonnen. Das GT-MHR Kraftwerk beispielsweise soll inhärent sicher sein und hat darüber hinaus eine höhere Effizienz bei der Umwandlung von Wärme in Strom als konventionelle AKWs [gt-mhr.ga.com].

Sagen und Mythen

Zwei häufig angeführte Nachteile der Kernkraft sind die Baukosten und der Abfall. Lassen Sie uns einige Aspekte dazu beleuchten.

Der Bau eines AKW benötigt große Mengen Beton und Stahl, Materialien deren Herstellung eine große CO₂-Verschmutzung mit sich bringt.

Stahl und Beton eines 1GW AKW hat einen CO₂-Fußabdruck von etwa 300.000 t CO₂.

Verteilt man diese große Zahl über die 25-jährige Lebensdauer des Reaktors und rechnet die CO₂-Beiträge auf die Standardeinheiten (g CO₂ pro kWh(el)) um, ergibt das

$$\begin{aligned} \text{CO}_2\text{-Intensität aus d. Bauphase} &= \frac{300 \times 10^9 \text{ g}}{10^6 \text{ kW}(\text{el}) \times 220.000 \text{ h}} \\ &= 1,4 \text{ g/kWh}(\text{el}), \end{aligned}$$

was viel geringer ist, als der Wert des fossilen Brennstoffs von 400 g CO₂/kWh(el). Das IPCC schätzt ab, dass die *gesamte* CO₂-Intensität eines AKW (einschließlich Bau, Brennstoffverarbeitung und Rückbau) unter 40 g CO₂/kW(el) liegt (Sims et al. 2007).

Verstehen sie mich bitte nicht falsch: Ich versuche nicht, pro-Kernkraft zu sein. Ich bin nur pro-Arithmetik.

Ist der Abfall eines Reaktors nicht ein großes Problem?

Wie wir am Anfang des Kapitels bereits feststellten, ist das Volumen des anfallenden Mülls verhältnismäßig klein. Wo die Asche von zehn Kohlekraftwerken eine Masse von vier Millionen Tonnen pro Jahr ausmacht (mit einem Volumen von etwa 40 Litern pro Person pro Jahr), umfasst der nukleare Müll von Englands 10 AKWs nur ein Volumen von 0,84 Liter pro Person pro Jahr – stellen Sie sich das als eine Flasche Wein pro Person pro Jahr vor (Fig.24.13).

Das meiste davon ist nieder-radioaktiver Abfall. 7% sind mittel-radioaktiver Abfall und nur 3% davon – 25 ml pro Jahr – sind hochradioaktiver Abfall.

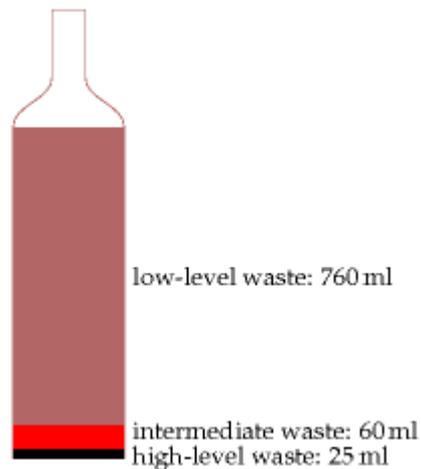


Fig.24.13: Britischer Atom-
müll, pro Person, pro Jahr, hat
ein Volumen von etwas mehr
als einer Weinflasche voll.

Der hochradioaktive Abfall ist ein wirklich übler Stoff. Es ist üblich, den hochradioaktiven Abfall die ersten 40 Jahre beim Reaktor zu belassen. Er wird in Wasserbecken gelagert und gekühlt. Nach 40 Jahren ist die Radioaktivität auf 1/1000 gefallen. Die Radioaktivität nimmt weiter ab; wenn wir den Abfall wiederaufarbeiten und Plutonium und Uran für die weitere Verwendung als Kernbrennstoff trennen, dann ist nach 1000 Jahren die Aktivität des hochradioaktiven Abfalls auf dem Level natürlichen Uranerzes. Endlager-Ingenieure brauchen also ein Konzept, den Abfall für die nächsten 1000 Jahre zu sichern.

Ist das ein schwieriges Problem? 1000 Jahre sind sicherlich eine lange Zeit verglichen mit der Lebenserwartung von Regierungen und Ländern! Doch ist das Volumen so klein, dass ich denke, nuklearer Abfall ist eines der kleineren Probleme, im Vergleich zu den anderen Arten von Müll, den wir zukünftigen Generationen hinterlassen. Bei 25 ml pro Jahr bringt jeder in seinem ganzen Leben weniger als 2 Liter hochradioaktiven Müll zusammen. Auch wenn wir das mit den 60 Millionen Menschen multiplizieren, scheint das Volumen des über die Lebenszeit aufgelaufenen hochradioaktiven Abfalls nicht unbeherrschbar groß: 105.000 Kubikmeter. Das ist dasselbe Volumen wie 35 olympische Schwimmbecken. Würde man diesen Müll in einer ein Meter dicken Schicht ausbringen, er würde gerade ein Zehntel eines Quadratkilometers belegen.

Es gibt bereits viele Plätze, die für Menschen gesperrt sind. Ich sollte nicht in Ihren Garten spazieren. Und auch Sie nicht in meinen. Keiner von uns ist in Balmoral³⁰ willkommen. „Betreten verboten“-Schilder gibt es überall. Downing Street, Heathrow Airport, Kasernen, aufgelassene Bergwerke – überall ist gesperrt. Ist es unvorstellbar einen weiteren 1-km²-Platz – vielleicht tief unter Tage – für die nächsten 1000 Jahre zu sperren?

Vergleichen Sie diese 25 ml hochradioaktiven Abfall pro Jahr pro Person mit anderen Formen traditionellen Abfalls, die wir gegenwärtig deponieren: Hausmüll – 517 kg pro Jahr pro Person; Gefahrmüll – 83 kg pro Jahr pro Person.

Manchmal wird möglicher neuer Atommüll mit dem Atommüll verglichen, mit dem wir bereits zu tun haben, dank unserer bestehenden alten Reaktoren. Hier sind die Zahlen für England. Der projektierte Umfang von „Abfall erhöhter Aktivität“ bis 2120, aus dem Rückbau bestehender AKWs, ist 478.000 m³. 2% dieses Volumens (etwa 10.000 m³) setzen sich zusammen aus dem hochradioaktiven Abfall (1.290 m³) und dem verbrauchten Kernbrennstoff (8.150 m³) und beinhalten 92% der Aktivität. Würden wir

³⁰ die Sommerresidenz der englischen Königsfamilie

zehn weitere Reaktoren bauen (10 GW), kämen aus diesen weitere 31.900 m³ an verbrauchtem Kernbrennstoff hinzu. Das ist dasselbe Volumen wie 10 Schwimmbecken.

Wenn wir Unmengen von Energie aus nuklearer Spaltung und Fusion erhalten, würde die dann nicht zur globalen Erwärmung beitragen, weil, all die zusätzliche Energie doch früher oder später als Wärme in die Umgebung gelangt?

Das ist eine lustige Frage. Und weil wir alles in diesem Buch sorgfältig in denselben Einheiten ausgedrückt haben, ist sie recht einfach zu beantworten. Lassen Sie mich zuerst die Schlüsselzahlen der globalen Energiebilanz aus Seite 21 rekapitulieren: Die mittlere solare Leistung, die von Atmosphäre, Land und Wasser aufgenommen wird, ist 238 W/m²; eine Verdopplung der CO₂-Konzentration würde effektiv die Nettoerwärmung um 4W/m² erhöhen. Diese 1,7%ige Erhöhung erachtet man als schlechte Nachricht für das Klima. Veränderungen der Sonnenleistung während des 11jährigen solaren Zyklus erreichen 0,25 W/m². Nehmen wir nun an, in 100 Jahren oder so sei die Weltbevölkerung 10 Milliarden, und jeder lebt nach dem europäischen Lebensstandard und verbraucht täglich 125 kWh, die er von fossilen, nuklearen oder geothermischen Quellen bezieht. Die Erdoberfläche pro Person wäre bei 51.000 m². Teilen wir nun die Leistung pro Person durch die Fläche pro Person, finden wir den zusätzlichen Beitrag der menschlichen Energie zu 0,1 W/m². Das ist ein Vierzigstel dessen, worüber wir uns derzeit ärgern, und ein wenig kleiner als der 0,25 W/m² Effekt des Sonnenzyklus. Also ja, unter diesen Annahmen würde die menschliche Energieerzeugung gerade so als Beitrag zum globalen Klimawandel aufscheinen.

Ich hörte, dass Kernkraftwerke nicht in ausreichender Rate erbaut werden können, um einen nutzbaren Beitrag zu leisten.

Die Schwierigkeit, AKWs schnell zu bauen wurde übertrieben mit Hilfe einer irreführenden Vortragstechnik, die ich „das magische Spielfeld“ nenne. In dieser Technik scheinen zwei Dinge miteinander verglichen zu werden, doch die Grundlage des Vergleichs wird auf halber Strecke gewechselt. Der Umweltredakteur des Guardian schrieb in seiner Zusammenfassung eines Berichts der Oxford Research Group: „Damit Kernkraft in den nächsten zwei Generationen einen signifikanten Beitrag zur Reduktion der weltweiten CO₂-Emissionen leisten kann, müsste die Industrie nahezu 3000 neue Reaktoren errichten – oder etwa einen jede Woche, 60 Jahre lang. Ein ziviles Ausbauprogramm dieser Größenordnung ist ein Wunschtraum und völlig undurchführbar. Die höchste Zubaurate der Geschichte ist 3,4 neue Reaktoren pro Jahr.“ 3000 klingt viel größer als 3,4, nicht wahr? In dieser Anwendung der „magischen Spielfeld“-Technik ist der Sprung nicht nur auf der Zeitskala, sondern auch noch zwischen zwei Regionen Während die erste Zahl (3000 neue Reaktoren in 60 Jahren) sich auf den ganzen Planeten bezieht, ist die zweite Zahl (3,4 neue Reaktoren pro Jahr) die maximale Zubaurate eines einzelnen Landes (Frankreich)!

Eine ehrlichere Darstellung hätte den Vergleich auf einer planetenweiten Basis gehalten. Frankreich hat 59 der weltweit 429 laufenden AKWs, deshalb ist es plausibel, dass die weltweite maximale Zubaurate etwa zehnmal der Zubau Frankreichs ist, d.h. 34 neue Reaktoren pro Jahr. Und die erforderliche Rate (für 3000 neue Reaktoren in 60 Jahren) ist 50 pro Jahr. Also ist die Behauptung „Ein ziviles Ausbauprogramm dieser

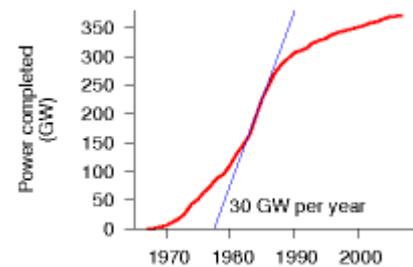


Fig.24.14: Grafik der weltweiten Gesamtleistung aus Kernenergie, die seit 1967 gebaut wurde und noch in Betrieb ist. Die Spitze der Zubaurate lag im Jahr 1984, mit 30 GW pro Jahr.

Größenordnung ist ein Wunschtraum und völlig undurchführbar“ einfach Geschwätz. Ja, es ist eine große Zubaurate, doch liegt sie in derselben Größenordnung wie frühere Raten.

Wie vernünftig ist die Behauptung, dass die größte weltweite Zubaurate bei etwa 34 Reaktoren pro Jahr liegt? Schauen wir auf die Zahlen. Fig.24.14 zeigt die Gesamtleistung der weltweiten Nuklearflotte als Funktion der Zeit, wobei nur die 2007 noch laufenden Reaktoren berücksichtigt sind. Die Zuwachsrate war 1984 am höchsten und hatte damals einen Wert von (Trommelwirbel bitte ...) etwa 30 GW pro Jahr – ungefähr 30 1GW-Reaktoren. Voila!

Was ist mit der Kernfusion?

We say that we will put the sun into a box. The idea is pretty. The problem is, we don't know how to make the box.

Sébastien Balibar, Director of Research, CNRS

Fusionsenergie ist spekulativ und experimentell. Ich denke es ist leichtsinnig, anzunehmen, dass das Fusionsproblem geknackt werden wird, doch ich möchte gerne abschätzen, wie viel Energie die Fusion liefern könnte, wenn das Problem geknackt ist.

Diese zwei Fusionsreaktionen werden als sehr vielversprechend eingestuft:

- die DT-Reaktion, die Deuterium und Tritium fusioniert und Helium erzeugt; und
- die DD-Reaktion, die Deuterium mit Deuterium fusioniert.

Deuterium, ein natürlich vorkommendes schweres Wasserstoffisotop, kann aus Meerwasser gewonnen werden; Tritium ein noch schwereres Wasserstoffisotop, kommt in der Natur nicht in größeren Mengen vor (da seine Halbwertszeit nur 12 Jahre beträgt), kann aber aus Lithium erzeugt werden.

ITER ist ein internationales Projekt zur Entwicklung eines stetig arbeitenden Fusionsreaktors. Der ITER Prototyp wird die DT-Reaktion verwenden. DT wird gegenüber DD bevorzugt, weil die DT-Reaktion mehr Energie freisetzt und weil sie „nur“ 100 Millionen °C erfordert, um abzulaufen, im Gegensatz zur DD-Reaktion, die 300 Millionen °C erfordert. (Die maximale Temperatur in der Sonne ist 15 Millionen °C).

Lassen Sie uns fantasieren und annehmen dass das ITER Projekt erfolgreich wäre. Welche nachhaltige Energie könnte die Fusion dann liefern? Kraftwerken, die die DT-Reaktion benutzen, geht der Saft aus, wenn das Lithium zu Ende geht. Vor dieser Zeit ist hoffentlich dann die zweite Installation der Fantasie Wirklichkeit geworden: Fusionsreaktoren, die nur Deuterium benötigen.

Ich werde diese beiden Energiequellen „Lithiumfusion“ und „Deuteriumfusion“ nennen nach dem primären Brennstoff um den wir uns jeweils sorgen. Schätzen wir nun ab, wie viel Energie jede dieser Quellen liefern kann.

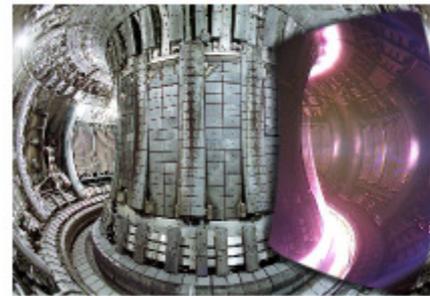


Fig.24.15: Das Innere eines experimentellen Fusionsreaktors, der JET Vakuumbehälter. Das „Bild im Bild“ rechts zeigt das JET Plasma, aufgenommen mit einer einfachen TV-Kamera. Foto: EFDA-JET.

Lithiumfusion

Die weltweiten Lithiumreserven in Erzlagerstätten werden auf 9,5 Millionen Tonnen abgeschätzt. Werden all diese Reserven der Fusion innerhalb von 1000 Jahren zugeführt, liefert das 10 kWh/d pro Person.

Es gibt eine weitere Quelle für Lithium: Meerwasser, wo Lithium in einer Konzentration von 0,17 ppm enthalten ist. Um Lithium mit einer Rate von 100 Millionen kg pro Jahr aus Meerwasser zu produzieren, braucht man schätzungsweise Energie von 2,5 kWh(el) pro Gramm Lithium. Wenn ein Fusionsreaktor 2.300 kWh(el) pro Gramm Lithium zurückgibt, wäre die gewonnene Energie 105 kWh/d pro Person (bei 6 Milliarden Menschen). Bei dieser Rate würde das Lithium der Ozeane über eine Million Jahre lang reichen.

Deuteriumfusion

Wenn wir uns vorstellen, dass Wissenschaftler und Ingenieure das Problem lösen, die DD-Fusion ans Laufen zu bekommen, haben wir sehr gute Neuigkeiten. Es sind 33g Deuterium in jeder Tonne Wasser und die Energie, die aus der Fusion nur eines Gramms Deuterium gewonnen werden kann, liegt bei irrsinnigen 100.000 kWh. Erinnern wir uns, dass die Ozeane 230 Millionen Tonnen pro Person beinhalten, und folgern, dass genug Energie vorhanden ist, um jeden Menschen einer zehnfach höheren Weltbevölkerung mit 30.000 kWh pro Tag (das ist 100mal mehr als der durchschnittliche amerikanische Verbrauch) eine Million Jahre lang zu versorgen (Fig.24.17).

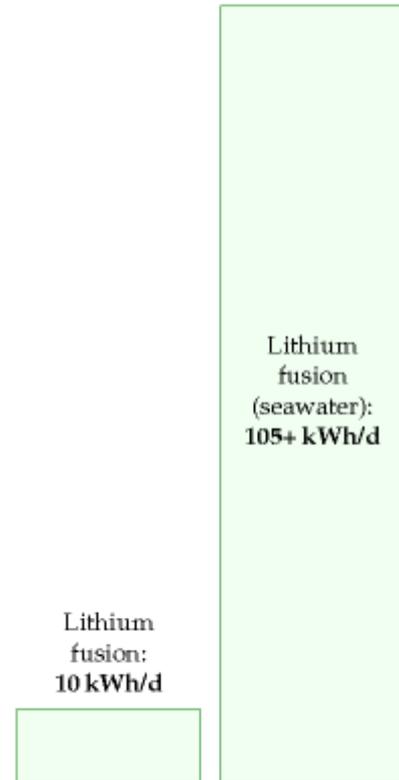


Fig.24.16: Lithium-basierte Fusion, fair und nachhaltig benutzt, könnte unseren Verbrauch decken. Lithium aus dem Bergbau würde 10 kWh/d/p für 1000 Jahre liefern, Meerwasser 105 kWh/d/p für über eine Million Jahre.

Fig.24.17: Deuterium-basierte Fusion, wenn sie realisierbar ist, eröffnet reichlich nachhaltige Energie für Millionen von Jahren. Die Skala des Diagramms ist in jeder Dimension zehnfach verkleinert, damit der Beitrag der Fusion auf die Seite passt. Zum Vergleich sind der rote und grüne Stapel aus Fig. 18.1 im selben Maßstab danebenge stellt.



Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 179 Fig.24.1** Quelle: World Nuclear Association [5qntkb]. Die gesamte Kapazität arbeitender Kernreaktoren ist 372 GW(el), sie benötigen 65.000 Tonnen Uran jährlich. Die USA haben 99 GW, Frankreich 63,5 GW, Japan 47,6 GW, Russland 22 GW, Deutschland 20 GW, Südkorea 17,5 GW, Ukraine 13 GW, Kanada 12,6 GW und England 11 GW. Im Jahr 2007 erzeugten alle Reaktoren der Welt zusammen 2.608 TWh Elektrizität, das sind im Mittel 300 GW oder 1,2 kWh pro Tag pro Person.
- 181 Schnelle Brüter Reaktoren ... erhalten so etwa 60 mal mehr Energie aus dem Uran** *162Fast breeder reactors obtain 60 times as much energy from the uranium.* Quelle: www.world-nuclear.org/info/inf98.html. Derzeit führt Japan in der Entwicklung Schneller-Brüter-Reaktoren.
- 181 Ein Once-Through 1-Gigawatt-AKW braucht 162 Tonnen Uran pro Jahr** *-A once-through one-gigawatt nuclear power station uses 162 tons per year of uranium.* Quelle: www.world-nuclear.org/info/inf03.html. Ein 1 GW(el) Kraftwerk mit einer thermischen Effizienz von 33% bei einem Load-Faktor von 83% hat den folgenden Fußabdruck: Bergbau – 16.600 Tonnen von 1%-Uranerz; Mahlen – 191 t Uranoxid (enthält 162 t Natur-Uran); Anreicherung und Brennstabherstellung – 22,4 t Uranoxid (enthält 20 t angereichertes Uran). Die Anreicherung erfordert 115.000 SWU; siehe Seite 118 zu den Energiekosten einer SWU (separative work unit).
- 181 Uran-Ressourcen sind etwa 1000mal höher als unsere angenommenen 27 Millionen Tonnen** *163it's been estimated that the low-grade uranium resource is more than 1000 times greater than the 22 million tons we just assumed.* Deffeyes und MacGregor (1980) schätzen die Ressourcen von Uran in Konzentrationen von 30 ppm oder mehr auf 3×10^{10} Tonnen. (Die mittlere Erzgüte in Südafrika lag 1985 und 1990 bei 150 ppm. Phosphate liegen typischerweise bei 100 ppm im Mittel.) Das sagte die World Nuclear Association zu den Uranreserven im Juni 2008:
“From time to time concerns are raised that the known resources might be insufficient when judged as a multiple of present rate of use. But this is the Limits to Growth fallacy, ... which takes no account of the very limited nature of the knowledge we have at any time of what is actually in the Earth's crust. Our knowledge of geology is such that we can be confident that identified resources of metal minerals are a small fraction of what is there.”
“Measured resources of uranium, the amount known to be economically recoverable from orebodies, are ... dependent on the intensity of past exploration effort, and are basically a statement about what is known rather than what is there in the Earth's crust.”
“The world's present measured resources of uranium (5.5 Mt) ... are enough to last for over 80 years. This represents a higher level of assured resources than is normal for most minerals. Further exploration and higher prices will certainly, on the basis of present geological knowledge, yield further resources as present ones are used up.”
“Economically rational players will only invest in finding these new reserves when they are most confident of gaining a return from them, which usually requires positive price messages caused by undersupply trends. If the economic system is working correctly and maximizing capital efficiency, there should never be more than a few decades of any resource commodity in reserves at any point in time.”
[Exploration has a cost; exploring for uranium, for example, has had a cost of \$1–\$1.50 per kg of uranium (\$3.4/MJ), which is 2% of the spot price of \$78/kgU; in

contrast, the finding costs of crude oil have averaged around \$6/barrel (\$1050/MJ) (12% of the spot price) over at least the past three decades.]

“Unlike the metals which have been in demand for centuries, society has barely begun to utilize uranium. There has been only one cycle of exploration-discovery-production, driven in large part by late 1970s price peaks.”

“It is premature to speak about long-term uranium scarcity when the entire nuclear industry is so young that only one cycle of resource replenishment has been required.” www.world-nuclear.org/info/inf75.html

Weiterführende Literatur: Herring (2004); Price and Blaise (2002); Cohen (1983).

Die IPCC, die die OECD zitiert, schätzt, dass bei den Raten von 2004 das Uran in konventionellen Ressourcen und Phosphaten 670 Jahre für Once-Through-Reaktoren, 20.000 Jahre für schnelle Reaktoren mit Plutonium-Wiederaufbereitung und 160.000 Jahre für schnelle Reaktoren mit Wiederaufbereitung von Uran und allen Aktiniden reicht. (Sims et al., 2007).

- 183 Japanische Forscher fanden eine Methode, Uran aus Meerwasser zu extrahieren**
165 *Japanese researchers have found a technique for extracting uranium from seawater.* Die Kostenschätzung von \$100 pro kg stammt von Seko et al. (2003) und [y3wnzr]; die Schätzung von \$300 pro kg von der OECD Nuclear Energy Agency (2006, p130). Die Uranextraktion erfolgt über Gewebe, das einige Monate in den Ozean getaucht wird; das Gewebe besteht aus Polymerfasern, die vor dem Eintauchen durch Bestrahlung aufnahmefähig gemacht werden; die aufnahmefähigen Fasern sammeln Uran mit einer Rate von 2 g Uran pro kg Fasern.
- 183 Der Aufwand für die Uranextraktion aus dem Meerwasser könnte sich verringern, wenn man die Extraktion mit einer anderen Nutzung des Meerwassers verbindet – beispielsweise der Kraftwerkskühlung** – *The expense of uranium extraction could be reduced by combining it with another use of seawater – for example, power-station cooling.* Die Idee einer nuklearbetriebenen Insel, die Wasserstoff produziert, stammt von C. Marchetti. Brüter-Reaktoren würden mit Meerwasser gekühlt und könnten aus dem Kühlwasser Uran extrahieren mit einer Rate von 600 t Uran pro 500.000 Mt Meerwasser.
- 184 Thoriumreaktoren liefern 3,6 Milliarden kWh Wärme pro Tonne Thorium**
166 *Thorium reactors deliver 3.6×10^9 kWh of heat per ton of thorium.* Quelle: www.world-nuclear.org/info/inf62.html. Es besteht noch Potenzial für Verbesserungen in Thorium-Reaktoren, daher könnte sich diese Zahl zukünftig erhöhen.
- 185 Ein alternativer Kernreaktor für Thorium, das „Rubbiatron“** – *An alternative nuclear reactor for thorium, the “energy amplifier”...* Siehe Rubbia et al. (1995), [web.ift.uib.no/~lillestol/Energy Web/EA.html](http://web.ift.uib.no/~lillestol/Energy%20Web/EA.html), [32t5zt], [2qr3yr], [ynk54y].
- 185 Tabelle 24.7 – World thorium resources in monazite.** Quelle: US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Januar 1999. [yl7tkm] zitiert in UIC Nuclear Issues Briefing Paper #67 November 2004: “Andere Mineraleerze mit höherem Thoriumgehalt, wie Thorit, wären wahrscheinlich als Quelle verwendet, wenn die Nachfrage significant erhöht würde.” In [yju4a4] fehlt der Wert für die Türkei, den man hier finden kann: [yeyr7z].
- 186 Die Atomindustrie verkaufte jedem in England 4 kWh/d seit etwa 25 Jahren**
167 *The nuclear industry sold everyone in the UK 4 kWh/d for about 25 years.* Die erzeugte Summe bis 2006 war etwa 2200 TWh. Quelle: Stephen Salter’s Energy Review for the Scottish National Party.

- 186 Die Behörde für nukleare Stilllegungen hat ein Jahresbudget von 2 Milliarden € – *The nuclear decommissioning authority has an annual budget of £2 billion.* Tatsächlich scheint sich das Rückbau-Budget immer weiter zu erhöhen. Der aktuellste Wert für die Gesamtkosten des Rückbaus ist 73 Mrd. £.
news.bbc.co.uk/1/hi/uk/7215688.stm
- 186 Die Kritik des *Chief Inspector of Nuclear Installations* war niederschmetternd
168*The criticism of the Chief Inspector of Nuclear Installations was withering...* (Weightman, 2007).
- 187 Kernkraft ist nicht unendlich gefährlich. Sie ist einfach gefährlich –*Nuclear power is not infinitely dangerous. It's just dangerous.* Weiterführende Literatur zum Risiko: Kammen und Hassenzahl (1999).
- 187 Menschen in der Umgebung von Kohlekraftwerken sind höheren Strahlungsdosen ausgesetzt als in der Umgebung von Kernkraftwerken –*People in America living near coal-fired power stations are exposed to higher radiation doses than those living near nuclear power plants.* Quelle: McBride et al. (1978). Uran und Thorium haben in Kohle Konzentrationen von 1 ppm bzw. 2 ppm. Weiterführende Literatur: gabe.web.psi.ch/research/ra/ra_res.html, www.physics.ohio-state.edu/~wilkins/energy/Companion/E20.12.pdf.xpdf.
- 188 Atom und Wind sind die besten, mit Opferraten unter 0,2 pro GWy –*Nuclear power and wind power have the lowest death rates.* Siehe auch Jones (1984). Diese Opferraten sind aus Studien, die zukünftige Entwicklungen vorhersagen. Wir können aber auch einen Blick in die Vergangenheit werfen. In England wurden mit Kernkraft 200 GWy Elektrizität erzeugt, und die Nuklearindustrie forderte ein Todesopfer, einen Arbeiter, der 1978 bei Chapelcross starb [4f2ekz]. Ein Opfer pro 200 GWy ist eine beeindruckend niedrige Opferrate im Vergleich zur Erdöl- und Erdgas-Industrie. Weltweit gesehen ist die Opferrate von Kernkraft schwer abzuschätzen. Die Kernschmelze auf Three-Mile-Island tötete niemanden, und die damit verbundenen Lecks kosteten vermutlich ein Todesopfer in der Zeit seit dem Unfall. Der Unfall in Tschernobyl tötete zunächst 62 Menschen durch direkte Verstrahlung, und 15 Menschen vor Ort starben später an Schilddrüsenkrebs; man schätzt 4000 Krebsopfer aus der näheren Umgebung und weitere 5000 Menschen weltweit (von den 7 Millionen, die dem Fallout ausgesetzt waren), die an Krebs starben, der von Tschernobyl verursacht war (Williams and Baverstock, 2006); doch diese Todesfälle sind unmöglich zu belegen, da Krebs, vielfach durch natürliche Strahlung ausgelöst, allein 25% der Todesfälle in Europa bedingt. Ein Weg, die globale Opferrate der weltweiten Kernkraft zu bestimmen, ist, diese geschätzte Tschernobyl-Todeswolke (9000 Todesfälle) durch die kumulative Energieerzeugung von 1969 bis 1996 zu dividieren, die 3685 GWy beträgt. Das ergibt eine Opferrate von 2,4 Toten pro GWy. An Todesopfern der Windkraft nennt das Caithness Windfarm Information Forum (www.caithnesswindfarms.co.uk) 49 Todesfälle weltweit von 1970 bis 2007 (35 Arbeiter der Windindustrie und 14 zivile Opfer). 2007 führt Paul Gipe 34 Todesopfer weltweit auf [www.wind-works.org/articles/BreathLife.html]. In der Mitte der 1990er lag die mit Windkraft assoziierte Opferrate bei 3,5 Toten pro GWy. Nach Paul Gipe fiel gegen Ende des Jahres 2000 die Todesrate der Windkraft auf 1,3 Tote pro GWy. Also sind die historischen Opferraten sowohl in der Kernkraft als auch in der Windkraft höher als die vorhergesagten zukünftigen Raten.
- 188 Stahl und Beton eines 1GW AKW hat einen CO₂-Fußabdruck von etwa 300.000 t CO₂ 169*The steel and concrete in a 1 GW nuclear power station have a carbon footprint of roughly 300 000 t CO₂.* Ein 1 GW Kernkraftwerk enthält 520.000 m³

Beton (1,2 Millionen Tonnen) und 67.000 Tonnen Stahl [2k8y7o]. Bei angenommenen 240 kg CO₂ pro m³ Beton [3pvf4j], liegt der Fußabdruck des Betons bei etwa 100.000 t CO₂. Gemäß Blue Scope Steel [4r7zpg] liegt der Fußabdruck von Stahl bei etwa 2,5 Tonnen CO₂ pro Tonne Stahl. Die 67.000 Tonnen Stahl haben also einen Fußabdruck von etwa 170.000 Tonnen CO₂.

- 188 Ist der Abfall eines Reaktors nicht ein großes Problem 170Nuclear waste discussion. Quellen: www.world-nuclear.org/info/inf04.html, [49hcnw], [3kduo7]. Neuer Atommüll verglichen mit altem: Committee on Radioactive Waste Management (2006).
- 192 Die weltweiten Lithiumreserven in Erzlagerstätten werden auf 9,5 Millionen Tonnen abgeschätzt 172World lithium reserves are estimated as 9.5 million tons. Die hauptsächlichsten Lithiumvorkommen liegen in Bolivien (56,6%), Chile (31,4%) und den USA (4,3%). www.dnpm.gov.br
- 192 Es gibt eine weitere Quelle für Lithium: Meerwasser –There’s another source for lithium: seawater... Einige Extraktions-Technologien wurden untersucht (Steinberg und Dang, 1975; Tsuruta, 2005; Chitrakar et al., 2001).
- 192 Wenn ein Fusionsreaktor 2.300 kWh(el) pro Gramm Lithium zurückgibt –Fusion power from lithium reserves. Die Energiedichte von natürlichem Lithium ist etwa 7500 kWh pro Gramm (Ongena und Van Oost, 2006). Es gibt große Unterschiede in den Schätzungen über die Effizienz, mit der Fusionsreaktoren diese Energie in Elektrizität verwandeln können, von 310 kWh(el)/g (Eckhartt, 1995) bis 3400 kWh(el)/g natürliches Lithium (Steinberg and Dang, 1975). Ich habe 2300 kWh(el)/g angenommen, auf Basis des vielzitierten Gesamtwertes: “Ein 1 GW Fusionsreaktor benötigt etwa 100 kg Deuterium und 3 Tonnen natürliches Lithium pro Jahr und erzeugt damit etwa 7 Milliarden kWh.” [69vt8r], [6oby22], [63l2lp].

Weiterführende Literatur über Spaltung: Hodgson (1999), Nuttall (2004), Rogner (2000), Williams (2000). Uranium Information Center – www.uic.com.au. www.world-nuclear.org, [wnchw]. Über Kosten: Zaleski (2005). Über Atommüll-Lager: [shrln]. Über Brutreaktoren und Thorium: www.energyfromthorium.com.

Weiterführende Literatur über Fusion: www.fusion.org.uk, www.askmar.com/Fusion.html.

25. Leben von den Erneuerbaren anderer Länder?

Whether the Mediterranean becomes an area of cooperation or confrontation in the 21st century will be of strategic importance to our common security.

Joschka Fischer, German Foreign Minister, February 2004

Wir haben herausgefunden, dass es schwierig ist, aus den fossilen Brennstoffen auszusteigen und dabei von eigenen Erneuerbaren zu leben. Auch Kernkraft hat ihre Probleme. Was können wir sonst noch machen? OK, wie sieht es denn aus, wenn wir von den Erneuerbaren Energiequellen anderer leben würden? (Nicht dass wir irgendeinen Anspruch auf jemandes Erneuerbare hätten, sicher, aber vielleicht wäre dieser Jemand ja interessiert, sie uns zu verkaufen.)

Die meisten Ressourcen nachhaltiger Lebensführung erfordern Landfläche: Wenn Sie Solarmodule wollen, brauchen Sie Land um sie darauf aufzustellen; wenn Sie Raps anbauen wollen, brauchen Sie ebenfalls Land. Jared Diamond beobachtet in seinem Buch *Collapse*, dass zwar viele Faktoren zum Kollaps der Zivilisation führen, diese aber alle eine gemeinsame Wurzel in der Tatsache haben, dass die Bevölkerungsdichte zu groß wird.

Regionen wie England oder Europa haben ein Problem, weil sie eine große Bevölkerungsdichte haben und all die verfügbaren Erneuerbaren so diffus sind – sie haben eine geringe Leistungsdichte (Tabelle 25.1). Wenn wir nach Hilfe suchen, sollten wir uns an Länder wenden, auf die folgende drei Dinge zutreffen: a) geringe Bevölkerungsdichte; b) große Landfläche ; c) Erneuerbare Energiequellen mit hoher Leistungsdichte.

Leistung pro Flächeneinheit Land oder Meer	
Wind	2W/m ²
Off-shore Wind	3W/m ²
Gezeitenbecken	3W/m ²
Gezeitenstrom	6W/m ²
Solare PV Module	5–20W/m ²
Pflanzen	0.5W/m ²
Regenwasser (highlands)	0.24W/m ²
Wasserkraftwerk	11W/m ²
Solarkamin	0.1W/m ²
Concentrating Solar Power (Wüste)	15W/m ²

Region	Bevölkerung	Fläche (km ²)	Dichte (Pers. pro km ²)	Fläche p. Person (m ²)
Libyen	5 760 000	1 750 000	3	305 000
Kasachstan	15 100 000	2 710 000	6	178 000
Saudi Arabien	26 400 000	1 960 000	13	74 200
Algerien	32 500 000	2 380 000	14	73 200
Sudan	40 100 000	2 500 000	16	62 300
Welt	6 440 000 000	148 000 000	43	23 100
Schottland	5 050 000	78 700	64	15 500
Europ. Union	496 000 000	4 330 000	115	8 720
Wales	2 910 000	20 700	140	7 110
Großbritannien	59 500 000	244 000	243	4 110
England	49 600 000	130 000	380	2 630

Tabelle 25.1:
(oben) Erneuerbare Anlagen müssen Landesgröße haben, weil Erneuerbare so diffus sind.

Tabelle 25.2:
(links) Einige Regionen, geordnet nach aufsteigender Bevölkerungsdichte (vgl. auch S.335)

Tabelle 25.2 enthält einige Länder, die diese Bedingungen erfüllen. Libyens Bevölkerungsdichte beispielsweise ist 70mal geringer als die von Großbritannien und seine Fläche 7mal größer. Andere große, flächenreiche Länder sind Kasachstan, Saudi Arabien, Algerien und Sudan.

In all diesen Ländern halte ich Solarenergie für am vielversprechendsten, insbesondere solarthermische Kraftwerke mit *Bündelung* der Direktstrahlung (CSP-Anlagen³¹), die Spiegel oder Linsen zum Fokussieren des Sonnenlichts verwenden. CSP-Anlagen gibt es in einer Vielzahl verschiedener Anordnungsgeometrien der beweglichen Spiegel und mit unterschiedlichen Techniken bei der Umwandlung der Leistung im Brennpunkt - Stirlingmotor, Druckwasser, Flüssigsalz zum Beispiel. Sie alle liefern nahezu dieselbe mittlere Leistung pro Flächeneinheit, in der Größenordnung von **15 W/m²**.

Eine Technologie mit nennenswertem Beitrag

„Der gesamte Weltenergiebedarf kann auf einer Fläche von 100km x 100km in der Sahara erzeugt werden.“ Stimmt das? CSP in der Wüste liefert etwa 15 W/m². Wenn in obiger Fläche also nichts anderes erlaubt ist, liegt die erzeugte Gesamtleistung bei 150 GW. Das ist nicht dasselbe wie der aktuelle gesamte Weltenergiebedarf. Das ist noch nicht einmal der gesamte Weltbedarf an *Elektrizität*, der bei 2.000 GW liegt. Der Weltenergiebedarf beträgt heute 15.000 GW. Die richtige Aussage über die Sahara-Energieversorgung wäre also, dass auf einer Fläche von **1000km x 1000km** den Weltenergiebedarf erzeugt werden könnte. Das ist viermal die Fläche Großbritanniens. Und wenn wir in einer Welt der Gleichberechtigung leben wollen, sollten wir vermutlich mehr als den gegenwärtigen Verbrauch ansetzen. Um jeden Menschen weltweit mit dem mittleren europäischen Verbrauch (125 kWh/d) versorgen wollen, brauchen wir zwei 1000km x 1000km Quadrate in der Wüste.

Zum Glück ist die Sahara nicht die einzige Wüste, deshalb ist es vielleicht realistischer, die Welt in kleinere Regionen aufzuteilen und herauszufinden, welche Fläche jeweils in der lokalen Wüste einer solchen Region erforderlich wäre. Um sich also auf Europa zu konzentrieren: Welche Fläche in der nördlichen Sahara ist erforderlich, um jeden in Europa und Nordafrika mit dem mittleren europäischen Bedarf zu versorgen? Nehmen wir die Bevölkerung von Europa und Nordafrika zu 1 Milliarde an, geht der Flächenbedarf auf 340.000 km² zurück, was einem Quadrat von 600 km mal 600 km entspricht. Das



Fig.25.3: Stirling-Maschine. Diese formschönen Reflektoren liefern eine Leistungsdichte pro Landfläche von 14 W/m². Foto mit freundlicher Genehmigung von Stirling Energy Systems. www.stirlingenergy.com



Fig.25.4: Andasol, Spanien – ein „100MW“ Solarkraftwerk in Bau. Übrige thermische Energie, die tagsüber produziert wird, wird in Flüssigsalztanks bis zu sieben Stunden gelagert, was eine kontinuierliche und stabile Netzversorgung gewährleistet. Das Kraftwerk soll voraussichtlich 350 GWh im Jahr (40 MW) liefern. Die Paraboltröge belegen 400 Hektar, die Leistungsdichte pro Landfläche ist also 10 W/m². Foto oben: ABB, Foto unten: IEA SolarPACES.

³¹ CSP steht für „Concentrating Solar Power“

entspricht einmal Deutschland, 1,4mal Großbritannien oder 16mal Wales.

Der für England erforderliche Anteil an dieser 16-Wales-Fläche wäre etwa einmal Wales: Eine 145 km mal 145 km Fläche der Sahara würde Englands gesamten Primärenergiebedarf decken können. Diese Flächen sind in Fig.25.5 eingezeichnet. Obwohl das gelbe Quadrat „klein“ im Vergleich zu Afrika wirkt, hat es die Fläche Deutschlands.

Der DESERTEC-Plan

Eine Organisation namens DESERTEC [www.desertec.org] vermarktet einen Plan, der vorsieht, CSP-Anlagen in sonnigen Mittelmeerländern zur Stromerzeugung zu nutzen und diesen Strom über Hochspannungs-Gleichstromleitungen (HVDC-Kabel, siehe Fig.25.7) in die wolkenreicheren nördlichen Teile zu übertragen. HVDC-Technik ist seit 1954 im Einsatz, um Leistung über Überlandleitungen und Tiefseekabel (so wie die Verbindungsleitung zwischen Frankreich und England) zu transportieren. Man überträgt bereits auf diese Weise Elektrizität über Strecken von 1000 km in Südafrika, China, Amerika, Kanada, Brasilien und Kongo. Eine typische 500kV-Leitung überträgt eine Leistung von 2 GW. Ein HVDC-Leitungspaar in Brasilien überträgt 6,3 GW.

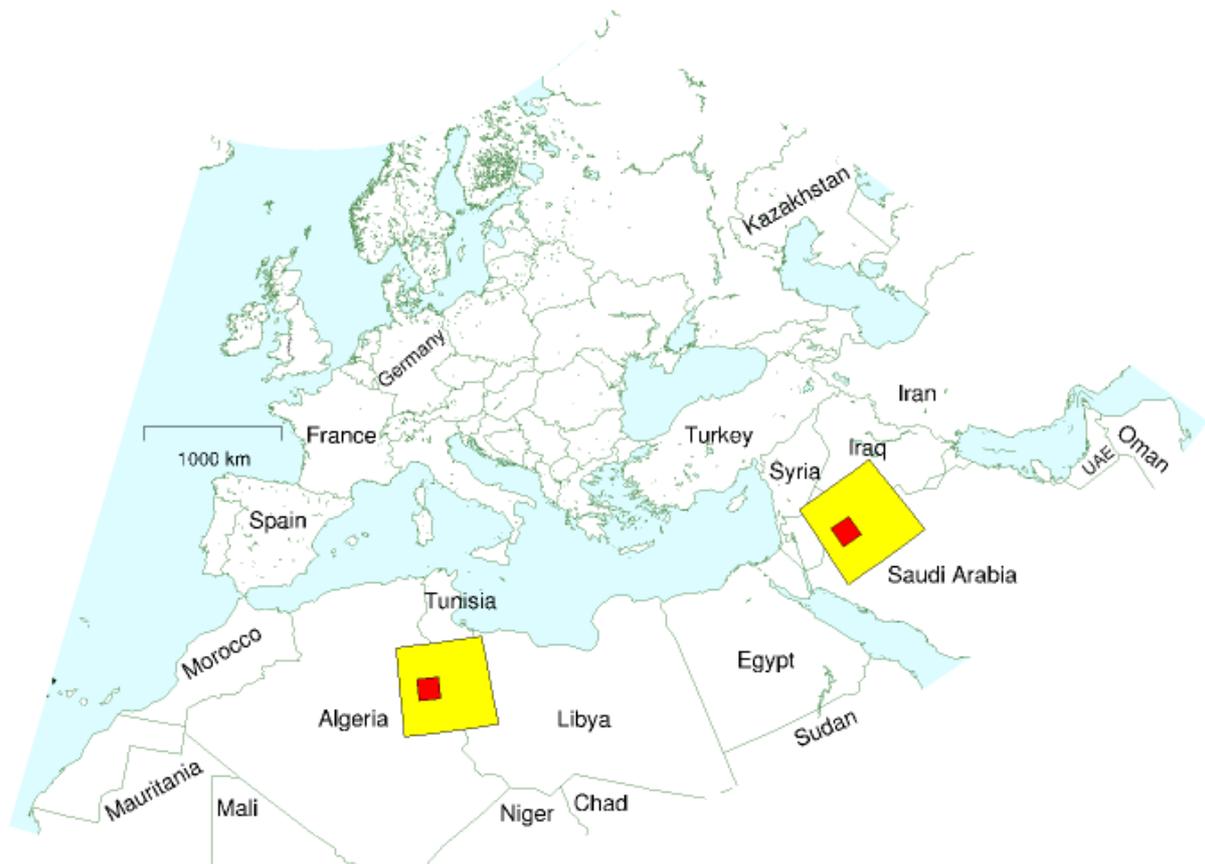


Fig.25.5: Das vielzitierte kleine Quadrat. Die Karte zeigt ein 600km x 600km Quadrat in Afrika, ein anderes in Saudi Arabien, Jordanien und Irak. CSP-Anlagen, die ein solches Quadrat vollständig ausfüllen, erzeugen genug Energie, um eine Milliarde Leute mit dem mittleren europäischen Verbrauch von 125 kWh/d/p zu versorgen. Die Fläche eines solchen Quadrats entspricht der Fläche Deutschlands oder 16mal der Fläche von Wales. In jedem großen Quadrat ist noch ein kleineres mit 145km x 154km eingezeichnet, das in der Sahara benötigt wird, um die gesamte britische Energieversorgung zu gewährleisten.

HVDC wird traditionellen Wechselstrom-Hochspannungsleitungen vorgezogen, weil weniger Material und weniger Landfläche benötigt wird und die Leitungsverluste geringer

sind. Der Leistungsverlust auf einer 3.500 km langen HVDC Leitung, einschließlich der Umwandlung von Wechsel- auf Gleichstrom und wieder zurück, liegt bei etwa 15%. Ein weiterer Vorteil ist, dass HVDC-Systeme die Stromnetze, mit denen sie verbunden sind, stabilisieren helfen.

Land	ökonomisches Potential (TWh/y)	Küstenpotential (TWh/y)
Algerien	169 000	60
Libyen	140 000	500
Saudi Arabien	125 000	2 000
Ägypten	74 000	500
Irak	29 000	60
Marokko	20 000	300
Oman	19 000	500
Syrien	10 000	0
Tunisien	9 200	350
Jordanien	6 400	0
Jemen	5 100	390
Israel	3 100	1
VAE	2 000	540
Kuwait	1 500	130
Spanien	1 300	70
Qatar	800	320
Portugal	140	7
Türkei	130	12
gesamt	620 000 (70 000GW)	6 000 (650GW)

Tabelle 25.6: Solarenergie-Potenzial der Länder in und um Europa. Das „ökonomische Potenzial“ ist die Leistung, die produziert werden könnte an geeigneten Orten, an denen die normale Einstrahlungsleistung über 2000 kWh/m²/y liegt. Das „Küstenpotenzial“ ist die Leistung, die in Küstengebieten bis 20 m über dem Meeresspiegel erzeugt werden kann. Dies ist besonders vielversprechend wegen der möglichen Kombination mit Entsalzungsanlagen. Zum Vergleich: Die gesamte erforderliche Leistung, um 1 Milliarde Menschen 125 kWh/d/p zu liefern, liegt bei 46.000 TWh/y (5.200 GW). 6.000 TWh/y (650 GW) liefern 16 kWh/d/p für 1 Milliarde Menschen.

In den Plänen von DESERTEC werden vor allem Küstenregionen zum Bau von Kraftwerken in Betracht gezogen, weil die Kraftwerke dort als Nebenprodukt entsalztes Meerwasser liefern, das als Trinkwasser oder für die Landwirtschaft genutzt werden könnte.

Tabelle 25.6 zeigt die DESERTEC-Schätzungen für das Potenzial an Kraftwerksleistung, das in den jeweiligen Ländern Europas und Nordafrikas vorhanden ist. Dieses „ökonomische Potenzial“ summiert sich zu mehr als nötig ist, um 1 Milliarde Menschen mit 125 kWh/d/p zu versorgen. Das gesamte „Küstenpotenzial“ reicht für 16 kWh/d/p für eine Milliarde Menschen. Lassen Sie uns an Hand einer Karte entwickeln, wie ein realistischer Plan aussehen könnte. Nehmen wir an, wir bauen Solaranlagen mit je 1.500 km² Größe – das ist etwa die Größe Londons. (Der Großraum London hat 1.580 km², die M25-Ringautobahn um London umschließt ein Gebiet von 2.300 km².) Wir nennen diese Anlage ein „Blob“. Wir nehmen weiter an, dass in jedem Blob die Hälfte der Fläche für CSP-



Fig.25.7: Verlegen eines HVDC Kabels zwischen Finnland und Estland. Ein solches Kabelpaar überträgt 350 MW Leistung. Foto: ABB

Spiegellinsen reserviert ist (mittlere Leistungsdichte 15 W/m^2) und dazwischen Platz wäre für Ackerbau, Gebäude, Straßen, Eisenbahnen, Rohre und Kabel. Lassen wir 10% Kabelverluste auf dem Weg zwischen dem Blob und dem Verbraucher zu, liefert jeder Blob ein mittlere Leistung von 10GW.

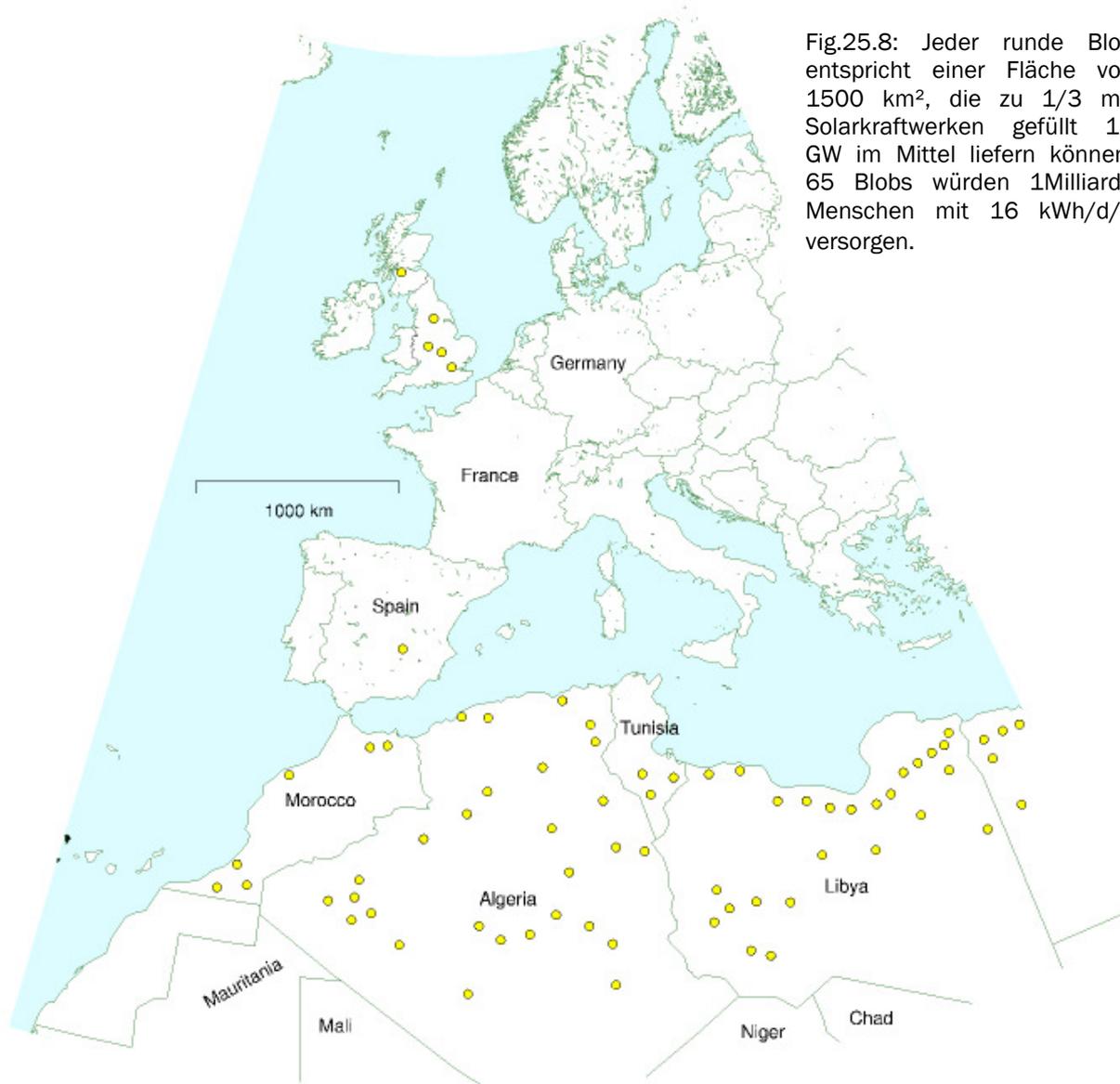


Fig.25.8: Jeder runde Blob entspricht einer Fläche von 1500 km^2 , die zu $1/3$ mit Solarkraftwerken gefüllt 10 GW im Mittel liefern können. 65 Blobs würden 1Milliarde Menschen mit 16 kWh/d/p versorgen.

Fig.25.8 zeigt einige Blobs maßstäblich in einer Karte eingezeichnet. Um ein Gefühl für die Größe zu vermitteln, habe ich ein paar auch in England eingezeichnet. Vier diese Blobs liefern einen Output vergleichbar mit dem britischen Gesamtelektrizitätsverbrauch (16 kWh/d/p für 60 Millionen Menschen). Fünfundsechzig Blobs würden alle 1-Milliarde Menschen in Europa und Nordafrika mit 16 kWh/d/p versorgen. Fig.25.8 zeigt 68 Blobs in der Wüste.

Photovoltaik mit Lichtbündelung

Eine Alternative zu CSP in der Wüste sind großflächige PV-Module mit Lichtbündelung. Um ein solches Modul herzustellen, setzt man eine hochwertige PV-Solarzelle in den Brennpunkt von kostengünstigen Linsen oder Spiegeln. Faiman et al. (2007) sagen, dass „Solarenergie, in ihrer Ausführung als PV mit Lichtbündelung, komplett kosten-

vergleichbar mit fossilen Brennstoffen sein kann [in Wüstenstaaten wie Kalifornien, Arizona, New Mexico oder Texas] und keine Subventionen irgendwelcher Art erforderlich wären“.

Nach Angaben des Herstellers Amonix hat diese Form der gebündelten Solarenergie eine Leistungsdichte pro Landfläche von 18 W/m^2 .

Ein anderer Ansatz, ein Gefühl für die erforderliche Anlagenhardware zu bekommen, ist, sie zu personalisieren. Einer der „25 kW“(peak) Kollektoren (Fig.25.9) erzeugt im Mittel 138 kWh pro Tag; der amerikanische Lebensstil verbraucht aktuell 250 kWh pro Tag pro Person. Um die USA mit Solarkraft frei von fossilen Brennstoffen zu machen, bräuchte man also etwa zwei dieser 15 m x 15 m Kollektoren pro Person.

Fragen

Ich bin verwirrt. In Kapitel 6 sagten Sie, dass die besten PV-Module 20 W/m^2 im Mittel produzierten, an einem Ort mit britischen Sonnenverhältnissen. In der Wüste würde die vermutlich 40 W/m^2 schaffen. Wie kommt es dann, dass trotz der Lichtbündelung diese Anlagen nur $15\text{-}20 \text{ W/m}^2$ generieren? Durch Lichtbündelung sollte sich doch die Ausbeute verbessern gegenüber einfachen flachen Modulen?

Gute Frage. Die kurze Antwort ist nein. CSP erreicht keine bessere Leistungsdichte pro Landfläche als flache Module. Die Fokussierungseinheiten müssen der Sonne folgen, sonst wird der Brennpunkt nicht korrekt ausgeleuchtet; sobald Sie Land mit nachgeführten Fokussierungseinheiten zubauen, müssen Sie zwischen ihnen Platz lassen. Ein Teil des Sonnenlichts fällt in diese Zwischenräume und ist verloren. Der Grund, warum man dennoch Systeme mit Lichtbündelung herstellt und erforscht, ist, dass die heutigen flachen Module sehr teuer sind und Lichtbündelung kostengünstigere Systeme ermöglicht. Das Ziel der CSP-Ingenieure ist nicht große Leistungsdichte pro Landfläche, denn Landfläche ist (aus ihrer Sicht) billig zu haben. Das Ziel ist, viel Leistung pro Dollar zu erzeugen.

Wenn flache Module die größere Leistungsdichte haben, wieso planen wir dann nicht, die Sahara mit diesen zu bedecken?

Weil ich versuche, die praktikablen Optionen für großangelegte nachhaltige Energieerzeugung zu diskutieren, für Europa und Nordafrika bis 2050. Ich schätze, dass auch 2050 noch Spiegel billiger als PV-Module sein werden, deshalb sollten wir uns auf die Technologien mit Lichtbündelung konzentrieren.

Was ist mit Thermikkraftwerken (solar chimneys)?

Ein Thermikkraftwerk nutzt Sonnenkraft auf sehr einfache Weise. Ein großer Kamin wird in der Mitte einer Fläche errichtet, die mit einem durchsichtigen Dach aus Glas oder Folie überdacht wird. Weil warme Luft aufsteigt, zieht die Luft, die wie in einem Glashaushaus unter dem Dach erwärmt wird, im Kamin nach oben und kältere Luft strömt am äußeren Rand der überdachten Kollektorfläche nach. Aus diesem Luftstrom wird durch eine



Fig.25.9: Ein 25 kW(peak) PV-Kollektor mit Lichtbündelung des kalifornischen Herstellers Amonix. Eine 225 m^2 Lichtfläche enthält 5760 Fresnellinsen mit einer optischen Konzentration von $\times 260$, von denen jede eine 25%-effiziente Siliziumzelle beleuchtet. In einer geeigneten Wüstengegend liefert dieser Kollektor 138 kWh pro Tag, genug für den Energiekonsum eines halben Amerikaners. Beachte den Menschen als Größenvergleich. Foto von David Faiman.

Turbine am Fuß des Kamins Energie erzeugt. Thermikkraftwerke sind relativ einfach aufzubauen, doch liefern sie nicht sehr beeindruckend viel Leistung pro Flächeneinheit. Eine Pilotanlage in Manzanares, Spanien, war sieben Jahre von 1982 bis 1989 in Betrieb. Der Kamin hatte eine Höhe von 195 m und einen Durchmesser von 10 m. Der Kollektor hatte einen Durchmesser von 240 m, sein Dach eine Fläche von 6.000 m² Glas und 40.000 m² Plastikfolie. Sie erzeugte 44 MWh pro Jahr, was einer Leistungsdichte pro Flächeneinheit von **0,1 W/m²** entspricht. Theoretisch wird die Leistung eines Thermikkraftwerks um so höher, je größer der Kollektor und je höher der Kamin ist. Die Ingenieure von Manzanares rechneten hoch, dass ein 1000 m hoher Kamin umgeben von einem Kollektor mit 7 km Durchmesser eine Leistung von 680 GWh pro Jahr erzeugen könnte. Das ist eine Leistungsdichte pro Landfläche von etwa **1,6 W/m²**, ähnlich der Leistungsdichte von Windfarmen in England, und etwa ein zehntel der Leistungsdichte der oben erwähnten CSP-Anlagen. Es wird behauptet, dass Strom aus Thermikkraftwerken zu einem ähnlichen Preis wie aus konventionellen Kraftwerken bereitgestellt werden kann. Ich schlage vor, dass Länder mit genug Landfläche und Sonnenschein einen großen Wettbewerb zwischen Thermikkraftwerken und CSP-Anlagen veranstalten sollten, gesponsert von ölproduzierenden und ölverbrauchenden Ländern.

Wie wäre es, Energie aus Island zu beziehen, wo Geothermie und Wasserkraft so reichlich vorhanden sind?

Tatsächlich exportiert Island bereits Energie, indem es Industrie beliefert, die energieintensive Produkte herstellt. Island produziert beispielsweise fast eine Tonne Aluminium pro Einwohner! Aus isländischer Sicht sind hier große Profite zu machen. Doch kann Island Europa retten? Es würde mich wundern, wenn Islands Energieproduktion so weit hochskaliert werden könnte, dass sie auch nur für England nennenswerte Elektrizitätsexporte tragen würde. Als Vergleichsskala nehmen wir einfach mal die Verbindungsleitung Frankreich-England, die 2 GW über den Ärmelkanal liefern kann. Diese Maximalleistung entspricht 0,8 kWh pro Tag pro Brite, etwa 5% des mittleren britischen Elektrizitätsbedarfs. Islands mittlere Geothermie-Stromleistung ist lediglich 0,3 GW, was unter 1% des britischen Durchschnitts-Stromverbrauchs liegt. Islands mittlere Elektrizitätsproduktion ist 1,1 GW. Um eine Verbindung mit Stromimporten vergleichbar mit denen aus Frankreich zu beschicken, müsste Island seine Stromproduktion *verdreifachen*. Um uns mit 4 kWh/d/p zu versorgen (etwa der Anteil britischer Kernkraftwerke), müsste sich Islands Elektrizitätsproduktion *verzehnfachen*. Es ist wahrscheinlich eine gute Idee, eine Verbindungsleitung nach Island zu bauen, doch erwarten Sie nicht, dass darüber nennenswerte Beiträge fließen werden.



Fig.25.10: Der Thermikkraftwerk-Prototyp in Manzanares. Fotos von solarmillennium.de



Fig.25.11: Mehr Geothermie in Island. Foto von Rosie Ward.

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

198 CSP in der Wüste liefert etwa 15 W/m²

178 Concentrating solar power in deserts delivers an average power per unit area of roughly 15 W/m². Meine Quellen für diese Zahlen sind zwei Firmen, die CSP-Anlagen herstellen. www.stirlingenergy.com sagt, einer ihrer Spiegel mit einer 25 kW Stirlingmaschine im Brennpunkt könne in einer guten Wüstengegend 60.000 kWh/y erzeugen. Man könnte sie bis zu einem Spiegel pro 500 m² dicht packen. Das gibt eine Durchschnitts-Leistung von 14 W/m². Laut Hersteller ist diese Maschine die beste Landnutzung, was Energieausbeute betrifft. www.ausra.com benutzt flache Spiegel, um Wasser auf 285 °C zu erhitzen und eine Dampfturbine zu betreiben. Der erhitzte und verdichtete Wasserdampf kann in tiefen metallverstärkten Kavernen gelagert werden, um Energieerzeugung auch nachts zu ermöglichen. In ihrer Beschreibung eines „240 MW(el)“

Kraftwerks für Australien (Mills and LiÈvre, 2004) behaupten die Planer, dass 3,5 km² Spiegel 1,2 TWh(el) liefern könnten, das sind 38 W pro m² Spiegelfläche. Um dies auf die Leistung pro Landfläche umrechnen zu können, müsste man die Zwischenräume der Spiegel kennen. Ausra sagt, dass sie eine Fläche von 153 km mal 153 km in einer Wüste benötigen, um die gesamte Elektrizität für die USA zu erzeugen (Mills and Morgan, 2008). Die gesamte US-Elektrizität beträgt 3.600 TWh/y, also folgt aus der Behauptung eine Energiedichte pro Landfläche von 18 W/m². Diese Technologie wird unter dem Namen *Compact Linear Fresnel Reflector* (Mills and Morrison, 2000; Mills et al., 2004; Mills and Morgan, 2008) beschrieben. Die Firma Ausra bevorzugt statt *Concentrating Solar Power* (CSP) den Ausdruck *Solar Thermal Electricity* (STE); sie betonen den Vorteil der thermischen Lagerung im Vergleich mit konzentrierter Photovoltaik, wo es keine intrinsische Speichermöglichkeit gibt. Trieb and Knies (2004), große Verfechter der CSP-Technik, schätzen für die verschiedenen CSP-Technologien folgende Leistungsdichten pro Landfläche ab: Parabolwannen, 14–19 W/m²; Linear Fresnel Collector, 19–28 W/m²; Turm mit Heliostaten, 9–14 W/m²; Stirling-Spiegel, 9–14 W/m². In Europa gibt es drei Demonstrationskraftwerke für CSP: Andasol – mit Parabolwannen; Solúcar PS10, ein Turm nahe Sevilla; und Solartres, ein Turm, der geschmolzenes Salz zur Wärmespeicherung benutzt. Das Parabolwannen-System von Andasol (Fig.25.4) soll 10 W/m² erzeugen. Solúcars „11 MW“-Solarturm hat 624 Spiegel zu je 121 m². Diese Spiegel konzentrieren das Sonnenlicht zu einer Strahlungsdichte von bis zu 650 kW/m². Der Empfänger im Turm erhält in der Spitze eine Leistung von 55 MW. Das Kraftwerk kann 20 MWh thermische Energie speichern, was die Elektrizitäts-Produktion über 50 Minuten Bewölkung aufrechterhält. Es sollte 24,2 GWh Strom pro Jahr produzieren, auf 55 Hektar. Das ergibt eine mittlere Leistung pro Landfläche von 5 W/m². (Quelle: Abengoa Annual Report 2003.) Solartres wird 142 Hektar belegen und soll 96,4 GWh pro Jahr liefern; das entspricht einer Leistungsdichte von 8 W/m². Andasol und Solartres werden beide im Normalbetrieb mit Erdgas betrieben.



Fig.25.12: Zwei Ingenieure bauen ein eSolar-Kraftwerk mit Heliostaten (Spiegel, die sich drehen und neigen können um der Sonne zu folgen) auf. esolar.com stellt mittelgroße Kraftwerke her: eine 33MW(peak) Anlage auf 64 Hektar. Das sind 51 W/m² (peak), in typischer Wüstenlage könnten, würde ich schätzen, etwa 25% davon als Dauerleistung geliefert werden: 13 W/m².

- 199 Man überträgt bereits mit HVDC Elektrizität über Strecken von 1000 km 179 HVDC is already used to transmit electricity over 1000-km distances in South Africa, China, America, Canada, Brazil, and Congo. Quellen: Asplund (2004), Bahrman and Johnson (2007). Weiterführende Literatur on HVDC: Carlsson (2002).
- 200 Der Leistungsverlust auf einer 3.500 km langen HVDC Leitung, einschließlich der Umwandlung von Wechsel- auf Gleichstrom und wieder zurück, liegt bei etwa 15%. 179 Losses on a 3500 km-long HVDC line, including conversion from AC to DC and back, would be about 15%. Quellen: Trieb and Knies (2004); van Voorthuysen (2008).
- 202 Nach Angaben des Herstellers Amonix hat diese Form der gebündelten Solarenergie eine Leistungsdichte pro Landfläche von 18 W/m². 182 According to Amonix, concentrating photovoltaics would have an average power per unit land area of 18 W/m². Die Annahmen von www.amonix.com sind: Die Linse transmittiert 85% des Lichts; 32% Zellen-Wirkungsgrad; 25% Kollektor-Wirkungsgrad und 10% zusätzlichen Verlust wegen Verschattung. Apertur/Land-Verhältnis ist 1/3. Normale direkte Einstrahlung: 2222 kWh/m²/Jahr. Sie erwarten pro kW Peak-Kapazität 2000 kWh/y Output (im Mittel 0,23 kW). Ein Kraftwerk mit 1 GW Peak Kapazität würde 12 km² Land erfordern und 2000 GWh pro Jahr liefern. Das sind 18 W/m².
- 202 Ein Thermikkraftwerk – Solar chimneys. Quellen: Schlaich J (2001); Schlaich et al. (2005); Dennis (2006), www.enviromission.com.au, www.solarairpower.com.
- 203 Islands mittlere Elektrizitätsproduktion ist 1,1 GW 183 Iceland's average geothermal electricity generation is just 0.3 GW. Iceland's average electricity production is 1.1 GW. Dies sind die Werte von 2006: 7,3 TWh Wasserkraft und 2,6 TWh Elektrizität aus Geothermie, mit Nennkapazitäten von 1.16 GW bzw. 0.42 GW. Quelle: Orkustofnun National Energy Authority [www.os.is/page/energystatistics].

Weiterführende Literatur:

European Commission (2007), German Aerospace Center (DLR) Institute of Technical Thermodynamics Section Systems Analysis and Technology Assessment (2006), www.solarmillennium.de.



Fig.25.13: Eine HVDC Anlage in China. Foto: ABB

26. Schwankungen und Speicherung

The wind, as a direct motive power, is wholly inapplicable to a system of machine labour, for during a calm season the whole business of the country would be thrown out of gear. Before the era of steamengines, windmills were tried for draining mines; but though they were powerful machines, they were very irregular, so that in a long tract of calm weather the mines were drowned, and all the workmen thrown idle.

William Stanley Jevons, 1865³²

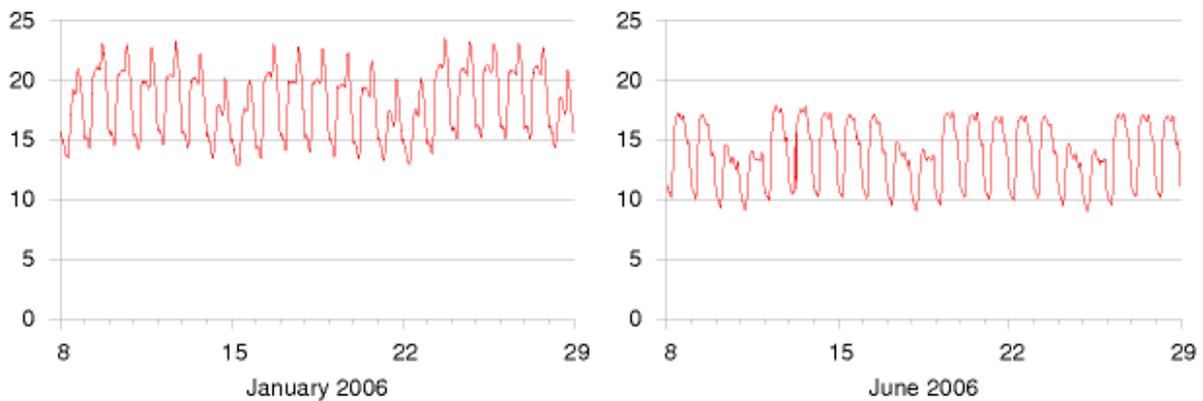


Fig.26.1: Elektrizitätsbedarf Großbritanniens (in kWh/d pro Person) während dreier Wochen im Winter und im Sommer 2006. Die Spitzen im Januar sind jeweils um 18 Uhr abends. Die fünftägige Arbeitswoche sieht man im Sommer und im Winter. (Wenn Sie den nationalen Bedarf in GW ableiten wollen, erinnern Sie sich, dass das obere Ende der dargestellten Skala, 24 kWh/d pro Person, äquivalent mit 60 GW in Großbritannien ist.)

Wenn wir alle fossilen Brennstoffe weglassen und ausschließlich Erneuerbare, oder ausschließlich Atomkraft, oder einen Mix dieser beiden verwenden, könnten wir ein Problem haben. Die meisten der großen Erneuerbaren sind nicht beliebig an- und ausschaltbar. Wenn der Wind bläst und die Sonne herauskommt, dann ist Energie da, die man sich nehmen kann, doch nach vielleicht zwei Stunden ist sie wieder weg. Auch Kernkraftwerke sind normalerweise nicht dafür ausgelegt, beliebig an- und abgeschaltet zu werden. Normalerweise laufen sie durch und ihre abgegebene Leistung kann allenfalls auf einer Zeitskala von Stunden hoch- und runtergeregelt werden. Das ist ein Problem, denn im Stromversorgungsnetz muss Verbrauch und Produktion zu jeder Zeit gleich sein. Das Stromnetz kann keine Energie *speichern*. Damit ein Energieplan jede Minute an jedem Tag aufgeht, brauchen wir etwas, das *einfach an- und abzuschalten ist*. Es wird gemeinhin angenommen, dass dieses leicht an- und abschaltbare Etwas eine Energiequelle sein sollte, die an- und abgeschaltet wird, um die Fluktuationen der Versorgung relativ zum Verbrauch zu kompensieren (etwa ein Erdgaskraftwerk!) Doch ein anderer genauso effektiver Weg zum Angleichen von Versorgung und Verbrauch wäre es, einen leicht an- und abschaltbaren *Verbraucher* für die Leistung zu haben – eine Energie-Senke, die beim geringsten Anlass an- oder ausgeschaltet werden kann.

³² „Der Wind als Quelle der Bewegung ist völlig unpassend für ein maschinelles Fertigungssystem, denn während einer windstillen Zeit käme das gesamte Geschäft des Landes zum Erliegen. Vor der Ära der Dampfmaschine wurden Windmühlen verwendet, um Bergwerke zu entwässern; zwar waren dies kräftige Maschinen, doch sie arbeiteten sehr unregelmäßig, so dass bei windstillem Wetter die Bergwerke überflutet wurden und die Arbeiter untätig herumstanden.“

In jedem Fall muss das leicht ein- und ausschaltbare Etwas ein *großes* Etwas sein, denn die Schwankungen im Energiebedarf sind hoch (Fig.26.1). Manchmal schwankt der Bedarf signifikant auf einer Zeitskala von wenigen Minuten. Dieses Kapitel erklärt, wie man mit den Fluktuationen in der Versorgung und in der Nachfrage umgehen kann, ohne fossile Brennstoffe zu benutzen.

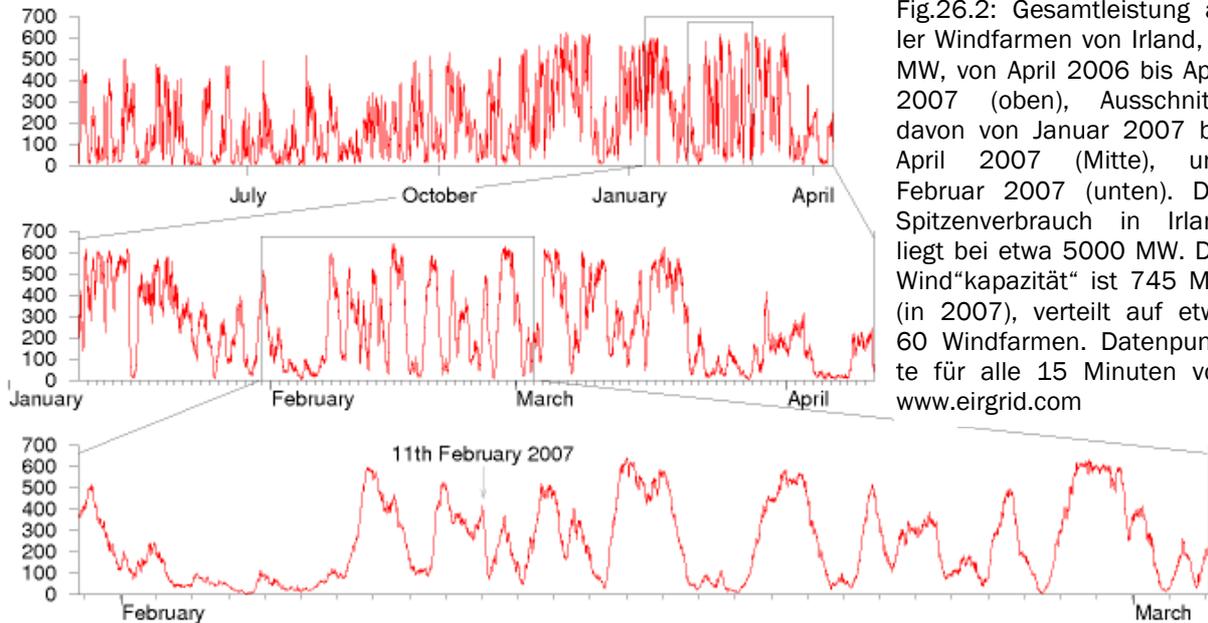


Fig.26.2: Gesamtleistung aller Windfarmen von Irland, in MW, von April 2006 bis April 2007 (oben), Ausschnitte davon von Januar 2007 bis April 2007 (Mitte), und Februar 2007 (unten). Der Spitzenverbrauch in Irland liegt bei etwa 5000 MW. Die Windkapazität ist 745 MW (in 2007), verteilt auf etwa 60 Windfarmen. Datenpunkte für alle 15 Minuten von www.eirgrid.com

Wie viel schwanken Erneuerbare?

Wie sehr wir die Erneuerbaren auch lieben, wir dürfen uns nicht über die Tatsache hinwegtäuschen, dass der Wind schwankt.

Kritiker der Windkraft sagen: „Windkraft ist intermittent³³ und unvorhersagbar, deshalb kann sie keinen Beitrag zur Versorgungssicherheit leisten; wenn wir riesige Windfarmen bauen, brauchen wir ebensoviel fossile Wärmekraftwerke, damit wir bei Flaute Ersatz haben.“ Schlagzeilen wie „Rückgang des Windes löst in Texas Stromnotstand aus“ stärken diesen Standpunkt. Windkraftbefürworter spielen das Problem herunter: „Keine Sorge - einzelne Windfarmen mögen intermittent sein, aber zusammengenommen ist die *Summe* der Windkraft aus verschiedenen Gegenden weil weniger intermittent.“

Schauen wir auf die realen Zahlen, um einen objektiven Standpunkt zu finden. Fig.26.2 zeigt den summierten Output aller Windfarmen der Republik Irland von April 2006 bis April 2007. Sicherlich ist Wind intermittent, auch wenn wir viele über ein ganzes Land verteilte Turbinen aufsummieren. England ist etwas größer als Irland, doch das Problem bleibt das gleiche. Zwischen Oktober 2006 und Februar 2007 gab es 17 Tage, an denen der Output aller 1632 englischer Windmühlen unter 10% ihrer Nennkapazität blieb. Darunter waren fünf Tage mit einem Output von weniger als 5% der Nennkapazität und einer mit nur 2%.

Lassen Sie uns die Fluktuationen der landesweiten Windkraft quantifizieren. Die zwei Aspekte sind kurzzeitige Schwankungen und langandauernde Flaute. Lassen Sie uns die schnellste kurzzeitige Veränderung in einem Monat der Island-Daten suchen. Am 11.

³³ Der Begriff „intermittent“ beschreibt ursprünglich das Verhalten nichtlinearer dynamischer Systeme beim Übergang in einen chaotischen Zustand. Im Zusammenhang mit Energiequellen wird er auch zur Beschreibung des schwankenden und unregelmäßigen Verhaltens, Intermittenz als qualitatives Maß für die Größe dieser unregelmäßigen Schwankungen verwendet.

Februar 2007 fiel die irische Windleistung stetig von 415 MW um Mitternacht auf 79 MW um 4 Uhr früh. Das ist eine Änderungsrate von 84 MW pro Stunde für eine landesweite Kapazität von 745 MW. (Mit Änderungsrate meine ich die Rate, mit der die abgegebene Leistung ansteigt oder abfällt – die Steigung des Graphen am 11. Februar.) OK: Wenn wir die britische Windenergie auf 33 GW hoch skalieren (so dass sie 10 GW im Mittel liefern kann), können wir gelegentliche Änderungsraten von

$$84 \text{ MW/h} \times \frac{33.000 \text{ MW}}{745 \text{ MW}} = 3.700 \text{ MW/h}$$

erwarten, wenn England wie Irland ist.³⁴ Wir müssen also entweder Ersatz für die Windkraft mit derselben Rate von 3,7 GW pro Stunde *hochfahren* können – das sind, etwa, vier AKWs von Null auf hundert jede Stunde – *oder* wir müssen in der Lage sein, unseren *Verbrauch* um 3,7 GW pro Stunde zu *reduzieren*.

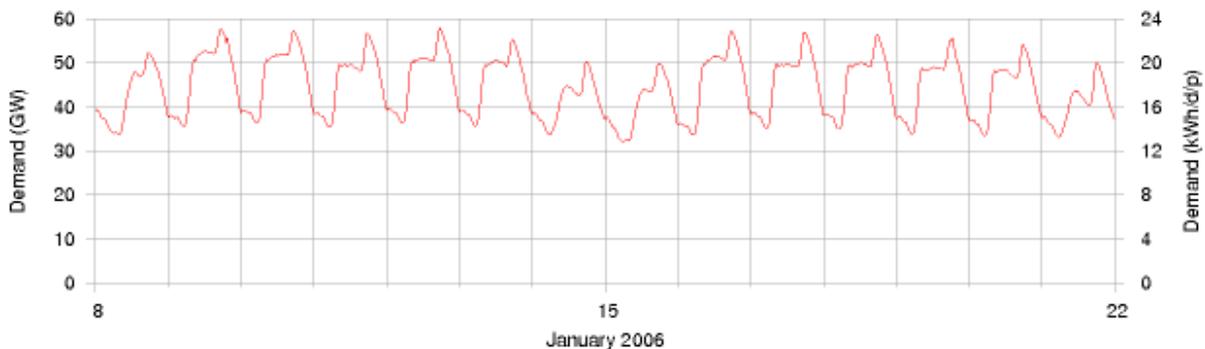


Fig.26.3: Elektrizitätsbedarf in Großbritannien über zwei Wochen im Winter 2006. Die linke und rechte Skala zeigen den Bedarf jeweils in nationalen Einheiten (GWh) und in personalisierten Einheiten (kWh/d pro Person). Dies sind dieselben Daten wie in Fig.26.1.

Können solch windige Anforderungen überhaupt erfüllt werden? Für die Antwort dieser Frage müssen wir etwas näher über „Gigawatt“ sprechen. Gigawatt sind große, landesweite Einheiten für Leistung. Sie sind für ein Land, was eine Kilowattstunde-pro-Tag für den Einzelnen ist: eine nette passende Größe. Der mittlere Energieverbrauch Englands ist etwa 40 GW. Wir können diesen nationalen Verbrauch mit dem persönlichen Verbrauch in Relation setzen: 1 kWh/d pro Person ist äquivalent mit 2,5 GW national. Wenn jeder täglich 16 kWh Elektrizität verbraucht, ist der nationale Energiebedarf 40 GW.

Ist eine nationale Änderungsrate von **4 GW pro Stunde** völlig außerhalb der menschlichen Erfahrung? Nein. Jeden morgen, wie Fig.26.3. zeigt, steigt der britische Verbrauch um 13 GW von 6:30 Uhr bis 8:30 Uhr. Das ist eine Veränderungsrate von **6,5 GW pro Stunde**. Unsere Versorgungsingenieure sind also täglich mit Änderungsraten von mehr als 4 GW pro Stunde im nationalen Netz konfrontiert. Eine mögliche zusätzliche Änderungsrate um 4 GW pro Stunde durch plötzliche Windveränderungen ist kein vernünftiger Grund, die Idee landesweiter Windfarmen zu verwerfen. Sie ist ein Problem,

³⁴ Dies gilt, wenn die Ursachen der Schwankungen landesweit korreliert sind, etwa abhängig von der Großwetterlage. Überlagern sich dagegen lokale, unabhängige Schwankungen, ist eine korrektere Abschätzung, mit der Quadratwurzel des Kapazitätsverhältnisses zu skalieren, also $84\text{MW/h} \times \sqrt{(33.000/745)} = 560 \text{ MW/h}$. Üblicherweise werden tatsächliche Superpositionen Elemente beider Aspekte beinhalten (also Schwankungen sowohl durch korrelierte als auch durch unkorrelierte Ereignisse ausgelöst sein) und der real auftretende Wert zwischen diesen beiden berechneten Extremen liegen. Für die weiteren Abschätzungen wird vom oberen Grenzwert ausgegangen.

vergleichbar mit den Problemen, die die Ingenieure bereits gelöst haben. Wir müssen einfach herausfinden, wie wir den dauernd veränderlichen Verbrauch und das dauernd veränderliche Angebot aufeinander abstimmen ohne fossile Brennstoffe. Ich sage nicht, dass dieses Problem schon gelöst wäre – nur dass es ein Problem von der selben Größenordnung wie andere, bereits gelöste, Probleme ist.

OK, bevor wir nach Lösungen suchen, müssen wir das andere Problem des Windes lösen: langanhaltende Flauten. Anfang Februar 2007 hatte Irland eine landweite Flaute, die fünf Tage dauerte. Das war nichts Ungewöhnliches, wie Sie in Fig.26.2 sehen können. Flauten von zwei oder drei Tagen kommen mehrmals jedes Jahr vor.

Es gibt zwei Möglichkeiten, Flauten zu überbrücken. Entweder können wir Energie vor der Flaute irgendwo speichern, oder wir müssen während der gesamten Flaute den Bedarf reduzieren. (Oder ein Mix der beiden.) Wenn wir 33GW Windturbinen haben, die im Mittel 10GW Leistung liefern, dann ist die Energiemenge, die wir entweder vorher speichern oder währenddessen einsparen müssen bei einer 5-tägigen Flaute

$$10 \text{ GW} \times (5 \times 24 \text{ h}) = 1200 \text{ GWh}$$

(Die Gigawattstunde (GWh) ist die griffige Energieeinheit für Nationen. Englands Energieverbrauch ist etwa 1000 GWh pro Tag.)

Um diesen Wert zu personalisieren: Ein Energiespeicher von 1200 GWh für die Nation ist äquivalent zu einem Energiespeicher von 20 kWh pro Person. Ein solcher Energiespeicher würde der Nation erlauben, auf 10GW über fünf Tage zu verzichten; oder äquivalent jedem einzelnen, auf 4 kWh Elektrizität pro Tag über fünf Tage.

Der Umgang mit Flauten und Änderungsraten

Wir müssen zwei Probleme lösen – Flauten (lange Perioden mit geringer Produktion erneuerbarer Energien), und Änderungsraten (kurzzeitige Schwankungen entweder im Verbrauch oder im Angebot). Wir quantifizierten diese Probleme unter der Annahme, dass England 33GW Windkraftanlagen hätte. Um Flauten in den Griff zu bekommen, müssen wir größenordnungsmäßig 1.200 GWh Energie (20 kWh pro Person) speichern. Die Änderungsrate, mit der wir zurecht kommen müssen, liegt bei **6,5 GW pro Stunde** (oder 0,1 kW pro Stunde pro Person).

Es gibt zwei Lösungen, die wir beide hoch skalieren könnten um diese Probleme zu lösen. Die erste Lösung ist zentralisiert, die zweite dezentral. Die erste Lösung speichert die Energie, und wird mit Schwankungen fertig, indem sie eine aus diesem Speicher gespeiste Quelle an- oder ausschaltet. Die zweite arbeitet mit dem An- oder Abschalten eines Teils des Verbrauchs.

Die erste Lösung sind Pumpspeicher-Kraftwerke. Die zweite benutzt die Batterien der Elektrofahrzeuge, die wir in Kapitel 20 diskutierten. Bevor ich diese Lösungen beschreibe, möchte ich noch einige alternative Möglichkeiten zum Umgang mit den Änderungsraten vorstellen.

Andere versorgungsseitige Maßnahmen zur Schwankungsanpassung

Manche Erneuerbare sind an- und abschaltbar. Hätten wir eine große Menge erneuerbare Leistung, die wir einfach an- oder ausschalten könnten, würden all die Probleme dieses Kapitels verschwinden. Länder wie Norwegen oder Schweden haben große und tiefe Wasserspeicher mit Kraftwerken, die sie an- oder ausschalten können. Wie könnten die Optionen für England aussehen?

Erstens, England könnte eine große Anzahl Müll- und Biomasse-Heizkraftwerke haben, die die Rolle der jetzigen Heizkraftwerke mit fossilen Brennstoffen übernehmen.

Würden diese Kraftwerke an- und abschaltbar betrieben, hätte das Kosten, wie sie auch konventionelle Heizkraftwerke haben, die nur Teilzeit arbeiten: Ihre Generatoren stehen teils still, teils arbeiten sie doppelt hart; und die meisten Generatoren sind dabei weniger effizient als wenn sie gleichmäßig arbeiten. OK, abgesehen von den Kosten, die entscheidende Frage ist, wie groß unsere an- und abschaltbaren Ressourcen denn wären. Würden wir all unseren Hausmüll verbrennen, und dazu dieselbe Menge an landwirtschaftlichem Abfall, wäre die mittlere Leistung etwa 3 GW. Würden wir nun Anlagen für die doppelte Leistung bauen, also Verbrennungsanlagen für 6 GW installieren mit der Planvorgabe, sie nur in der Hälfte der Zeit in Betrieb zu haben, könnten sie 6 GW in Zeiten hoher Anforderung liefern und null dazwischen. Diese Heizkraftwerke könnten so gebaut werden, dass sie innerhalb einer Stunde an- und ausgeschaltet werden können und so Änderungsraten von 6 GW pro Stunde auffangen – doch nur bis zu einem Maximum der Schwankungshöhe von 6 GW! Das ist ein hilfreicher Beitrag, doch nicht genug Schwankungshöhe, wenn wir mit Fluktuationen von 33 GW Wind zu tun haben.

Wie steht es mit der Wasserkraft? Englands Wasserkraftwerke haben einen Load-Faktor von 20%, also haben sie sicherlich Potenzial an- und abgeschaltet zu werden. Zudem hat Wasserkraft die nette Eigenschaft, sehr schnell an- und abschaltbar zu sein, Glendoe, ein neues Wasserkraftwerk mit 100 MW Kapazität, wird beispielsweise von aus zu an in 30 Sekunden schaltbar sein. Das ist eine Änderungsrate von 12 GW pro Stunde mit nur einem Kraftwerk! Ein ausreichend großer Park an Wasserkraftwerken könnte also die Schwankungen eines enormen Windparks auffangen. Die Kapazität der derzeitigen Wasserkraftwerke Englands ist jedoch nicht groß genug, um einen Beitrag zu unserem Schwankungsproblem zu leisten (wenn wir mit schnellen Schwankungen von, sagen wir, 10 oder 33 GW Windkraft klarkommen wollen). Die Gesamtkapazität britischer Wasserkraft liegt nur bei 1,5 GW.

Einfach andere Erneuerbare ein- und auszuschalten ist also für England kein gangbarer Weg. Wir brauchen andere Lösungen.

Pumpspeicher-Kraftwerke

Pumpspeicher nutzen billige Elektrizität, um Wasser von einem tiefergelegenen See in einen höhergelegenen See zu pumpen, und generieren dann wieder Elektrizität, wenn es sich lohnt. Sie benutzen dabei Turbinen genau wie die in Wasserkraftwerken.

England hat vier Pumpspeicher, die 30 GWh speichern können (Tabelle 26.4, Fig.26.6). Sie werden typischerweise eingesetzt, um übrige Elektrizität in der Nacht zu speichern um sie dann tagsüber zurückzuspeisen, insbesondere zu Zeiten von Spitzenverbrauch – ein profitables Geschäft, wie Fig.26.5 zeigt. Das Dinorwig-Kraftwerk – eine beeindruckende Kathedrale in einem Berg in Snowdonia – spielt so eine Sicherheitsrolle: es hat genug Power, um das nationale Netz nach einem Totalausfall wieder zu starten. Dinorwig kann einschalten, von 0 auf 1,3 GW Leistung, in 12 Sekunden.

Speicherwerk	Leistung (GW)	Höhe (m)	Volumen (Mio m ³)	gespeicherte Energie (GWh)
Ffestiniog	0,36	320–295	1,7	1,3
Cruachan	0,40	365–334	11,3	10
Foyers	0,30	178–172	13,6	6,3
Dinorwig	1,80	542–494	6,7	9,1

Tabelle 26.4: Pumpspeicherwerke in England. Die maximal speicherbare Energie ist etwa 30 GWh.

Dinorwig ist die Königin unserer Anlagen. Lassen Sie uns ihre Lebensgeschichte ansehen. Die gesamte Energie, die in Dinorwig gespeichert werden kann, ist 9 GWh. Sein oberer See ist etwa 500 m über dem unteren, und das Arbeitsvolumen von 7 Millionen m³ fließt mit maximal 390 m³/s, was eine Energieabgabe von 1,7 GW für 5 Stunden erlaubt. Der Anlagenwirkungsgrad (Effizienz) ist 75%.

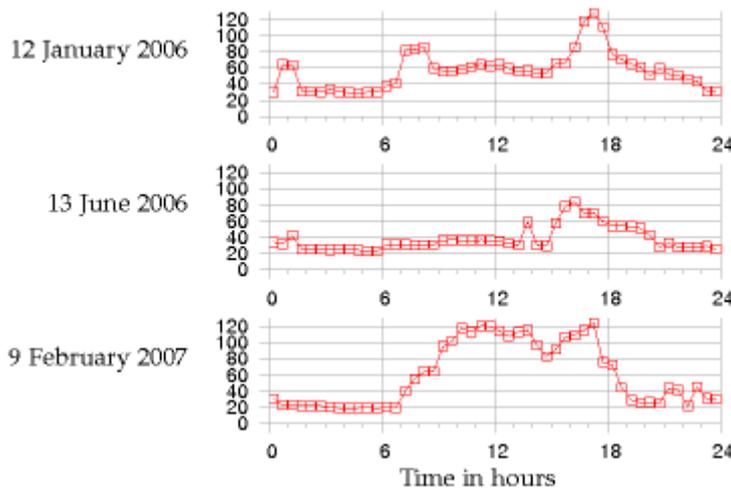


Fig.26.5: Wie sich Pumpspeicherwerke selbst finanzieren. Strompreise in £ pro MWh, an drei Tagen in 2006 und 2007.

Werden alle vier Pumpspeicherkraftwerke gleichzeitig eingeschaltet, liefern sie 2,8 GW. Sie können extrem schnell eingeschaltet werden und so auf jede denkbare Änderungsrate reagieren, die durch Verbrauchsschwankungen oder Windfluktuationen auftreten kann. Doch reicht die Kapazität von 2,8 GW nicht aus, um 10 GW oder 33 GW Windenergie zu ersetzen, wenn sie plötzlich verloren geht. Und auch die gesamte gespeicherte Energie (30 GWh) ist weit entfernt von den zur Überbrückung einer größeren Flaute erforderlichen 1200 GWh. Können Pumpspeicher ausgebaut werden? Können wir uns vorstellen, das gesamte Flauteproblem über Pumpspeicher allein zu lösen?



Fig.26.6: Llyn Stwlan, der obere Speichersee des Ffestiniog Pumpspeicherwerks in Nord-Wales. Gespeicherte Energie: 1,3 GWh. Foto von Adrian Pingstone

Können wir 1200 GWh speichern?

Wir interessieren uns für den Aufbau eines viel größeren Speichersystems, das 1200 GWh speichern kann (etwa 130mal mehr als in Dinorwig). Und wir hätten gerne eine Kapazität von 20 GW – um die 10mal höher als Dinorwig. So sieht die Pumpspeicherlösung aus: Wir hätten etwa 12 neue Anlagen zu bauen, jede mit 100 GWh – also 10mal mehr Energie als in Dinorwig. Die Pumpen und Generatoren an jeder Anlage wären etwa mit denen von Dinorwig vergleichbar.

Unter der Annahme, die Generatoren seien 90% effizient, stellt Tabelle 26.7 einige Möglichkeiten mit verschiedenen Höhendifferenzen vor, wie man 100 GWh speichern kann. (Für die Physik hinter dieser Tabelle siehe die Anmerkungen am Ende dieses Kapitels)

Speichermöglichkeiten für 100 GWh		
Höhendiff. vom Oberwasser	Erforderliches Arbeitsvolumen (Mio m ³)	Beispiel f. Seegröße Fläche Tiefe
500m	80	2 km ² x 40m
500m	80	4 km ² x 20m
200m	200	5 km ² x 40m
200m	200	10 km ² x 20m
100m	400	10 km ² x 40m
100m	400	20 km ² x 20m

Tabelle 26.7: Pumpspeicher. Möglichkeiten 100 GWh zu speichern. Zum Vergleich mit Spalte 2: Das Arbeitsvolumen von Dinorwig ist 7 Millionen m³ und das Volumen von Lake Windermere 300 Millionen m³. Zum Vergleich mit Spalte 3: Rutland Water hat eine Fläche von 12,6 km², der Carron Valley Speicher ist 3,9 km². Der größte See Englands ist Loch Lemond mit 71 km².

Ist es plausibel, dass 12 solche Stellen gefunden werden könnten? Wir könnten sicher einige Anlagen wie Dinorwig allein in Snowdonia bauen. Tabelle 26.8 zeigt zwei Alternativen nahe Ffestiniog, wo zwei mit Dinorwig vergleichbare Anlagen gebaut hätten werden können. Diese Plätze wurden zusammen mit Dinorwig in den 1970ern erkundet, und Dinorwig wurde schließlich ausgewählt.

Ort	Leistung (GW)	Höhe (m)	Volumen (Mill. m ³)	gespeicherte Energie (GWh)
Bowydd	2,40	250	17,7	12,0
Croesor	1,35	310	8,0	6,7

Fig.26.8: Alternative Standorte für Pumpspeicherwerke in Snowdonia. An beiden Plätzen wäre das Unterwasser ein neuer künstlicher Stausee.

Pumpspeicher mit signifikant mehr Energiegehalt als Dinorwig könnten in Schottland gebaut werden, wenn man bestehende Wasserkraftwerke aufrüstet. Ein Kandidat würde Loch Sloy als oberen und Loch Lomond als unteren See verwenden. Es gibt bereits ein kleines Wasserkraftwerk, das die beiden Seen verbindet. Fig.26.9 zeigt diese Seen und die Seen Dinorwigs im gleichen Maßstab. Die Höhendifferenz zwischen Loch Sloy und Loch Lemond liegt bei etwa 270 m. Die Fläche von Loch Sloy ist etwa 1,5 km², und kann schon jetzt eine Energie von 20 GWh speichern. Würde man den Damm um 40 m erhöhen, kämen weitere 40 GWh hinzu. Der Wasserspiegel in Loch Lemond würde sich bei einem Zyklus um bis zu 0,8 m verschieben. Das ist weniger als die jahreszeitlichen Wasserspiegelschwankungen von Loch Lemond (2m).

Fig.26.10 zeigt 13 mögliche Plätze für Pumpspeicher in Schottland. (Die meisten davon haben bereits Wasserkraftwerke.) Wenn zehn von ihnen dasselbe Potenzial hätten, das ich soeben für Loch Sloy abgeschätzt habe, könnten wir 400 GWh speichern – ein Drittel der insgesamt 1200 GWh, die wir anstreben.

Wir könnten die Landkarte von Großbritannien nach weiteren Plätzen durchstöbern. Am besten wären Plätze nahe an Windfarmen. Eine Idee wäre, einen neuen künstlichen See in einem abschüssigen Tal zu erschaffen (am unteren Ende würde es durch einen Damm als Talsperre abgeschlossen) und das Meer als Unterwasser zu verwenden.

Denkt man noch weiter, jenseits von Seen und Staudämmen, könnte man sich vorstellen, eine Hälfte der Anlage in unterirdische Höhlen zu verlagern. Eine Pumpspeicherkammer einen Kilometer unter London wurde schon vorgeschlagen.

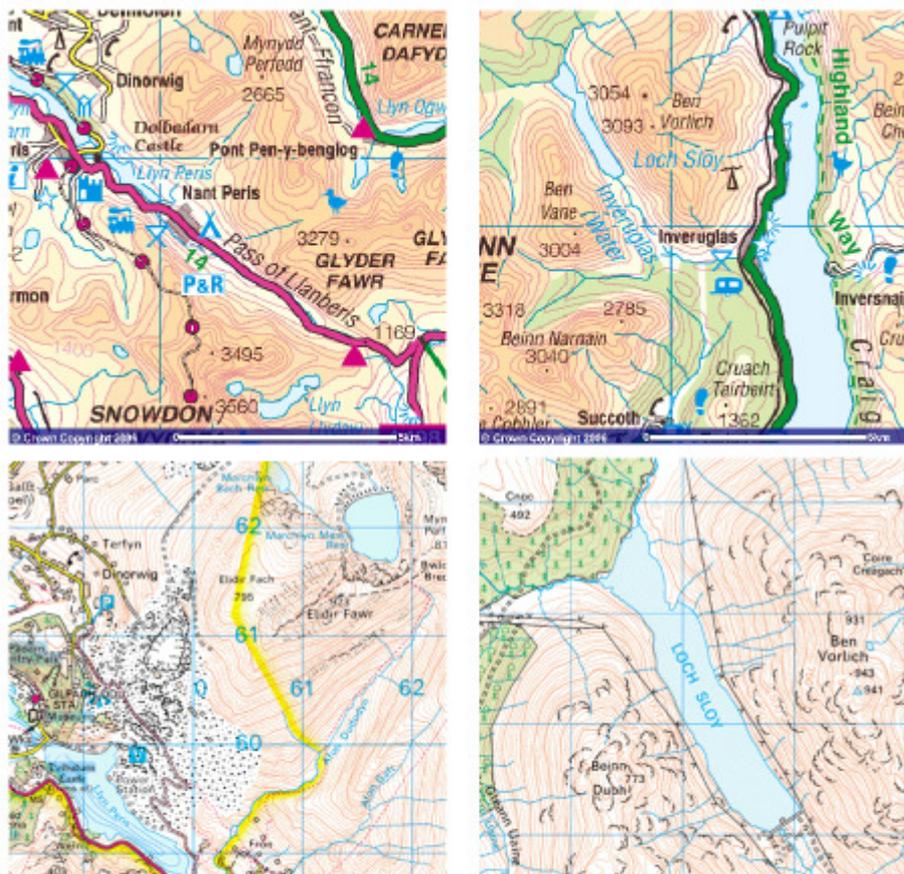


Fig.26.9: Dinorwig im Snowdonia Nationalpark im Vergleich mit Loch Sloy und Loch Lomond. Die oberen Karten zeigen 10km x 10km, in den unteren Karten bezeichnet das blaue Gitter 1-km-Abstände. Bilder erstellt aus Ordnance Survey's Get-a-map service www.ordnancesurvey.co.uk/getamap. Bild mit Genehmigung von Ordnance Survey. © Crown Copyright 2006.

Dinorwig is the home of a 9GWh storage system, using Marchlyn Mawr (615E,620N) and Llyn Peris (590E,598N) as its upper and lower reservoirs.

Loch Sloy illustrates the sort of location where a 40GWh storage system could be created.



Durch den Bau von Pumpspeichern, scheint es, könnten wir unsere Energiespeicherkapazität von 30 GWh auf 100 GWh oder vielleicht 400 GWh erhöhen. Die erhofften 1200 GWh erreichen wir aber nur zäh. Glücklicherweise gibt es eine andere Lösung.

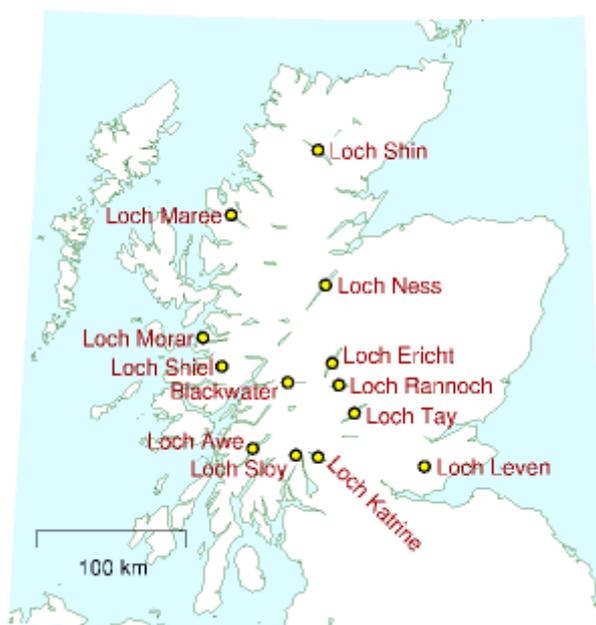


Fig.26.10: (links) Lochs in Schottland mit Potenzial für Pumpspeicher

Fig.26.11: (unten) Okinawa Pumpspeicherkraftwerk, dessen Unterwasser der Ozean ist. Gespeicherte Energie: 0,2 GWh. Foto mit freundlicher Genehmigung von J-Power www.ieahydro.org



Verbrauchsmanagement mit Elektrofahrzeugen

Um unsere Anforderungen zu rekapitulieren: Wir würden gerne 1200 GWh speichern oder einsparen können – das sind 20 kWh pro Person – und mit Versorgungsschwankungen von bis zu 33 GW klarkommen – das sind 0,5 kW pro Person. Diese Zahlen sind herrlich gleich groß wie die Energie- und Leistungsanforderungen von Elektrofahrzeugen. Die Elektroautos, die wir in Kapitel 20 sahen, hatten Energiespeicher zwischen 9 kWh und 53 kWh. Eine nationale Flotte von 30 Millionen Elektroautos würde eine Energie vergleichbar mit 20 kWh pro Person speichern können. Typische Batterieladegeräte ziehen eine Leistung von 2 bis 3 kW. Schaltet man die 30 Millionen Batterieladegeräte gleichzeitig, ändert das den Verbrauch um etwa 60 GW! Die mittlere Leistung, die man benötigt, um den gesamten nationalen Transport zu versorgen, wenn alles elektrisch lief, ist etwa 40 oder 50 GW. Es gibt also eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der Einführung von Elektroautos wie in Kapitel 20 vorgeschlagen und dem Aufbau von etwa 33 GW Windkraftanlagen, die 10 GW Leistung im Mittel abgeben.

Hier ist ein Weg, diese Übereinstimmung auszunutzen: Elektroautos könnten in intelligente Ladegeräte eingesteckt werden, zu Hause oder am Arbeitsplatz. Diese Ladegeräte kennen sowohl den Wert der Elektrizität als auch die Anforderungen der Fahrer (z.B. „Mein Auto muss voll sein bis Montag morgens um 7 Uhr.“) Das Ladegerät würde nun die Anforderungen des Benutzers sensibel erfüllen und Energie saugen wenn der Wind bläst und abschalten, wenn der Wind aufhört oder andere Verbrauchsformen zunehmen. Diese intelligenten Ladegeräte liefern einen sehr nützlichen Beitrag zur Netzstabilisierung, der natürlich finanziell vergütet werden könnte.

Eine besonders stabile Lösung wäre es, wenn die Autobatterien austauschbar wären. Stellen Sie sich vor, an eine Tankstelle zu fahren und ein Set neuer Batterien einzusetzen als Austausch für die leergefahrenen. Die Tankstelle wäre für das Wiederaufladen der Batterien verantwortlich und könnte das zu den perfekten Zeiten durchführen und die Ladegeräte so an- und ausschalten, dass Angebot und Verbrauch immer im Gleichgewicht sind. Austauschbare Batterien sind eine besonders stabile Lösung, weil Millionen von Austauschbatterien in den Lagern der Füllstationen stehen. Diese Reservebatterien gäben einen zusätzlichen Puffer für Windflauten. Einige Leute sagen: Horror! Wie könnte ich der Füllstation vertrauen, dass sie sorgfältig auf meine Batterie achtet?“ Gut, aber ebenso gut könnte man heute fragen: „Was wenn die Tankstellen Benzin mit Wasser verschneiden?“. Ich würde viel lieber ein Auto fahren, das von Profis gewartet wird als durch einen Muppet wie mich!

Lassen Sie mich unsere Optionen rekapitulieren. Wir können fluktuierenden Verbrauch und fluktuierendes Angebot ausgleichen, indem wir *Generatoren* an- und abschalten (Müllverbrennung und Wasserkraftwerke zum Beispiel), indem wir Energie irgendwo *speichern* und wiedereinspeisen, wenn sie gebraucht wird und indem wir den *Verbrauch* an- oder abschalten.

Die vielversprechendste dieser drei Optionen ist das an- und abschalten des Verbrauchs beim Laden von Elektrofahrzeugen. 30 Millionen Autos, jedes mit einer 40 kWh Batterie (einige davon könnten Wechselbatterien sein, die in den Lade-Tankstellen liegen) addieren sich zu 1200 GWh. Würde man zudem den Frachttransport elektrifizieren, wäre die gesamte Speicherkapazität natürlich entsprechend höher.

Die Windkraft und die Elektrofahrzeuge passen deshalb wunderbar zusammen. Wenn wir Elektrofahrzeuge und Windkraft mit derselben Rate aufstocken, etwa 3000 neue Fahrzeuge für 3MW Windturbinen, und wenn wir sicherstellen, dass die Ladesysteme für die Elektroautos intelligent gesteuert sind, würde diese Synergie ein gutes Stück zur

Lösung des Wind-Fluktuationsproblems beitragen. Wenn sich meine Vorhersage zu Wasserstoffautos als falsch erweist und sich Wasserstoffautos als die Niederenergie-Fahrzeuge der Zukunft herausstellen, dann könnte sich natürlich dieselbe Synergie ergeben, weil Wind-und-Wasserstoff genauso gut zusammenpasst wie Wind-und-Elektroauto. Die Windturbinen erzeugen Elektrizität; und wann immer Elektrizität ausreichend vorhanden ist, würde man Wasserstoff erzeugen und in Tanks lagern, um ihn später zu benutzen, ob in Fahrzeugen oder in anderen Anwendungen wie etwa der Glasproduktion.

Weitere Ideen zu Verbrauchsmanagement und Speicherung

Es gibt noch weitere Ideen zu diesem Themenfeld, die ich kurz anreißen will.

Die Anpassung der Produktionsrate in der industriellen Fertigung an die verfügbare Energiemenge ist nicht neu. Viele Aluminium produzierende Betriebe sitzen nahe an Wasserkraftwerken; je mehr es regnet, um so mehr Aluminium wird produziert. Wo immer Energie zur Produktion von lagerbaren Gütern verwendet wird gibt es ein Potenzial, den Energiebedarf intelligent an- und abzuschalten. Meerwasserentsalzung durch reverse Osmose etwa (Siehe Seite 106) ist ein Haupt-Energieverbraucher in vielen Ländern (allerdings nicht in England). Ein anderes lagerbares Gut ist Wärme. Wenn wir, wie in Kapitel 21 angedacht, Gebäudeheizungen elektrifizieren, dann schafft auch das Potenzial für leicht an- und abschaltbaren Elektrizitätsverbrauch im Stromnetz. Gut isolierte Gebäude halten die Wärme für viele Stunden und haben daher eine gewisse Flexibilität, zu welcher Zeit sie heizen. Zudem kann man große thermische Reservoirs in den Gebäuden anlegen, und durch Wärmepumpen in Zeiten reichen Stromangebots Wärme in diese oder aus diesen Reservoirs zu pumpen; und dann durch einen zweiten Satz Wärmepumpen die Wärme oder Kälte bei Bedarf an die entsprechenden Plätze im Gebäude verteilen.

Den Elektrizitätsbedarf automatisch zu kontrollieren wäre nicht sehr schwer. Das einfachste wäre, wenn Geräte wie Kühlschränke oder Gefriertruhen auf die Frequenz der Spannungsversorgung sensitiv wären. Gibt es Stromknappheit im Netz, fällt die Frequenz unter den Standardwert von 50 Hz, liegt Energieüberschuss vor, erhöht sich die Frequenz über 50 Hz. (Es ist wie bei einem Fahrraddynamo: Wenn das Licht an ist muss man härter treten, um die zusätzliche Leistung zu bringen; tut man das nicht, wird das Fahrrad ein bisschen langsamer.) Kühlschränke könnten so modifiziert werden, dass sie ihren Thermostat ein kleines Stück nach oben oder unten drehen in Abhängigkeit von der Netzfrequenz, so dass sie, ohne natürlich die Temperatur Ihrer Butter zu gefährden, dazu neigen, Strom nur dann aus dem Stromnetz zu ziehen, wenn es dieses damit stabilisiert.

Kann Bedarfssteuerung ein signifikantes Stück virtueller Speicherkapazität beitragen? Wie groß ist die Leistung der Kühlschränke einer Nation? Ein typischer Kühlschrank zieht etwa 18 W; schätzen wir die Anzahl der Kühlschränke auf 30 Millionen ab. Die Möglichkeit, alle Kühlschränke der Nation einige Minuten an- und abzuschalten wäre somit äquivalent zu 0,54 GW automatisch anpassungsfähiger Leistung. Das ist eine ganze Menge – über 1% des nationalen Gesamtverbrauchs – und ist etwa so groß wie der plötzliche Verbrauchsanstieg, der durch Leute verursacht wird, die in einem Akt religiöser Betrachtung (z.B. wenn sie die „Lindenstraße“ ansehen) gleichzeitig ihre Wasserkessel einschalten. Solche „TV Spitzen“ generieren typische Verbrauchsanstiege im Bereich von 0,6 bis 0,8 GW. Automatisches Schalten der Kühlschränke würde *beinahe* diese täglichen Spikes des gemeinschaftlichen Teewasserkochens ausgleichen. Die intelligenten Kühlschränke könnten in gleicher Weise kurzzeitige Schwankungen der Windleistung ausbügeln. Die TV-Spitzen in Verbindung mit den Allerheiligsten Akten der Betrachtung (beispielsweise wenn Deutschland gegen England spielt) können plötzliche

Anstiege von über 2 GW erzeugen. Bei solchen Gelegenheiten kann der Verbrauch und die Produktion nur im Gleichgewicht gehalten werden durch die volle Macht von Dinorwig.

Um den Netzmanagern, die laufend Kraftwerke an- und ausschalten um Verbrauch und Angebot anzugleichen, weitere Flexibilität zu geben, ist mit vielen industriellen Stromkunden vertraglich vereinbart, dass die Netzmanager den Verbrauch des Kunden mit sehr kurzer Vorwarnzeit an- und abschalten können. In Südafrika (wo häufig Stromknappheit herrscht) sind funkgesteuerte Verbrauchs-Managementsysteme in Hunderttausenden von Wohnungen installiert, die Klimaanlage und Wasserboiler steuern.

Dänemarks Lösung

So bekommt Dänemark die Intermittenz ihrer Windkraft in den Griff. Die Dänen zahlen effektiv für Wasserkraftwerke anderer Länder, um deren Speicherkapazität nutzen zu dürfen. Fast die gesamte dänische Windenergie wird an die europäischen Nachbarn exportiert, von denen einige Wasserkraft haben, die sie zurückfahren, um das dänische Windangebot wieder auszugleichen. Die ersparte Wasserkraft wird dann (zu einem höheren Preis) an die Dänen zurückverkauft, wenn dort hoher Verbrauch bei wenig Wind herrscht. Unter dem Strich steuert dänische Windkraft nützliche Energie bei, und das Gesamtsystem hat ausreichende Stabilität dank der Kapazität der Wasserkraftwerke.

Könnte England das dänische System übernehmen? Wir bräuchten direkte Verbindungsleitungen zu Ländern mit großen Mengen an- und abschaltbarer Wasserkraft-Kapazität; oder eine große Verbindung zum europaweiten Netz. Norwegen hat 27,5 GW Wasserkraft-Kapazität, Schweden etwa 16 GW und Island 1,8 GW. Eine 1,2 GW HVDC-Verbindung nach Norwegen wurde bereits 2003 vorgeschlagen, aber nicht gebaut. Eine Verbindung nach Holland – der BritNed Interkonnektor mit einer Kapazität von 1 GW – wird 2010 gebaut werden. Dänemarks Windkapazität ist 3,1 GW, und hat Verbindungen mit 1 GW nach Norwegen, 0,6 GW nach Schweden und 1,2 GW nach Deutschland, also insgesamt 2,8 GW Exportkapazität, ähnlich im Umfang wie seine Windkraft-Kapazität. Um seine überschüssige Windkraft auf die dänische Art zu exportieren, bräuchte England (mit angenommenen 33GW Windkapazität) Verbindungen in den Größenordnungen 10 GW nach Norwegen, 8 GW nach Schweden und 1 GW nach Island.

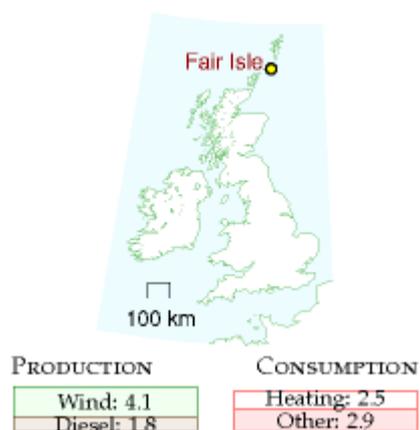


Fig.26.12: Stromproduktion und -verbrauch auf Fair Isle, 1995-96. Alle Zahlen in kWh/d pro Person. Die Produktion übersteigt den Verbrauch, weil 0,6 kWh/d pro Person weggeworfen werden.

Eine Lösung mit zwei Stromnetzen

Ein radikaler Ansatz ist, die Windkraft in ein separates zweites Netz zu speisen und damit Geräte zu betreiben, die keine verlässliche Stromzufuhr brauchen, etwa Heizungen oder Autobatterie-Ladegeräte. Seit über 25 Jahren (seit 1982) gibt es auf der

schottischen Insel Fair Isle (70 Einwohner, 5,6 km²) zwei Stromnetze, die die Leistung von zwei Windturbinen und bei Bedarf eines Dieselaggregates verteilen. Die Standard-Stromversorgung wird auf dem einen Netz sichergestellt, und Elektroheizungen werden über einen zweiten Kabelstrang beliefert. Das Heizungs-Stromnetz wird hauptsächlich durch überschüssige Windenergie gespeist, die andernfalls verloren wäre. Fernprogrammierbare frequenzsensitive Relais steuern die individuellen Wasserboiler und Speicheröfen in den Privathäusern der Gemeinde. Die Frequenz der Versorgungsleitung wird benutzt, um den Heizungen zu sagen, dass sie sich anschalten sollen. In der Tat gibt es sechs Frequenzkanäle pro Haushalt, wodurch das System sieben Netze emuliert. Fair Isle führte auch erfolgreiche Versuche mit einem kinetischen Energiespeichersystem (einem Schwungrad) durch, das Energieschwankungen der Windstärke auf einer Zeitskala von 20 Sekunden speichert.

Elektroautos als Generatoren

Wenn 30 Millionen Elektroautos bereit wäre, ihre Ladegeräte in Zeiten nationaler Energieknappheit umgekehrt laufen zu lassen und Energie ins Netz zurückzuspeisen, ergäbe das bei 2 kW pro Fahrzeug ein Gesamtvolumen von 60 GW – vergleichbar mit der Gesamtkapazität aller Elektrizitätswerke des Landes. Wenn nur jedes dritte Fahrzeug zum Zeitpunkt des Bedarfs verbunden und verfügbar wäre, würden sie sich immer noch zu einer potenziellen Quelle von 20 GW summieren. Würde jedes der Fahrzeuge eine Notfallabgabe von 2kWh leisten – was etwa 20% seiner Batterie-Ladekapazität entspräche – würde die gesamte Flotte so 20 GWh Energie liefern – doppelt so viel wie der Pumpspeicher Dinorwig.

Andere Speichertechnologien

Es gibt Möglichkeiten Energie zu speichern und viele Kriterien, nach denen man diese Lösungen beurteilen kann. Fig.26.13 zeigt drei der wichtigsten Kriterien: Energiedichte (wie viel Energie kann pro kg Speichermedium gespeichert werden), Effizienz (wie viel Energie erhält man pro eingebrachter Einheit wieder zurück) und Lebensdauer (wie viele Ladezyklen kann man durchführen, bis man das System erneuern muss). Andere wichtige Kriterien sind: die maximale Rate, mit der Energie in das und aus dem Speichersystem gepumpt werden kann, oft ausgedrückt in Leistung pro kg; die Zeitspanne wie lange die Energie im System verbleiben kann und natürlich Kosten und Sicherheit des Systems.

Schwungräder

Fig.26.15 zeigt ein Monster-Schwungrad, das kurze Leistungs-Bursts bis 0,4 GW in einer Experimentieranlage erzeugt. Es wiegt 800 t. Wenn es sich mit 225 Umdrehungen pro Minute dreht, speichert es 1000 kWh, seine Energiedichte ist also etwa 1 Wh pro kg. Ein Schwungrad-Energiespeicher in einem Rennauto kann 400 kJ (0,1 kWh) speichern und wiegt 24 kg (Seite 142). Das ist eine Energiedichte von 4,6 Wh/kg.

Hochgeschwindigkeits-Schwungräder aus Spezialmaterialien erreichen Energiedichten bis 100 Wh/kg.



Fig.26.15: eines der beiden Schwungräder an der Fusionsforschungsstätte Culham, in Bau. Foto EFDA-JET. www.jet.efda.org

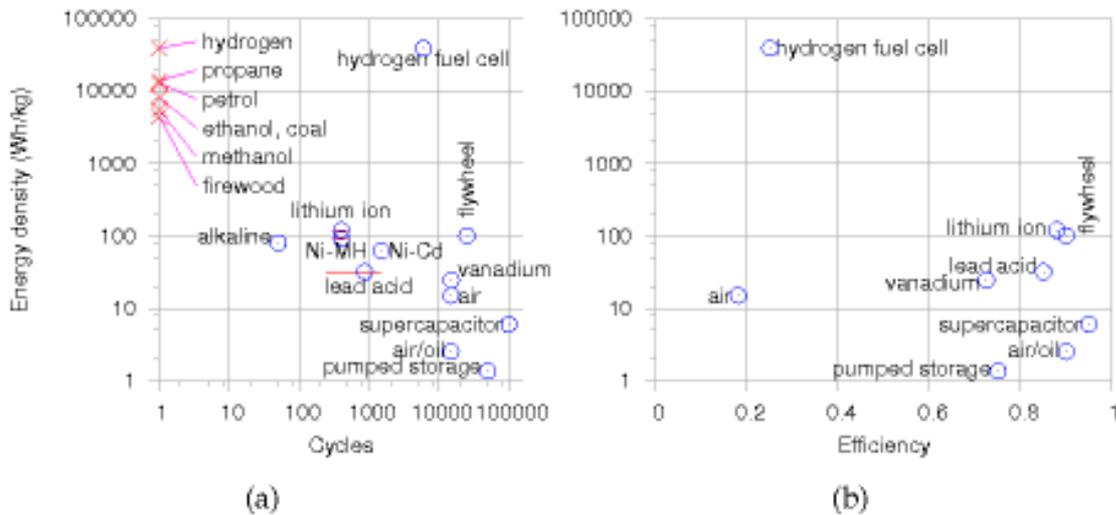


Fig.26.13: Einige Eigenschaften von Speichersystemen und Brennstoffen. (a) Energiedichte (in logarithmischer Skala) vs. Lebensdauer (Anzahl der Zyklen). (b) Energiedichte vs. Effizienz. Die Energiedichten berücksichtigen keine Masse für Behälter, außer bei Pressluft. Berücksichtigt man das Gewicht eines Kryotanks für Wasserstoff, reduziert sich die Energiedichte von Wasserstoff von 39.000 Wh/kg auf etwa 2.400 Wh/kg.

Brennstoff	Brennwert	
	(kWh/kg)	(MJ/l)
Propan	13,8	25,4
Benzin	13,0	34,7
Diesel (DERV)	12,7	37,9
Kerosin	12,8	37
Heizöl	12,8	37,3
Ethanol	8,2	23,4
Methanol	5,5	18,0
Bioethanol		21,6
Kohle	8,0	
Brennholz	4,4	
Wasserstoff	39,0	
Erdgas	14,85	0,04

Batterietyp	Energiedichte (Wh/kg)	Lebensdauer (Zyklen)
Nickel-Cadmium	45-80	1500
NiMH	60-120	300-500
Bleiakku	30-50	200-300
Lithium-Ionen	110-160	300-500
Li-Ionen-Polymer	100-130	300-500
wiederaufladbare Alkali-Batterie	80	50

Tabelle 26.14 (Mitte) Brennwerte (Energiedichten, pro kg und pro Liter) einiger Brennstoffe (in kWh pro kg und MJ pro Liter. (unten) Energiedichte einiger Batterien (in Wh pro kg). 1 kWh = 1000 Wh.

Superkondensatoren

Superkondensatoren sind geeignet, um kleine Mengen elektrischer Energie (bis zu 1kWh) zu speichern, wenn viele Operationszyklen erforderlich sind, und das Laden schnell gehen muss. Etwa beim regenerativen Bremsen von Fahrzeugen, die viele Starts und Stopps machen, sind Superkondensatoren den Batterien vorzuziehen. Sie können Superkondensatoren mit Energiedichten von 6 Wh/kg kaufen. Die US-Firma EESor bwehauptet, mit Barium-Titanat viel bessere Superkondensatoren herstellen zu können, mit Energiedichten von 280 Wh/kg.

Vanadium-Redox-Akkumulatoren

VRB Power Systems haben ein 12 MWh Speichersystem für die Sorne Hill Windfarm in Irland geliefert, deren aktuelle Kapazität „32 MW“ ist, und auf „39 MW“ erhöht werden soll (VRB steht für Vanadium-Redox-Batterie). Dieses Speichersystem ist eine große Flüssigbatterie, eine wiederaufladbare Redox-Speicherzelle, mit einigen Tanks voll Vanadium in verschiedenen chemischen Zuständen. Dieses Speichersystem kann den Output der Windfarm auf einer Zeitskala von Minuten glätten, doch die maximale Zeit, für die sie ein Drittel der Windfarm-Leistung während einer Flaute aufrechterhalten kann, ist eine Stunde.

Ein 1,5 MWh Vanadium-System kostet 480.000 \$ und belegt 70 m² Platz mit einer Masse von 107 Tonnen. Seine Lebensdauer liegt bei über 10.000 Zyklen. Es kann genauso schnell geladen wie entladen werden (im Unterschied zu Bleiakkus, die fünfmal langsamer aufgeladen werden müssen), seine Effizienz ist bei 70-75% für den Zyklus. Man braucht etwa 1 m³ 2-molares Vanadium in Schwefelsäure um 20 kWh zu speichern. (Das sind 20 Wh/kg.)

10 GW zu speichern erfordert also 500.000 m³ (170 Schwimmbäder) – etwa mit 2 m Tankhöhe auf 500m x 500m realisierbar.

Die Vanadiumtechnologie in die Größenordnungen von Pumpspeichern – 10 GWh – hochzuskalieren dürfte nennenswerten Einfluss auf den Vanadium-Weltmarkt haben, doch gibt es keine langfristige Knappheit von Vanadium. Die derzeitige weltweite Produktion von Vanadium ist 40.000 t pro Jahr. Ein 10GWh-System benötigt 36.000 t Vanadium, also etwa eine Jahresproduktion. Vanadium wird gegenwärtig als Nebenprodukt anderer Prozesse hergestellt, die gesamten Vanadiumreserven der Welt werden auf 63 Millionen Tonnen geschätzt.

„ökonomische“ Lösungen

In der heutigen Welt, die keine Kosten auf CO₂-Verschmutzung legt, ist die finanzielle Hürde, die ein Speichersystem nehmen muss, eine hässliche Alternative: Speicherung kann simuliert werden, indem man einfach ein zusätzliches Gasheizkraftwerk für zusätzlichen Verbrauch errichtet und überschüssige Energie in Heizgeräten verbrät.

Jahreszeitliche Schwankungen

Die langfristigsten Schwankungen im Bedarf und in der Versorgung sind die im Jahresverlauf. Die wichtigste davon ist der Verbrauch durch Gebäudeheizungen, der im Winter hochgeht. Der derzeitige britische Erdgasverbrauch variiert im Jahresverlauf von typischen mittleren 36 kWh/d/p im Juli und August bis zu einem Mittel von 72 kWh/d/p von Dezember bis Februar, mit Extremen von 30-80 kWh/d/p (Fig.26.16).

Einige Erneuerbare haben ebenfalls jahreszeitliche Schwankungen – Solarleistung ist im Sommer höher und Windkraft geringer.

Wie kann man durch diese sehr langzeitlichen Schwankungen kommen? Elektrofahrzeuge und Pumpspeicher können bei der erforderlichen Größenordnung nicht weiterhelfen. Eine nützliche Technologie ist dabei sicher die langfristige Speicherung von Wärme. Ein großer Fels oder ein großes Wassergefäß kann einen

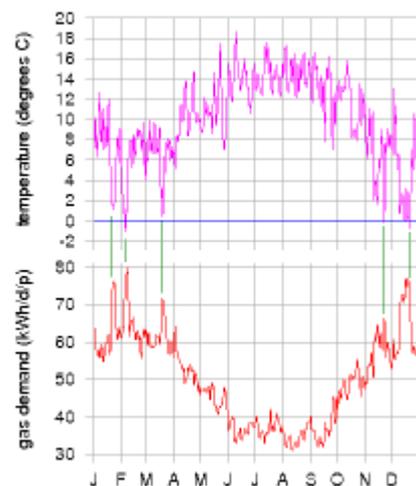


Fig.26.16: Gasverbrauch (unten) und Temperatur (oben) in England 2007

Wintervorrat Wärme für ein Gebäude speichern – Anhang E diskutiert diese Idee detaillierter. In den Niederlanden wird Sommerhitze von den Straßen in grundwasserführenden Schichten bis zum Winter gelagert und dann mit Wärmepumpen in die Gebäude geliefert [2wmuw7].

Anmerkungen

Seite

207 den summierten Output aller Windfarmen der Republik Irland 187The total output of the wind fleet of the Republic of Ireland. Data from eirgrid.com [2hxf6c].

207 „Rückgang des Windes löst in Texas Stromnotstand aus“ – “Loss of wind causes Texas power grid emergency”. [2I99ht] Actually, my reading of this news article is that this event, albeit unusual, was an example of normal power grid operation. The grid has industrial customers whose supply is interruptible, in the event of a mismatch between supply and demand. Wind output dropped by 1.4 GW at the same time that Texans’ demand increased by 4.4 GW, causing exactly such a mismatch between supply and demand. The interruptible supplies were interrupted. Everything worked as intended. Here is another example, where better power-system planning would have helped: “Spain wind power hits record, cut ordered.” [3x2kvv] Spain’s average electricity consumption is 31 GW. On Tuesday 4th March 2008, its wind generators were delivering 10 GW. “Spain’s power market has become particularly sensitive to fluctuations in wind.”

207 Windkraftbefürworter spielen das Problem herunter: „Keine Sorge - einzelne Windfarmen mögen intermittent sein, aber zusammengenommen ist die Summe der Windkraft aus verschiedenen Gegenden weil weniger intermittent.“ –Supporters of wind energy play down this problem: “Don’t worry – individual wind farms may be intermittent, but taken together, the sum of all wind farms is much less intermittent.” For an example, see the website yes2wind.com, which, on its page “debunking the myth that wind power isn’t reliable” asserts that “the variation in output from wind farms distributed around the country is scarcely noticeable.” www.yes2wind.com/intermittency_debunk.html

207 Sicherlich ist Wind intermittent, auch wenn wir viele über ein ganzes Land verteilte Turbinen aufsummieren –...wind is intermittent, even if we add up lots of turbines covering a whole country. The UK is a bit larger than Ireland, but the same problem holds there too. Source: Oswald et al. (2008).

210 Der Anlagenwirkungsgrad (Effizienz) ist 75%. 191Dinorwig’s pumped-storage efficiency is 75%. Figure 26.17 shows data. Further information about Dinorwig and the alternate sites for pumped storage: Baines et al. (1983, 1986).

212 Tabelle 26.7: 192Table 26.7. The working volume required, V , is computed from the height drop h as follows. If ε is the efficiency of potential energy to electricity conversion,

$$V = 100 \text{ GWh}/(\rho gh\varepsilon),$$

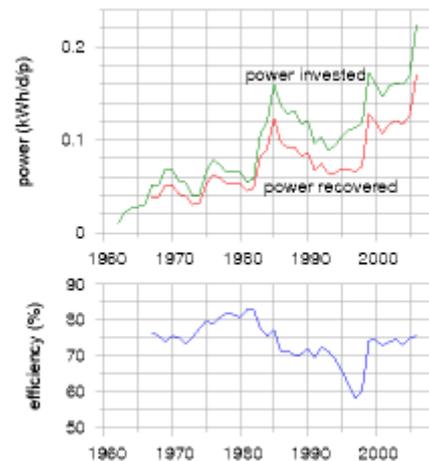


Fig.26.17: Effizienz der vier Pumpspeichersysteme in England

where ρ is the density of water and g is the acceleration of gravity. I assumed the generators have an efficiency of $\varepsilon = 0.9$.

212 **Tabelle 26.8:** 192 *Table 26.8, Alternative sites for pumped storage facilities.* The proposed upper reservoir for Bowydd was Llyn Newydd, grid reference SH 722 470; for Croesor: Llyn Cwm-y-Foel, SH 653 466.

212 Wenn zehn von ihnen dasselbe Potenzial hatten, das ich soeben für Loch Sloy abgeschätzt habe, könnten wir 400 GWh speichern 193 *If ten Scottish pumped storage facilities had the same potential as Loch Sloy, then we could store 400 GWh.* This rough estimate is backed up by a study by Strathclyde University [5o2xgu] which lists 14 sites having an estimated storage capacity of 514 GWh.

215 Kühlschränke könnten so modifiziert werden, dass sie ihren Thermostat nach oben oder unten drehen in Abhängigkeit von der Netzfrequenz 196 *Fridges can be modified to nudge their internal thermostats up and down . . . in response to the mains frequency.* [2n3pmb] Further links: Dynamic Demand www.dynamicdemand.co.uk; www.rltec.com; www.responsiveload.com.

216 In Südafrika (wo häufig Stromknappheit herrscht) sind funkgesteuerte Verbrauchers-Managementssysteme in Hunderttausenden von Wohnungen installiert 197 *In South Africa... demand-management systems are being installed.* Source: [2k8h4o]

216 Fast die gesamte dänische Windenergie wird an die europäischen Nachbarn exportiert –Almost all of Denmark's wind power is exported to its European neighbours. Source: Sharman (2005).

216 Seit über 25 Jahren gibt es auf der schottischen Insel Fair Isle zwei Stromnetze 198 *For over 25 years (since 1982), Fair Isle has had two electricity networks.* www.fairisle.org.uk/FIECo/ Wind speeds are between 3 m/s and 16 m/s most of the time; 7 m/s is the most probable speed.

218 **Fig.26.13:** 199 *Figure 26.13. Storage efficiencies.* Lithium-ion batteries: 88% efficient. Source: www.national.com/appinfo/power/files/swcap_eet.pdf Lead-acid batteries: 85–95%. Source: www.windsun.com/Batteries/Battery_FAQ.htm Compressed air storage: 18% efficient. Source: Lemofouet-Gatsi and Rufer (2005); Lemofouet-Gatsi (2006). See also Denholm et al. (2005).

Air/oil: hydraulic accumulators, as used for regenerative braking in trucks, are compressed-air storage devices that can be 90%-efficient round-trip and allow 70% of kinetic energy to be captured. Sources: Lemofouet-Gatsi (2006), [5cp27j].

218 **Tabelle 26.14:** –*Table 26.14.* Sources: Xtronics xtronics.com/reference/energy_density.htm; Battery University [2sxlyj]; flywheel information from Ruddell (2003). The latest batteries with highest energy density are lithium-sulphur and lithium-sulphide batteries, which have an energy density of 300 Wh/kg. Some disillusioned hydrogen-enthusiasts seem to be making their way up the periodic table and becoming boron-enthusiasts. Boron (assuming you will burn it to B₂O₃) has an energy density of 15 000Wh per kg, which is nice and high. But I imagine that my



Fig.26.18: Ein möglicher Standort für ein weiteres 7 GWh Pumpspeicherrwerk. Croesor Valley ist etwas links der Mitte, zwischen dem spitzen Gipfel (Cnicht) zur Linken und den breiteren Gipfeln (die Moelwyns) zur Rechten.

main concern about hydrogen will apply to boron too: that the production of the fuel (here, boron from boron oxide) will be inefficient in energy terms, and so will the combustion process.

- 219 **Vanadium-Redox-Batterie** 200*Vanadium flow batteries.* Sources: www.vrbpower.com; *Ireland wind farm* [ktd7a]; *charging rate* [627ced]; *worldwide production* [5fasl7].
- 220 **Sommerhitze von den Straßen in grundwasserführenden Schichten** 201... *summer heat from roads is stored in aquifers...* [2wmuw7].

27. Fünf Energiepläne für England

Wenn wir von unserer Sucht nach fossilen Brennstoffen loskommen wollen, brauchen wir einen Plan für unser grundsätzliches Vorgehen. Und der Plan muss aufgehen. Ein Plan braucht zudem ein politisches und ein finanzielles Konzept. Politik und Ökonomie sind nicht Bestandteil dieses Buches, deshalb beschreibe ich hier nur, wie die technische Seite eines Plans, der aufgeht, aussehen könnte.

Das sind meine Pläne, die aufgehen. In diesem Kapitel beschreibe ich fünf solche Pläne. Nehmen Sie bitte nicht einen dieser Pläne als „die vom Autor empfohlene Lösung“ heraus. Meine einzige Empfehlung ist

Stellen Sie sicher, dass Ihre Politik einen Plan enthält, der aufgeht!

Jeder Plan hat eine Verbrauchsseite und eine Produktionsseite: Wir müssen festlegen, wie viel Energie unser Land verbrauchen wird, und wie diese Energie produziert werden muss. Damit die Pläne nicht so viele Seiten lang werden, lege ich wieder das vereinfachte England zu Grunde, in dem Energie nur auf drei Arten verbraucht wird: Transport, Heizung und Elektrizität. Das ist eine drastische Vereinfachung, die Industrie, Landwirtschaft, Nahrung, Importe usw. vernachlässigt. Doch ich hoffe, es ist eine hilfreiche Vereinfachung, die uns erlaubt, alternative Pläne zu vergleichen und voneinander abzugrenzen innerhalb einer Minute. Beizeiten werden wir einen detaillierteren Plan brauchen, doch heute sind wir so weit von unserem Ziel entfernt, dass ich denke, eine vereinfachte Skizze ist der einfachste Weg, die Angelegenheiten zu erfassen.

Ich werde ein paar Pläne präsentieren, von denen ich denke, sie wären für England bis 2050 technisch machbar. Alle werden dieselbe Verbrauchsseite aufweisen. Ich betone nochmals, dass das nicht bedeutet, ich hielte dies für den korrekten Plan des Verbrauchs, oder für den einzigen Plan. Ich will Sie andererseits nicht mit einer ganzen Serie von Plänen überschütten. Nur auf der Produktionsseite beschreibe ich eine Bandbreite von Plänen, die einen unterschiedlichen Energiemix aus Erneuerbaren, „Clean Coal“ und Kernkraft haben.

Die derzeitige Situation

Die Ausgangssituation unseres vereinfachten Englands ist die folgende: Transport (von Menschen und Waren) braucht 40 kWh/d pro Person. Das meiste dieser Energie wird derzeit als Benzin, Diesel oder Kerosin konsumiert. Heizen (Luft- und Wassererwärmung) benötigt 40 kWh/d pro Person. Ein Großteil dieser Energie ist durch Erdgas abgedeckt. Die bereitgestellte Elektrizität beträgt 18 kWh/d/p und benutzt Brennstoff (hauptsächlich Kohle, Gas und Atomkraft) mit einem Energiegehalt von 45 kWh/d/p. Die übrigen 27 kWh/d/p gehen über die Kühltürme (25 kWh/d/p) oder bei der Übertragung im Netz (2 kWh/d/p) verloren. Der gesamte Energie-Input in diesem „heutigen vereinfachten England“ ist 125 kWh/d pro Person.

Gemeinsame Punkte in allen fünf Plänen

In meinem zukünftigen vereinfachten England ist der Energieverbrauch reduziert durch den Einsatz effizienterer Technologien beim Transport und beim Heizen. In allen fünf Plänen für die Zukunft ist der Transport weitgehend elektrifiziert. Elektrische Motoren sind effizienter als Benzinmotoren, deshalb ist die für den Transport benötigte

Energie reduziert. Öffentliche Transportmittel (ebenfalls weitgehend elektrifiziert) sind

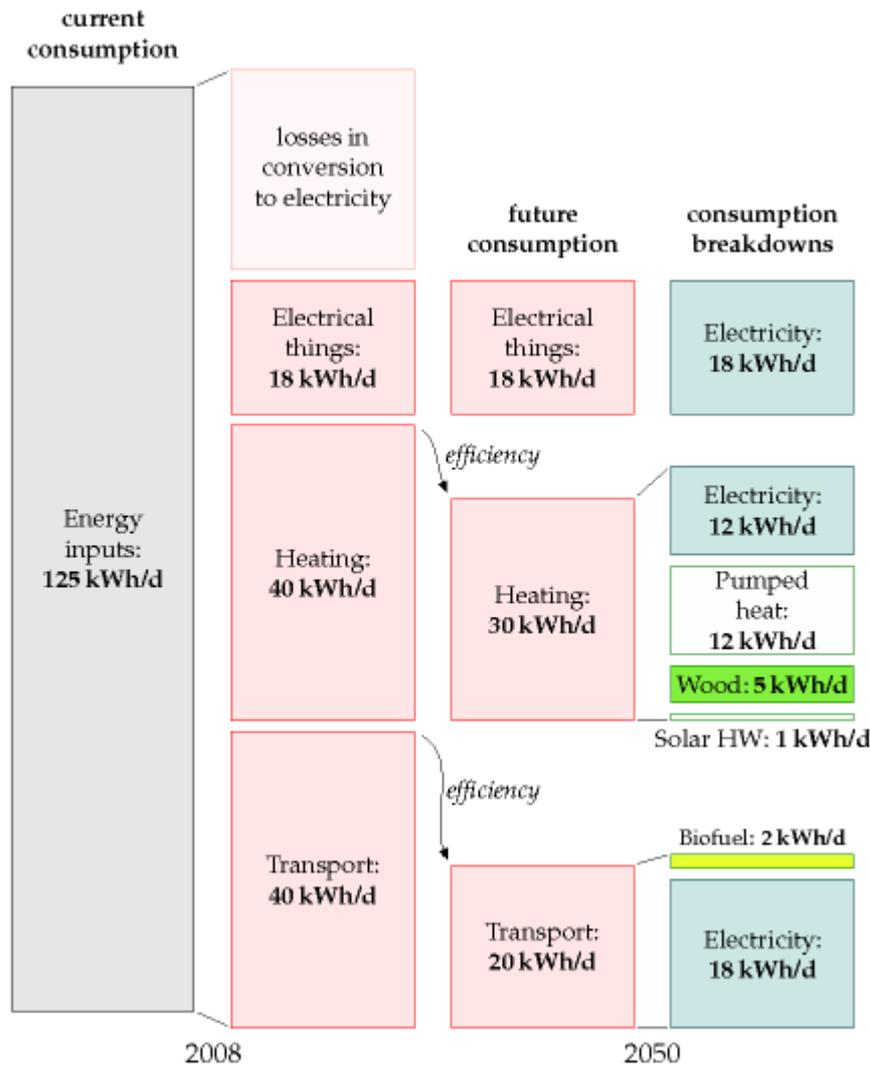


Fig.27.1: Derzeitiger Verbrauch im „vereinfachten England 2008“ (die linken beiden Spalten) und der geplante zukünftige Verbrauch mit einer Unterteilung nach Brennstoffen (die rechten beiden Spalten). Dieser Plan erfordert, dass die Elektrizitätsversorgung von 18 auf 48 kWh/d/p erhöht wird.

besser integriert, besser personalisiert und besser geregelt. Ich habe angenommen, dass die Elektrifizierung den Transport etwa viermal effizienter macht und dass Wachstum einige dieser Einsparungen wieder wettmacht, so dass der Nettoeffekt eine Halbierung des Energieverbrauchs im Transportsektor ist. Es gibt einige essentielle Fahrzeuge, die nicht so einfach elektrifiziert werden können, und für diese machen wir uns unseren eigenen Flüssigtreibstoff (beispielsweise Biodiesel oder Biomethanol oder Zellulose-Bioethanol). Die für den Transport benötigte Energie ist dann 18 kWh/d/p an Elektrizität und 2 kWh/d/p Flüssigtreibstoff. Die Batterien der Elektrofahrzeuge dienen als Energiespeicher um eventuelle Fluktuationen in Versorgung und Verbrauch auszugleichen. Die zur Biotreibstoff-Herstellung erforderliche Landfläche ist etwa 12 % von England (500 m² pro Person), unter der Annahme dass der Biotreibstoff von 1%-effizienten Pflanzen kommt und die Treibstoffgewinnung aus den Pflanzen 33% effizient ist. Alternativ könnte Biotreibstoff auch importiert werden, wenn wir andere Länder dazu überreden könnten, die entsprechenden landwirtschaftlichen Flächen (etwa in der Größe von Wales) unseren Biotreibstoffen zu widmen.

In allen fünf Plänen ist der Energieverbrauch für das Heizen reduziert durch Ausbau der Gebäudedämmung und durch intelligentere Kontrolle der Innentemperatur (durch Thermostate, Erziehung, und Promotion durch sexy VIPs, die Rollkragenpullover tragen). Neue Gebäude (ab Baujahr 2010) sind wirklich gut isoliert und benötigen fast keine Raumheizung. Alte Gebäude (die auch 2050 noch in der Überzahl sind) sind

hauptsächlich durch Luft- und Erdwärmepumpen beheizt. Ein Anteil der Wassererwärmung erfolgt mit Solarkollektoren (2,5 m² auf jedem Haus), ein Anteil mit Wärmepumpen und ein Anteil mit Strom. Einige Gebäude nahe am Wald oder an Energiepflanzen-Plantagen werden mit Biomasse beheizt. Die zum Heizen erforderliche Energie ist dadurch reduziert von 40 kWh/d/p auf 12 kWh/d/p Elektrizität, 1kWh/d/p Solarthermie und 5 kWh/d/p Brennholz.

Das Holz für die Heizung (oder möglicherweise Kraft-Wärme-Kopplung) kommt aus nahegelegenen Wäldern oder Energiepflanzen (vielleicht Miscanthus, Weide oder Pappel) die eine gesamte Landfläche von 30.000 km² (500 m² pro Person) überziehen. Das sind 18% der gesamten Landwirtschaftsfläche Englands, die 2800 m² pro Person beträgt. Die Energiepflanzen werden hauptsächlich auf minderwertigen Böden angebaut und überlassen höherwertige Böden dem Anbau von Nahrungsmitteln. Jeder 500 m²-Anteil liefert jährlich 0,5 Tonnen ofentrockenes Holz, das einen Energiegehalt von etwa 7 kWh/d hat. Von dieser Energie gehen etwa 70% im Prozess der Wärmeerzeugung und - Lieferung verloren. Die letztlich nutzbare Wärme ist 5 kWh/d pro Person.

In diesen Plänen nehme ich an, dass der gegenwärtige Elektrizitätsbedarf für Geräte, Licht etc. bestehen bleibt. Wir brauchen dafür also weiterhin 18 kWh(el)/d/p als Strom. Ja, die Beleuchtungs-Effizienz ist durch die Umstellung auf Leuchtdioden verbessert, und auch viele andere Apparate werden effizienter werden, doch dank der Segnungen des Wirtschaftswachstums werden wir eine wachsende Anzahl von Geräten in unserem täglichen Leben haben - vielleicht Videokonferenz-Systeme, die uns helfen, weniger zu reisen.

Der gesamte Elektrizitätsbedarf geht nach diesen Plänen *hoch* (wegen der 18 kWh/d/p für Transport und der 12 kWh/d/p für Wärmepumpen), auf 48 kWh/d/p (oder 120 GW national). Das ist nahezu eine Verdreifachung des britischen Strombedarfs. Woher kommt diese Energie?

Lassen Sie mich einige Alternativen beschreiben. Nicht alle davon sind „nachhaltig“ nach der Definition dieses Buches, aber alle sind CO₂-neutral.

Große Mengen Elektrizität erzeugen – die Komponenten

Um große Mengen Elektrizität zu erzeugen, benutzt jeder dieser Pläne einen Anteil an on-shore und off-shore Windkraft, etwas Photovoltaik, möglicherweise etwas Solarenergie aus der Wüste, Müllverbrennung (Hausmüll und landwirtschaftliche Abfälle), Wasserkraft (in demselben Umfang wie heute), vielleicht Wellenenergie, Gezeitenkraftwerke (auch Tidenlagunen und Tidenstromgeneratoren), vielleicht Kernenergie, und vielleicht fossile Brennstoffe mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung. Jeder Plan zielt auf eine mittlere Produktion von 50 kWh/d/p ab – diesen Wert erhalte ich durch Aufrunden des Bedarfs von 48 kWh/d/p und erlaube damit auch Verluste im Verteilernetz.

Einige der folgenden Pläne werden Energie aus andern Ländern importieren. Zum Vergleich ist es hilfreich, unsere derzeitigen Importquoten zu kennen. Die Antwort ist, dass im Jahr 2006 Großbritannien 28 kWh/d/p Brennstoffe importierte – 23% des Primärenergiebedarfs. Diese Importe werden dominiert von Kohle (18 kWh/d/p), Rohöl (18 kWh/d/p) und Erdgas (6 kWh/d/p). Nuklearbrennstoff (Uran) wird gewöhnlich nicht als Energieimport gewertet, weil er leicht lagerbar ist.

In allen fünf Plänen nehme ich an, dass wir die Müllverbrennung so hochskalieren, dass fast der gesamte brennbare Abfall recycled statt deponiert wird. Verbrennen von 1 kg Müll pro Tag pro Person erzeugt grob 0,5 kWh/d/p Elektrizität. Ich werde annehmen, dass eine ähnliche Menge landwirtschaftlicher Abfall ebenfalls verbrannt werden kann und 0,6 kWh/d/p liefert. Diesen Müll zu verbrennen erfordert etwa 3 GW

Müllverbrennungs-Kraftwerksleistung, eine Verzehnfachung der installierten Leistung von 2008 (Fig.27.2). London (7 Millionen Einwohner) hätte dann zwölf 30-MW-Müllverbrennungsanlagen wie das SELCHP-Kraftwerk in Süd-London (siehe Seite 307). Birmingham (1 Million) hätte zwei davon. Jede Stadt mit 200.000 Einwohnern hätte eine 10-MW-Müllverbrennungsanlage. Etwaige Ängste, dass Müllverbrennung in dieser Größenordnung schwierig, schmutzig oder gefährlich wäre, sollten durch Fig.27.3 ausgeräumt werden, die zeigt, dass viele Länder Europas viel mehr Müll pro Person verbrennen als England; diese verbrennungsliebenden Länder schließen Deutschland, Schweden, Dänemark, Holland und die Schweiz ein – keine Länder, die man gemeinhin mit Hygiene-problemen in Verbindung bringt. Ein positiver Nebeneffekt der Müllverbrennung ist, dass sie zukünftige Methanfreisetzungen aus Mülldeponien vermeidet.

In allen fünf Plänen trägt Wasserkraft 0,2 kWh/d/p bei, genau wie heute.

Elektrofahrzeuge werden als dynamisch anpassungsfähige Last im Stromnetz benutzt. Die mittlere zum Laden der Elektroautos erforderliche Leistung ist 45 GW (18 kWh/d/p). Fluktuationen in den Erneuerbaren (Solar und Wind) können ausgeglichen werden, indem man diese Last entsprechend hoch- und runterdreht, so lange die Fluktuationen nicht zu groß oder zu langanhaltend sind. Die täglichen Schwankungen des Bedarfs werden höher sein als heute, weil Elektrizität das Gas beim Kochen und Heizen ersetzt (siehe Fig.26.6). Um sicherzustellen, dass Wellen im Verbrauch von 10 GW über 5 Stunden Dauer ausgeglichen werden können, sehen alle fünf Pläne den Bau von fünf neuen Pumpspeicherwerken vergleichbar mit Dinorwig vor

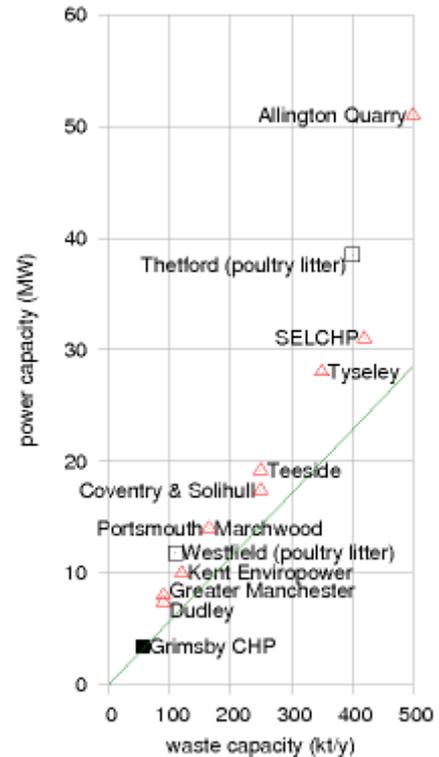


Fig.27.2: Müllverbrennungsanlagen in England. Die Linie zeigt die mittlere Leistung bei Annahme von 1 kg Müll → 0,5 kWh Elektrizität

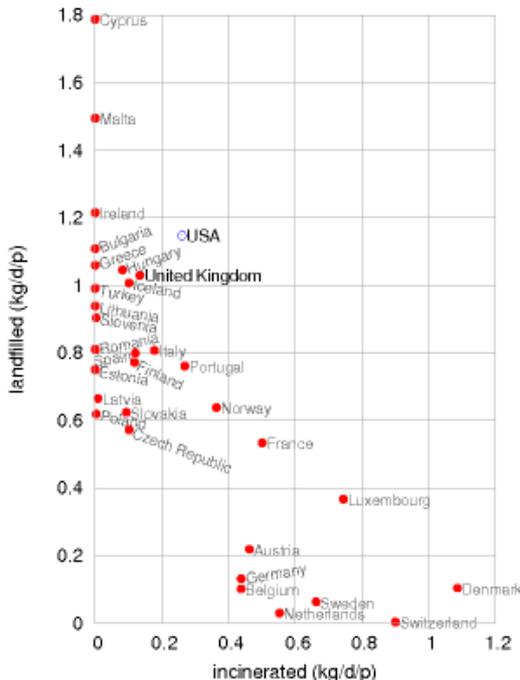
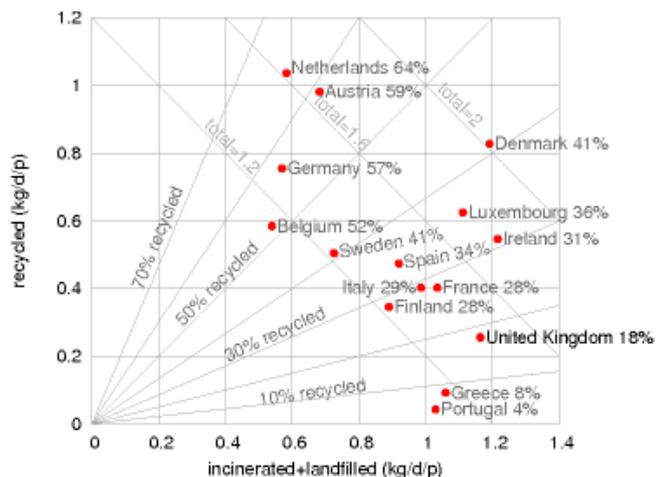


Fig.27.3: Links: Auf Deponien entsorgter Hausmüll vs. Müllverbrennung, in kg pro Tag pro Person, nach Ländern. Rechts: Recycelter Müll vs. verbrannter oder deponierter Müll. Die Recyclingquote in % ist neben jedem Landesnamen angegeben.



(oder den äquivalenten Ausbau bestehender Wasserkraftwerke auf Pumpspeicherbetrieb). 50 GWh Speicherkapazität entspricht fünf Dinorwigs, jedes mit einer Nennleistung von 2GW. Einige der folgenden Pläne werden darüber hinaus noch weitere Pumpspeicherwerke erforderlich machen. Für zusätzliche Netzsicherheit würde jeder Plan eine Verbindungsleitung nach Norwegen mit 2 GW Kapazität vorsehen.

Große Mengen Elektrizität erzeugen – Plan D

Plan D (D steht für „domestic diversity“ – heimische Vielfalt) benutzt eine Menge von jeder heimisch verfügbaren Elektrizitätsressource, und hängt relativ wenig von der Unterstützung aus anderen Ländern ab.

Und so kommt nach Plan D die Elektrizität von 50 kWh/d/p zusammen. Wind: 8kWh/d/p (20 GW im Mittel, 66 GW Spitze) (dazu etwa 400 GWh verbundener Pumpspeicherwerke). Photovoltaik: 3 kWh/d/p. Müllverbrennung: 1,3 kWh/d/p³⁵. Wasserkraft: 0,2 kWh/d/p. Wellen: 2 kWh/d/p. Gezeiten: 3,7 kWh/d/p. Kernkraft: 16 kWh/d/p (40 GW). „Clean Coal“: 16 kWh/d/p (40 GW).

Für die 8 kWh/d/p Wind braucht man 30mal mehr als die in 2008 installierte Leistung. England hätte dann nahezu dreimal mehr Windkraft als Deutschland heute hat. Diese Windleistung off-shore in einem Zeitraum von 10 Jahren zu installieren erfordert etwa 50 Jackup-Bargen.

3 kWh/d/p von PV-Modulen zu beziehen benötigt 6 m² 20%-effiziente Module pro Person. Die meisten Süddächer wären damit komplett mit Modulen bedeckt; alternativ könnte es ökonomischer sein und weniger Stress mit dem „Verein zur Erhaltung alter Häuser“ geben, viele dieser Module auf die traditionelle bayrische Art in die Landschaft zu setzen (Fig.6.7, Seite 45).

Die Müllverbrennung entspricht 1 kg pro Tag pro Person an Hausmüll (0,5 kWh/d/p) und eine ähnliche Menge von landwirtschaftlichem Abfall (0,6 kWh/d/p); die Wasserkraft liegt mit 0,2 kWh/d/p auf demselben Wert wie heute.

Die Wellenenergie erfordert 16.000 Pelamis Hochsee-Wellengeneratoren, die 830 km der Atlantikküste besetzen (siehe die Karte in Fig.12.1 auf Seite 82)

Die Gezeitenkraft kommt von 5 GW Tidenstromgeneratoren, einem 2 GW Severn-Wehr und 2,5 GW Tidenlagunen, die wir auch als Pumpspeicher benutzen können.

Um 16 kWh/d/p Kernkraft zu erzeugen, ist 40 GW AKW-Leistung erforderlich, was etwa eine Vervielfachung des Anlagenbestandes von 2007 bedeutet. Würden wir 16 kWh/d/p Atomstrom produzieren, lägen wir zwischen Belgien, Finnland, Frankreich und Schweden, nach pro-Kopf-Produktion gemessen: Belgien und Finnland liegen bei 12 kWh/d/p, Frankreich und Schweden bei 19 kWh/d/p bzw. 20 kWh/d/p.

Um 16 kWh/d/p an „Clean Coal“ (40 GW) zu erhalten, müssten wir unsere bestehenden Kohlekraftwerke nehmen, die derzeit etwa 30 GW liefern, sie mit CO₂-Abscheidern nachrüsten, was ihre Leistung auf 22 GW reduziert, und dazu 18 neue „Clean“-Kohlekraftwerke bauen. Dieser Anteil an Kohleenergie erfordert einen Energie-Input von etwa 53 kWh/d/p Kohle, der etwas über dem liegt, was wir derzeit an *allen* fossilen Brennstoffen in Kraftwerken verstromen, und weit über dem, was wir in Kapitel 23 als „nachhaltig“ abgeschätzt hatten. Diese Rate des Kohleverbrauchs ist etwa dreimal



Fig.27.4: Plan D

³⁵ Tippfehler: 1,1 kWh ??

die Rate des gegenwärtigen Kohleimports (18 kWh/d/p). Wenn wir nicht britische Kohlebergwerke wiedereröffnen, wären in diesem Plan 32% der britischen Elektrizität³⁶ von importierter Kohle abhängig. Wiedereröffnete britische Kohleminen könnten etwa 8 kWh/d/p beitragen, also wäre in jedem Fall England nicht autark in Sachen Kohle.

Kommen Ihnen irgendwelche Punkte dieses Plans unvernünftig oder unzulässig vor? Wenn ja, findet vielleicht einer der nächsten Pläne Ihre Zustimmung.

Große Mengen Elektrizität erzeugen – Plan N

Plan N ist der „NIMBY“-Plan³⁷, für Leute, die die englische Landschaft nicht mit Erneuerbare-Energie-Anlagen industrialisieren wollen und auch keine neuen Atomkraftwerke wollen.

Zuerst drehen wir alle Stellschrauben für Erneuerbare zurück von den hohen Einstellungen aus Plan D. Wind 2 kWh/d/p (5 GW im Mittel), Photovoltaik: 0, Wellen: 0, Gezeiten: 1 kWh/d/p.

Wir verlieren so 14 kWh/d/p (35 GW national) gegenüber Plan D. (Verstehen wir uns nicht falsch: Wind ist immer noch achtmal über dem Niveau von 2008.)

Im NIMBY-Plan reduzieren wir auch den nuklearen Anteil auf 10 kWh/d/p (25 GW) – eine Reduktion von 15 GW gegenüber Plan D, doch immer noch eine substantielle Erhöhung gegenüber dem heutigen Niveau. Diese 25 GW Atomkraft könnte man, vermute ich, in die bestehenden Anlagenflächen quetschen, um Neubauten in irgendjemandes Hinterhöfen zu vermeiden. Den Clean-Coal Anteil belasse ich bei 15 kWh/d/p (40 GW), dem Wert aus Plan D, ebenso bleiben Wasserkraft und Müllverbrennung auf dem Wert aus Plan D.

Wo können wir die fehlenden 50 GW heranschaffen? Der NIMBY sagt „Nicht in meinem Hinterhof, sondern in dem eines anderen.“ Darum bezahlt der NIMBY Plan andere Länder für den Import von Solarenergie aus ihren Wüsten im Umfang von 20 kWh/d/p (50 GW).

Dieser Plan erfordert die Errichtung von 5 Blobs, jeder so groß wie London (44 km Durchmesser), in der nordafrikanischen Wüste, ausgefüllt mit Solarkraftwerken. Er erfordert zudem Übertragungssysteme, um eine elektrische Leistung von 50 GW von dort nach England zu schaffen. Die heutige Hochspannungsleitung nach Frankreich kann 2 GW liefern. Der Plan erfordert also eine 25fach höhere Kapazität dieser Stromverbindung. (Oder eine äquivalente Lösung des Energietransports – vielleicht Schiffe gefüllt mit Methanol oder Boron, die zwischen der Wüstenküste und England verkehren.)

Weil es weniger Windkraft gibt, braucht England auch nicht die zusätzlichen Pumpspeicher bauen, die in Plan D erwähnt wurden. Doch wegen der Abhängigkeit vom Sonnenschein braucht es dennoch Speichersysteme, um die Schwankungen der Sonneneinstrahlung auszugleichen. Flüssigsalzspeicher an den Solarkraftwerken sind eine Option. Auch bei Pumpspeicherwerken in den Alpen könnte man anfragen. Eine andere Option ist die Umwandlung der Energie in speicherbaren Treibstoff wie etwa Methanol, wobei die Umwandlung Verluste beinhaltet und daher entsprechend mehr Solarkraftwerke erfordert.



Fig.27.5: Plan N

³⁶ Wobei hier als Vergleichsbasis nur die Haushalts-Elektrizität, nicht die zusätzlich für Heizen und Transport geplante angenommen worden sein dürfte ?!?

³⁷ NIMBY steht für Not In My BackYard, nicht in meinem Hinterhof

Dieser Plan enthält einen Importanteil von 32% + 40% = 72% für die englische Elektrizität.

Große Mengen Elektrizität erzeugen – Plan L

Manche sagen: „Wir wollen keine Atomkraft!“ Wie können wir die zufrieden stellen? Vielleicht sollte es der Job der Atomkraftgegner-Liga sein, die NIMBY-Liga davon zu überzeugen, sich schlussendlich doch die Erneuerbaren in ihrem Hinterhof zu wünschen.

Wir können einen kernenergiefreien Plan erhalten, indem wir aus Plan D all die Erneuerbaren übernehmen und die Kernkraft eins-zu-eins durch Wüsten-Solarstrom ersetzen. Wie in Plan N erfordert das einen riesigen Zuwachs an Leitungskapazität zwischen Nordafrika und England, die Festlandverbindung Englands müsste von 2GW auf mindestens 40GW ausgebaut werden.

Hier die Übersicht, woher Plan L die 50 kWh/d/p Elektrizität bezieht. Wind: 8kWh/d/p (20 GW im Mittel) (dazu etwa 400 GWh verbundener Pumpspeicherwerke). Photovoltaik: 3 kWh/d/p. Müllverbrennung und Wasserkraft: 1,3 kWh/d/p. Wellen: 2 kWh/d/p. Gezeiten: 3,7 kWh/d/p. „Clean Coal“: 16 kWh/d/p (40 GW). Solarkraft aus Wüstengebieten: 16 kWh/d/p (40 GW).

Dieser Plan importiert 64% der englischen Elektrizität aus anderen Ländern.

Ich nenne diesen Plan „L“, weil er ziemlich gut mit der Politik der Liberalen Demokraten in England übereinstimmt – zumindest als ich dieses Kapitel ursprünglich schrieb, Mitte 2007. Aktuell reden sie über „reale Energie-Unabhängigkeit für England“, und haben eine CO₂-Vermeidungspolitik ausgegeben, unter der England ein Netto-Energie-Exporteur sein soll; ihre Politik geht nicht im Einzelnen darauf ein, wie diese Ziele erreicht werden sollen.

Große Mengen Elektrizität erzeugen – Plan G

Einige Menschen sagen: „Wir wollen keine Atomkraft *und* wir wollen keine Kohlekraftwerke mehr!“ Das klingt nach einem erstrebenswerten Ziel, doch brauchen wir einen Plan, der das leisten kann. Ich nenne ihn Plan „G“, weil ich vermute, dass die Grüne Partei Englands weder Atom noch Kohle will, obwohl ich annehme, dass nicht alle Grünen dem Rest meines Planes zustimmen würden. Auch Greenpeace liebt, wie ich weiß, Wind, darum ist dieser Plan auch ihnen gewidmet, denn er hat eine Menge Wind.

Ich forme Plan G wiederum aus dem Anfangsszenario des Plan D heraus, erhöhe den Wellenanteil um 1 kWh/d/p (indem ich Geld in die Wellenforschung pumpe und die Effizienz des Pelamis Konverters erhöhe) und blase die Windkraft um einen Faktor 4 auf (relativ zu Plan D) auf 32 kWh/d/p, so dass Windkraft 64% der benötigten Elektrizität liefern kann. Das ist eine 120fache Erhöhung der britischen Windkraft über den momentanen Level. Unter diesem Plan wird die weltweite Windkraft vervierfacht und all der Zuwachs auf und um die britischen Inseln stationiert.



Fig.27.6: Plan L

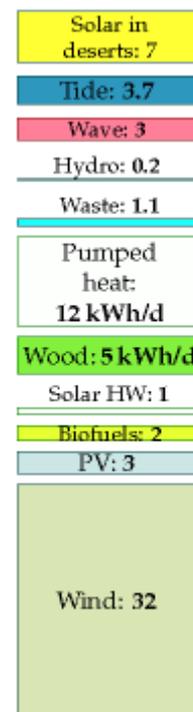


Fig.27.7: Plan G

Diese immense Abhängigkeit des Plans G von Erneuerbaren, insbesondere von Wind, führt zu Schwierigkeiten für unsere geplante Methode, das Stromnetz stabil zu halten, nämlich die Laderate für Millionen von Akkus für Elektrofahrzeuge anzupassen. In Plan G müssen wir deshalb umfangreiche zusätzliche Pumpspeicherwerke einschließen, die Windschwankungen auf einer Zeitskala von Tagen überbrücken können. Pumpspeicher-Potenzial im Umfang von 400 Dinorwigs könnte die gesamte Windenergie im Falle einer landesweiten Flaute von 2 Tagen substituieren. Etwa hundert der größten britischen Seen und Lochs wären für das erforderliche Speichervolumen nötig.

Nach Plan G spaltet sich die Energieproduktion folgendermaßen auf: Wind 32 kWh/d/p (80 GW im Mittel) (dazu etwa 4000 GWh verbundener Pumpspeicherwerke). Photovoltaik: 3 kWh/d/p. Müllverbrennung und Wasserkraft: 1,3 kWh/d/p. Wellen: 3 kWh/d/p. Gezeiten: 3,7 kWh/d/p. Solarkraft aus Wüstengebieten: 7 kWh/d/p (17 GW).

Dieser Plan erhält 14% seiner Elektrizität aus anderen Ländern.

Große Mengen Elektrizität erzeugen – Plan E

E steht für „Economy“ – Wirtschaftlichkeit. Dieser fünfte Plan ist eine grobe Abschätzung, wie die Dinge sich in einem liberalisierten Energiemarkt mit hohen CO₂-Abgaben entwickeln werden. Wird um die Preisökonomie gespielt, mit einem starken Preissignal, CO₂-Ausstoß zu vermeiden, erwarten wir keine breitgefächerte Lösungsvielfalt mit einem weiten Bereich von Energiekosten, sondern eine gewinnoptimale Lösung, die die erforderliche Energie zum niedrigsten Preis bereitstellt. Und wenn „Clean Coal“ und Kernkraft Kopf an Kopf als Preiskonkurrenten antreten, gewinnt die Kernkraft. (Ingenieure an einem englischen „schmutzigen“ Kohlekraftwerk erklärten mir, dass dort die Kapitalkosten bei etwa 1 Milliarde € pro GW lägen, etwa so wie bei AKWs; doch die Kapitalkosten für „Clean Coal“ einschließlich der CO₂-Abscheidung und -Speicherung bei etwa 2 Milliarden €.) Ich nahm an, dass die Solarenergie in der Wüste den Kostenwettbewerb wegen der erforderlichen 2000 km Leitungslänge ebenfalls verliert (obwohl van Voorthuysen (2008) berechnete, dass nobelpreiswürdige Entwicklungen im Bereich der solarbetriebenen Herstellung von chemischen Brennstoffen die Solarkraftwerke in den Wüsten ökonomisch mit Kernkraft gleichziehen lassen könnten). Off-Shore Wind verliert ebenfalls gegen Kernkraft, doch nahm ich an, dass on-shore Wind kostenmäßig mit der Kernkraft mithalten kann.

Und so erhält man nach Plan E die erforderlichen 50 kWh/d/p: Wind: 4 kWh/d/p (10 GW im Mittel). Photovoltaik: 0. Müllverbrennung und Wasserkraft: 1,3 kWh/d/p. Wellen: 0. Gezeiten: 0,7 kWh/d/p. Und Kernkraft: 44 kWh/d/p (110 GW).

Dieser Plan beinhaltet eine Verzehnfachung unserer AKW-Leistung gegenüber 2007. England hätte dann 110 GW, etwa das doppelte des in Frankreich bestehenden Potentials. Ich habe etwas Gezeitenkraft eingeschlossen, weil ich denke, dass eine gut geplante Tidenlagune mit Kernkraft konkurrenzfähig sein könnte.

Im Rahmen dieses Plans hat England keine Energieimporte (mit Ausnahme von Uran, das, wie oben erläutert, normalerweise nicht zu den Importen gerechnet wird.)

Fig:27.9 zeigt alle fünf Pläne im Vergleich.

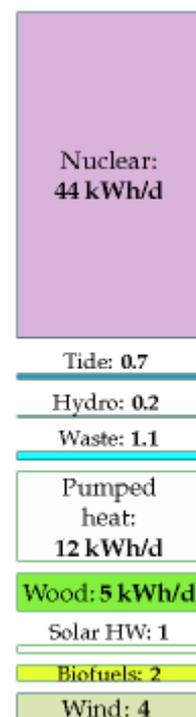


Fig.27.4: Plan D

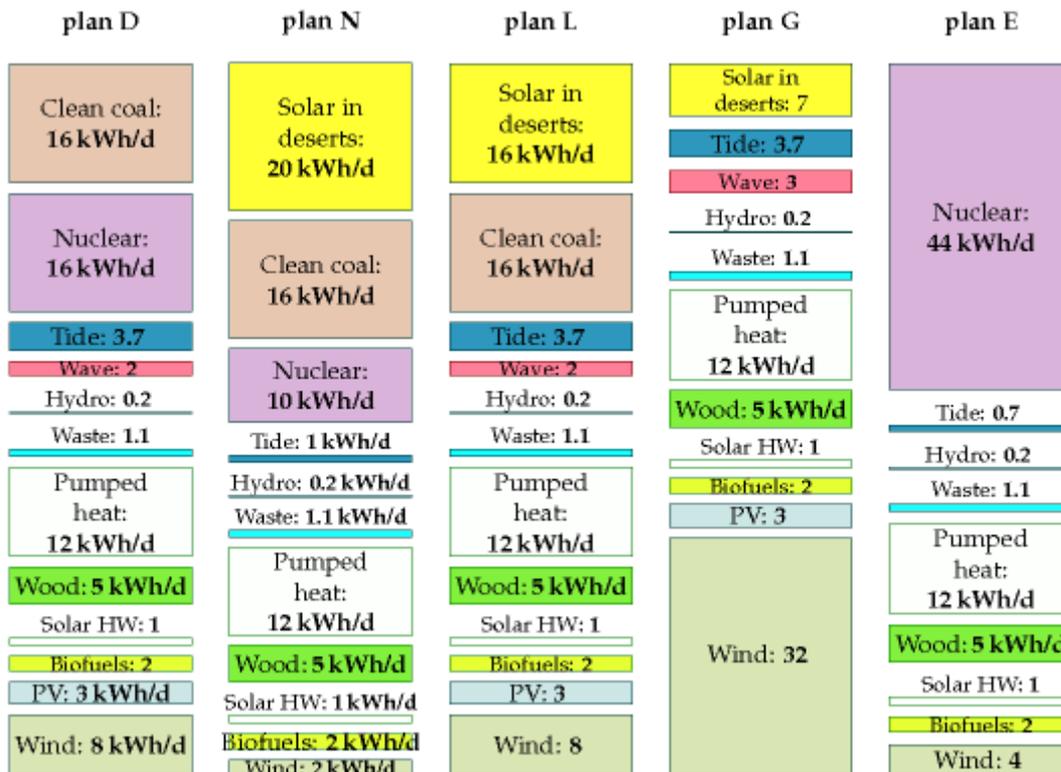


Fig.27.9: Alle fünf Pläne

Wie diese Pläne zu CO₂-Saugen und Flugverkehr stehen

In einer zukünftigen Welt, in der CO₂-Verschmutzung genügend teuer ist, um katastrophale Klimaveränderungen zu verhindern, wird es Interesse an Anlagen geben, die zu niedrigen Kosten CO₂ aus der Luft saugen und in einem Loch im Boden speichern können. Solche CO₂-Neutralisierungsanlagen könnten uns erlauben, im Umfang von 2004 mit weiterhin erdölbetriebenen Flugzeugen zu fliegen. Im Jahr 2004 waren die britischen Emissionen an CO₂ aus dem Flugverkehr 0,5 t CO₂ pro Jahr pro Person. Wenn man den gesamten Treibhauseffekt berücksichtigt, entspricht das vielleicht 1 t CO_{2e} pro Jahr pro Person (1 t CO_{2e} steht – wir erinnern uns – für Treibhausgas-Emissionen äquivalent zu einer Tonne CO₂). In allen fünf Plänen habe ich angenommen, dass ein Achtel Englands der Produktion von Energiepflanzen gewidmet wäre, die dann zum Heizen oder in KWK-Anlagen benutzt werden. Würden wir diese Pflanzen statt dessen in Kraftwerke mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung umleiten – die „Clean Coal“ Kraftwerke, die wir schon in dreien der Pläne erwähnten – würde das dadurch zusätzlich eingefangene CO₂ etwa 1 t CO₂ pro Jahr pro Person betragen. Wenn auch die Müllverbrennungsanlagen (für Hausmüll und landwirtschaftlichen Müll) bei den „Clean Coal“-Kraftwerken platziert werden, so dass sie deren CO₂-Abscheider mitbenutzen können, könnte der Einfang auf etwa 2 t CO₂ pro Jahr pro Person gesteigert werden. Diese Anordnung hätte zusätzliche Kosten: Die Biomasse und der Müll müssten weiter transportiert werden, der CO₂-Abscheidungsprozess würde einen signifikanten Anteil der Energie aus den Pflanzen verbrauchen und die Gebäudeheizung müsste durch noch mehr Luftwärmepumpen gewährleistet werden. Doch wenn CO₂-Neutralität unser Ziel ist, sollte man vielleicht vorausplanen und versuchen, neue „Clean Coal“ Kraftwerke mit Müllverbrennungsanlagen in Gegenden zu platzieren, die nahe an potenziellen Biomasse-Plantagen liegen.

„All diese Pläne sind absurd!“

Wenn Sie diese Pläne nicht mögen, überrascht mich das nicht. Ich stimme Ihnen zu, dass in jedem etwas Ungenießbares enthalten ist. Nehmen Sie sich die Freiheit, einen anderen Plan zu machen, der Ihren Wünschen besser entspricht. Stellen Sie aber sicher, dass er auch aufgeht!

Vielleicht ist Ihre Schlussfolgerung, dass ein gangbarer Plan einen geringeren Pro-Kopf-Verbrauch beinhalten soll. Ich könnte dem zustimmen, doch ist das schwer zu verkaufen – erinnern Sie sich an Tony Blairs Antwort (Seite 249) als ihm jemand nahe legte, er solle weniger oft nach Übersee in die Ferien fliegen.

Alternativ könnten Sie folgern, dass wir eine zu hohe Bevölkerungsdichte haben, und dass ein gangbarer Plan weniger Menschen erfordert. Wieder eine Politik, die schwer zu verkaufen sein wird.

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 225 **Verbrennen von 1 kg Müll pro Tag pro Person erzeugt grob 0,5 kWh/d/p Elektrizität**
206 *Incinerating 1 kg of waste yields roughly 0.5 kWh of electricity. The calorific value of municipal solid waste is about 2.6 kWh per kg; power stations burning waste produce electricity with an efficiency of about 20%. Quelle: SELCHP tour guide.*
- 226 **Fig. 27.3:** 207 *Figure 27.3.* Daten von Eurostat, www.epa.gov, und www.esrcsocietytoday.ac.uk/ESRCInfoCentre/.
- 229 **Politik der Liberalen Demokraten in England** 210 *The policies of the Liberal Democrats.* Siehe www.libdems.org.uk: [5os7dy], [yrw2oo].

28. Betrachtung der Kosten

Ein Plan auf der Landkarte

Lassen Sie uns die Größendimension der Pläne aus dem vorigen Kapitel noch klarer herausarbeiten. Dazu sehen wir uns eine Karte Englands an, die einen sechsten Plan trägt. Dieser sechste Plan liegt etwa in der Mitte der ersten fünf, deshalb nenne ich ihn Plan M (Fig.28.1).

Die Flächen und ungefähren Kosten der benötigten Anlagen zeigt Tabelle 28.3. Der Einfachheit halber sind die finanziellen Kosten nach heutigen Preisen vergleichbarer Anlagen abgeschätzt, von denen viele nur erste Prototypen sind. Wir können bei vielen dieser Preise einen erheblichen Verfall erwarten. Die groben Kostenschätzungen hier beinhalten Baukosten, keine Rückbau- oder Betriebskosten. Die personenbezogenen Kosten werden aus der Gesamtsumme errechnet, indem sie durch 60 Millionen geteilt wird. Bitte beachten Sie, das ist kein Buch über Ökonomie – das würde weitere 400 Seiten füllen! Ich gebe diese Kostenschätzungen nur, um eine ganz grobe Vorstellung zu vermitteln, welches Preisschild an einem solchen Plan, der aufgeht, hängen wird.

Ich betone nochmals, dass ich nicht diesen besonderen Plan verteidigen will – er beinhaltet einige Punkte, die ich als Diktator von England nicht wählen würde. Ich habe willkürlich alle verfügbaren Technologien mit eingeschlossen, damit Sie Ihren eigenen Plan mit einem anderen Mix ausprobieren können.

Wenn Sie zum Beispiel der Meinung sind „Photovoltaik ist zu teuer, ich hätte lieber einen Plan mit mehr Wellenkraft stattdessen,“ können Sie das auf einfache Weise berücksichtigen: Sie müssen nur die Wellenkraftkapazität auf das Achtfache erhöhen. Wenn Sie die Lage der Windfarmen stört, versetzen Sie sie einfach (bloß wohin?). Bedenken Sie aber, dass es die Kosten erhöht, wenn man diese off-shore stellt. Wenn Sie weniger Windfarmen wollen, kein Problem – erklären Sie einfach, welche andere Technologie sie stattdessen wünschen. Sie können fünf der 100-km²-Windfarmen einsparen, wenn Sie dafür zum Beispiel ein weiteres 1 GW Kernkraftwerk dazunehmen.

Vielleicht sind Sie der Ansicht, dass dieser Plan (wie die fünf anderen des vorigen Kapitels) unverhältnismäßig viel Fläche auf Biotreibstoffe verwendet. Fein: Sie müssen daraus aber folgern, dass der Bedarf an Flüssigtreibstoff für Transporte unter die angenommenen 2 kWh pro Tag pro Person reduziert werden kann; oder dass Flüssigtreibstoffe auf andere Art erzeugt werden.

Die Kosten des Umstiegs von fossilen Brennstoffen auf Erneuerbare

Jede Windfarm kostet einige Millionen an Baukosten und liefert einige Megawatt. Als ganz grobe Hausnummer für 2008 gilt: ein Watt Windkapazität kostet einen Euro Installationskosten; ein Kilowatt kostet 1000 €; ein Megawatt kostet eine Million; ein Gigawatt kostet eine Milliarde oder vielleicht zwei. Andere Erneuerbare sind teurer. Wir (in England) verbrauchen derzeit eine Gesamtleistung von etwa 300 GW an Erneuerbarer und/oder Kernenergie und haben daher Anlagenwerte (Kosten) in der Größenordnung von 300 Milliarden. Die Kostenschätzungen in Tabelle 28.3 summieren sich zu 870 Mrd., wobei



Fig.28.1: Plan M

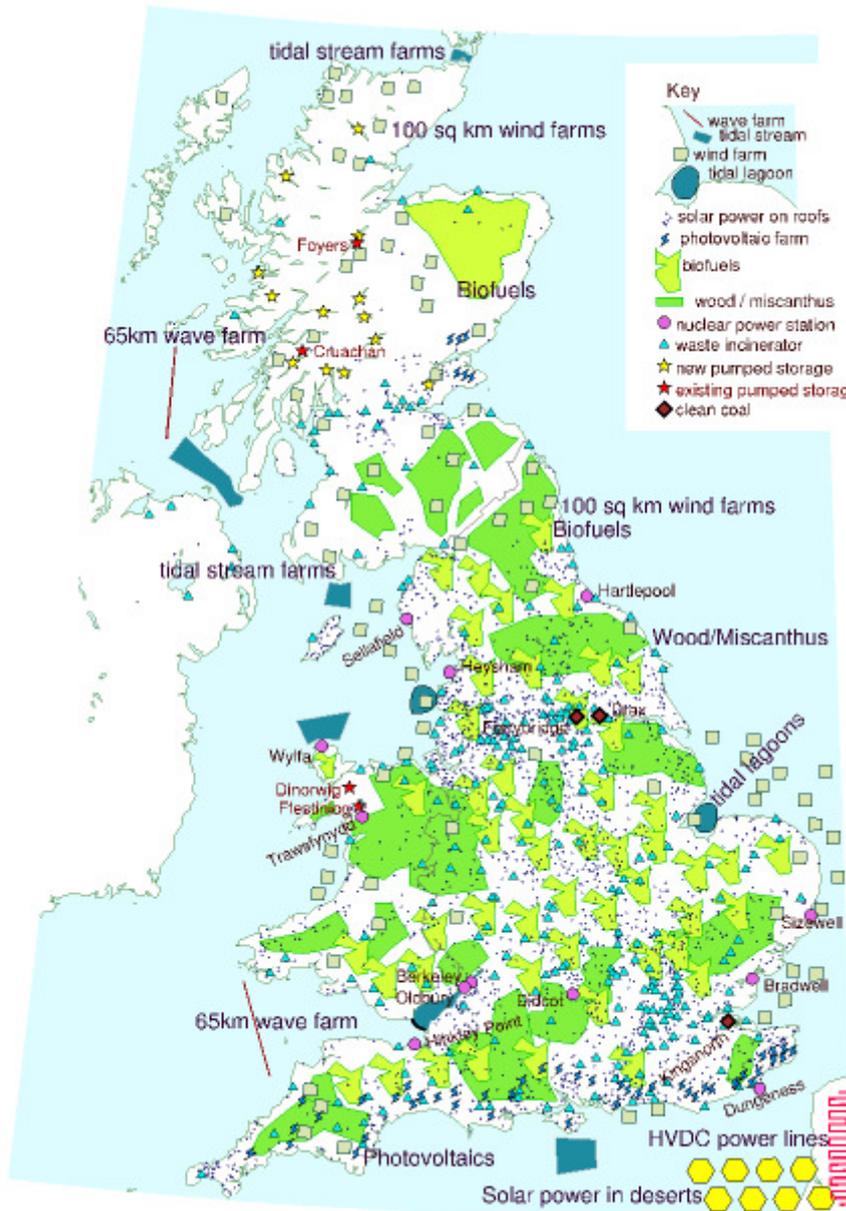


Fig.28.2: Ein Plan, der aufgeht für Schottland, England und Wales. Die graugrünen Quadrate sind Windfarmen. Jede ist 100km² groß und maßstäblich gezeichnet. Rote Linien im Meer sind Wellenfarmen, maßstäblich. Hellblaue Blitze: PV-Farmen – jede 20 km² groß, maßstäblich. Blaue scharfbegrenzte Polygone im Meer: Gezeitenfarmen. Blaue Blasen im Meer (Blackpool und The Wash): Tidenlagunen. Grüne Landflächen: Wälder und schnellwachsende Energiepflanzen, gelbgrüne Flächen: Biotreibstoff, beide maßstäblich. Kleine blaue Dreiecke: Müllverbrennung (nicht maßstäblich) große braune Rauten: „Clean Coal“ Kraftwerke, mit CO₂-Abscheidern, Biomasse wird mitverstromt (nicht maßstäblich). Rote Punkte: AKW (nicht maßstäblich) – 3,3 GW mittlere Leistung an jedem der 12 Standorte. Gelbe Sechsecke im Ärmelkanal: CSP-Anlagen in entfernten Wüsten (nicht maßstäblich, jedes 335 km²). Die winkelige Linie in Frankreich repräsentiert neue HVDC-Kabel, 2000 km lang, für 40 GW von der Wüste nach UK. Gelbe Sterne in Schottland: Neue Pumpspeicherwerke. Rote Sterne: bestehende Pumpspeicherwerke. Blaue Punkte: Solarkollektoren für Warmwasser auf allen Dächern.

die Solaranlagen die Kosten dominieren - die Photovoltaik-Anlagen kosten 190 Mrd. und die CSP-Anlagen 340 Mrd. Beide Kostenpunkte mögen dramatisch zurückgehen, wenn wir – „learning by doing“ – diese Technologien ausbauen. Ein interner Regierungsbericht, der dem „Guardian“ im August 2007 zugespielt wurde, schätzt, dass das Erreichen von „20% bis 2020“ (d.h. 20% der Gesamtenergie aus Erneuerbaren, was einem Zubau an Erneuerbaren von 80 GW entspricht) „bis zu 22 Milliarden“ (das wären im Mittel 1,7 Milliarden pro Jahr) kosten könnte. Auch wenn diese Schätzung noch unter den 80 Milliarden liegt, die meine eben erwähnte Faustformel liefert, sahen die Autoren dieses durchgesickerten Berichts diese 22 Milliarden als „unverhältnismäßige“ Kosten an, und zogen eine Zielvorgabe von 9% Erneuerbaren vor. (Ein anderer Grund, den Sie als Gegenargument für „20% bis 2020“ angaben, war die Tatsache, dass man durch die daraus resultierenden Treibhausgas-Einsparungen „riskiere, das EU-Konzept zum Emissionshandel überflüssig zu machen“ - ein schrecklicher Gedanke!)

	Kapazität	Kostenschätzung total	pro Person	Mittlere Leistungsabgabe
52 on-shore Windfarmen: 5200 km ²	35 GW	£27 Mrd	£450	4,2 kWh/d/p
		– auf Basis der Lewis Windfarm		
29 off-shore Windfarmen: 2900 km ²	29 GW	£36 Mrd	£650	3,5 kWh/d/p
		– auf Basis von Kentish Flats, incl. £3 Mrd Investition in Jackup-Bargen		
Pumpspeicher: 15 Anlagen wie Dinorwig	30 GW	£15 Mrd	£250	
PV Freifläche: 1000 km ²	48 GW	£190 Mrd	£3200	2 kWh/d/p
		– auf Basis des Solarparks in Bayern		
Solare Brauchwassermodule: 1 m ² Dachmodule pro Person. (60 km ² ges.)	2,5 GW(th) mittl.	£72 Mrd	£1200	1 kWh/d/p
Müllverbrennung: 100 neue 30-MW-Kraftwerke:	3 GW	£8,5 Mrd	£140	1,1 kWh/d/p
		– auf Basis von SELCHP		
Wärmepumpen	210 GW(th)	£60 Mrd	£1000	12 kWh/d/p
Wellenfarmen – 2500 Pelamis, 130 km Meer	1,9 GW (0,76 GW mittl.)	£6 Mrd?	£100	0,3 kWh/d/p
Severn Sperrwerk: 550 km ²	8 GW (2 GW mittl.)	£15 Mrd	£250	0,8 kWh/d/p
Tidenlagunen: 800 km ²	1,75GW mittl.	£2,6 Mrd?	£45	0,7 kWh/d/p
Gezeitenstrom:15 000 Turbinen – 2000 km ²	18 GW (5,5 GW mittl.)	£21 Mrd?	£350	2,2 kWh/d/p
Kernkraft: 40 AKWs	45 GW	£60 Mrd	£1000	16 kWh/d/p
		– auf Basis von Olkiluoto, Finnland		
“Clean Coal”	8 GW	£16 Mrd	£270	3 kWh/d/p
Concentrating solar in deserts:2700 km ² power	40 GW mittl.	£340 Mrd	£5700	16 kWh/d/p
		– auf Basis von Solarucar		
Land in Europa für 1600 km HVDC Kabeltrasse: 1200 km ²	50 GW	£1 Mrd	£15	
		– angenommene Kosten von £7500 pro ha		
2000 km HVDC Kabel	50 GW	£1 Mrd	£15	
		– auf Basis von Schätzungen des German Aerospace Center		
Biotreibstoff: 30 000 km ²		(Kosten nicht bekannt)		2 kWh/d/p
Holz/Miscanthus: 31.000 km ²		(Kosten nicht bekannt)		5 kWh/d/p

Tabelle 28.3: Benötigte Land- und Seefläche für Plan M, und grobe Kostenschätzung. Kosten mit Fragezeichen bezeichnen Technologien, deren Kosten von den bestehenden Prototypen nicht genau verfügbar sind „1GW(th)“ bedeutet ein GW thermische Leistung

Andere Dinge, die Milliarden kosten

Milliarden sind große Zahlen und es ist schwierig, ein Gefühl für sie zu bekommen. Um die Kosten für den Ausstieg aus fossilen Energien in die richtige Perspektive zu rücken, mag es helfen, andere Dinge aufzulisten, die ebenfalls Milliarden kosten, oder Milliarden pro Jahr. Ich werde außerdem viele dieser Aufwendungen „pro Person“ umrechnen, indem ich die Summe durch die zugeordnete Bevölkerung teile.

Die vielleicht am meisten relevante Größe zum Vergleichen ist das Geld, das wir jetzt schon jedes Jahr für Energie ausgeben. In England ist das Geld, das die Endkunden für Energie bezahlen, 754 Mrd. pro Jahr, und das gesamte Marktvolumen der verbrauchten Energie 130 Mrd. pro Jahr. So gesehen ist die Idee, zusätzliche 1,7 Mrd. jährlich als Investition in zukünftige Energie-Infrastruktur auszugeben, keineswegs „unverhältnismäßig“ – es ist weniger als 3% der derzeitigen Energieausgaben.

Eine andere gute Vergleichsgröße ist der jährliche Aufwand für Versicherungen: Einige der Investitionen, die wir machen müssen, bieten keine Gewissheit auf Rückvergütungen – genau wie bei einer Versicherung. Privatpersonen und Betriebe zahlen in England 90 Mrd. jährlich an Versicherungen.

Subventionen

56 Mrd. £ über 25 Jahre: die Kosten des Rückbaus britischer Kernkraftwerke und Kernwaffenfabriken. Das sind die Zahlen aus 2004. 2008 waren es schon 73 Mrd. (1.200£ pro Person in UK). [6eoyhg]

Transport

4,3 Mrd. £: die Kosten des Terminal 5 am Flughafen London Heathrow. (72 £ pro Person in UK)

1,9 Mrd. £: Kosten für die Verbreiterung der Autobahn M1 (zwischen Anschlussstelle 21 und 30, Fig.28.4). [yu8em5]. (32 £ pro Person in UK)

Besondere Anlässe

Kosten der Olympischen Spiele in London 2012: 2,4 Mrd. £; nein, Entschuldigung, 5 Mrd. [3x2cr4]; oder vielleicht 9 Mrd. [2dd4mz]. (150 £ pro Person in UK)

Normaler Geschäftsbetrieb

£2.5 Mrd./y: Tesco's Gewinn (bekannt gegeben 2007). (£42 pro Jahr pro Person in UK)

£10.2 Mrd./y: Aufwand der Briten für Nahrungsmittel, die sie kaufen aber nicht essen.

£170 pro Jahr pro Person in UK)

£11 Mrd./y: BP's Gewinn (2006).

£13 Mrd./y: Royal Dutch Shell's Gewinn (2006).

\$40 Mrd./y: Exxon's Gewinn (2006).

\$33 Mrd./y: weltweiter Aufwand für Parfum und Make-Up.

\$700 Mrd. pro Jahr: Aufwand in den USA für ausländisches Öl (2008). (\$2300 pro Jahr pro Person in USA)



Fig.28.4: Die Autobahn M1, von Anschlussstelle 21 bis 30

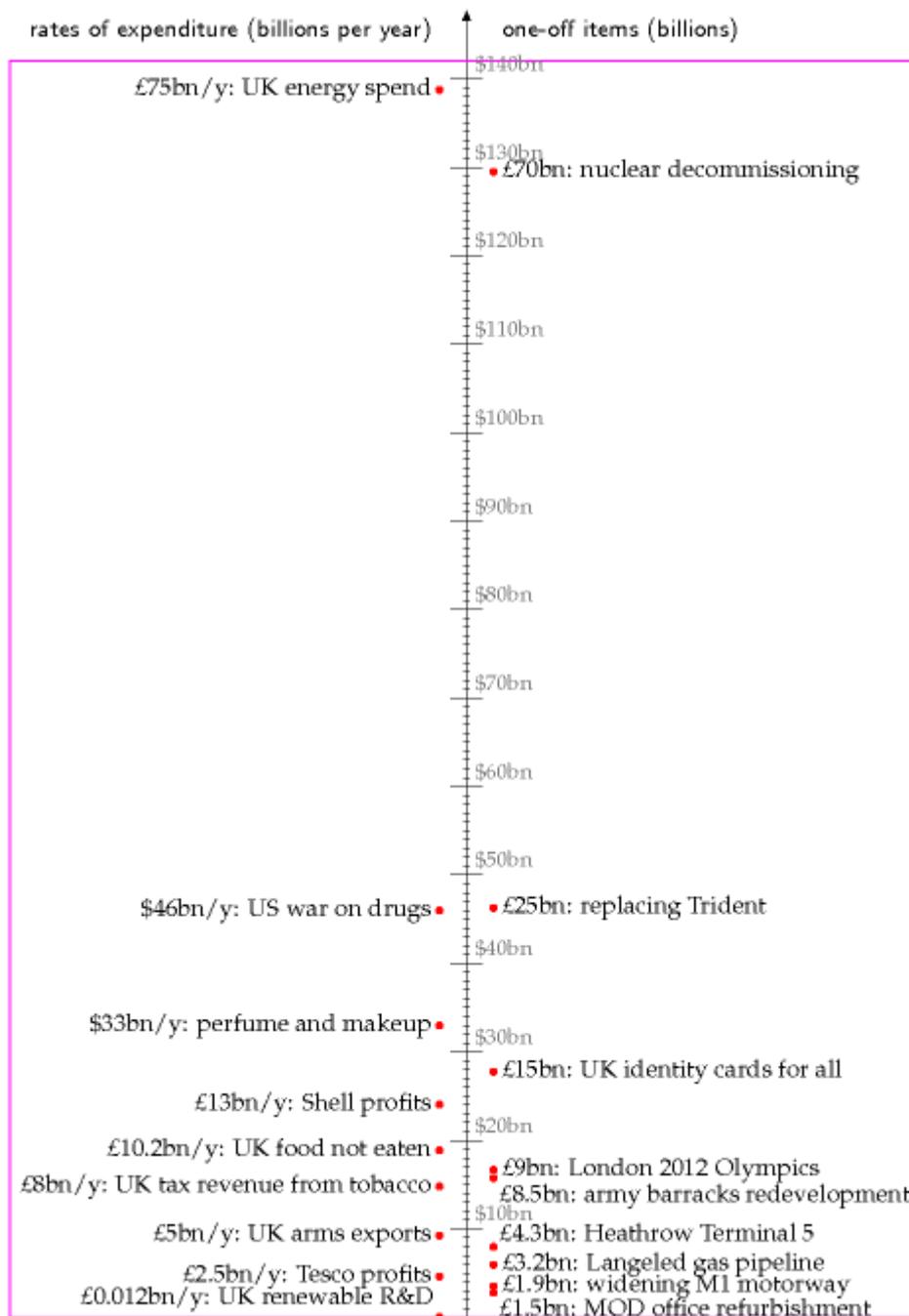


Fig.28.5: Dinge, die in die Milliarden gehen. Die Achse in der Mitte hat große Skalenteiler alle 10 Milliarden, und kleine bei 1 Milliarde.

Normaler Regierungsbetrieb

£1.5 Mrd.: Sanierungskosten für die Büros des Verteidigungsministeriums (Private Eye No. 1176, 19. Januar 2007, S. 5) (£25 pro Person in UK)

£15 Mrd.: Kosten der Einführung des neuen Personalausweises [7vixp]. (£250 pro Person in UK)

Zukunftspläne

£3.2 Mrd.: Kosten der Langeled Pipeline, die Gas norwegischer Hersteller nach England bringt. Die Kapazität der Pipeline ist 20 Mrd. m³ pro Jahr, was einer Leistung von 25 GW entspricht. [6x4nvu] [39g2wz] [3ac8sj]. (£53 pro Person in UK)

Tabaksteuer und ähnliche Spielchen

£8 Mrd./y: Jährliche Einnahmen aus der Tabaksteuer in England [y7kg26]. (£130 pro Jahr pro Person in UK)
Die EU gibt fast 1 Mrd. € Subventionen an Tabakfarmen. www.ash.org.uk
\$46 Mrd./y: Jährliche Kosten des "War on drugs" in USA [r9fcf] (\$150 pro Jahr pro Person in USA)



Weltraum

\$1,7 Mrd.: Die Kosten eines Space Shuttles (\$6 pro Person in USA).

Banken

\$700 Mrd.: Im Oktober 2008 genehmigte die US-Regierung \$700 Mrd. zur Rettung der Wall Street, und...
£500 Mrd. genehmigte die englische Regierung zur Rettung britischer Banken

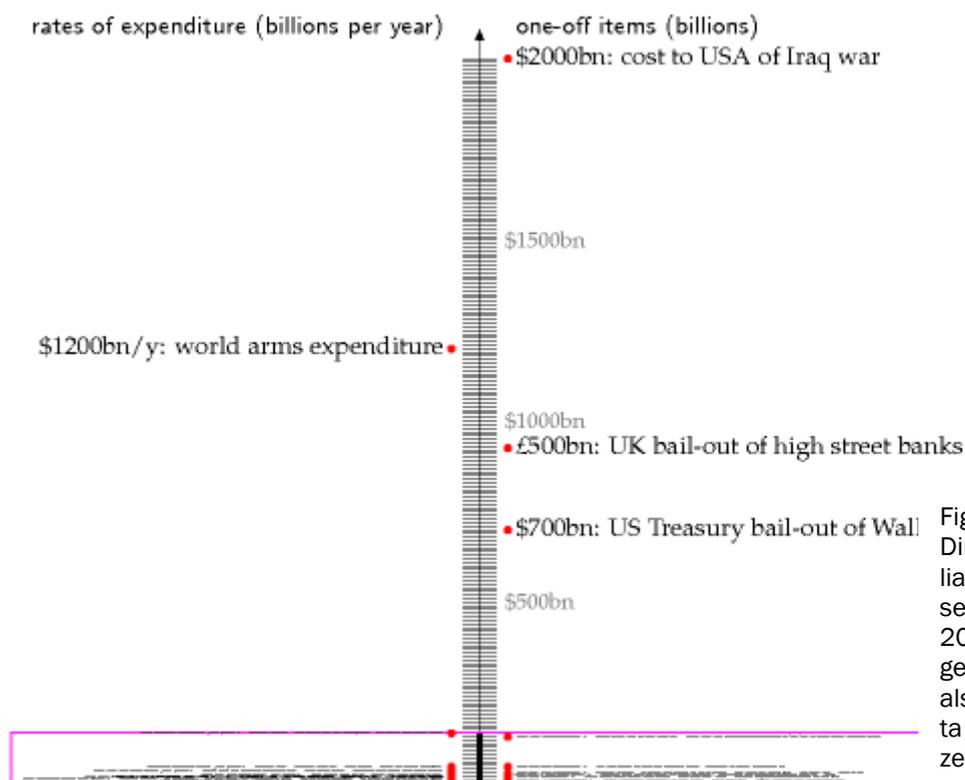


Fig.28.6: Einige weitere Dinge, die in die Milliarden gehen. Die senkrechte Achse ist 20fach gestaucht gegenüber Fig.28.5, die als Rechteck in Magenta maßstäblich eingezeichnet ist.

Militär

£5 Mrd. pro Jahr: Britische Rüstungsexporte (£83 pro Jahr pro Person in UK), wovon £2.5 Mrd. in den Mittleren Osten gehen und £1 Mrd. nach Saudi Arabien. Quelle: Observer, 3. Dezember 2006.
£8.5 Mrd.: Kosten der Sanierung von Kasernen in Aldershot und Salisbury Plain. (£140 pro Person in UK)
£3.8 Mrd.: die Kosten von zwei neuen Flugzeugträgern (£63 pro Person in UK). news.bbc.co.uk/1/low/scotland/6914788.stm

\$4.5 Mrd. pro Jahr: die Kosten, keine Kernwaffen zu bauen – das Budget des Department of Energy enthält mindestens \$4.5 Mrd. pro Jahr für „Erhaltung des Lagerbestandes“ an Nuklearwaffen ohne Atomtests und ohne größere Produktion neuer Waffen. (\$15 pro Jahr pro Person in Amerika)

£10–25 Mrd.: Die Kosten für den Ersatz von Trident, dem britischen Atomabwehrsystem. (£170–420 pro Person in UK) [ysncks].

\$63 Mrd.: amerikanische Spende “militärischer Hilfe” (d.h. Waffen) an den Mittleren Osten über 10 Jahre – etwa zur Hälfte an Israel, zur Hälfte an arabische Staaten. [2vq59t] (\$210 pro Person in USA)

\$1200 Mrd. pro Jahr: weltweite Ausgaben für Waffen [ym46a9]. (\$200 pro Jahr pro Person weltweit.)

\$2000 Mrd. oder mehr: die Kosten der USA für den [99bpt] Irakkrieg, gemäß dem Wirtschafts-Nobelpreisträger Joseph Stiglitz. (\$7000 pro Person in Amerika.)

Nach dem Stern-Report sind die globalen Kosten zum Abwenden des Klimawandels (wenn wir jetzt handeln) \$440 Mrd. pro Jahr (\$440 pro Jahr pro Person, wenn man es gleichmäßig auf die 1 Mrd. reichsten Menschen verteilt). Im Jahr 2005 gab allein die englische Regierung \$480 Mrd. für Krieg und Kriegsvorbereitungen aus. Die gesamten Militärausgaben der 15 darin führenden Länder war \$840 Mrd.

Ausgaben, die nicht in die Milliarden laufen

£0.012 Mrd. pro Jahr: Der kleinste in Fig.28.5 eingezeichnete Beitrag sind die jährlichen Regierungsausgaben in Erforschung und Entwicklung Erneuerbarer Energien. (£0.20 pro Person in UK, pro Jahr.)

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

234 Fig.28.2: 215 *Figure 28.2.* Ich habe angenommen, dass Solarfarmen eine Leistungsdichte von 5 W/m² haben, entsprechend der Solarfarm in Bayern aus Seite 45, also liefert jede Farm auf der Karte 100 MW im Mittel. Die gesamte mittlere Produktion wäre 5 GW, was etwa 50 GW(peak) Kapazität erfordert (das ist 16mal die 2006 in Deutschland installierte Leistung). Die gelben Sechsecke der CSP-Anlagen haben eine mittlere Leistung von jeweils 5 GW. Man braucht zwei davon, um ein „Blob“ aus Kapitel 25 zu versorgen.

234 Ein interner Regierungsbericht, der dem „Guardian“ im August 2007 zugespielt wurde 217A *government report leaked by the Guardian...* Der Bericht im Guardian vom 13. August 2007 lautete [2bmuod] “Offizielle Mitarbeiter der Regierung haben den Ministern vertraulich mitgeteilt, dass England nicht hoffen kann, dem im Frühjahr von Tony Blair unterzeichneten EU-Ziel zu Erneuerbaren Energien nahezukommen – und ihnen geraten Wege zu finden, sich von diesen Zielen zu befreien.” Das zitierte Dokument ist zu finden bei [3g8nn8].

236 weltweiter Aufwand für Parfum 219... *perfume...* Quelle: Worldwatch Institute www.worldwatch.org/press/news/2004/01/07/

239 für Krieg und Kriegsvorbereitungen 221...*wars and preparation for wars...* www.conscienceonline.org.uk

239 die jährlichen Regierungsausgaben in Erforschung und Entwicklung Erneuerbarer Energien –*Government investment in renewable-energy-related research and development.* In den Jahren 2002–3 lagen die staatlichen Zuschüsse zu F&E Erneuerbarer Energien bei 12,2 Mio £. Quelle: House of Lords Science and Technology Committee, 4th Report of Session 2003–04. [3jo7q2] Vergleichsweise

gering ist die Mittelfestsetzung für das Low Carbon Buildings Programme: £0.018bn/y verteilt auf Wind, Biomasse, Solarthermie und PV, Erdwärmepumpen, Klein-Wasserkraft und KWK.

29. Was jetzt zu tun ist

Unless we act now, not some time distant but now, these consequences, disastrous as they are, will be irreversible. So there is nothing more serious, more urgent or more demanding of leadership.

Tony Blair, 30 October 2006

a bit impractical actually. . .

Tony Blair, two months later, responding to the suggestion that he should *show* leadership by not flying to Barbados for holidays.

Was wir tun sollten, hängt teilweise von unserer Motivation ab. Erinnern Sie sich, dass wir auf Seite 5 drei Motivationen für den Ausstieg aus den fossilen Brennstoffen diskutierten: Das Ende billigen Treibstoffs; Versorgungssicherheit; Klimawechsel. Nehmen wir zuerst an, wir wären durch den Klimawechsel motiviert – dass wir unseren CO₂-Ausstoß radikal verringern wollen. (Jeder, der nicht an den Klimawechsel glaubt, kann dieses Kapitel überspringen und auf Seite 242 wieder zum Rest von uns stoßen.)

Was mit der CO₂-Verschmutzung zu tun ist

Wir sind nicht auf dem Weg in eine CO₂-freie Zukunft. Langzeit-Investitionen hierauf werden nicht unternommen. Firmen für CO₂-Sequestrierung blühen nicht, obwohl der Rat von Klimaexperten und Wirtschaftsexperten gleichermaßen nahe legt, dass Kohlendioxid aus der Luft zu saugen vermutlich notwendig werden wird, um einen gefährlichen Klimawechsel abzuwenden. CO₂ wird auch in keinem Kohlekraftwerk ausgefiltert (außer in einer kleinen Versuchsanlage in Deutschland).

Warum nicht?

Das prinzipielle Problem besteht darin, dass die CO₂-Verschmutzung preislich nicht richtig bewertet ist. Und es gibt keine Hinweise, dass sie in Zukunft richtig preislich bewertet werden wird. Wenn ich „richtig“ sage, dann meine ich, der Preis für CO₂-Emission sollte so hoch sein, dass sich für jedes bestehende Kohlekraftwerk die Nachrüstung mit CO₂-Abscheidern lohnt.

Das Klimaproblem zu lösen ist eine schwierige Aufgabe, doch in einem einzigen groben Pinselstrich skizziert sich die Lösung so: Der Preis für CO₂ muss so hoch sein, dass Leute aufhören, Kohle ohne CO₂-Abscheider zu verbrennen. Ein Großteil der Lösung ist in dieser Skizze abgedeckt, denn auf lange Sicht ist Kohle der große fossile Brennstoff. (Der Versuch, Emissionen aus Öl und Gas zu reduzieren ist von untergeordneter Bedeutung, weil voraussichtlich Öl und Gas die nächsten 50 Jahre ohnehin zurückgehen werden.)

Was müssen also die Politiker machen? Sie müssen sicherstellen, dass alle Kohlekraftwerke CO₂-Abscheider installieren. Der erste Schritt hin zu diesem Ziel wäre für die Regierung, ein großangelegtes Demonstrationsprojekt zu finanzieren, um die richtige Technologie für CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS) herauszufinden; zweitens hätten die Politiker die langfristigen Verordnungen für Kraftwerke so zu ändern, dass die perfektionierte CCS-Technik überall angewendet wird. Meine naive Vorstellung von diesem zweiten Schritt ist, ein Gesetz zu erlassen, dass – von einem bestimmten Stichtag an – alle Kohlekraftwerke CCS benutzen müssen. Doch manche Politiker der Demokraten

scheinen zu glauben, dass der Weg, eine Stalltür zu schließen darin besteht, einen Markt für Ausnahmegenehmigungen zum Ofenlassen der Stalltüre zu erzeugen. Wenn wir aber dem Dogma folgen, dass das Klimaproblem durch den Markt gelöst werden soll, was wäre der marktkonforme Weg, unser einfaches Ziel zu erreichen – dass alle Kohlekraftwerke CCS haben? Ja, wir können mit CO₂ handeln – handeln mit Rechten zur Emission von CO₂ und mit Zertifikaten für CO₂-Einfang, und beides ineinander umtauschbar machen. Aber Kohlekraftwerksbetreiber werden in CCS nur investieren, wenn sie überzeugt sind, dass der CO₂-Preis lang genug hoch genug sein wird, dass die CCS-Anlage sich selbst amortisiert. Experten sagen, dass ein langfristig garantierter CO₂-Preis um die 100\$ pro Tonne CO₂ das leisten könnte.

Politiker müssten sich also auf langfristige CO₂-Reduktionsziele einigen, die stark genug sind, um potenziellen Investoren das Vertrauen zu geben, dass der CO₂-Preis dauerhaft auf mindestens 100\$ pro Tonne CO₂ steigen wird. Alternativ könnten sie Emissionsrechte in Auktionen mit einem festen Mindestgebot herausgeben. Ein anderer Weg wäre, dass Regierungen für Investments in CCS bürgen, indem sie garantieren, dass sie CO₂-Einfang-Zertifikate immer zu 100\$ pro Tonne einlösen, egal was auf dem Emissionsmarkt passiert.

Ich frage mich noch, ob es nicht das klügste wäre, die Stalltür direkt zu schließen, anstatt mit einem internationalen Markt herumzuspielen, der nur dazu geschaffen wird, das Schließen der Stalltür zu fördern.

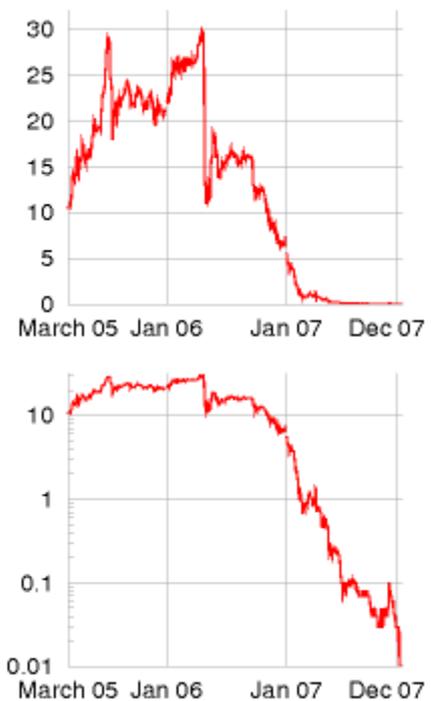


Fig.29.1: A fat lot of good that did! Der Preis für eine Tonne CO₂, in Euro, während der ersten Periode des europäischen Emissionshandelsschemas. Quelle www.eex.com

Britain's energy policy just doesn't stack up. It won't deliver security. It won't deliver on our commitments on climate change. It falls short of what the world's poorest countries need.

Lord Patten of Barnes, Chair of Oxford University task force on energy and climate change, 4 June 2007.

Was mit der Energieversorgung zu tun ist

Lassen Sie uns nun unsere Motivationen erweitern und annehmen, wir wollten aus den fossilen Brennstoffen aussteigen, um die Verlässlichkeit der Energieversorgung zu sichern.

Was sollten wir tun, um die nichtfossile Energieversorgung und Effizienzmaßnahmen voranzubringen? Eine Haltung ist „Lass den Markt das nur regeln. Sobald fossile Brennstoffe teuer werden, werden Erneuerbare und Kernkraft relativ dazu billiger, und der clevere Verbraucher wird effiziente Technologien bevorzugen.“ Ich finde es merkwürdig, dass die Leute soviel Vertrauen in den Markt haben, wenn man bedenkt, wie regelmäßig die Märkte uns Höhenflüge und Abstürze, Kreditklemmen und Zusammenbrüche von Banken liefern. Märkte mögen gut sein für kurzfristige Entschei-

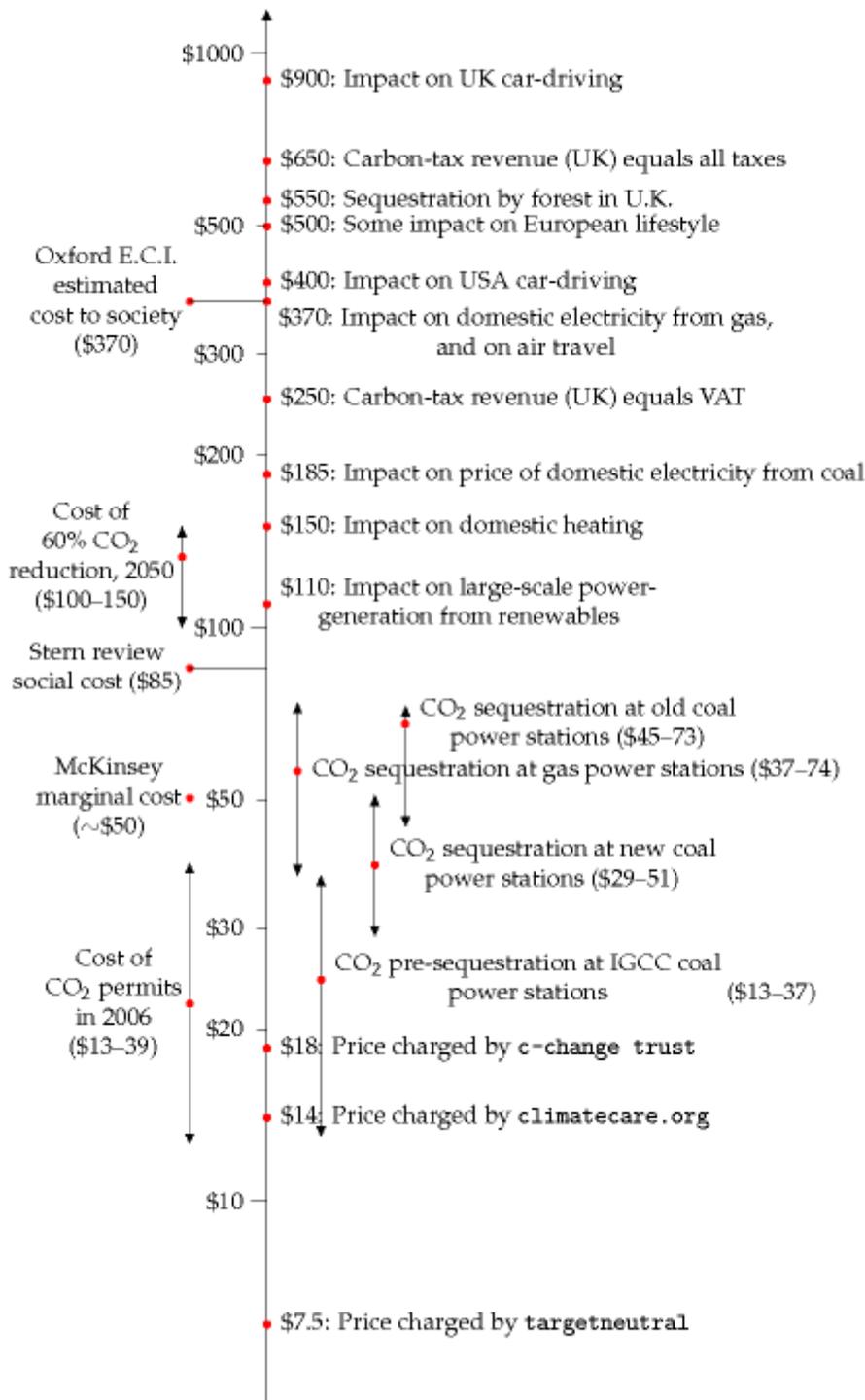


Fig.29.2: Welchen Preis müsste CO₂ haben, damit die Gesellschaft signifikante Änderungen bei der CO₂-Verschmutzung macht? Das Diagramm zeigt CO₂-Kosten pro Tonne, bei denen bestimmte Investitionen ökonomisch werden, oder bestimmte Verhaltensweisen signifikant betroffen sind, wobei eine Verhaltensweise wie Fliegen oder Auto fahren dann als „betroffen“ gilt, wenn die CO₂-Preise die Kosten der Verhaltensweise verdoppeln.

Steigen die Kosten auf 20-70 \$/t, würde CCS ökonomisch für neue und bestehende Kohlekraftwerke. Ein Preis von 100 \$/t würde langfristige erneuerbare Elektrizitätsprojekte, die aktuell 3 Ct/kWh teurer als Gas sind, vom Wunschtraum zur finanzierbaren Unternehmung machen. Das vorgeschlagene Severn-Stauwerk etwa würde Gezeitenkraft zu etwa 6 Ct/kWh liefern können, was 3,3 Ct über dem gegenwärtigen Strompreis von 2,7 Ct/kWh liegt. Wenn je 1000 kWh vom Stauwerk 1 Tonne CO₂ vermeidet im Wert von 60£/t, würde sich das Severn-Stauwerk mehr als rechnen.

Bei 150\$/t würden Haushalte, die Gas benutzen, die CO₂-Kosten auf ihren Heizrechnungen bemerken. Ein Preis von 250\$/t würde die effektiven Kosten von 1 Barrel Öl um 100\$ erhöhen. Bei 500\$/t CO₂ würde die Lust der Menschen am Fliegen signifikant zurückgehen.

Bei 500\$/t würde ein Durchschnittseuropäer, der seinen Lebensstil nicht ändern, 12% seines Einkommens für CO₂-Kosten von Auto, Flugreisen und Gasheizung ausgeben. Und bei 900 \$/t wäre die Kostensteigerung beim Autofahren spürbar.

dungen – für Investments die sich innerhalb von 10 Jahren oder so rechnen – doch können wir damit rechnen, dass Märkte gute Arbeit leisten für Entscheidungen über Energie, Entscheidungen, deren Auswirkungen viele Jahrzehnte oder Jahrhunderte andauern?

Wenn wir den freien Markt Häuser bauen lassen, enden wir mit Häusern, die armselig isoliert sind. Moderne Häuser sind nur dank der Gesetzgebung energie-effizienter.

Der freie Markt ist auch nicht verantwortlich für den Straßen- und Eisenbahnbau, für Buslinien, Parkplätze und Radwege. Doch Straßenbau und die Bereitstellung von Parkplätzen haben eine signifikante Auswirkung auf die Transportmöglichkeiten der Leute. Auch die Bauleitplanung, die festlegt, wo Wohnungen und Arbeitsstätten errichtet werden und wie dicht die Häuser in das Land gepackt werden, haben einen überwältigenden Einfluss auf das zukünftige Verkehrsverhalten der Bürger. Wenn eine neue Stadt gebaut wird, die keinen Bahnhof hat, ist es unwahrscheinlich, dass deren Einwohner Langstreckenreisen mit der Bahn unternehmen werden. Wenn Wohnung und Arbeit mehr als ein paar Kilometer voneinander entfernt sind, haben viele Leute kaum eine andere Wahl, als mit dem Auto zur Arbeit zu fahren.

Einer der größten Energieverbraucher ist die Produktion von Waren; in einem freien Markt versorgen uns viele Hersteller mit Waren, die schon eine eingeplante Veralterung haben, Waren, die weggeworfen und ersetzt werden müssen, damit der Hersteller mehr Geschäft macht.

Wenn Märkte auch eine gewisse Rolle spielen mögen, ist es doch dumm zu sagen „Lass die Märkte *alles* machen“. Sicherlich werden wir über Gesetzgebung, Vorschriften und Steuern reden müssen.

Das grüne Steuersystem

We need to profoundly revise all of our taxes and charges. The aim is to tax pollution – notably fossil fuels – more, and tax work less.

Nicolas Sarkozy, President of France

Momentan ist es viel billiger, eine Mikrowelle, einen DVD-Player oder einen Staubsauger neu zu kaufen als einen defekten zu reparieren. Das ist verrückt.

Diese Verrücktheit ist teilweise durch unser Steuersystem verursacht, das die Arbeit des Mikrowellen-Reparaturmechanikers besteuert und sein Geschäft mit zeitfressendem Papierkram umklammert. Er macht etwas Gutes, er repariert meine Mikrowelle! – aber das Steuersystem erschwert ihm sein Geschäft.

Die Idee des grünen Steuersystems ist, Steuern von den *guten* Dingen, wie Arbeit auf *schlechte* Dinge wie Umweltzerstörung zu verlagern. Verfechter der Umwelt-Steuerreform schlagen vor, Steuerensenkungen bei den „guten“ Dingen mit äquivalenten Steuererhöhungen bei den „schlechten“ Dingen zu kompensieren, so dass die Steuerreform insgesamt kostenneutral bleibt.

Ökosteuer

Die wichtigste Steuer, die wir erhöhen müssen, um fossile-Energie-freie Technologien zu fördern, ist die Ökosteuer auf CO₂-Ausstoß. Der Preis für CO₂ muss hoch genug sein, um Investitionen in Alternativen zu fossilen Brennstoffen und Investitionen in Effizienzmaßnahmen zu fördern. Wie Sie bemerken, ist das genau dieselbe Politik, wie sie im vorigen Abschnitt gefordert wurde. Egal, ob unsere Motivation aus dem Klimaproblem oder aus der Sorge um Versorgungssicherheit kommt, das politische Ergebnis ist dasselbe: Wir brauchen einen CO₂-Preis, der stabil und hoch ist. Fig.29.2 zeigt ganz grob, welche CO₂-Preise für verschiedene Verhaltensänderungen oder Investitionen erforderlich sind; und die viel geringeren Preise, die verschiedene Organisationen zum „Ausgleich“ von Treibhausgas-Emissionen fordern. Wie kann man am besten einen hohen Kohlenstoffpreis organisieren? Ist der EU-Emissionshandel (Fig.29.1) ein gangbarer Weg? Diese Frage liegt im Sachgebiet von Ökonomen und Experten

internationaler Politik. Die Ansicht der Ökonomen Michael Grubb und David Newbery aus Cambridge ist, dass der EU-Emissionshandel nicht funktioniert – „bestehende Instrumentarien erreichen keine adäquate Wirkung auf Investitionen.“

The Economist fordert Ökosteuer als primären Mechanismus der regierungsseitigen Unterstützung sauberer Energie. Die „Quality of Life Group“ der Konservativen Partei Englands fordert ebenfalls, Umweltsteuern zu erhöhen und andere Steuern zu senken – „Besteuerung von „bezahle für das, was du verdienst“ auf „bezahle für das, was du verbrennst“ verschieben.“ Auch die Royal Commission on Environmental Pollution sagt, dass England eine Ökosteuer einführen sollte: „Sie sollte an der Quelle ansetzen und alle Sektoren umfassen.“

Es gibt also klare Unterstützung für eine hohe Ökosteuer, begleitet von einer Reduktion der Einkommens-, Körperschafts- und Umsatzsteuer. Doch Steuern und Märkte allein werden nicht alle erforderlichen Aktionen erbringen können. Der Steuer- und Markt-Ansatz schlägt fehl, wenn Verbraucher manchmal irrational entscheiden, wenn Verbraucher kurzfristiges Geld höher schätzen als langfristige Einsparungen, oder wenn jemand bei der Kaufentscheidung nicht alle damit verbundene Kosten bedenkt.

In der Tat sind viele Marken „beruhigend teuer.“ Die Kaufentscheidung wird nicht nur durch Preissignale bestimmt. Viele Verbraucher schauen mehr auf Image und Anerkennung, und manche kaufen absichtlich teure Dinge.

Ist eine ineffiziente Sache einmal gekauft, ist es zu spät. Es ist entscheidend, dass ineffiziente Dinge erst gar nicht hergestellt werden; oder dass der Verbraucher sich beim Kauf leiten lässt, keine ineffizienten Dinge zu kaufen.

Hier sind einige weitere Beispiele, wo der freie Markt versagt.

Die Markteintritts-Barriere

Stellen Sie sich vor, Steuern wären ausreichend hoch, dass ein neues super-duper CO₂-freies Dingsbums 5% weniger kostet als sein langeingesessener CO₂-belasteter Rivale, das Dino-Dingsbums, *wenn* er in derselben Menge massenproduziert werden kann. Dank cleverer Technologie ist die CO₂-Emission des Öko-Dingsbums um 90% geringer als beim Dino-Dingsbums. Es ist klar, dass es gut für die Gesellschaft wäre, wenn jeder nun Öko-Dingsbumse kaufen würde. Doch momentan sind die Verkaufszahlen des Öko-Dingsbums niedrig, und daher die Kosten pro Stück höher als beim Dino-Dingsbums. Nur ein paar Natur-Fuzzis und Fortschrittsfreaks kaufen das Öko-Dingsbums, und Öko-Dingsbums Inc. zieht sich aus dem Markt zurück.

Vielleicht sind Regierungsinterventionen notwendig, um den Übergang zu ölen und der Innovation eine Chance zu geben. Unterstützung für Forschung und Entwicklung? Steuervorteile, die das neue Produkt bevorzugen (wie die Steuervorteile, die den Übergang vom verbleiten zum bleifreien Benzin „ölten“)?

Das Problem kleiner Kostenunterschiede

Stellen Sie sich vor, Öko-Dingsbums Inc. hätte es von der Kaulquappe zum Frosch geschafft, und dass die Ökosteuer hoch genug ist, damit das Öko-Dingsbums tatsächlich 5% weniger kostet als sein alteingesessener Rivale von der Dino-Dingsbums Inc. Sicherlich werden jetzt die ökosteuerlichen Umstände dazu führen, dass alle Verbraucher das CO₂-freie Öko-Dingsbums kaufen? Ha! Zuerst, viele Verbraucher kümmern sich nicht um eine 5% Preisdifferenz. Image ist alles. Zweitens wird Dino-Dingsbums Inc., wenn sie sich überhaupt von Öko-Dingsbums bedroht fühlt, ihr Dino-Dingsbums wiedereinführen, unterstreichen, dass es viel patriotischer ist, verkünden, dass es nun auch in grün

verfügbar ist, und coole Persönlichkeiten zeigen, die sich mit dem guten alten Dino-Dingsbums schmücken. „Echte Männer brauchen Dino-Dingsbums.“ Hilft das nicht, wird Dino-Dingsbums Inc. Pressemeldungen lancieren, Wissenschaftler hätten die Möglichkeit nicht ausschließen können, dass länger anhaltender Gebrauch von Öko-Dingsbumsen Krebs verursacht, und den Fall einer alten Frau groß herausbringen, die durch ein Öko-Dingsbums zu Fall gebracht wurde, oder den Verdacht äußern, dass Öko-Dingsbumse die kleine gefleckte Frucht-Fledermaus bedrohen. Furcht, Unsicherheit, Zweifel. Als Rückfallplan könnte Dino-Dingsbums Inc. immer noch die Firma Öko-Dingsbums komplett aufkaufen. Das Produkt, das dabei gewinnt, wird nichts mit Energiesparen zu tun haben, wenn der ökonomische Anreiz für den Verbraucher nur bei 5% liegt.

Das Problem von Harry und Mona

Stellen Sie sich vor, dass Harry der Hausbesitzer ein Appartement vermietet, an Mona die Mieterin. Harry ist verantwortlich für die Instandhaltung des Appartements und für die Geräte darin, und Mona zahlt die monatlichen Rechnungen für Heizung und Strom. Hier ist das Problem: Harry hat keine Veranlassung, in Veränderungen zu investieren, die Monas Rechnungen verringern würden. Er könnte effizientere Lampen installieren, und einen effizienteren Kühlschrank einbauen; diese umweltschonenden Geräte würden leicht ihren Aufpreis im Laufe ihres Lebens zurückzahlen, doch würde davon Mona profitieren, nicht Harry. Ähnlich wenig Veranlassung spürt Harry, die Wärmedämmung des Appartements zu verbessern oder Doppelglasfenster einzubauen, besonders wenn er das Risiko in Betracht zieht, dass Monas Freund Wayne eines der Fenster zerschlagen könnte, wenn er betrunken ist. Prinzipiell würden Harry und Mona in einem perfekten Marktumfeld die richtigen Entscheidungen treffen: Harry würde all die Energiesparmaßnahmen durchführen und Mona eine etwas höhere Miete abverlangen; Mona würde erkennen, dass es sich in dem nun modern und gut ausgestatteten Appartement billiger lebt und daher gerne die höhere Miete zahlen; Harry würde eine erhöhte Kautions fordern für den Fall, dass eines der neuen teuren Fenster zerbricht; und Mona würde rational reagieren und Wayne rausschmeißen. Doch glaube ich nicht recht, dass Harry und Mona ein perfektes Marktumfeld schaffen werden. Mona ist arm und hat Probleme, hohe Kautions zu hinterlegen. Harry will das Appartement möglichst rentabel vermieten, und Mona misstraut seinen Versprechungen niedriger Energierechnungen, vermutet, dass Harry übertreibt.

Daher ist irgendeine Intervention erforderlich, um Harry und Mona das Richtige tun zu lassen – beispielsweise könnte die Regierung eine hohe Steuer auf ineffiziente Geräte erheben; den Verkauf von Kühlschränken verbieten, die gewisse ökonomische Grenzwerte nicht erreichen; oder ein verpflichtendes unabhängiges Bewertungssystem für das Appartement einführen, so dass Mona sich über das Energieprofil des Appartements informieren kann, bevor sie den Mietvertrag unterschreibt.

Investitionen in Forschung und Entwicklung

We deplore the minimal amounts that the Government have committed to renewable-energy-related research and development (£12.2 million in 2002-03). . . . If resources other than wind are to be exploited in the United Kingdom this has to change. We could not avoid the conclusion that the Government are not taking energy problems sufficiently seriously.

House of Lords Science and Technology Committee

The absence of scientific understanding often leads to superficial decision-making. The 2003 energy white paper was a good example of that. I would not like publicly to call it amateurish but it did not tackle the problem in a realistic way.³⁸

Sir David King, former Chief Scientist

Serving on the government's Renewables Advisory Board . . . felt like watching several dozen episodes of Yes Minister in slow motion. I do not think this government has ever been serious about renewables.

Jeremy Leggett, founder of Solarcentury

Ich denke, die Zahlen sprechen für sich. Sehen Sie einfach auf Fig.28.5 (Seite 237) und vergleichen Sie die Milliarden, die für Bürosanierung und Militärspielzeug ausgegeben werden, mit dem hundertmal kleineren Beitrag zu Forschung und Entwicklung im Umfeld Erneuerbarer Energien. Es braucht Jahrzehnte um Erneuerbare Technologien wie Tidenstromkraft oder Sonnenenergie zu entwickeln. Kernfusion braucht auch noch Jahrzehnte. All diese Technologien brauchen dringend Unterstützung, wenn sie erfolgreich sein sollen.

Individuelle Maßnahmen

Manchmal fragen mich Leute „Was kann *ich persönlich* tun?“ Tabelle 29.3 zeigt acht einfache persönliche Maßnahmen, die ich empfehle, und eine *ganz grobe* Schätzung der Einsparmöglichkeiten in Zusammenhang mit der jeweiligen Maßnahme. Es gelten die üblichen Einschränkungen, ohne Gewähr. Ihre Einsparungen hängen von Ihrem Startpunkt ab. Die Zahlen in Tabelle 29.3 nehmen als Startpunkt den etwas überdurchschnittlichen Verbraucher.

Einfache Maßnahme	Mögliche Einsparung
Ziehe einen Wollpullover an und drehe den Thermostat der Heizung herunter (auf 15 oder 17 °C etwa). Montiere einzelne Thermostate an alle Heizkörper. Stelle sicher, dass die Heizung aus ist, wenn keiner zuhause ist. Mach es an deiner Arbeitsstelle genauso.	20 kWh/d

³⁸ „Das Fehlen wissenschaftlichen Verständnisses führt oft zu oberflächlichen Entscheidungen. Das 2003 Energiepapier war ein gutes Beispiel dafür. Ich würde es nicht gerne in aller Öffentlichkeit amateurhaft nennen wollen, aber es packte das Problem nicht auf realistische Weise an.“

Lies Deine Zähler (für Gas, Strom, Wasser) jede Woche ab und achte auf einfache Veränderungen, die den Verbrauch reduzieren (z.B. Abschalten von Geräten). Mache Vergleichswettkämpfe mit Deinen Freunden. Lies auch die Zähler an Deiner Arbeitsstelle ab, so dass Du eine durchgehende Kontrolle Deines Energiebedarf erhältst.	4 kWh/d
Flieg' nicht mehr mit dem Flugzeug.	35 kWh/d
Fahre weniger Auto, fahre langsamer, fahre ruhiger, nutze Fahrgemeinschaften, fahre Elektroauto, tritt einem Autoclub bei, fahre Rad, gehe zu Fuß, benutze Bus und Bahn.	20 kWh/d
Nutze alte Geräte (z.B. Computer) weiter, ersetze sie nicht so früh.	4 kWh/d
Ändere die Beleuchtung auf Energiesparlampen oder LED.	4 kWh/d
Don't buy clutter. Vermeide Verpackung.	20 kWh/d
Iss vegetarisch, an sechs Tagen pro Woche.	10 kWh/d

Tabelle 29.3: Acht einfache persönliche Maßnahmen

Die obigen Maßnahmen sind einfach zu realisieren, doch die folgenden in Tabelle 29.4 benötigen etwas mehr Planung, Entschlossenheit und Geld.

Größere Maßnahme	Mögliche Einsparung
Zug und Kältebrücken eliminieren.	5 kWh/d
Doppelverglasung.	10 kWh/d
Wand-, Dach- und Bodendämmung verbessern.	10 kWh/d
Solare Brauchwasser-Module.	8 kWh/d
Photovoltaik-Module.	5 kWh/d
Altbau abreißen und neu bauen.	35 kWh/d
Öl- oder Gasheizung durch Erd- oder Luft-Wärmepumpen ersetzen.	10 kWh/d

Tabelle 29.4: sieben schwierigere Maßnahmen

Zuletzt zeigt Tabelle 29.5 zwei Aufsteiger: einfache Maßnahmen mit kleinen Einsparungen.

Maßnahme	Mögliche Einsparung
Wäschewaschen in kaltem Wasser.	0.5 kWh/d
Benutze keinen Trockner; benutze stattdessen eine Wäscheleine.	0.5 kWh/d

Tabelle 29.5: Einige weitere einfache Maßnahmen mit kleinen Einsparungen

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 241 *“a bit impractical actually”* Der Gesamttext des Interviews mit Tony Blair (vom 9. Januar 2009) ist hier [2ykfgw]. Hier einige Auszüge daraus: **Interviewer:** Haben Sie erwogen, nicht nach Barbados in Urlaub zu fliegen und auf all diese Flugmeilen nicht verzichten? **Tony Blair:** Ich würde, offen gestanden, nur sehr widerwillig meine Urlaubsreise aufgeben. **Interviewer:** Das würde doch ein klares Signal aussenden, oder? ... - Ferien näher zu Hause? **Tony Blair:** Nun ja – doch ich persönlich finde es gerade ein wenig unpraktikabel, von den Leuten das jetzt zu erwarten. Ich denke, was wir tun sollten ist zu versuchen, den Flugverkehr energie-effizienter zu machen, und wie wir neue Treibstoffe entwickeln die uns gestatten, weniger Energie zu verbrennen und weniger zu emittieren. Wie beispielsweise bei den neuen Flugzeugformen, die viel effizienter sind. Ich weiß dass jeder immer – die Leute denken wahrscheinlich, der Premierminister sollte überhaupt keine Ferien machen, doch ich denke, dass wir den Leuten unrealistische Zielvorstellungen geben, wissen Sie, wenn wir etwa sagen, wir sollten all den billigen Flugverkehr abschaffen. Wissen Sie, ich warte noch auf den ersten Politiker, der sich für ein Amt bewirbt und sich dabei outet und genau das fordert – aber so jemanden sehe ich nicht.
Ein anderes Zitat: “Wenn wir nicht jetzt handeln, und nicht zu einer Zeit jenseits des Jetzt, werden diese Konsequenzen, katastrophal wie sie sind, unumkehrbar sein. Deshalb ist nichts ernster, nichts dringender und nichts mehr nach Führerschaft verlangend.” sagte Tony Blair am Anfang des Stern-Reports, 30. Oktober 2006 [2nsvx2]. Siehe auch [yxq5xk] zu weiteren Kommentaren.
- 244 **Umwelt-Steuerreform** 225 *Environmental tax reform*. Siehe bei Green Fiscal Commission, www.greenfiscalcommission.org.uk.
- 245 *The Economist* fordert Ökosteuer 226 *The Economist recommends a carbon tax*. “Nuclear power’s new age,” *The Economist*, 8. September 2007.
- 245 Die „Quality of Life Group“ der Konservativen Partei – *The Conservative Party’s Quality of Life Policy Group* – Gummer et al. (2007).

30. Energiepläne für Europa, Amerika und die Welt

Fig.30.1. zeigt den Energiebedarf vieler Länder und Regionen, aufgetragen über dem Bruttosozialprodukt (BSP). Es wird weithin angenommen, dass Entwicklung und Wachstum der Menschheit eine gute Sache wären, wenn ich also die Weltpläne für nachhaltige Energie umreißer, werde ich annehmen, dass alle Länder mit niedrigem BSP pro Kopf sich in Fig.30.1 nach rechts entwickeln. Und mit ihrem BSP werden diese Länder unausweichlich auch ihren Energieverbrauch erhöhen. Es ist nicht klar, welches Verbrauchsverhalten wir dafür einplanen sollten, doch denke ich, der europäische Mittelwert (125 kWh pro Tag pro Person) ist eine realistische Annahme; alternativ könnten wir auch davon ausgehen, dass Effizienz steigernde Maßnahmen, wie wir sie in Kapitel 19-28 für das vereinfachte England aufgezeigt haben, allen Ländern europäischen Lebensstandard mit geringerem Energieverbrauch erlauben. Im Plan für den Verbrauch auf Seite 224 fiel der Verbrauch im vereinfachten England auf etwa **68 kWh/d/p**. Behalten wir im Gedächtnis, dass im vereinfachten England kaum industrielle Aktivitäten vorhanden waren, wäre es vielleicht angebracht, eine etwas höhere Zielvorgabe anzunehmen, vielleicht **80 kWh/d/p** wie in Hong Kong.

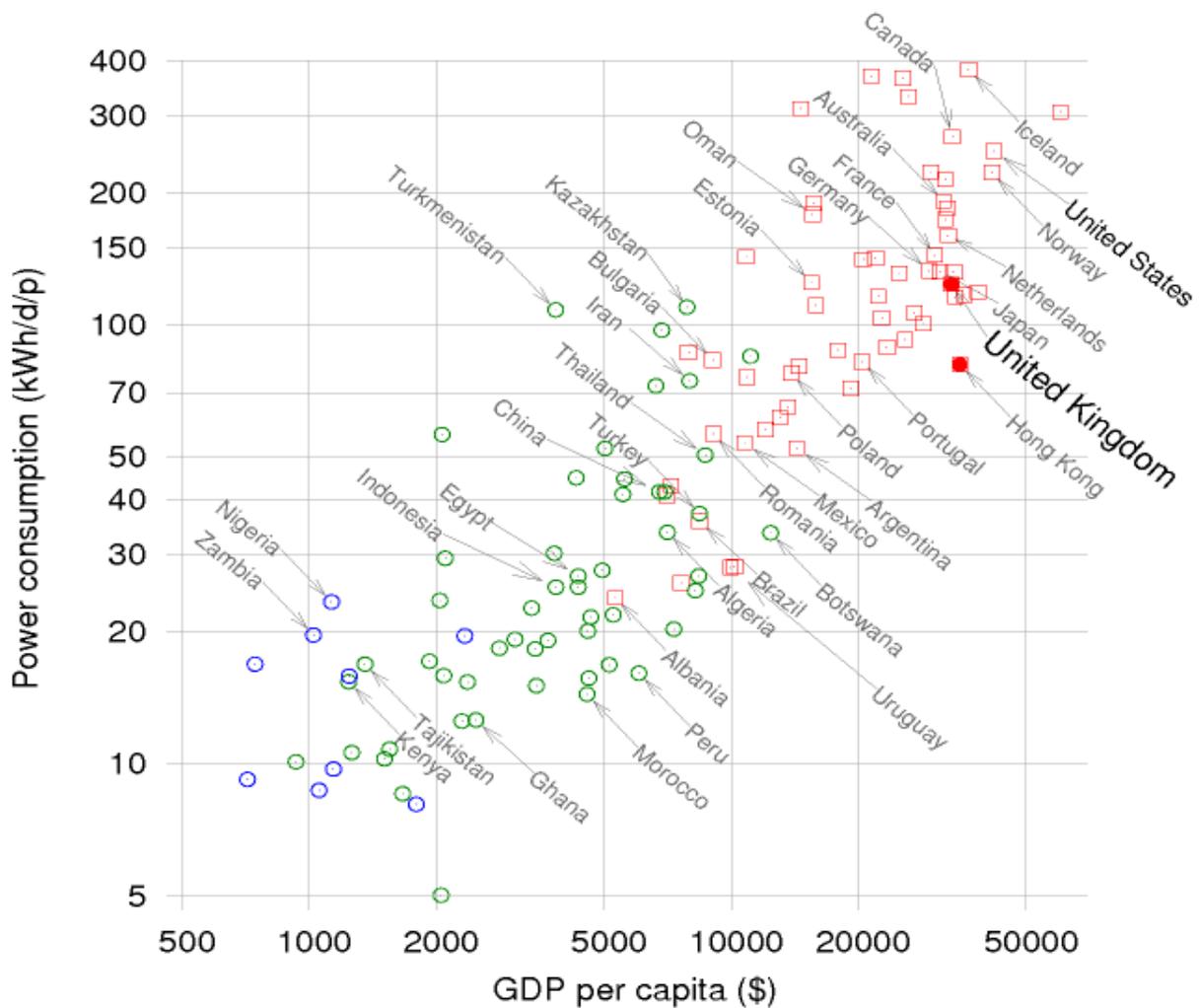


Fig.30.1: Energieverbrauch pro Kopf vs. BSP pro Kopf, in Kaufkraft-Äquivalent US-\$. Daten von UNDP Human Development Report, 2007. Quadrate zeigen Länder mit "hohem Entwicklungsstand", Kreise mit „niederm“ oder „mittlerem“. Beide Achsen sind in logarithmischem Maßstab. Fig.18.4 zeigt dieselben Daten in linearem Maßstab.

Wiederholung der Berechnungen für Europa

Kann Europa von seinen Erneuerbaren leben?

Europas Bevölkerungsdichte ist etwa halb so groß wie Englands, also steht mehr Land zur Verfügung, um große Anlagen für Erneuerbare zu platzieren. Die Fläche der EU ist etwa 9000 m² pro Person. Allerdings haben viele Erneuerbare in Europa eine geringere Energiedichte (pro Fläche) als in England: Der Großteil Europas hat weniger Wind, weniger Wellen und weniger Gezeiten. Einige Teile haben aber mehr Wasserkraft (in Skandinavien und Zentraleuropa); und manche haben mehr Solar. Lassen Sie uns die groben Zahlen bestimmen.

Wind

Das Herz des kontinentalen Europas hat niedrigere typische Windgeschwindigkeiten als die britischen Inseln – in einem Großteil Italiens beispielsweise liegen die Windgeschwindigkeiten unter 4 m/s. Nehmen wir an, dass ein Fünftel Europas genügend hohe Windgeschwindigkeiten für ökonomische Windfarmen aufweist, mit einer Leistungsdichte von 2 W/m², und nehmen wir weiter an, wir behandeln diese Regionen wie England in Kapitel 4 und füllen sie zu 10% mit Windfarmen. Die Gesamtfläche der EU ist etwa 9000 m² pro Person, also liefert der Wind

$$1/5 \times 10\% \times 9000 \text{ m}^2 \times 2 \text{ W/m}^2 = 360 \text{ W},$$

was 9 kWh/d pro Person bedeutet.

Wasserkraft

Die derzeitige Produktion von Wasserkraft liegt bei insgesamt 590 TWh/y oder 67 GW. Auf 500 Millionen Menschen verteilt sind das 3,2 kWh/d/p. Die Produktion ist hauptsächlich in Norwegen, Frankreich, Schweden, Italien, Österreich und der Schweiz. Würde jedes Land seine Wasserkraft-Kapazität verdoppeln – was wohl nicht einfach wäre – würde Wasserkraft einen Beitrag von 6,4 kWh/d pro Person liefern.

Wellen

Nehmen wir die gesamte Atlantikküste (etwa 4000 km) und multiplizieren das mit einer mittleren Produktionsrate von 10 kW/m, erhalten wir 2 kWh/d pro Person. Ostsee und Mittelmeer haben keine erwähnenswerten Wellenressourcen.

Gezeiten

Nehmen wir das Doppelte des für England abgeschätzten Gezeitenpotenzials, sollte dies die französischen, irischen und norwegischen Gezeitenkraft-Ressourcen berücksichtigen. Aufgeteilt auf 500 Millionen Menschen erhalten wir 2,6 kWh/d pro Person. Ostsee und Mittelmeer haben keine erwähnenswerten Gezeitenressourcen.

Photovoltaik und Solarthermie auf den Dächern

Die meisten Orte Europas sind sonniger als England, deshalb liefern PV-Module auf dem Kontinent mehr Leistung. 10 m² erzeugen etwa 7 kWh/d an allen Orten südlich von England. Genauso können Warmwasser-Module im Mittel 3,6 kWh/d niederstufige Wärmeenergie liefern. (Ich sehe keine Veranlassung, mehr als 2 m² Solarthermie pro

Person anzusetzen, weil diese Kapazität bereits ausreicht, den typischen Warmwasserbedarf abzudecken.)³⁹

Was noch?

Die bisherige Summe ist $9 + 6,4 + 2 + 2,6 + 7 + 3,6 = 30,6$ kWh/d pro Person. Die einzigen bisher noch unberücksichtigten Ressourcen sind Geothermie und großflächige Solarfarmen (mit Spiegeln, Modulen oder Biomasse).

Geothermie könnte funktionieren, ist aber noch im Forschungsstadium. Ich denke, man sollte sie behandeln wie die Fusion: Eine gute Investition aber noch nicht verlässlich.

Aber was ist mit Solarfarmen? Wir könnten uns 5% Europas (450 m^2 pro Person) an Freiflächen-PV-Anlagen vorstellen, etwa wie die in Bayern aus Fig.6.7 (mit einer Leistungsdichte von 5 W/m^2). Dies würde eine mittlere Leistung von

$$5 \text{ W/m}^2 \times 450 \text{ m}^2 = 54 \text{ kWh/d pro Person}$$

erbringen. PV würde damit einen substantziellen Beitrag leisten. Das Hauptproblem der PV-Module sind aber ihre Kosten. Die Energiegewinnung im Winter ist ebenfalls bedenklich.

Energiepflanzen? Pflanzen fangen nur $0,5 \text{ W/m}^2$ (Fig.6.11). Geht man davon aus, dass Europa sich selbst ernähren soll, kann der Energiebeitrag europäischer Pflanzen jenseits der Verwendung als Nahrung nicht enorm sein. Ja, es wird hier und da Rapsöl-Felder und Forstwirtschaft geben, doch kann ich mir nicht vorstellen, dass die non-food-Anteile der Pflanzen mehr als $12 \text{ kWh/d pro Person}$ ausmachen.

Die Grundlast

Lassen Sie uns realistisch sein: Genau wie England kann auch Europa nicht von seinen eigenen Erneuerbaren leben. Wenn das Ziel also der Ausstieg aus den fossilen Brennstoffen ist, braucht Europa Kernkraft oder Solarfarmen in den Wüsten anderer Leute (wie in Fig.25.5 auf Seite 199), oder beides.

Wiederholung der Berechnungen für Nordamerika

Der Durchschnittsamerikaner verbraucht 250 kWh pro Tag. Können wir diese Vorgabe mit Erneuerbaren erreichen? Was, wenn wir schockierende Effizienz-Maßnahmen einführen (wie sparsame Autos oder Hochgeschwindigkeitszüge), so dass die Amerikaner ins Elend des Lebensstandards eines Europäers oder Japaners von lediglich 125 kWh/d gestürzt würden?

Wind

Eine Studie von Elliott et al. (1991) eruierte das Windenergiepotenzial der USA. Die windigsten Gebiete sind North Dakota, Wyoming und Montana. Sie berechneten, dass über die gesamten Staaten 435.000 km^2 Windfläche ausgebeutet werden könnte, ohne



Fig.30.2: Ein solares Warmwassermodul, das heißes Wasser für eine Familie in Michigan bereitstellt. Die Pumpe des Systems wird von dem kleinen PV-Modul links angetrieben.

³⁹ Solarthermische Heizungsunterstützung durch zusätzliche Warmwasser-Module könnte aber für viele Gegenden auch über diesen Ansatz hinaus sinnvoll sein.

dass dadurch zu vielen die Nackenhaare aufstehen müssten, und dass die dort erzeugte Elektrizität 4.600 TWh pro Jahr wäre, etwa 42 kWh/d/p gleichmäßig auf 300 Millionen Amerikaner verteilt. Die Berechnungen gingen von einer mittleren Energiedichte von 1,2 W/m² aus – weniger als die 2 W/m², die wir in Kapitel 4 zu Grunde legten. Die Fläche dieser Windfarmen, 435.000 km², ist etwa die Fläche Kaliforniens. Die erforderlichen Wind-Anlagen (bei einem Load-Faktor von 20%) hätten eine Kapazität von 2.600 GW, was einen 200fachen Zuwachs gegenüber dem Bestand der USA bedeutet.

Off-shore Wind

Wenn wir die seichten Küstengewässer mit einer Fläche etwa gleich der Summe von Delaware und Connecticut (20.000 km², ein substanzieller Anteil der gesamten flachen Küstengewässer der US-amerikanischen Ostküste) mit Windparks füllen, die eine Leistungsdichte von 3 W/m² erreichen, erhalten wir eine mittlere Leistung von 60 GW. Das sind 4,8 kWh/d/p auf 300 Millionen Menschen verteilt. Die erforderlichen Anlagen wären 15mal so viel wie die derzeit bestehenden Anlagen der USA.

Geothermie

Ich habe die MIT Geothermie-Studie (Massachusetts Institute of Technology, 2006) in Kapitel 16 erwähnt. Die Autoren sind überzeugt vom Geothermie-Potenzial Nordamerikas, besonders in den westlichen Staaten, wo es heißeren Fels gibt. „Mit einer vernünftigen Investition in F&E sollten Hot-dry-Rock-Verfahren (HDR, auch enhanced geothermal system, EGS, bezeichnet) 100GW(el) oder mehr an Generatorkapazität bereitstellen, die in den nächsten 50 Jahren zu wettbewerbsfähigen Kosten arbeiten können. Darüber hinaus bieten HDR-Verfahren eine zuverlässige Energiequelle auf sehr lange Sicht.“ Nehmen wir an, sie hätten recht. 100 GW Elektrizität sind 8 kWh/d/p bei 300 Millionen Menschen.

Wasserkraft

Die Wasserkraftwerke in Kanada, USA und Mexiko erzeugen etwa 660 TWh pro Jahr. Verteilt auf 500 Millionen Menschen sind das 3,6 kWh/d/p. Könnte die Wasserkraft in Nordamerika verdoppelt werden? Dann wären das 7,2 kWh/d/p.

Was noch?

Bisher haben wir 42 + 4,8 + 8 + 7,2 = 62 kWh/d/p abgedeckt. Nicht einmal genug für ein europäisches Existenzminimum! Ich könnte verschiedene andere Optionen anführen wie nachhaltiges Verbrennen der kanadischen Wälder in Heizkraftwerken. Doch statt das Leiden zu verlängern, wenden wir uns doch dem fetten Brocken zu: CSP – Sonnenkraftwerke.

Fig.30.3 zeigt die Fläche in Nordamerika, die jeden dort (500 Millionen Menschen) mit einer mittleren Leistung von 250 kWh/d versorgt.

Die Grundlast

Nordamerikanische Erneuerbare ohne Solar reichen nicht zum Überleben. Nordamerika braucht also Solarkraftwerke in seinen Wüsten oder Kernkraft, oder beides.

Wiederholen der Berechnungen für die gesamte Welt

Wie können 6 Milliarden Menschen mit der Energie versorgt werden, die dem europäischen Lebensstandard entspricht, sagen wir 80 kWh/d/p?

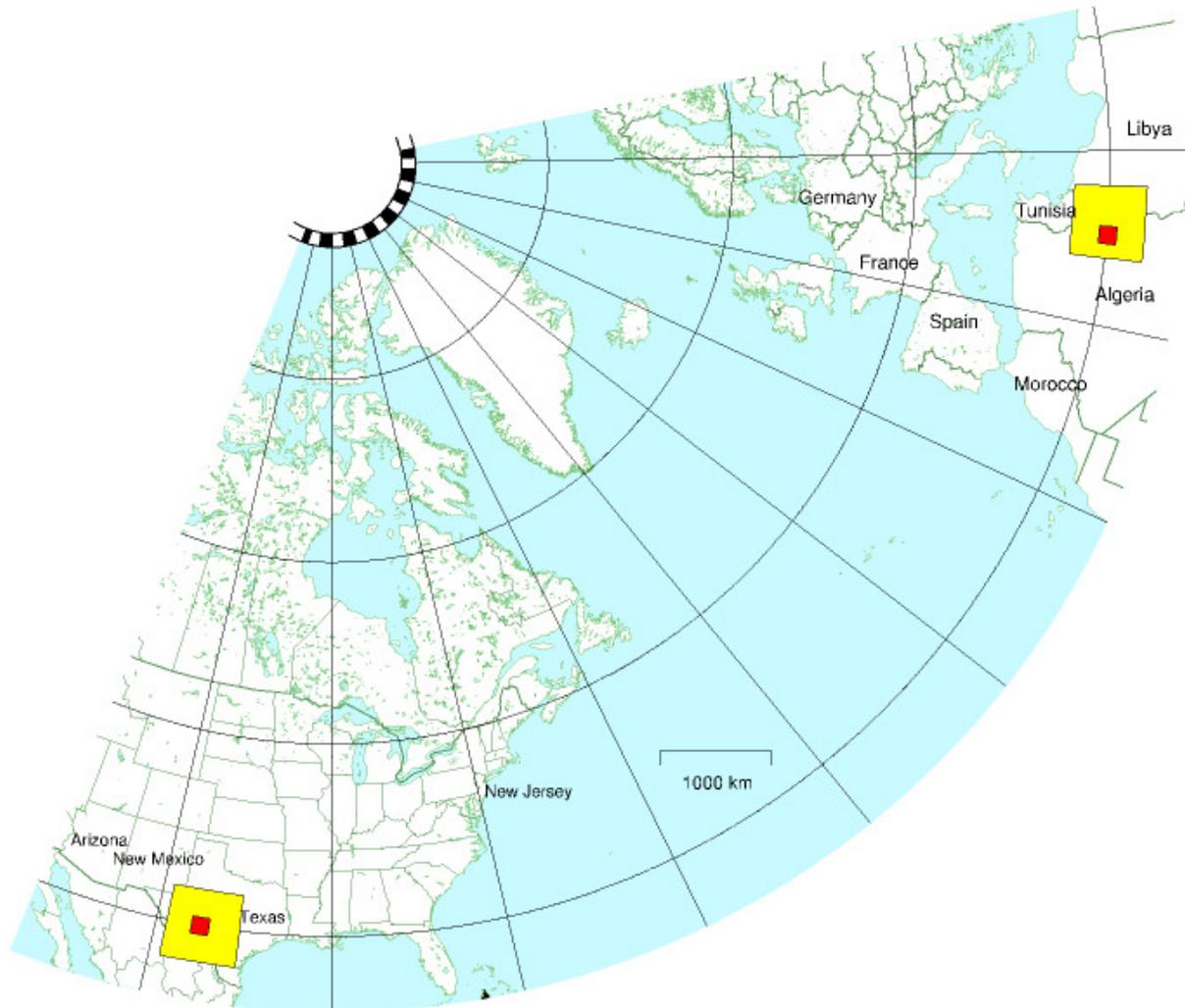


Fig.30.3: Das kleine Viereck schlägt wieder zu. Das 600km x 600km Quadrat in Nordamerika würde, vollständig gefüllt mit CSP, genug Strom liefern um 500 Millionen Menschen mit dem mittleren amerikanischen Verbrauch von 250 kWh/d zu versorgen. Die Karte enthält auch das 600km x 600km Quadrat in Afrika, das wir früher schon erwähnten. Ich habe wie dort eine Leistungsdichte von 15 W/m² angenommen.

Die Fläche eines gelben Quadrates ist etwas größer als Arizona, und 16mal größer als New Jersey. Innerhalb jedes größeren Quadrats ist ein kleineres mit 145km x 145km, das für die Fläche steht – einmal New Jersey –, die man benötigt, um 30 Millionen Menschen mit 250 kWh pro Tag pro Person zu versorgen.

Wind

Die herausragenden Punkte in der Welt mit starken dauerhaften Winden sind die zentralen Staaten der USA (Kansas, Oklahoma); Saskatchewan in Kanada; die südlichen Enden von Argentinien und Chile; Nordost-Australien; Nordost- und Nordwest-China; Nordwest-Sudan; der Südwesten von Südafrika; Somalia, Iran und Afghanistan. Und überall off-shore außer in einem Streifen von 60 Grad um den Äquator.

Für unsere globalen Abschätzungen nehmen wir die Zahlen von Greenpeace und der European Wind Energy Association: „die insgesamt verfügbaren Windressourcen werden weltweit auf 53.000 TWh pro Jahr geschätzt“, das sind **24 kWh/d pro Person**.

Wasserkraft

Weltweit beläuft sich die Wasserkraft derzeit auf 1,4 kWh/d pro Person. Nach der Website www.ieahydro.org: „Die International Hydropower Association und die International Energy Agency schätzen das weltweit technisch erschließbare Wasserkraftpotenzial auf 14.000 TWh pro Jahr [6,4 kWh/d/p weltweit], wovon 8.000 TWh/y [3,6 kWh/d/p] derzeit auch als ökonomisch erschließbar erachtet werden. Das meiste Entwicklungspotenzial bieten Afrika, Asien und Lateinamerika.“

Gezeitenkraft

Es gibt einige Plätze auf der Welt mit ähnlichem Gezeitenpotenzial wie die Severn-Mündung (Fig.14.8). In Argentinien gibt es zwei Standorte: San José und Golfo Nuevo; Australien hat Walcott Inlet; USA und Kanada teilen sich die Bay of Fundy; Kanada hat Cobequid, Indien den Golf von Khambat, die USA Turnagain Arm und Knik Arm und Russland hat Tugur.

Und dann ist da noch der Weltsieger, ein Ort namens Penzhinsk in Russland mit einem Potenzial von 22 GW – zehnmal größer als der Severn!

Kowalik (2004) schätzt, dass weltweit 40-80 GW Gezeitenkraft erzeugt werden könnte. Bei 6 Milliarden Menschen sind das **0,16-0,32 kWh/d/ pro Person**.

Wellen

Wir können die maximal erzeugbare Leistung von Wellen abschätzen, indem wir die Länge der benutzbaren Küsten (etwa 300.000 km) mit der typischen Leistung pro Längeneinheit Küste (10 kW pro Meter) multiplizieren: das ergibt eine Rohleistung von 3000 GW.

Nehmen wir an, dass 10% dieser Leistung von Energie-Systemen aufgenommen und mit 50% Effizienz in Strom umgewandelt werden, dann liefern **Wellenkraftwerke 0,5 kWh/d pro Person**.

Geothermie

Nach D. H. Freeston vom Auckland Geothermal Institute gibt es geothermische Leistung von 4GW weltweit in 1995 – das ist 0.01 kWh/d pro Person. Nehmen wir an, dass die MIT-Autoren von Seite 253 recht haben und dass die Welt mit Amerika vergleichbar ist, eröffnet uns die Geothermie **8 kWh/d pro Person**.

Sonne für Energiepflanzen

Die Leute sind ganz begeistert von Energiepflanzen wie Jatropha, das behauptetermaßen nicht mit Nahrungsmitteln um Land konkurrieren muss, weil es auch auf Wüstenboden wächst. Die Leute sollten auf die Zahlen sehen, bevor sie begeistert sind. Die Zahlen für Jatropha sind auf Seite 304. Auch wenn ganz Afrika komplett mit Jatropha Plantagen überzogen wäre, würde die erzeugte Leistung bei 6 Milliarden Menschen gerade **8 kWh/d/p** beitragen (was nur ein Drittel des gegenwärtigen Ölverbrauchs ist). Sie können mit Jatropha sicher ihre Öl-Abhängigkeit nicht loswerden!

Lassen Sie uns eine obere Schranke abschätzen, wie viel Leistung Energiepflanzen für die ganze Welt liefern können, indem wir dieselbe Methode anwenden wie für England in

Kapitel 6: Stellen Sie sich vor, wir nähmen alles ackerfähige Land und widmeten es Energiepflanzen. 18% der Landfläche ist derzeit Acker- und Kulturland – eine Fläche von 27 Millionen km². Das sind **4.500 m² pro Person**, aufgeteilt auf 6 Milliarden Menschen. Nehmen wir eine Leistungsdichte von 0,5 W/m² und Verluste von 33% bei Verarbeitung und Anbau, ergibt sich für Energiepflanzen, wenn sie die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche übernehmen, **36 kWh/d pro Person**. Jetzt ist das vielleicht eine Unterschätzung, weil wir in Fig.6.11 (Seite 48) sahen, dass brasilianisches Zuckerrohr eine Leistungsdichte von 1,6 W/m² liefern kann, also etwa dreimal mehr als obige Annahme. OK, vielleicht haben brasilianische Energiepflanzen eine Art Zukunft. Doch würde ich lieber zur nächsten Option übergehen.

Solarheizung, Photovoltaik, CSP-Sonnenkraftwerke

Bei solarthermischer Wassererwärmung muss man nicht lange überlegen. Sie funktioniert fast überall auf der Welt. China ist Weltführer in dieser Technologie. Es gibt über 100GW solarthermische Anlagenkapazität weltweit, über die Hälfte davon in China.

PV-Anlagen wären technisch machbar in Europa, doch hielt ich sie für zu teuer. Ich hoffe natürlich, dass ich da falsch liege. Es wäre wundervoll, wenn die Kosten für PV-Module fallen würden wie die Kosten für Computer in den letzten 40 Jahren.

Meine Vermutung ist, dass in vielen Regionen die beste Solartechnologie für die Stromerzeugung die CSP-Sonnenkraftwerke darstellen werden, die wir auf Seite 198 und 254 (Fig.30.3) diskutierten. Auf diesen Seiten hatten wir bereits eingeführt, dass eine Milliarde Menschen in Europa und Nordafrika mit landesgroßen Solarkraftwerken in den Wüsten am Mittelmeer und eine halbe Milliarde Nordamerikaner durch ähnlich große Kraftwerke in den Wüsten der USA und Mexikos versorgt werden könnten. Ich überlasse es dem Leser als Übung, geeignete Wüsten zu finden, um die verbleibenden 4,5 Milliarden Menschen zu versorgen.

Die Grundlast

Die nicht-solaren Erneuerbaren addieren sich wie folgt: Wind 24 kWh/d/p, Wasser 3,6 kWh/d/p, Gezeiten 0,3 kWh/d/p, Wellen 0,5 kWh/d/p, Geothermie 8 kWh/d/p – insgesamt 36 kWh/d/p. Unser Ziel war eine spät-europäische Verbrauchsrate von 80 kWh/d/p. Wir haben ein klares Ergebnis: die nicht-solaren Erneuerbaren mögen „groß“ sein, aber nicht groß genug. Um einen Plan zu erstellen, der aufgeht, müssen wir eine oder mehrere Formen solarer Energie hinzunehmen. Oder Kernkraft. Oder beides.

Sheffield	28%
Edinburgh	30%
Manchester	31%
Cork	32%
London	34%
Köln	35%
Kopenhagen	38%
München	38%
Paris	39%
Berlin	42%
Wellington, NZ	43%
Seattle	46%
Toronto	46%
Detroit, MI	54%
Winnipeg	55%
Peking 2403	55%
Sydney 2446	56%
Pula, Kroatien	57%
Nizza, Frankreich	58%
Boston, MA	58%
Bangkok, Thailand	60%
Chicago	60%
New York	61%
Lissabon, Portugal	61%
Kingston, Jamaica	62%
San Antonio	62%
Seville, Spanien	66%
Nairobi, Kenia	68%
Johannesburg, SA	71%
Tel Aviv	74%
Los Angeles	77%
Upington, SA	91%
Yuma, AZ	93%
Sahara	98%

Tabelle 30.4: Weltweite Sonnenscheinzahlen

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

253 Nordamerika off-shore Wind 234 *North American offshore wind resources.*
www.ocean.udel.edu/windpower/ResourceMap/index-wn-dp.html

253 Nordamerika braucht also Solarkraftwerke in seinen Wüsten, Kernkraft, oder beides. 235 *North America needs solar in its own deserts, or nuclear power, or both.* Für Google's 2008er Plan für eine 40%ige Reduktion der fossilen Brennstoffe in den USA, siehe Jeffery Greenblatts Artikel *Clean Energy 2030* [3lcw9c]. Die Hauptpunkte dieses Plans sind Effizienzmaßnahmen, Elektrifizierung des Transports und Erneuerbare Elektrizitätsproduktion. Der Plan zur Elektrizitätsproduktion enthält

10,6 kWh/d/p	Windkraft,
2,7 kWh/d/p	Photovoltaik,
1,9 kWh/d/p	Concentrating Solar Power (CSP),
1,7 kWh/d/p	Biomasse,
und 5,8 kWh/d/p	geothermische Energie

bis 2030. Das ist insgesamt eine Zunahme der Erneuerbaren von 23 kWh/d/p. Sie gehen zudem von einem kleinen Zuwachs bei Nuklearenergie aus, von 7,2 kWh/d/p auf 8,3 kWh/d/p, und keinen Veränderungen bei der Wasserkraft. Erdgas würde weiterhin verwendet, mit einem Beitrag von 4 kWh/d/p.

255 Weltweit beläuft sich die Wasserkraft derzeit auf 1,4 kWh/d pro Person 237 *The world's total hydro potential...* Quelle: www.ieahydro.org/faq.htm.

258 das ergibt eine Rohleistung von 3000 GW – *Global coastal wave power resource is estimated to be 3000 GW.* Siehe Quayle und Changery (1981).

259 geothermische Leistung von 4GW weltweit in 1995 – *Geothermal power in 1995.* Freeston (1996).

255 Energiepflanzen 238 *Energy crops.* Siehe Rogner (2000) zu Abschätzungen ähnlich wie meine.

Weiterführende Literatur: Das *Nature* magazine brachte eine achtseitigen Artikel, wie die Welt mit Energie versorgt werden kann (Schiermeier et al., 2008).

31. Das Letzte worüber wir sprechen sollten

Einfangen von Kohlendioxid aus der Luft ist das letzte, worüber wir sprechen sollten.

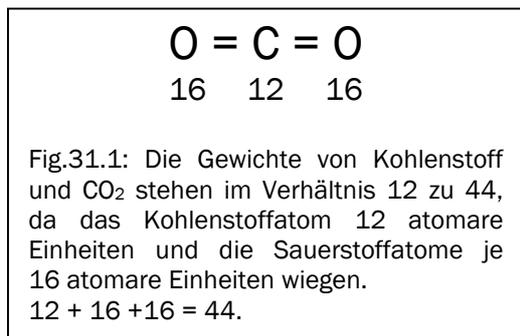
Wenn ich das sage, ist das absichtlich doppeldeutig. Erstens, die Energieerfordernisse für CO₂-Einfang aus der Luft sind so enorm, dass es fast absurd scheint, darüber zu reden (und es besteht die Befürchtung, dass das Hochspielen der Möglichkeit, den Klimawandel durch diese Art des Geo-Engineerings zu heilen, die gegenwärtige Inaktivität noch unterstützt). Zweitens aber denke ich, wir sollten darüber reden, wir sollten nachdenken, wie wir es am besten machen könnten, und den Grundstein für Forschung legen, die zeigt, wie es noch besser gemacht werden könnte. Denn das Einfangen von Kohlendioxid aus der Luft könnte sich als unsere letzte Verteidigungslinie erweisen, wenn der Klimawandel wirklich so schlimm ist, wie die Klimaforscher behaupten, und wenn die Menschheit es nicht schafft, die einfacheren und feinfühligere Möglichkeiten wahrzunehmen, die sich heute noch bieten.



Bevor wir uns mit dem Einfang von CO₂ aus der Luft beschäftigen, müssen wir ein differenzierteres Bild des globalen Kohlenstoffkreislaufs haben.

CO₂ verstehen

Als ich anfangs dieses Buch plante, war meine Absicht, den Klimawandel gar nicht zu behandeln. In einigen Kreisen war „Gibt es den Klimawandel?“ eine kontrovers diskutierte Frage. Genauso „Ist er durch Menschen verursacht?“ oder „Spielt es eine Rolle?“ Und, angelangt am Ende der Kontroverse „Wie sollten wir damit umgehen?“ Ich fand, dass nachhaltige Energiegewinnung für sich genommen bereits ein fesselndes Thema sei, und es am besten wäre, diese Kontroversen zu vermeiden. Mein Argument war stets: „Egal wann fossile Energien zur Neige gehen, egal ob es den Klimawandel gibt oder nicht, *es ist auf alle Fälle nicht nachhaltig, fossile Brennstoffe zu verbrennen*; wie sollten uns vorstellen, nachhaltig zu leben und herausfinden, wie viel nachhaltige Energiegewinnung möglich ist.“



Doch hat sich der Klimawandel ins öffentliche Bewusstsein gedrängt und erzeugt dort alle Spielarten von interessanten Abschätzungsfragen. Also habe ich beschlossen, ihn im Vorwort ein bisschen zu diskutieren und hier im abschließenden Kapitel. Keine umfassende Diskussion, nur ein paar interessante Zahlen.

Einheiten

CO₂-Verschmutzungsabgaben werden üblicherweise in Dollar oder Euro pro Tonne CO₂ gemessen, deshalb benutze ich die Tonne CO₂ als Haupteinheit, wenn ich über CO₂-Verschmutzung spreche, und die Tonne CO₂ pro Jahr, wenn es um Verschmutzungsraten geht. (Die Treibhausgas-Emissionen des Durchschnittseuropäers entsprechen 11 Tonnen CO₂ pro Jahr, oder 30 kg CO₂ pro Tag.) Wenn wir aber über Kohlenstoff in fossilen Brennstoffen, Pflanzen, im Boden oder Wasser sprechen, gebe ich Tonnen Kohlenstoff

an. Eine Tonne CO₂ enthält 12/44 Tonnen Kohlenstoff, etwas mehr als eine Vierteltonne. Auf weltweiter Skala werde ich über Gigatonnen Kohlenstoff (Gt C) sprechen. Eine Gigatonne Kohlenstoff ist eine Milliarde Tonnen. Gigatonnen kann man sich schwer vorstellen, man kann sie aber auf eine menschliche Dimension bringen: Stellen Sie sich eine Tonne Kohlen vor (etwa das, was man braucht, um ein Jahr sein Haus zu beheizen). Nun stellen Sie sich vor, jeder würde seine Tonne Kohlen jedes Jahr verbrennen: Das sind 6 Gt C pro Jahr, weil unser Planet 6 Milliarden Menschen beheimatet.

Wo ist der Kohlenstoff

Wo ist der ganze Kohlenstoff? Wir müssen wissen, wie viel in den Ozeanen, im Boden und in der Vegetation ist, verglichen mit dem Kohlenstoff in der Atmosphäre, wenn wir die Konsequenzen von CO₂-Emissionen verstehen wollen.

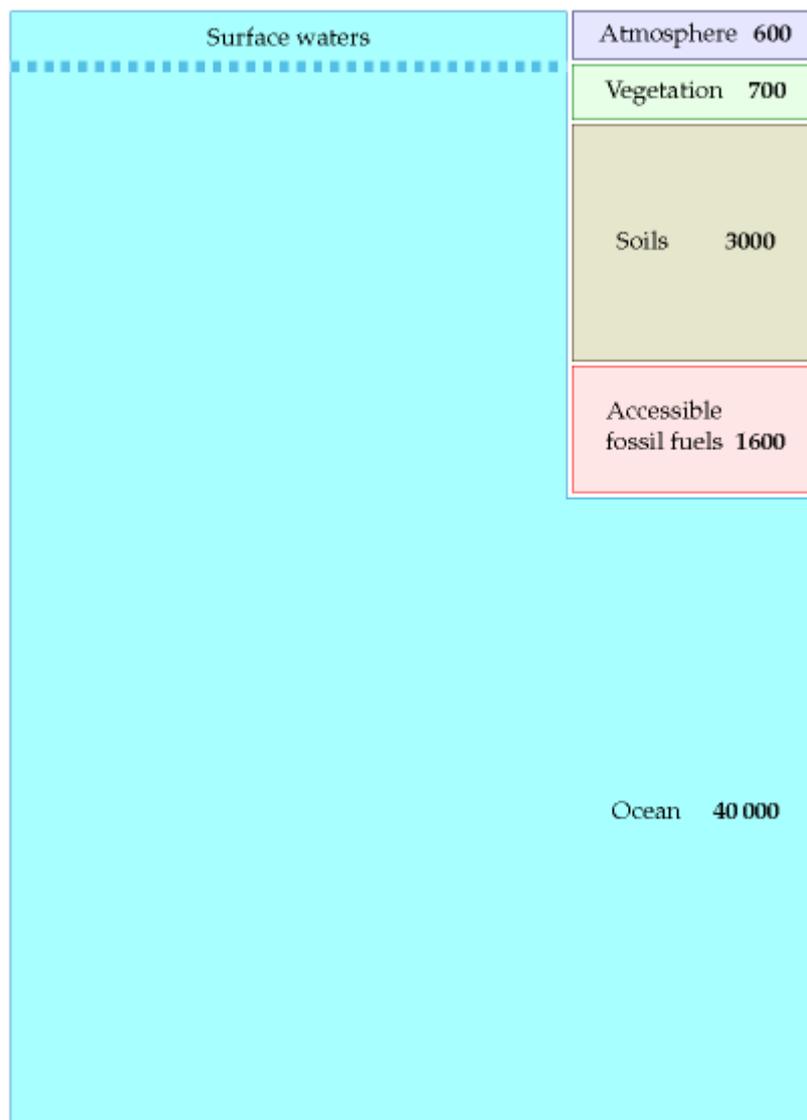


Fig.31.2: Geschätzte Mengen von Kohlenstoff, in Gigatonnen, an zugänglichen Orten der Erde. (Es gibt noch eine ganze Ladung mehr Kohlenstoff im Felsgestein. Dieser Kohlenstoff zirkuliert auf Zeitskalen von Millionen von Jahren, in einem Langzeitgleichgewicht zwischen Kohlenstoff in Sedimenten, die an tektonischen Plattengrenzen nach unten gedrückt werden, und Kohlenstoff, der durch Vulkanausbrüche von Zeit zu Zeit wieder herausbricht. Der Einfachheit halber vernachlässige ich diesen geologischen Kohlenstoff.)

Fig.31.2 zeigt, wo der Kohlenstoff ist. Das meiste – 40.000 GT – ist im Ozean (in Form von gelösten CO₂-Gas, Carbonaten, in lebenden Pflanzen und Tieren, und in zerfallendem Material). Böden und Vegetation enthalten zusammen etwa 3.700 Gt. Abbaubare fossile Brennstoffe – hauptsächlich Kohle – enthalten etwa 1.600 Gt. Und die Atmosphäre enthält 600 Gt Kohlenstoff.

Bis vor kurzem waren all diese Kohlenstoffspeicher weitgehend im Gleichgewicht: Alle Ströme aus einem Speicher (also Boden, Vegetation oder Atmosphäre) waren durch

gleichgroße Ströme in den Speicher hinein wieder ausgeglichen. Die Ströme in den und aus dem Speicher „fossile Brennstoffe“ waren beide vernachlässigbar. Dann begannen die Menschen, fossile Brennstoffe zu verbrennen und erzeugten so zwei zusätzliche Ströme, die nicht ausgeglichen waren, wie Fig.31.3 zeigt.

Die Rate des fossilen Brennstoffabbrands betrug etwa 1Gt C/y in 1920, 2 Gt C/y in 1955 und 8,4 Gt C in 2006. (Diese Zahlen beinhalten kleinere Beiträge aus der Zementproduktion, die CO₂ aus dem Kalkstein freisetzt.)

Wie hat dieser zusätzliche Strom das Bild von Fig.31.2 modifiziert? Nun, das ist nicht genau bekannt. Fig.31.3 zeigt die wesentlichen Dinge, die bekannt sind. Vieles der zusätzlichen 8,4 Gt C pro Jahr, die wir in die Atmosphäre abgeben, bleibt in der Atmosphäre und erhöht deren Kohlendioxid-Konzentration. Die Atmosphäre bildet relativ schnell wieder ein Gleichgewicht mit dem oberflächen-nahen Ozeanwasser (diese Relaxation dauert nur etwa 5-10 Jahre), wodurch ein Nettostrom von CO₂ aus der Atmosphäre in die Ozeane von etwa 2 Gt C pro Jahr entsteht. (Neuere Forschungen weisen jedoch darauf hin, dass diese Kohlenstoff-Aufnahme der Ozeane rückläufig sein könnte.) Dieser nicht ausgeglichene Strom in die Oberflächenwasser erhöht die Acidität der Ozeane, was eine schlechte Nachricht für Korallen ist. Einiges an zusätzlichem CO₂ fließt in die Böden und die Vegetation, vielleicht 1,5 Gt C pro Jahr, doch diese Ströme sind nicht zuverlässig gemessen. Weil etwa die Hälfte der Kohlenstoff-Emission in der Atmosphäre verbleibt, wird eine fortgesetzte Verschmutzung mit 8,4 Gt C pro Jahr den CO₂-Gehalt der Atmosphäre weiter ansteigen lassen, wie auch den im Oberflächenwasser.

Was ist das langfristige Ziel dieses zusätzlichen CO₂? Nun, da die Gesamtmenge in fossilen Brennstoffen so viel geringer als die der Ozeane ist, wird „auf lange Sicht“ der zusätzliche Kohlenstoff seinen Weg in die Ozeane finden und die Mengen von Kohlenstoff in Atmosphäre, Vegetation und Boden werden zum normalen Wert zurückkehren. Jedoch bedeutet „auf lange Sicht“ hier tausende von Jahren. Der Ausgleich zwischen Atmosphäre und Oberflächenwasser ist schnell, wie ich bereits sagte, doch Fig.31.2 und 31.3 zeigen eine gestrichelte Trennlinie zwischen Oberflächenwasser und dem restlichen Ozean. Auf einer Zeitskala von 50 Jahren ist diese Grenze eine virtuell feste Wand. Radioaktiver Kohlenstoff, der durch die Atomtests der 1960er und 70er über den Globus verstreut wurde, hat die Ozeane erst bis zu einer Tiefe von 400 m durchdrungen. Die mittlere Tiefe des Ozeans ist dagegen 4000 m.

Die Ozeane zirkulieren langsam: Ein Schluck tiefes Ozeanwasser braucht etwa 1000 Jahre, um zur Oberfläche zu rollen und wieder hinab. Die Zirkulation der tiefen Gewässer ist angetrieben von einer Kombination aus Temperaturgradienten und Salzgehalts-

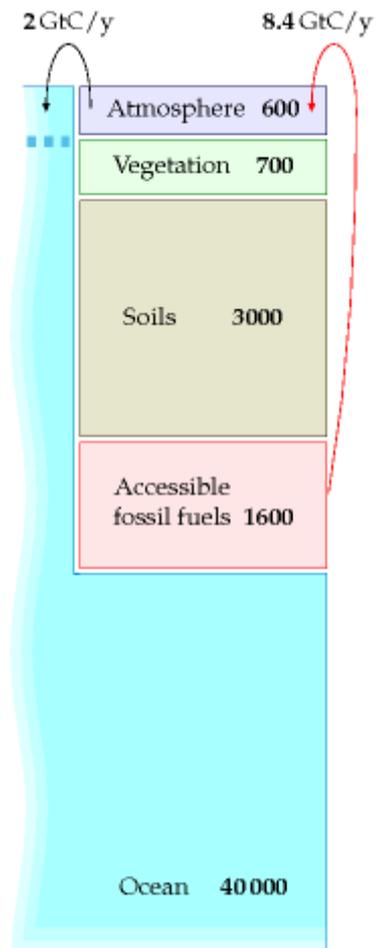


Fig.31.3: Die Pfeile zeigen zwei zusätzliche Kohlenstoffströme, die durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe erzeugt werden. Es ist ein Ungleichgewicht zwischen den 8,4 Gt C/y, das durch fossile Verbrennung in die Atmosphäre gelangt und den 2 Gt C/y, das von den Ozeanen aufgenommen wird. Diese Skizze vernachlässigt die schlecht gemessenen Ströme zwischen Atmosphäre, Boden, Vegetation usw.

Gradienten, deshalb wird sie auch die thermohaline Zirkulation genannt (im Gegensatz zu den Zirkulationen des Oberflächenwassers, die windgetrieben sind).

Dieses langsame Durchmischen der Ozeane hat eine verhängnisvolle Konsequenz: Wir haben genug fossile Brennstoffe, um unser Klima für die nächsten 1000 Jahre zu beeinflussen.

Wohin geht der Kohlenstoff

Fig.31.3 ist eine grobe Vereinfachung. Menschen verursachen weitere zusätzliche Ströme, die im Diagramm nicht gezeigt sind: Das Verbrennen von Torf und Wäldern in Borneo 1997 setzte allein 0,7 Gt C frei. Zufällig ausbrechende Feuer in Kohleflözen setzen etwa 0,25 Gt C pro Jahr frei.

Trotzdem hilft uns diese Vereinfachung, grob zu verstehen, was kurz- und mittelfristig passieren wird unter verschiedenen Szenarien: Wenn die Verschmutzung der „weiter-wie-bisher“ Linie folgt und man weiterhin 500 Gt Kohlenstoff innerhalb der nächsten 50 Jahre verbrennt, können wir erwarten, dass weiterhin CO₂ in die Oberflächenwasser sickert mit einer Rate von 2 Gt C pro Jahr. Bis 2055 werden mindestens 100 Gt dieser 500 Gt in die Oberflächenwasser übergegangen sein, und die CO₂-Konzentration der Atmosphäre würde etwa das Doppelte ihres vorindustriellen Wertes erreichen.

Würde das Verbrennen fossiler Brennstoffe bis 2050 auf null reduziert werden, würde sich der 2Gt Strom von der Atmosphäre in die Ozeane ebenfalls signifikant reduzieren. (Ich dachte zunächst, dieser Strom würde für Jahrzehnte anhalten, doch wäre das nur der Fall, wenn Atmosphäre und Oberflächenwasser aus dem Gleichgewicht sind; doch wie erwähnt relaxiert Atmosphäre und Oberflächenwasser innerhalb weniger Jahre.) Vieles der 500 Gt C, die wir in die Atmosphäre freisetzen, wird nur schrittweise in die Ozeane driften über die nächsten paar tausend Jahre, wenn die Oberflächenwasser nach unten zirkulieren und durch neue Wasser aus der Tiefe ersetzt sind.

Auf diese Weise wird unsere Störung der Kohlenstoff-Konzentration möglicherweise korrigiert, jedoch erst nach Tausenden Jahren. Dabei wird vorausgesetzt, dass die lange Störung der Atmosphäre das Ökosystem nicht wesentlich verändert. Es ist beispielsweise denkbar, dass die Erhöhung der Acidität im Oberflächenwasser eine ausreichende Reduktion ozeanischer Flora verursacht, dass ein neuer Teufelskreis angestoßen werden könnte: Höhere Acidität bedeutet geringeres Pflanzenwachstum, das bedeutet weniger Pflanzen, die CO₂ aus dem Ozean absorbieren, das bedeutet, die Acidität der Ozeane steigt noch weiter. Solche Teufelskreise (die von Wissenschaftlern „verstärkende Rückkopplung“ genannt werden) gab es schon früher auf der Erde: man glaubt beispielsweise, dass die Eiszeiten verhältnismäßig rasch endeten wegen der verstärkenden Rückkopplung, in der höhere Temperaturen Schnee und Eis schmelzen ließen, was die Reflektion von Sonnenlicht am Boden reduzierte, was bedeutet, dass der Boden mehr Wärme absorbiert, was wiederum zu steigenden Temperaturen führte. (geschmolzener Schnee – Wasser – ist viel dunkler als gefrorener Schnee.) Eine andere Möglichkeit zu verstärkender Rückkopplung, um die man sich sorgt, involviert

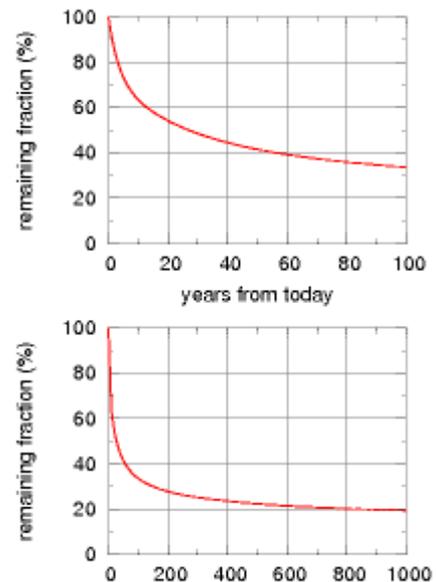


Fig.31.4: Abfall eines schmalen Pulses von CO₂, das in die heutige Atmosphäre emittiert wird, nach dem Bern Modell des Kohlenstoffzyklus. Quelle Hansen et al. (2007).

Methanhydrat, das gefroren in Mengen von einigen Gigatonnen an Plätzen wie Nord-Sibirien und in Mengen von 100en Gigatonnen an den Kontinentalschelfen liegt. Globale Erwärmung über 1 °C könnte Methanhydrat schmelzen, was Methan in die Atmosphäre freisetzt, und dieses Methan erhöht die globale Erwärmung noch stärker als CO₂.

Dies ist nicht der Ort, wo ich die Unsicherheiten des Klimawandels noch detaillierter diskutieren möchte. Ich empfehle wärmstens die Bücher *Avoiding Dangerous Climate Change* (Schellnhuber et al., 2006) und *Global Climate Change* (Dessler und Parson, 2006), und auch die Artikel von Hansen et al. (2007) und Charney et al. (1979).

Die Intention dieses Kapitels ist, die Idee des Kohlenstoff-Einfangs aus der Luft als Heilmittel gegen den Klimawandel zu diskutieren; wir diskutieren die Energiekosten dieses Einfangs als nächstes.

Die Kosten des Saugens

Heute ist Kohlenstoff aus dem Boden zu pumpen ein großes Geschäft. In Zukunft wird vielleicht Kohlenstoff *in* den Boden zu pumpen ein großes Geschäft sein. Unter der Annahme, dass jetzt nicht die richtigen Maßnahmen eingeleitet werden, um die globale Verschmutzung aufzuhalten, wird vielleicht in ein paar Jahrzehnten eine „Koalition der Willigen“ dafür bezahlen, einen großen Staubsauger zu bauen und den ganzen Schmutz sauberzumachen.

Bevor wir in die Details gehen, wie man Kohlenstoff aus der Luft einfangen kann, wollen wir die unausweichlichen Energiekosten des Einfangs bestimmen. Welche Technologie wir auch immer benutzen, wir müssen die Gesetze der Physik respektieren, und leider benötigt das Einfangen und Konzentrieren von CO₂ Energie. Die Gesetze der Physik sagen, dass die benötigte Energie mindestens 0,2 kWh pro kg CO₂ beträgt (Tabelle 31.5). Bedenkt man, dass reale Prozesse typischerweise bestenfalls 35 % effizient sind, würde es mich wundern, wenn die Energiekosten für CO₂-Einfang je unter 0,55 kWh pro kg gesenkt werden könnten.

Lassen Sie uns nun annehmen, wir wollten den CO₂-Ausstoß eines typischen Europäers neutralisieren, 11 Tonnen pro Jahr, was 30 kg pro Tag pro Person entspricht. Die dafür erforderliche Energie, angenommen die Kosten liegen bei 0,55 kWh pro kg CO₂, ist **16,5 kWh/d pro Person**. Das ist exakt der **englische Elektrizitätsverbrauch**. Diesen gigantischen Staubsauger zu betreiben würde also eine Verdopplung unserer Elektrizitätsproduktion erfordern – oder zumindest, dass wir irgendwo Leistung äquivalent zu unserer Elektrizitätsproduktion hernehmen.

Wenn wir die Kosten für den Betrieb des gigantischen Staubsaugers reduzieren können, lasst uns das machen. Doch kein Aufwand an Forschung oder Entwicklung kann die Gesetze der Physik umgehen, die sagen, dass CO₂-Einfang mindestens 0,2 kWh pro kg CO₂ erforderlich macht.

Was ist jetzt die beste Methode, um CO₂ aus der Luft zu saugen? Ich werde vier Technologien diskutieren, um einen gigantischen Staubsauger zu bauen:

- A. chemische Pumpen
- B. Bäume
- C. Beschleunigte Verwitterung von Steinen
- D. Ozeandüngung.

A. Chemische Technologien zum Kohlenstoffeinfang

Die chemischen Technologien gehen mit dem CO₂ üblicherweise so um:

0,03% CO₂ konzentrieren → reines CO₂ komprimieren → flüssiges CO₂

Zuerst konzentriert man das CO₂ von seiner niedrigen Konzentration in der Atmosphäre; dann komprimiert man es in ein kleines Volumen, das man dann irgendwo (entweder in einem Erdloch oder in den Tiefen des Ozeans) vergraben kann. Jeder der beiden Schritte hat Energiekosten. Die Kosten aufgrund physikalischer Gesetze zeigt Tabelle 31.5.

	Kosten (kWh/kg)
Konzentration	0,13
Kompression	0,07
gesamt	0,20

Tabelle 31.5: Die unausweichlichen Energiekosten für Konzentration und Kompression von CO₂ aus der Luft



Im Jahr 2005 waren die besten veröffentlichten Methoden zum CO₂-Einfang aus der Luft ziemlich ineffizient: die Energiekosten lagen bei 3,3 kWh pro kg, die finanziellen Kosten bei 140 \$ pro Tonne CO₂. Bei diesen Energiekosten erfordert der Einfang der täglichen 30 kg eines Europäers **100 kWh pro Tag** – fast dasselbe wie sein Energieverbrauch von 125 kWh/d. Kann man bessere Staubsauger designen?

Kürzlich hat der Klimatologe Wallace Broecker, „der vielleicht Weltbeste im Interpretieren der Funktion der Erde als biologisches, chemisches und physikalisches System“, eine bis dahin unbekannte CO₂-Einfang-Technologie vorgestellt, die der Physiker Klaus Lackner entwickelte: Broecker stellt sich vor, dass die Erde weiterhin fossile Brennstoffe mit der selben Rate wie bisher verheizt, und 60 Millionen CO₂-Schrubber (jeder so groß wie ein großer Überseecontainer) das CO₂ aufsaugen. Welche Energie benötigt Lackners Prozess? Im Juni 2007 erzählte mir Lackner, dass sein Labor 1,3 kWh pro kg erreichte, doch seitdem entwickelten sie einen neuen Prozess basierend auf einer Rosine, die trocken CO₂ absorbiert und CO₂ abgibt, wenn sie feucht ist. Lackner erzählte mir im Juni 2008 dass er in einem trockenen Klima die Kosten für die Konzentration auf 0,18-0,37 kWh niederstufiger Wärme pro kg CO₂ reduziert hätte. Das Komprimieren kostet 0,11 kWh pro kg. Somit ist Lackners Gesamtenergieaufwand 0,48 kWh/kg oder darunter. Für die Emissionen eines Europäers reden wir immer noch über **14 kWh/d**, von denen **3,3 kWh pro Tag** Elektrizität wären, die restlichen Wärme. Ein Hoch auf den technischen Fortschritt! Doch denken Sie nicht, dass das geringe Kosten wären. Wir würden etwa 20% Zuwachs der weltweiten Energieproduktion benötigen, nur um die Staubsauger zu betreiben.

B. Wie sieht's mit den Bäumen aus?

Bäume sind Kohlenstoff-Einfangsysteme: Sie saugen CO₂ aus der Luft, und sie verletzen keine physikalischen Gesetze. Sie sind zwei-in-einer Maschinen: Sie sind CO₂-Einfanganlagen angetrieben durch eingebaute Solarkraftwerke. Sie fangen CO₂ mit der Energie ein, die sie vom Sonnenlicht erhalten. Die fossilen Brennstoffe, die wir verbrennen, wurden ursprünglich durch diesen Prozess erzeugt. Also ist die Idee, das Gegenteil der Verbrennung fossiler Brennstoffe zu machen. Wie wäre es, Holz zu erzeugen und in einem Loch im Boden zu vergraben, während eine Tür weiter die Menschheit weiterhin fossiles Holz ausgräbt und einheizt? Die Vorstellung erscheint unausgegoren, vergrabenes Holz zu erzeugen und gleichzeitig vergrabenes Holz wieder auszugraben. Trotzdem, lassen Sie uns die Landflächen ausrechnen, die erforderlich sind, um das Klima mit Bäumen zu retten.

Die besten Pflanzen in Europa binden etwa 10 Tonnen trockenes Holz pro Hektar pro Jahr – äquivalent zu etwa 15 t CO₂ pro Hektar und Jahr. Um den europäischen Pro-Kopf-CO₂-Ausstoß von 11 Tonnen CO₂ pro Jahr auszugleichen benötigt man pro Person eine Fläche von 7.500 m². Dies ist doppelt so viel wie die pro-Kopf-Fläche in England. Und dann müsste man einen Platz finden, an dem man permanent 7,5 Tonnen Holz pro Person und Jahr lagern könnte! Bei einer Dichte von 500 kg pro m³ würde das Holz einer Person 15 m³ pro Jahr belegen. Das Holz einer Lebensspanne – das, erinnern Sie sich, sicher endgelagert werden muss und nicht verbrannt werden darf – würde 1000 m³ füllen. Das ist fünfmal das Volumen eines ganzen Hauses. Wenn jemand vorschlägt, Holz gegen den Klimawandel zu verwenden, muss er realisieren, dass landesgroße Anlagen erforderlich sind. Ich kann nicht sehen, wie das jemals funktionieren sollte.

C. Verstärkte Verwitterung von Felsen

Gibt es einen trickreichen Weg, die signifikanten Energiekosten des chemischen CO₂-Einfangs zu vermeiden? Hier ist eine interessante Idee: Man zermahle Gestein, das CO₂ absorbieren kann, und lege es an die freie Luft. Diese Idee kann als Beschleunigung eines natürlichen geologischen Prozesses gesehen werden. Lassen Sie mich das erklären.

Zwei Kohlenstoff-Ströme, die ich in Fig.31.3 weggelassen hatte, sind der vom Gestein in die Ozeane im Zusammenhang mit der Verwitterung des Gesteins und der natürliche Niederschlag von Kohlenstoff in ozeanische Sedimente, die wieder zu Gestein werden. Diese Ströme sind relativ klein, etwa 0,2 Gt C pro Jahr (0,7 Gt CO₂ pro Jahr). Sie sind damit auch vernachlässigbar gegen derzeitige menschliche Kohlenstoffemissionen, die etwa 40mal größer sind. Doch die Behauptung der Befürworter dieser verstärkten Verwitterung ist, dass wir den Klimawandel stoppen könnten, wenn wir die Rate, mit der Stein gebrochen wird und CO₂ absorbiert, beschleunigen. Die dafür geeigneten Gesteine beinhalten Olivine oder Magnesiumsilikat, was beides weit verbreitet ist. Die Idee wäre, Minen zu finden an Plätzen, die von vielen Quadratkilometern Land umgeben wären, auf das man die gebrochenen Gesteine ausbringen kann, oder vielleicht auch das Bruchgestein direkt im Meer zu verteilen. In beiden Fällen würde das Gestein CO₂ absorbieren und in Carbonate verwandeln, die am Ende in die Ozeane gespült werden. Das Gestein in ausreichend kleine Körner zu zermahlen erfordert **nur 0,04 kWh pro kg gebundenes CO₂**. Halt, ist das nicht kleiner als die 0,20 kWh pro kg, die die Gesetze der Physik vorschreiben? Ja, doch es ist nichts falsch: das Gestein selbst liefert die fehlende Energie: Silikate haben höhere Energie als Carbonate, daher zahlt das Gestein die Energie für das Binden des CO₂. Ich liebe die kleinen Energiekosten dieses Verfahrens, doch die schwierige Frage ist, wer ist der Freiwillige, der sein Land mit Gesteinsmehl überziehen lässt?

D. Ozeandüngung

Das Problem mit diesen chemischen Methoden, Baumwachstums-Methoden und Gesteinszermahlungs-Methoden zum CO₂-Einfang ist, dass alle eine Menge Arbeit bedeuten, die keiner leisten mag – so lange nicht ein internationales Abkommen für diesen Einfang bezahlt. Momentan sind die CO₂-Preise zu niedrig.

Eine letzte Idee zum CO₂-Einfang könnte dieses Problem umgehen. Die Idee ist, den Ozean zu überreden, etwas schneller Kohlenstoff einzufangen als normal, als Nebenprodukt der Fischzucht.

Einige Gegenden der Welt haben Lebensmittelknappheit. Es gibt Fischmangel in einigen Gegenden wegen der Überfischung in den letzten 50 Jahren. Die Idee der Ozeandüngung ist, die Basis der Nahrungskette zu stärken, was die Ozeane dazu

befähigt, mehr pflanzliches und tierisches Leben hervorzubringen, und damit mehr Kohlenstoff zu binden. Meeres-Ingenieure unter der Leitung des australischen Wissenschaftlers Ian Jones würden gerne stickstoffhaltigen Dünger wie Harnstoff in geeignete fischarme Teile des Ozeans pumpen. Sie behaupten, dass man ein Areal von 900 km² Ozean so düngen kann, dass er 5 Mt CO₂/y aufnehmen kann. Jones und Kollegen rechnen, dass der Düngungsprozess für alle stickstoffarmen Gebiete des Ozeans geeignet ist. Das beinhaltet den größten Teil des Nordatlantiks. Zeichnen wir diese Idee in eine Landkarte ein. Englische Kohlenstoffemissionen liegen bei 600 Mt CO₂/y. Ihre vollständige Neutralisierung würde demnach 120 der o.g. Areale erfordern. Die Karte in Fig.31.6 zeigt diese Areale maßstabsgetreu neben den britischen Inseln. Wie gewöhnlich, braucht ein Plan, der aufgeht, landesgroße Anlagen. Und wir haben noch gar nicht die Frage berührt, wie der ganze Harnstoff hergestellt werden soll.



Fig.31.6: 120 Areale im Atlantik, jedes 900 km². Sie bilden die schätzungsweise erforderliche Fläche zur Neutralisierung der britischen Emissionen durch Ozeandüngung

Obwohl es eine ungeprüfte Idee ist, und derzeit illegal, finde ich die Ozeandüngung interessant, weil sie im Gegensatz zur geologischen Kohlenstofflagerung eine Technologie ist, die auch ohne große internationale Geldmittel implementiert werden könnte; Fischer würden den Ozean düngen, nur um mehr Fisch fangen zu können.

Commentators can be predicted to oppose manipulations of the ocean, focusing on the uncertainties rather than on the potential benefits. They will be playing to the public's fear of the unknown. People are ready to passively accept an escalation of an established practice (e.g., dumping CO₂ in the atmosphere) while being wary of innovations that might improve their future well being. They have an uneven aversion to risk.

Ian Jones

We, humanity, cannot release to the atmosphere all, or even most, fossil fuel CO₂. To do so would guarantee dramatic climate change, yielding a different planet. . .

J. Hansen et al (2007)

*"Avoiding dangerous climate change" is impossible – dangerous climate change is already here. The question is, can we avoid **catastrophic** climate change?*

David King, UK Chief Scientist, 2007

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

259 In einigen Kreisen war „Gibt es den Klimawandel?“ eine kontrovers diskutierte Frage.

240 *climate change... was a controversial question.* Indeed there still is a “yawning gap between mainstream opinion on climate change among the educated elites of Europe and America” [voxbz].



259 Wo ist der ganze Kohlenstoff? 241 *Where is the carbon?* Sources: Schellnhuber et al. (2006), Davidson and Janssens (2006).

260 Die Rate des fossilen Brennstoffabbrands 242 *The rate of fossil fuel burning...* Source: Marland et al. (2007).

260 Neuere Forschungen weisen jedoch darauf hin, dass diese Kohlenstoff-Aufnahme der Ozeane rückläufig sein könnte – *Recent research indicates carbon-uptake by the oceans may be reducing.* www.timesonline.co.uk/tol/news/uk/science/article1805870.ece, www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/1136188, [yofhc], Le Quéré et al. (2007).

260 Weil etwa die Hälfte der Kohlenstoff-Emission in der Atmosphäre verbleibt – *roughly half of the carbon emissions are staying in the atmosphere.* It takes 2.1 billion tons of carbon in the atmosphere (7.5 Gt CO₂) to raise the atmospheric CO₂ concentration by one part per million (1 ppm). If all the CO₂ we pumped into the atmosphere stayed there, the concentration would be rising by more than 3 ppm per year – but it is actually rising at only 1.5 ppm per year.

260 Radioaktiver Kohlenstoff ... hat die Ozeane erst bis zu einer Tiefe von 400 m durchdrungen – *Radioactive carbon... has penetrated to a depth of only about 400 m.* The mean value of the penetration depth of bomb ¹⁴C for all observational sites during the late 1970s is 390±39 m (Broecker et al., 1995). From [3e28ed].

262 Erwärmung über 1 °C könnte Methanhydrat schmelzen 244 *Global warming greater than 1 °C would possibly melt methane hydrates.* Source: Hansen et al. (2007, p1942).

263 Tabelle 31.5 245 *Table 31.5. Inescapable cost of concentrating and compressing CO₂ from thin air.* The unavoidable energy requirement to concentrate CO₂ from 0.03% to 100% at atmospheric pressure is $kT \ln 100/0.03$ per molecule, which is 0.13 kWh per kg. The ideal energy cost of compression of CO₂ to 110 bar (a pressure mentioned for geological storage) is 0.067 kWh/kg. So the total ideal cost of CO₂ capture and compression is 0.2 kWh/kg. According to the IPCC special report on carbon capture and storage, the practical cost of the second step, compression of CO₂ to 110 bar, is 0.11 kWh per kg. (0.4 GJ per t CO₂; 18 kJ per mole CO₂; 7 kT per molecule.)

263 das man dann in einem Erdloch oder in den Tiefen des Ozeans vergraben kann 245 *Shoving the CO₂ down a hole in the ground or deep in the ocean.* Vgl. Williams (2000). “Damit ein großer Anteil des injizierten CO₂ im Ozean verbleibt, muss die Injektion in großer Tiefe erfolgen. Es herrscht Konsens in der Entwicklung, dass die beste kurzfristige Strategie Injektionstiefen für das CO₂ von 1000–1500 anstrebt, was mit bereits bestehender Technologie durchgeführt werden kann.” Siehe auch den IPCC-Bericht: www.ipcc.ch/ipccreports/srccs.htm.

- 263 **Im Jahr 2005 waren die besten veröffentlichten Methoden zum CO₂-Einfang aus der Luft ziemlich ineffizient** –*In 2005, the best methods for carbon capture were quite inefficient: the energy cost was about 3.3 kWh per kg, with a financial cost of about \$140 per ton of CO₂.* Quellen: Keith et al. (2005), Lackner et al. (2001), Herzog (2003), Herzog (2001), David and Herzog (2000).
- 263 **Klimatologe Wallace Broecker** –*Wallace Broecker, climate scientist. . .* www.af-info.or.jp/eng/honor/hot/enrbro.html. His book promoting artificial trees: Broecker and Kunzig (2008).
- 264 **Die besten Pflanzen in Europa binden etwa 10 Tonnen trockenes Holz pro Hektar pro Jahr** 246*The best plants in Europe capture carbon at a rate of roughly 10 tons of dry wood per hectare per year.* Source: Select Committee on Science and Technology.
- 264 **Verstärkte Verwitterung von Felsen** –*Enhanced weathering of rocks.* See Schuiling and Krijgsman (2006).
- 264 **Ozeandüngung** 247*Ocean nourishment.* See Judd et al. (2008). See also Chisholm et al. (2001). The risks of ocean nourishment are discussed in Jones (2008).

32. Sag Ja!

Weil England derzeit 90% seiner Energie von fossilen Brennstoffen erhält, ist es nicht verwunderlich, dass der Ausstieg aus den Fossilen große, große Veränderungen erfordert – eine völlige Veränderung der Transportflotte, einen kompletten Wechsel der meisten Gebäudeheizungen und einen 10- oder 20-fachen Ausbau der Grünen Energie.

Bei der allgemeinen Tendenz der Öffentlichkeit, „nein“ zu sagen zu Windfarmen, „nein“ zu sagen zu Atomkraft, „nein“ zu sagen zu Gezeitenkraftwerken – „nein“ zu allem außer zu fossilen Heizkraftwerken – bin ich in Sorge, dass wir nicht von den fossilen Brennstoffen loskommen, wenn wir das müssen. Stattdessen zementieren wir Halbheiten: leicht effizientere fossile Heizkraftwerke, Autos, Gebäudeheizungen; das Feigenblatt eines Emissionshandels; ein Tröpfelchen Windturbinen; eine unpassende Anzahl Kernkraftwerke.

Wir müssen einen Plan wählen, der aufgeht. Es ist möglich, einen solchen Plan zu machen, aber es wird nicht einfach werden.

Wir müssen aufhören nein zu sagen und anfangen ja zu sagen. Wir müssen mit dem Kasperltheater aufhören und uns an die Arbeit machen.

Wenn Sie eine aufrichtige, realistische Energiepolitik wollen, die aufgeht, sagen Sie das bitte Ihren politischen Vertretern und denen, die es werden wollen.

Acknowledgments – Dank des Autors

For leading me into environmentalism, I thank Robert MacKay, Gale Ryba, and Mary Archer.

For decades of intense conversation on every detail, thank you to Matthew Bramley, Mike Cates, and Tim Jervis.

For good ideas, for inspiration, for suggesting good turns of phrase, for helpful criticism, for encouragement, I thank the following people, all of whom have shaped this book. John Hopfield, Sanjoy Mahajan, Iain Murray, Ian Fells, Tony Benn, Chris Bishop, Peter Dayan, Zoubin Ghahramani, Kimber Gross, Peter Hodgson, Jeremy Lefroy, Robert MacKay, William Nuttall, Mike Sheppard, Ed Snelson, Quentin Stafford-Fraser, Prashant Vaze, Mark Warner, Seb Wills, Phil Cowans, Bart Ullstein, Helen de Mattos, Daniel Corbett, Greg McMullen, Alan Blackwell, Richard Hills, Philip Sargent, Denis Mollison, Volker Heine, Olivia Morris, Marcus Frean, Erik Winfree, Caryl Walter, Martin Hellman, Per Sillrén, Trevor Whittaker, Daniel Nocera, Jon Gibbins, Nick Butler, Sally Daultrey, Richard Friend, Guido Bombi, Alessandro Pastore, John Peacock, Carl Rasmussen, Phil C. Stuart, Adrian Wrigley, Jonathan Kimmitt, Henry Jabbour, Ian Bryden, Andrew Green, Montu Saxena, Chris Pickard, Kele Baker, Davin Yap, Martijn van Veen, Sylvia Frean, Janet Lefroy, John Hinch, James Jackson, Stephen Salter, Derek Bendall, Deep Throat, Thomas Hsu, Geoffrey Hinton, Radford Neal, Sam Roweis, John Winn, Simon Cran-McGreehin, Jackie Ford, Lord Wilson of Tillyorn, Dan Kammen, Harry Bhadeshia, Colin Humphreys, Adam Kalinowski, Anahita New, Jonathan Zwart, John Edwards, Danny Harvey, David Howarth, Andrew Read, Jenny Smithers, William Connolley, Ariane Kossack, Sylvie Marchand, Phil Hobbs, David Stern, Ryan Woodard, Noel Thompson, Matthew Turner, Frank Stajano, Stephen Stretton, Terry Barker, Jonathan Köhler, Peter Pope, Aleks Jakulin, Charles Lee, Dave Andrews, Dick Glick, Paul Robertson, Jürg Matter, Alan and Ruth Foster, David Archer, Philip Sterne, Oliver Stegle, Markus Kuhn, Keith Vertanen, Anthony Rood, Pilgrim Beart, Ellen Nisbet, Bob Flint, David Ward, Pietro Perona, Andrew Urquhart, Michael McIntyre, Andrew Blake, Anson Cheung, Daniel Wolpert, Rachel Warren, Peter Tallack, Philipp Hennig, Christian Steinerücken, Tamara Broderick, Demosthenis Pafitis, David Newbery, Annee Blott, Henry Leveson-Gower, John Colbert, Philip Dawid, Mary Waltham, Philip Slater, Christopher Hobbs, Margaret Hobbs, Paul Chambers, Michael Schlup, Fiona Harvey, Jeremy Nicholson, Ian Gardner, Sir John Sulston, Michael Fairbank, Menna Clatworthy, Gabor Csanyi, Stephen Bull, Jonathan Yates, Michael Sutherland, Michael Payne, Simon Learmount, John Riley, Lord John Browne, Cameron Freer, Parker Jones, Andrew Stobart, Peter Ravine, Anna Jones, Peter Brindle, Eoin Pierce, Willy Brown, Graham Treloar, Robin Smale, Dieter Helm, Gordon Taylor, Saul Griffith, David Cebonne, Simon Mercer, Alan Storkey, Giles Hodgson, Amos Storkey, Chris Williams, Tristan Collins, Darran Messem, Simon Singh, Gos Micklem, Peter Guthrie, Shin-Ichi Maeda, Candida Whitmill, Beatrix Schlarb-Ridley, Fabien Petitcolas, Sandy Polak, Dino Seppi, Tadashi Tokieda, Lisa Willis, Paul Weall, Hugh Hunt, Jon Fairbairn, Miloš T. Kojašević, Andrew Howe, Ian Leslie, Andrew Rice, Miles Hember, Hugo Willson, Win Rampen, Nigel Goddard, Richard Dietrich, Gareth Gretton, David Sterratt, Jamie Turner, Alistair Morfey, Rob Jones, Paul McKeigue, Rick Jefferys, Robin S Berlingo, Frank Kelly, Michael Kelly, Scott Kelly, Anne Miller, Malcolm Mackley, Tony Juniper, Peter Milloy, Cathy Kunkel, Tony Dye, Rob Jones, Garry Whatford, Francis Meyer, Wha-Jin Han, Brendan McNamara, Michael Lughton, Dermot Mc-Donnell, John McCone, Andreas Kay, John McIntyre, Denis Bonnelle, Ned Ekins-Daukes, John Daghish, Jawed Karim, Tom Yates, Lucas Kruijswijk, Sheldon Greenwell, Charles Copeland, Georg Heidenreich, Colin Dunn, Steve Foale, Leo Smith, Mark McAndrew, Bengt Gustafsson, Roger Pharo, David Calderwood, Graham Pendlebury, Brian Collins, Paul Hasley, Martin Dowling, Martin Whiteland, Andrew Janca, Keith Henson, Graeme Mitchison, Valerie MacKay, Dewi Williams, Nick Barnes, Niall

Mansfield, Graham Smith, Wade Amos, Sven Weier, Richard McMahon, Andrew Wallace, Corinne Meakins, Eoin O'Carroll, Iain McClatchie, Alexander Ac, Mark Suthers, Gustav Grob, Ibrahim Dincer, Ian Jones, Adnan Midilli, Chul Park, David Gelder, Damon Hart-

Davis, George Wallis, Philipp Spöth, James Wimberley, Richard Madeley, Jeremy Leggett, Michael Meacher, Dan Kelley, Tony Ward-Holmes, Charles Barton, James Wimberley, Jay Mucha, Johan Simu, Stuart Lawrence, Nathaniel Taylor, Dickon Pinner, Michael Davey, Michael Riedel, William Stoett, Jon Hilton, Mike Armstrong, Tony Hamilton, Joe Burlington, David Howey, Jim Brough, Mark Lynas, Hezlin Ashraf-Ball, Jim Oswald, John Lightfoot, Carol Atkinson, Nicola Terry, George Stowell, Damian Smith, Peter Campbell, Ian Percival, David Dunand, Nick Cook, Leon di Marco, Dave Fisher, John Cox, Jonathan Lee, Richard Procter, Matt Taylor, Carl Scheffler, Chris Burgoyne, Francisco Monteiro, Ian McChesney, and Liz Moyer. Thank you all.

For help with finding climate data, I thank Emily Shuckburgh. I'm very grateful to Kele Baker for gathering the electric car data in figure 20.21. I also thank David Sterratt for research contributions, and Niall Mansfield, Jonathan Zwart, and Anna Jones for excellent editorial advice.

The errors that remain are of course my own.

I am especially indebted to Seb Wills, Phil Cowans, Oliver Stegle, Patrick Welche, and Carl Scheffler for keeping my computers working.

I thank the African Institute for Mathematical Sciences, Cape Town, and the Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences, Cambridge, for hospitality.

Many thanks to the Digital Technology Group, Computer Laboratory, Cambridge and Heriot-Watt University Physics Department for providing weather data online. I am grateful to Jersey Water and Guernsey Electricity for tours of their facilities.

Thank you to Gilby Productions for providing the TinyURL service. TinyURL is a trademark of Gilby Productions. Thank you to Eric Johnston and Satellite Signals Limited for providing a nice interface for maps [www.satsig.net].

Thank you to David Stern for the portrait, to Becky Smith for iconic artwork, and to Claire Jervis for the photos on pages ix, 31, 90, 95, 153, 245, 289, and 325. For other photos, thanks to Robert MacKay, Eric LeVin, Marcus Freaan, Rosie Ward, Harry Bhadeshia, Catherine Huang, Yaan de Carlan, Pippa Swannell, Corinne Le Quéré, David Faiman, Kele Baker, Tim Jervis, and anonymous contributors to Wikipedia. I am grateful to the office of the Mayor of London for providing copies of advertisements.

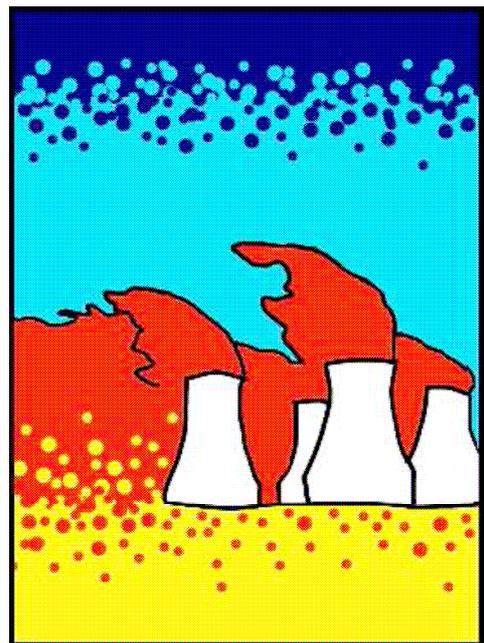
The artwork on page 240 is "Maid in London," and on page 288, "Sunflowers," by Banksy www.banksy.co.uk. Thank you, Banksy!

Offsetting services were provided by cheatneutral.com.

This book is written in LaTeX on the Ubuntu GNU/Linux operating system using free software. The figures were drawn with gnuplot and metapost. Many of the maps were created with Paul Wessel and Walter Smith's gmt software. Thank you also to MartinWeinelt and OMC. Thank you to Donald Knuth, Leslie Lamport, Richard Stallman, Linus Torvalds, and all those who contribute to free software.

Finally I owe the biggest debt of gratitude to the Gatsby Charitable Foundation, who supported me and my research group before, during, and after the writing of this book.

Teil III: Technischer Anhang



Anhang A. Autos II

Wir haben abgeschätzt, dass ein Auto für 100 km Fahrt etwa 80 kWh Energie benötigt. Wohin geht diese Energie? Wie hängt sie von den Eigenschaften des Fahrzeuges ab? Können wir 100mal effizientere Autos bauen? Lassen Sie uns ein simples Modell des Autofahrens skizzieren, um zu beschreiben, wohin die Energie geht. Die Energie eines typischen Diesel- oder Benzinautos geht hauptsächlich an vier Stellen, die wir alle behandeln werden:

1. Beschleunigen, und dann durch die Bremsen wieder entschleunigen
2. Luftwiderstand
3. Rollwiderstand
4. Wärme – etwa 75% der Energie wird in nutzlose Wärme gewandelt, weil die Energie-Umwandlungskette ineffizient ist.

Zunächst wird unser Modell den Rollwiderstand vernachlässigen; diesen Effekt werden wir später in diesem Kapitel hinzufügen. Nehmen wir an, der Fahrer beschleunigt rasch bis zur Reisegeschwindigkeit v und hält diese Geschwindigkeit eine Strecke d lang, die dem Abstand zwischen Ampeln, Stoppschildern oder Staus entspricht. Beim nächsten Halt angekommen steigt er auf die Bremse und verwandelt all die kinetische Energie in den Bremsen zu Wärme. (Das Fahrzeug benutzt nicht diese seltsamen regenerativen Bremsen.) Wenn er wieder fahren kann, beschleunigt er wieder auf die Reisegeschwindigkeit v . Diese Beschleunigung gibt dem Auto kinetische Energie; Bremsen wirft diese kinetische Energie weg.

Energie geht nicht nur in die Bremsen: Während das Auto fährt, verwirbelt es die Luft. Ein Auto lässt eine Röhre verwirbelter Luft hinter sich, die mit einer Geschwindigkeit strömt, die vergleichbar mit v ist. Welche dieser beiden Energieformen ist größer: Die kinetische Energie in Luftwirbeln oder die Wärme in den Bremsen? Rechnen wir es aus.

- Das Auto beschleunigt und bremst einmal innerhalb der Zeitspanne d/v . Die Rate, mit der Energie in die Bremsen gepumpt wird ist

$$\frac{\text{kinetische Energie}}{\text{Zeit zwischen Abbremsungen}} = \frac{\frac{1}{2} m_c v^2}{d/v} = \frac{\frac{1}{2} m_c v^3}{d}, \quad (\text{A.1})$$

wobei m_c die Masse des Autos sei.



Fig.A.1: Ein Peugeot 206 hat einen Cw-Wert von 0,33. Foto von Christopher Batt

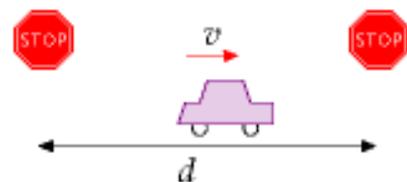


Fig.A.2: Annahme: Ein Auto bewegt sich mit der Geschwindigkeit v von einem Stopp zum nächsten, der den Abstand d hat.

Die Schlüsselformel für die meisten Berechnungen in diesem Buch ist

$$\text{kinetische Energie} = \frac{1}{2} m v^2 .$$

Beispiel: Ein Auto mit Masse $m=1000$ kg fährt mit der Geschwindigkeit $v = 100$ km/h = 28 m/s. Es hat dann die Energie

$$\frac{1}{2} m v^2 = 390.000 \text{ J} \approx 0,1 \text{ kWh}$$



Fig.A.3: Ein Auto mit Geschwindigkeit v erzeugt hinter sich eine Röhre wirbelnder Luft. Der Querschnitt der Röhre ist ähnlich der Aufstandsfläche des Autos und die Geschwindigkeit, mit der die Luft wirbelt, ist annähernd v .

- Die Röhre verwirbelter Luft, die ein Auto in der Zeit t erzeugt, hat das Volumen Avt , wobei A die Querschnittsfläche der Röhre ist, die ähnlich der von vorne gesehenen Fläche (der „Aufstandsfläche“) ist. (Für ein stromlinienförmiges Auto ist A gewöhnlich etwas kleiner als die Aufstandsfläche A_c des Autos, und das Verhältnis zwischen dem effektiven Querschnitt der Röhre und der Aufstandsfläche des Autos wird als Luftwiderstandsbeiwert oder c_W -Wert bezeichnet. Für die folgenden Berechnungen bedeutet A die „effektive Aufstandsfläche“ des Autos, $c_W A_c$.) Die Röhre hat eine Masse von $m_{\text{air}} = \rho Avt$ (Masse = Dichte \times Volumen, wobei ρ (griechischer Buchstabe Rho) die Dichte der Luft bezeichnet) und wirbelt mit der Geschwindigkeit v , also ist ihre kinetische Energie

$$\frac{1}{2} m_{\text{air}} v^2 = \frac{1}{2} \rho Avt v^2$$

und die Erzeugungsrate von kinetischer Energie in den Luftwirbeln ist

$$\frac{\frac{1}{2} \rho Avt v^2}{t} = \frac{1}{2} \rho Av^3.$$

Die Gesamtrate der Energieproduktion beim Auto ist also

$$\begin{aligned} \text{Leistung zum Abbremsen} &+ \text{Leistung zum Luftverwirbeln} \\ = \frac{1}{2} m_c v^3 / d &+ \frac{1}{2} \rho Av^3. \end{aligned} \tag{A.2}$$

Beide Formen der Energiedissipation skalieren mit v^3 . Dieses Modell sagt also vorher, dass ein Fahrer durch Halbieren seiner Geschwindigkeit seinen Energieverbrauch (pro Zeiteinheit) 8mal verkleinert. Beendet er seine Fahrt nach derselben Strecke, wird seine Fahrt doppelt so lang gedauert haben, doch die gesamte für die Fahrt benötigte Energie wird viermal geringer ausfallen.

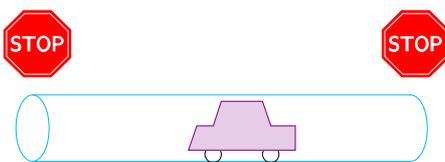


Fig.A.4: Um herauszufinden, ob der Energieverbrauch brems- oder luftwiderstands-dominiert ist, vergleichen wir die Masse des Autos mit der Masse der Luft-Röhre zwischen den Stopps.



Fig.A.5: Der Energieverbrauch eines Autos ist bei Autobahnfahrt proportional zu seiner Aufstandsfläche und bei Stadtverkehr proportional zu seiner Masse. Wer hat die besseren Verbrauchszahlen, der VW links, oder das Raumschiff?

Welche der beiden Formen der Energiedissipation – Bremsen und Luftverwirbelung – ist die größere? Das hängt vom Verhältnis

$$(m_c/d) / (\rho A)$$

ab. Ist das Verhältnis viel größer als 1, dann geht die meiste Energie in die Bremsen; ist es kleiner, geht mehr Energie in die Luftwirbel. Stellen wir dieses Verhältnis um, ist es größer als 1, wenn

$$m_c > \rho Ad.$$

Nun ist aber $\rho A d$ das Volumen der Röhre durchfahrener Luft von einem Stopp bis zum nächsten. Und $\rho A d$ ist die Masse dieses Volumens von Luft. So haben wir eine recht einfache Situation: Die Energiedissipation ist dominiert von der Energievernichtung beim Bremsen, wenn die Masse des Autos größer ist als die Masse der Luftröhre, die es von einem Stopp zum nächsten durchfährt; und sie ist dominiert vom Luftverwirbeln, wenn die Masse des Autos kleiner ist (Fig.A.4). Berechnen wir nun den Abstand d^* zwischen Stopps, unter dem die Dissipation bremsdominiert und über dem verwirbelungs- (Luftwiderstands-)dominiert ist. Wenn die Aufstandsfläche des Autos

$$A_c = 2 \text{ m breit} \times 1,5 \text{ m hoch} = 3 \text{ m}^2$$

beträgt, der c_W -Wert bei $1/3$ und die Masse $m_c = 1000 \text{ kg}$ ist, gilt für d^*

$$d^* = \frac{m_c}{\rho c_W A_c} = \frac{1000 \text{ kg}}{1,3 \text{ kg/m}^3 \times 1/3 \times 3 \text{ m}^2} = 750 \text{ m} .$$

Im Stadtverkehr dominiert also die kinetische Energie und das Bremsen, wenn der Abstand zwischen einzelnen Stopps weniger als 750 m ist. Unter diesen Umständen ist es zum Energiesparen eine gute Idee,

1. die Masse des Fahrzeugs zu reduzieren,
2. ein Auto mit regenerativen Bremsen zu benutzen (die den Energieverlust beim Bremsen etwa halbieren, vgl. Kapitel 20) und
3. langsamer zu fahren.

Wenn die Stopps signifikant weiter als 750 m auseinanderliegen, ist die Energiedissipation vom Luftwiderstand dominiert. Dann ist es kaum erheblich, wie viel Ihr Fahrzeug wiegt, die Energiedissipation ist fast die gleiche, ob ihr Auto mit einem oder mit sechs Leuten besetzt ist. Energie kann gespart werden,

1. indem man den Luftwiderstand des Autos verringert,
2. indem man die Aufstandsfläche reduziert,
3. indem man langsamer fährt.

Der tatsächliche Energieverbrauch eines Fahrzeugs ist die Energiedissipation aus Gleichung (A.2), erhöht um einen Faktor, der die Ineffizienz des Motors und der Kraftübertragung beinhaltet. Typische Verbrennungsmotoren sind 25%-effizient, also werden von der chemischen Energie, die ein Auto verbraucht, drei Viertel dazu verwendet, den Motor und den Kühler zu erhitzen und nur ein Viertel geht in „nützliche“ Energie:

Energie pro Strecke	
Auto mit 110 km/h	80 kWh/(100km)
Fahrrad mit 21 km/h	2,4 kWh/(100km)
Flugzeuge bei 900 km/h	
A380	27 kWh / 100 Sitzplatz-km

Tabelle A.6: Bemerkenswerte Fakten: Energieverbrauch des Autos.

$$\text{Gesamtleistung eines Autos} \approx 4 \left[\frac{1}{2} m_c v^3 / d + \frac{1}{2} \rho A v^3 \right] .$$

Lassen Sie uns diese Theorie des Autofahrens überprüfen, indem wir vernünftige Zahlen für Langstreckenfahrten einsetzen. Sei $v = 110 \text{ km/h} = 31 \text{ m/s}$ und $A = c_W A_c = 1 \text{ m}^2$. Der Leistungsverbrauch des Motors ist dann grob

$$4 \times \frac{1}{2} \rho A v^3 = 2 \times 1,3 \text{ kg/m}^3 \times 1 \text{ m}^2 \times (31 \text{ m/s})^3 = 80 \text{ kW} .$$

Fahren Sie mit dieser Geschwindigkeit eine Stunde täglich, dann legen Sie 110 km zurück und verbrauchen 80 kWh jeden Tag. Wären Sie stattdessen zwei Stunden mit der halben Geschwindigkeit gefahren, hätten Sie dieselbe Strecke zurückgelegt und nur 20 kWh Energie verbraucht. Diese einfache Theorie scheint konsistent zu sein mit den Verbrauchszahlen aus Kapitel 3. Darüber hinaus gibt diese Theorie Hinweise, wie der Energieverbrauch eines Autos reduziert werden kann. Die Theorie hat aber auch einige Schwächen, die ich gleich erklären werde.

Können wir ein neues Auto bauen, das 100mal weniger Energie verbraucht und trotzdem 110 km/h fährt? Nein. Nicht wenn das Auto dieselbe Form haben soll. Auf der Autobahn bei 100 km/h geht der Energieverbrauch vorrangig in die Luftverwirbelungen. Die Materialien des Fahrzeugs zu verändern macht da keinen Unterschied. Eine wundersame Verbesserung des Verbrennungsmotors könnte vielleicht seine Effizienz von 25% auf 50% steigern und den Energieverbrauch auf 40 kWh pro 100 km senken.

Elektroautos haben einige Vorzüge: Obwohl das Gewicht des Energiespeichers pro nutzbarer gespeicherter Kilowattstunde etwa 25mal größer ist als bei Benzin, kann das Gewicht des Elektromotors etwa 8mal geringer sein. Und die Energiewandlung ist auch bei Elektroautos viel effizienter: Elektromotoren können bis zu 90% Effizienz erreichen.

Wir werden am Ende des Kapitels noch einmal genauer auf Elektroautos zurückkommen.

Fahrräder und der Skalierungstrick

Hier eine Fangfrage: Was ist der Energieverbrauch eines Fahrrads auf 100 km? Sich mit einem Fahrrad fortzubewegen erfordert Energie aus genau demselben Grund wie beim Auto: man erzeugt Luftwirbel. Jetzt könnten wir dieselben Berechnungen nochmals neu anstellen und die Kennzahlen des Autos durch die des Fahrrades ersetzen. Aber es gibt einen einfachen Trick, um die Antwort für das Fahrrad aus der Antwort für das Auto zu erhalten. Der Energieverbrauch des Autos pro gefahrener Strecke ist der Energieverbrauch für die Luftverwirbelungen

$$4 \times \frac{1}{2} \rho A v^3$$

dividiert durch die Geschwindigkeit v , also

$$\text{Energie pro Strecke} = 4 \times \frac{1}{2} \rho A v^2 .$$

Die „4“ kam von der Motoreffizienz; ρ ist die Dichte von Luft, die Fläche $A = c_w A_c$ ist die effektive Aufstandsfläche des Fahrzeugs und v ist die Geschwindigkeit. Jetzt können wir ein Fahrrad mit einem Auto vergleichen, indem wir $4 \times \frac{1}{2} \rho A v^3$ für das Fahrrad durch $4 \times \frac{1}{2} \rho A v^3$ für das Auto teilen. Alle Konstanten und die Dichten kürzen sich heraus, wenn die Effizienz des Kohlenstoff-betriebenen Radfahrers vergleichbar mit der des kohlenstoff-betriebenen Automotors ist (was der Fall ist). Das Verhältnis ist:

Luftwiderstandsbeiwert c_w	
<i>Autos:</i>	
Honda Insight	0.25
Prius	0.26
Renault 25	0.28
Honda Civic (2006)	0.31
VW Polo Gti	0.32
Peugeot 206	0.33
Ford Sierra	0.34
Audi TT	0.35
Honda Civic (2001)	0.36
Citroën 2CV	0.51
Radfahrer	0.9
Reisebus	0.425
<i>Flugzeuge:</i>	
Cessna	0.027
Learjet	0.022
Boeing 747	0.031
Eff. Aufstandsfläche (m ²)	
Land Rover Discovery	1.6
Volvo 740	0,81
Typical car	0.8
Honda Civic	0.68
VW Polo Gti	0.65
Honda Insight	0.47

Table A.7. c_w -Werte und effektive Aufstandsflächen

$$\frac{\text{Energie pro Strecke Rad}}{\text{Energie pro Strecke Auto}} = \frac{c_{w,\text{Rad}} A_{\text{Rad}} v_{\text{Rad}}^2}{c_{w,\text{Auto}} A_{\text{Auto}} v_{\text{Auto}}^2}$$

Der angewandte Trick heißt Skalierung. Wenn wir wissen, wie der Energieverbrauch mit der Geschwindigkeit und der Aufstandsfläche skaliert, können wir auch den Energieverbrauch für Objekte voraussagen, die völlig andere Werte für Geschwindigkeit oder Aufstandsfläche haben. Lassen Sie uns in diesem speziellen Fall annehmen, das Flächenverhältnis sei

$$\frac{A_{\text{Rad}}}{A_{\text{Auto}}} = \frac{1}{4}$$

(Vier Radfahrer können Schulter an Schulter sitzen in der Breite eines PKW.) Nehmen wir weiter an, das Fahrrad sei nicht sonderlich stromlinienförmig:

$$\frac{c_{w,\text{Rad}}}{c_{w,\text{Auto}}} = \frac{1}{1/3}$$

und die Geschwindigkeit des Radfahrers sei 22 km/h, also

$$\frac{v_{\text{Rad}}}{v_{\text{Auto}}} = \frac{1}{5}$$

Dann gilt

$$\begin{aligned} \frac{\text{Energie pro Strecke Rad}}{\text{Energie pro Strecke Auto}} &= \frac{c_{w,\text{Rad}} A_{\text{Rad}}}{c_{w,\text{Auto}} A_{\text{Auto}}} \times \frac{v_{\text{Rad}}^2}{v_{\text{Auto}}^2} \\ &= \left(\frac{3}{4}\right) \times \left(\frac{1}{5}\right)^2 \\ &= \frac{3}{100} \end{aligned}$$

Ein Radfahrer mit 21 km/h benötigt also ca. 3 % der Energie eines Autofahrers auf der Autobahn – um die 2,4 kWh auf 100 km.

Wenn Sie also ein Fahrzeug suchen, dessen Treibstoff-Effizienz 30mal besser als die eines Autos ist, liegt die Antwort nahe: Fahren Sie Rad.

Rad	c_R
Zug (Stahl auf Stahl)	0,002
Fahrradreifen	0,005
LKW-Reifen	0,007
PKW-Reifen	0,010

Tabelle A.8: Der Rollwiderstand ist gleich dem Gewicht mal dem Rollwiderstandsbeiwert c_R . Der Rollwiderstand enthält Verformungskräfte des Reifens, Reibungsverluste in den Radlagern, Stöße und Vibrationen sowohl des Fahrzeugs als auch der Straße (einschließlich der Energie, die die Stoßdämpfer aufnehmen) und den Schlupf der Reifen auf Straße oder Schiene. Der Koeffizient ändert sich abhängig von der Straßenqualität, vom Reifenmaterial und von der Temperatur. Die hier angegebenen Zahlen gelten für glatte Straßen. [2bhu35]

Was ist mit dem Rollwiderstand?

Was wir bisher völlig vernachlässigt haben ist die Energie, die in Reifen und Lagern verbraucht wird, oder die Energie, die die Abrollgeräusche der Reifen auf der Straße

verursacht oder die den Gummi von den Reifen radiert und auch die Energie, die Fahrzeuge in die Straße übertragen, indem sie diese zu Erschütterungen anregen. Zusammengefasst nennt man diese Energien den Rollwiderstand. Das Standardmodell zum Rollwiderstand nimmt an, dass dieser – unabhängig von der Geschwindigkeit – exakt proportional zum Gewicht des Fahrzeugs ist. Die Proportionalitätskonstante heißt Rollwiderstandskoeffizient oder Rollwiderstandsbeiwert c_R . Tabelle A.8. zeigt einige typische Werte.

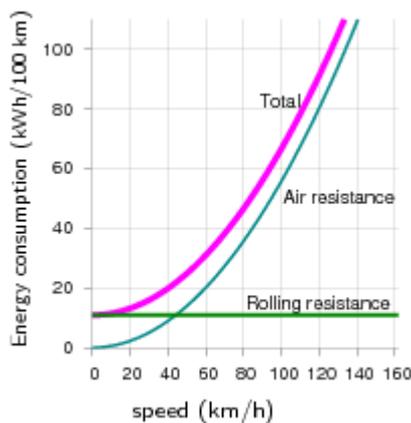


Fig.A.9: Einfache Theorie des Treibstoffverbrauchs beim Auto (Energie pro Strecke), bei gleichmäßiger Fahrgeschwindigkeit. Annahmen: Motorwirkungsgrad 25% geschwindigkeitsunabhängig, $c_W A_c = 1 \text{ m}^2$, $m_c = 1000 \text{ kg}$, $c_R = 0,01$.

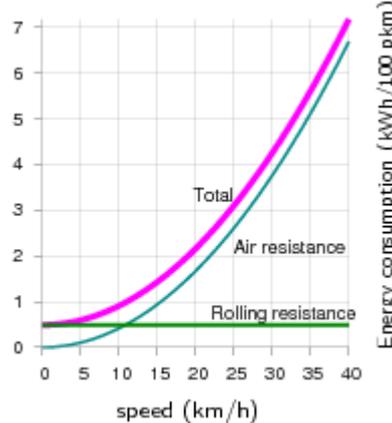


Fig.A.10: Einfache Theorie des Treibstoffverbrauchs beim Fahrrad (Energie pro Strecke). Senkrechte Achse ist Energieverbrauch auf 100 km. Annahmen: Wirkungsgrad des Motors (das sind Sie!) 25%, $c_W A_c = 0,75 \text{ m}^2$, Masse von Fahrer + Rad: 90 kg, $c_R = 0,005$.

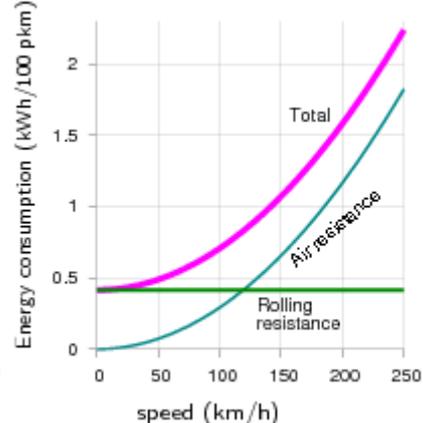


Fig.A.11: Einfache Theorie des Treibstoffverbrauchs beim Zug, pro Fahrgast, für einen 8-Waggon-Zug mit 584 Passagieren. Senkrechte Achse: Energieverbrauch in kWh pro 100 p-km. Annahmen: Motorwirkungsgrad 0,90, $c_W A_{Zug} = 11 \text{ m}^2$, $m_{Zug} = 400.000 \text{ kg}$, $c_R = 0,002$.

Der Rollwiderstandsbeiwert eines Autos ist etwa 0,01. Der Effekt des Rollwiderstandes ist derselbe wie wenn man dauernd einen Berg mit 1% Steigung hinauffahren würde. Die Rollreibung ist etwa 100 Newton pro Tonne, unabhängig von der Geschwindigkeit. Sie können das nachprüfen, indem Sie ein 1-Tonnen-Fahrzeug eine ebene Straße entlangschieben. Sobald es in Schwung ist, werden Sie es mit einer Hand in Bewegung halten können. (100 Newton sind das Gewicht von 100 Äpfeln.) Bei einer Geschwindigkeit von 31 m/s (110 km/h) liegt für ein 1-Tonnen-Fahrzeug die Energie, die erforderlich ist um den Rollwiderstand zu überwinden, bei

$$\text{Kraft} \times \text{Geschwindigkeit} = (100 \text{ N}) \times (31 \text{ m/s}) = 3.100 \text{ W} ,$$

was bei einem Motorwirkungsgrad von 25% eine Motorleistung von 12 kW erfordert, im Gegensatz zum Luftwiderstand, dessen Überwindung 80 kW erfordert, wie wir oben auf S.274 berechnet haben. Bei hohen Geschwindigkeiten wird also etwa 15% der Energie für die Rollreibung benötigt.

Fig.A.9 zeigt die Theorie des Treibstoffverbrauches (Energie pro zurückgelegter Strecke) als Funktion der (konstanten) Geschwindigkeit, wenn man Roll- und Luftwiderstand zusammennimmt.

Die Geschwindigkeit, bei der Roll- und Luftwiderstand gleich sind, ist gegeben durch

$$c_R m_c g = \frac{1}{2} \rho c_W A_c v^2$$

also

$$v = \sqrt{2 \frac{c_R m_c g}{\rho c_w A_C}} = 7 \text{ m/s} = 25 \text{ km/h.}$$

Fahrräder

Für ein Fahrrad ($m=90 \text{ kg}$, $A=0,75 \text{ m}^2$) findet der Übergang von rollwiderstandsdominiertem auf luftwiderstandsdominiertes Fahren bei etwa 12 km/h statt. Bei einer konstanten Geschwindigkeit um die 20 km/h kostet das Radfahren etwa $2,2 \text{ kWh}$ pro 100 km . Durch Einnehmen einer aerodynamisch günstigen Haltung kann Luftwiderstand und Aufstandsfläche so reduziert werden, dass der Energieverbrauch auf $1,6 \text{ kWh}$ pro 100 km zurückgeht.

Züge

Für einen 8-Waggon-Zug wie aus Fig.20.4 ($m=400.000 \text{ kg}$, $A=11 \text{ m}^2$) wird der Luftwiderstand größer als der Rollwiderstand bei einer Geschwindigkeit von

$$v = 33 \text{ m/s} = 120 \text{ km/h.}$$

Mit nur einem Waggon ($m=50.000 \text{ kg}$, $A=11 \text{ m}^2$) liegt die Grenze bei

$$v = 12 \text{ m/s} = 43 \text{ km/h.}$$

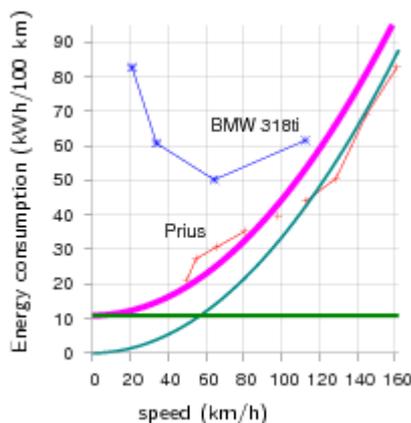
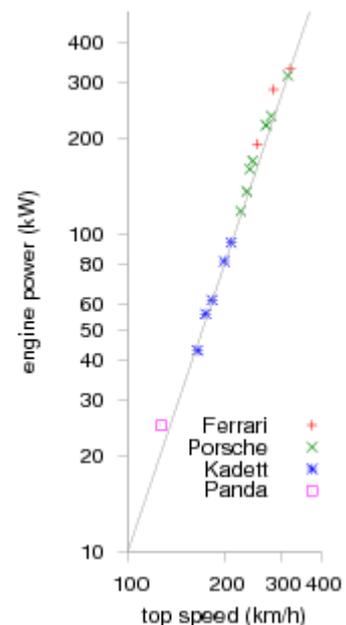


Fig.A.12: Der Treibstoffverbrauch der heutigen Autos geht nicht mit dem Quadrat der Geschwindigkeit. Prius Daten von B. Z. Wilson, BMW Daten von Phil C. Stuart. Die glatte Linie zeigt, wie eine v^2 -Kurve aussähe, bei einer angenommenen effektiven Aufstandsfläche von $0,6 \text{ m}^2$.

Fig.A.13: (rechts) Leistungen von Autos (kW) vs. Höchstgeschwindigkeit (in km/h). Beide Skalen sind logarithmisch. Die Leistung wächst mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit. Zweimal so schnell zu fahren erfordert die achtfache Motorleistung. Von Tennekes (1997).



Geschwindigkeitsabhängigkeit der Energie

Wenn ich sage, dass Halbieren der Fahrgeschwindigkeit den Verbrauch (in l auf 100 km) auf ein Viertel reduzieren sollte, schauen manche Leute skeptisch. Sie haben ein gutes Argument: Die meisten Automotoren haben eine optimale Drehzahl, und der gewählte Gang bestimmt die Geschwindigkeit, bei der die Motor-Effizienz optimal ist. In meinem Gedankenexperiment könnte bei Halbierung der Geschwindigkeit das Auto aus diesem optimalen Geschwindigkeitsbereich herausfallen und daher die Einsparung geringer als 4fach ausfallen. Meine stillschweigende Annahme, dass der Motorwirkungsgrad bei allen Geschwindigkeiten und allen Lastsituationen derselbe wäre, führte zur Schlussfolgerung, dass es (im Hinblick auf Verbrauch) immer besser wäre, langsamer zu fahren; wenn aber der Motorwirkungsgrad bei kleinen Geschwindigkeiten abfällt, müsste die treibstoff-effizienteste Geschwindigkeit ein Mittelweg sein, ein Kompromiss zwischen langsam fahren und den Motor im optimalen Drehzahlbereich halten. Für den BMW 318ti aus Fig.A.12 läge die optimale Geschwindigkeit beispielsweise bei 60 km/h . Wenn aber die Gesellschaft beschließt, dass Fahrzeuggeschwindigkeiten reduziert werden sollten,

spricht nichts dagegen, auch die Motoren so umzudesignen, dass die optimale Effizienz bei der entsprechenden Geschwindigkeit erreicht werden kann. Ein weiterer Hinweis auf die Proportionalität zwischen erforderlicher Energie und der dritten Potenz der Geschwindigkeit ist in Fig.A.13 abgebildet: Sie zeigt Motorleistung vs. Spitzengeschwindigkeit für eine Vielzahl von Autos. Die eingezeichnete Linie zeigt die Beziehung „Energie proportional zu v^3 .“

Elektroautos: Ist die Reichweite ein Problem?

Die Leute sagen oft, dass die Reichweite von Elektrofahrzeugen nicht groß genug wäre. E-Auto-Befürworter sagen „kein Problem, wir können ja einfach größere Batterien einsetzen“ – und das ist wahr, doch müssen wir ausarbeiten, welchen Effekt diese zusätzliche Batterien auf den Energieverbrauch haben. Die Antwort hängt entscheidend davon ab, welche Energiedichte wir für die Batterien annehmen. Für eine Energiedichte von 40 Wh/kg (typisch für Bleiakkus) werden wir sehen, dass es schwer ist, den Aktionsradius über 200 oder 300 km auszudehnen. Doch für Energiedichten um die 120 Wh/kg (typisch für verschiedene lithiumbasierte Akkus) sind Reichweiten von 500 km kein Problem.

Nehmen wir an, die Masse des Fahrzeugs mit Insassen wäre 740 kg, ohne Batterien. Wir werden dann nacheinander 100 kg, 200 kg, 500 kg oder vielleicht 1000 kg Batterien hinzunehmen. Nehmen wir weiter an: eine typische Geschwindigkeit 50 km/h, eine effektive Aufstandsfläche von 0,8 m², einen Rollwiderstand von 0,01, eine mittlere Entfernung zwischen Stopps von 500 m, einen Motorwirkungsgrad von 85% und eine Rückgewinnung von 50% der kinetischen Energie des Fahrzeugs beim Anhalten durch den Einsatz regenerativer Bremsen. Das Laden des Autos aus der Steckdose soll 85% effizient erfolgen können. Fig.A.14 zeigt die Transportkosten des Fahrzeugs über seiner Reichweite, wenn wir den Batterieumfang im Fahrzeug variieren. Die obere Kurve zeigt das Ergebnis für Batterien mit einer Energiedichte von 40 Wh/kg (altmodische Bleiakkus). Die Reichweite ist bei etwa 500 km limitiert. Um diesem Limit nahe zu kommen, müssen wir unheimlich große Batterien verwenden: Für eine Reichweite von 400 km wären beispielsweise 2000 kg Batterien erforderlich, und die Transportkosten wären über 25 kWh auf 100 km. Wenn wir mit einer Reichweite von 180 km zufrieden sind, können wir das mit 500 kg Batterien erreichen. Die Dinge sehen gleich viel besser aus, wenn man die leichteren Lithium-Ionen-Akkus verwendet. Bei einer Energiedichte von 120 Wh/kg können Autos mit 500 kg Batterien leicht über 500 km schaffen. Die Transportkosten wären dann bei 13 kWh pro 100 km.

Daher scheint es mir, dass das Reichweitenproblem bereits durch die Verfügbarkeit moderner Batterien gelöst ist. Es wäre sicherlich schön, noch bessere Batterien zu haben, doch eine Energiedichte von 120 Wh/kg ist bereits ausreichend, so lange wir mit

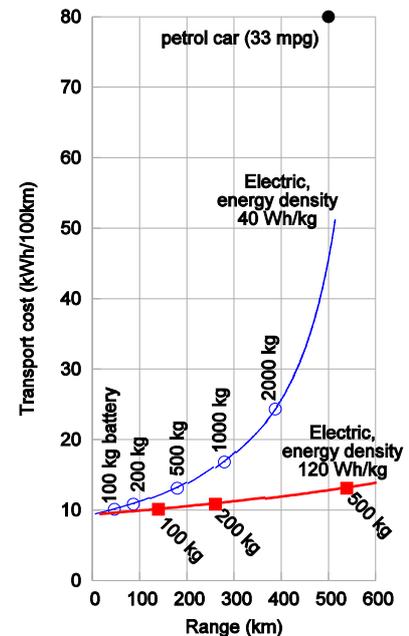


Fig.A.14: Theorie der Reichweite (waagrechte Achse) und Transportkosten (senkrechte Achse) von Elektroautos als Funktion der Batteriemasse, für zwei Batterietechnologien. Ein Auto mit 500 kg alter Batterien, mit einer Energiedichte von 40 Wh/kg, hat eine Reichweite von 180 km. Mit dem selben Gewicht an modernen Batterien, mit 120 Wh/kg, hat das Elektroauto eine Reichweite von über 500 km. In beiden Fällen sind die Energiekosten etwa 13 kWh pro 100 km. Die Zahlen gelten für eine Batterie-Ladeeffizienz von 85%.

500 kg Batterien im Auto glücklich sind. In der Praxis wären wohl die meisten Leute mit einem Radius von 300 km zufrieden, der mit 250 kg Batterien erreicht werden kann. Wären diese Batterien in Blöcke zu je 25 kg unterteilt, die einzeln ausbaubar wären, dann könnte ein Autofahrer, der nur die übliche Pendlerstrecke fährt, lediglich 4 der 10 Blöcke an Bord nehmen (100 kg ergeben 140 km) und weitere 6 Blöcke nur dann an der Stromtankstelle holen, wenn er eine längere Fahrt plant. Bei einer Langstreckenfahrt müsste man etwa alle 300 km die Batterien an einer Stromtankstelle durch einen frischen Satz austauschen.

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

274 mit regenerativen Bremsen, die den Energieverlust beim Bremsen etwa halbieren – *Regenerative brakes roughly halve the energy lost in braking.* Quelle: E4tech (2007).

274 Typische Verbrennungsmotoren sind 25%-effizient 256 *Typical petrol engines are about 25% efficient.* Encarta [6by8x] sagt: “Die Wirkungsgrade moderner Ottomotoren liegen zwischen 20 und 25%” Der Benzinmotor im Toyota Prius, berühmt dafür, eines der effizientesten Autos zu sein, benutzt den Atkinson-Zyklus statt des Otto-Zyklus; er hat eine Spitzenleistung von 52 kW und einen Wirkungsgrad von 34% bei 10 kW [348whs]. Der effizienteste Dieselmotor der Welt hat einen Wirkungsgrad von 52%, ist aber für Autos nicht geeignet, da er 2.300 Tonnen wiegt: Der Wartsila-Sulzer RTA96-C Turbodiesel (Fig.A.15) ist für Containerschiffe konzipiert und liefert 80 MW.



Fig.A.15: Der Wartsila-Sulzer RTA96-C 14-Zylinder Zweitakt-Dieselmotor. 27 m lang und 13,5 m hoch.
www.wartsila.com

275 kann das Gewicht des Elektroautos etwa 8mal geringer sein 257 *Electric engines can be about 8 times lighter than petrol engines.* Ein 4-Takt-Benzinmotor hat ein Leistungs-zu-Masse-Verhältnis von etwa 0.75 kW/kg. Die besten Elektromotoren haben einen Wirkungsgrad von 90% und ein Leistungs-zu-Masse-Verhältnis von 6 kW/kg. Einen 75 kW Benzinmotor durch einen 75 kW Elektromotor zu ersetzen spart also 85 kg Gewicht. Leider ist das Leistungs-zu-Masse-Verhältnis von Batterien etwa 1 kW pro kg, so dass man bei den Batterien wieder verliert, was man am Motor gewinnt.

275 die Effizienz des Kohlenstoff-betriebenen Radfahrers 259 *The bike's engine uses energy with an efficiency of 0.25.* Diese und weitere Annahmen über das Radfahren findet man bestätigt bei di Prampero et al. (1979). Die effektive Aufstandsfläche eines Radfahrers in Rennhaltung ist $c_{wA} = 0,3 \text{ m}^2$. Der Rollwiderstand eines hochwertigen Rennrades (Gesamtgewicht 73 kg) ist 3,2 N.

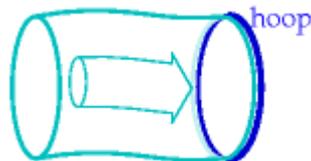
278 Fig.A.12 260 Prius Daten von B. Z. Wilson [home.hiwaay.net/~bzwilson/prius/]. BMW Daten von Phil C. Stuart [www.randomuseless.info/318ti/economy.html].

Weiterführende Literatur: Gabrielli und von Kármán (1950).

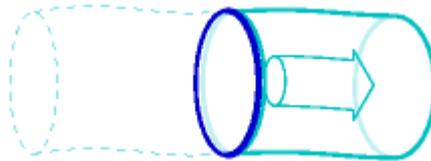
Anhang B: Wind II

Die Physik der Windkraft

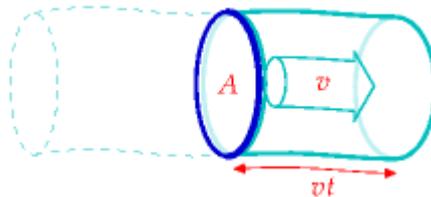
Um die Energie im Wind abzuschätzen, nehmen wir an, dass wir ein Windrad mit der Fläche A hochhalten, das Wind der Geschwindigkeit v ausgesetzt ist. Wir berechnen die Masse der Luft, die durch das Windrad pro Sekunde streicht. Hier ist ein Bild der Luft, kurz bevor sie durch das Windrad streicht:



Und hier ist das Bild der selben Masse von Luft eine Sekunde später:



Die Masse dieses Stücks Luft ist das Produkt aus seiner Dichte ρ , seiner Fläche A und seiner Länge, die v mal t ist, mit t gleich einer Sekunde.



Die kinetische Energie dieses Stücks Luft ist (ich benutze wieder die Formel Masse = Dichte x Volumen)

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Avt v^2 = \frac{1}{2}\rho Atv^3. \quad (\text{B.1})$$

Die Leistung des Windes auf einer Fläche A – das ist die kinetische Energie, die pro Zeiteinheit durch diese Fläche streicht – ist somit

$$\frac{\frac{1}{2}mv^2}{t} = \frac{1}{2}\rho Av^3. \quad (\text{B.2})$$

Diese Formel kommt uns bekannt vor – wir leiteten einen identischen Ausdruck auf Seite 346 bei der Diskussion des Energieverbrauchs eines bewegten Fahrzeugs ab.

Was ist eine typische Windgeschwindigkeit? An einem windigen Tag kann man als Radfahrer die Windrichtung direkt wahrnehmen; kommt der Wind von hinten, ist man viel schneller als sonst; die Windgeschwindigkeit ist also vergleichbar mit der eines Radfahrers, der sagen wir 21 km/h (6 m/s) schafft. In Cambridge ist der Wind nur gelegentlich so stark. Lassen Sie mich trotzdem dies als eine für England typische Zahl verwenden (und im Gedächtnis behalten, dass wir unsere Abschätzungen ggf. revidieren müssen).

Meilen/ Stunde	km/h	m/s	Beaufort Skala
2,2	3,6	1	Windstärke 1
7	11	3	Windstärke 2
11	18	5	Windstärke 3
13	21	6	Windstärke 4
16	25	7	Windstärke 5
22	36	10	Windstärke 6
29	47	13	Windstärke 7
36	58	16	Windstärke 8
42	68	19	Windstärke 9
49	79	22	Windstärke 10
60	97	27	Windstärke 11
69	112	31	Windstärke 12
78	126	35	Windstärke 12

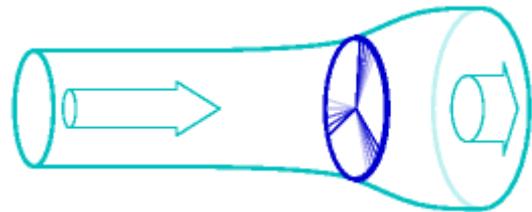


Fig.B.2: (oben) Luftströmung nach einer Windmühle. Die Luft wird abgebremst und aufgeweitet durch die Windmühle.

Fig.B.1: (links) Geschwindigkeiten

Die Dichte von Luft ist etwa 1,3 kg pro m³. (Gewöhnlich runde ich das zu 1 kg/m³, weil das leichter zu merken ist, aber hier habe ich nicht gerundet.) Die typische Windleistung pro Quadratmeter Windrad ist

$$\frac{1}{2} \rho v^3 = \frac{1}{2} 1,3 \text{ kg/m}^3 \times (6 \text{ m/s})^3 = 140 \text{ W/m}^2. \quad (\text{B.3})$$

Eine Windmühle kann diese Energie nicht komplett extrahieren. Die Windmühle verlangsamt den Luftstrom deutlich, sie muss aber der Luft etwas an kinetischer Energie belassen, sonst ist die abgebremste Luft im Weg. Fig.B.2 zeigt eine Skizze des tatsächlichen Luftstroms nach einer Windmühle. Der maximale Energie-Anteil, den eine Windmühle aus einem ankommenden Luftstrom extrahieren kann, wurde von dem deutschen Physiker Albert Betz 1919 berechnet. Wenn der abströmende Wind 1/3 der Geschwindigkeit des ankommenden Windes hat, dann ist die extrahierte Leistung 16/27 der Gesamtleistung. 16/27 sind 0,59. Lassen Sie uns für die Praxis annehmen, die Windmühlen seien 50% effizient. Tatsächlich werden Windmühlen für bestimmte Windgeschwindigkeiten konzipiert; liegt die tatsächliche Windgeschwindigkeit signifikant über der Idealgeschwindigkeit der Turbine, muss diese abgeschaltet werden.

Für eine Beispielrechnung nehmen wir einen Durchmesser von 25 m und eine Nabenhöhe von 32 m an, was in etwa den Dimensionen der einzeln stehenden Windanlage oberhalb der Stadt Wellington, Neuseeland, entspricht (siehe Fig.B.3). Die Leistung dieser einzelnen Windmühle ist



Fig.B.3: Die Brooklyn Windmühle bei Wellington, Neuseeland, mit Leuten zum Maßstabsvergleich. An einem windigen Tag erzeugte diese Windmühle 60 kW (1400 kWh/d). Foto von Philip Banks

Wirkungsgrad x Leistung pro Flächeneinheit x Fläche

$$= 50\% \times \frac{1}{2} \rho v^3 \times \frac{\pi}{4} d^2 \quad (\text{B.4})$$

$$= 50\% \times 140 \text{ W/m}^2 \times \frac{\pi}{4} (25 \text{ m})^2 \quad (\text{B.5})$$

$$= 34 \text{ kW.} \quad (\text{B.6})$$

Als ich die Windmühle an einem sehr windigen Tag besuchte, zeigte der Zähler des Generators eine tatsächliche Leistung von 60 kW.

Um abzuschätzen, wie viel Leistung wir aus dem Wind gewinnen können, müssen wir noch festlegen, wie groß unsere Windmühlen werden können und wie nahe wir sie zusammenpacken dürfen.

Wie dicht können Windmühlen gepackt werden? Zu nahe, und die im Wind stehenden werden für die dahinterliegenden einen Windschatten erzeugen. Experten sagen, dass Windmühlen nicht näher als 5mal ihr Durchmesser stehen dürfen, ohne dass signifikante Leistungseinbußen erfolgen. Bei diesem Abstand können Windmühlen pro Landfläche eine Leistung erzeugen von (vgl. Fig.B.4)

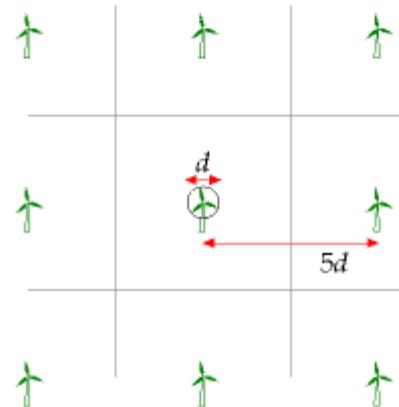


Fig.B.4: Windfarm-Layout

$$\frac{\text{Leistung pro Windmühle}}{\text{Fläche pro Windmühle}} = \frac{\frac{1}{2} \rho v^3 \frac{\pi}{8} d^2}{(5d)^2} \quad (\text{B.7})$$

$$= \frac{\pi}{200} \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (\text{B.8})$$

$$= 0,016 \times 140 \text{ W/m}^2 \quad (\text{B.9})$$

$$= 2,2 \text{ W/m}^2 \quad (\text{B.10})$$

Das ist eine Zahl, die man im Gedächtnis behalten sollte: Eine Windfarm bei 6 m/s Windgeschwindigkeit erzeugt 2 W pro m² Landfläche. Beachten Sie, dass dieser Wert nicht vom Durchmesser der Windräder abhängt. Die *d*'s kürzten sich heraus, da größere Windmühlen in größerem Abstand aufgestellt werden müssen. Größere Windmühlen sind eine gute Idee, wenn es darum geht, die höheren Windgeschwindigkeiten auszunutzen, die in größeren Höhen über Grund herrschen (je höher eine Windmühle, um so größere Windgeschwindigkeiten nutzt sie), oder aus ökonomischen Erwägungen. Diese beiden Argumente sind aber auch die einzigen, die für große Windmühlen sprechen.

Leistung pro Flächeneinheit	
Windfarm (Wind 6 m/s)	2W/m ²

Tabelle B.5: Fakten, die man behalten sollte: Windfarmen

Die Berechnungen hängen wesentlich von den angenommenen Windgeschwindigkeiten ab. Sind 6 m/s langfristig typische Geschwindigkeiten in windigen Gegenden Englands? Fig.4.1 und Fig.4.2 zeigen Windgeschwindigkeiten in Cambridge und Cairngorm. Fig.B.6 zeigt mittlere Winter- und Sommer-Windgeschwindigkeiten für acht weitere Orte in England. Ich fürchte, 6 m/s war zu hoch geschätzt für die typische Geschwindigkeit im größten Teil Englands! Ersetzen wir die 6 m/s durch die 4 m/s von

Bedford, müssen wir unsere Abschätzungen herunterskalieren, auf $(4/6)^3 \approx 0,3$ (denn die Leistung skaliert mit der Windgeschwindigkeit hoch 3).

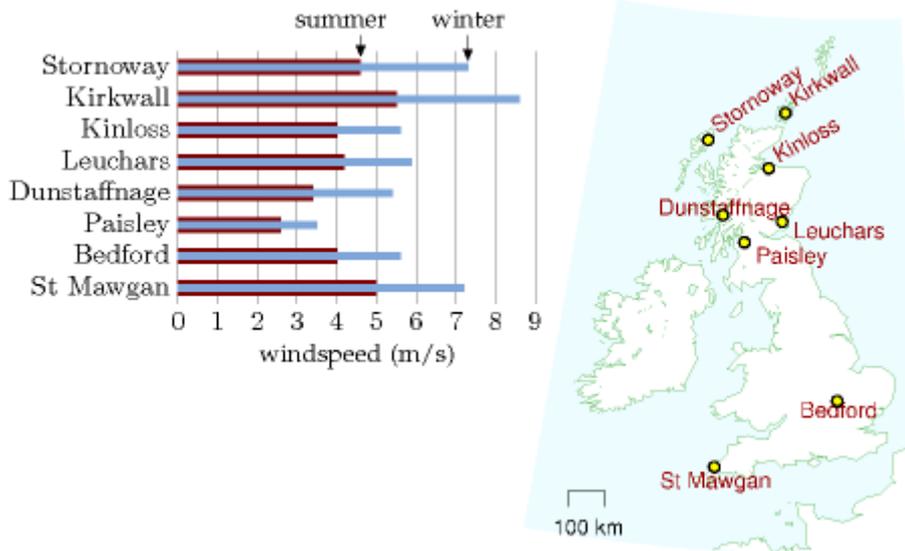


Fig.B.6: mittlere Sommer- (dunkelroter Balken) und Winter-Windgeschwindigkeiten (hellblauer Balken) an acht Stellen in England, gemessen in Standard-Wetterstationshöhe von 10m. Mittelwerte über 1971-2000.

Um andererseits die mittlere typische Leistung abzuschätzen, sollten wir nicht die mittlere Windgeschwindigkeit nehmen und sie in die dritte Potenz erheben, sondern das Mittel der mit 3 potenzierten Windgeschwindigkeit. Das Mittel der Potenzen ist größer als die entsprechende Potenz des Mittelwertes. Doch wenn wir so sehr ins Detail gehen wollen, wird es noch komplizierter, da reale Windturbinen nicht Leistung proportional zu v^3 erzeugen. Tatsächlich haben sie einen Geschwindigkeitsbereich, in dem sie die theoretisch mögliche Leistung liefern, bei höheren oder niedrigeren Geschwindigkeiten liefern reale Turbinen weniger als die theoretisch mögliche Leistung.

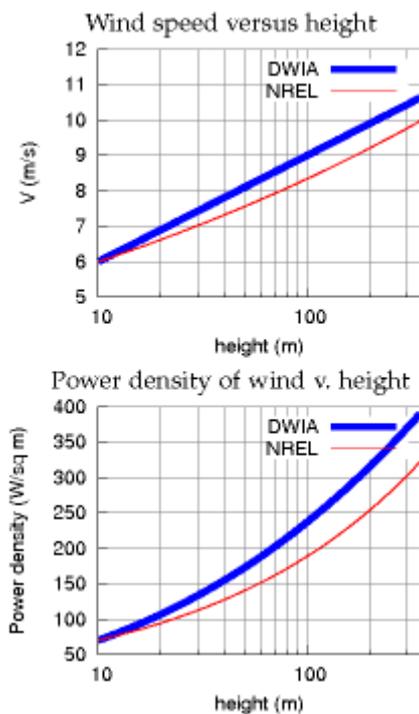


Fig.B.7: oben: Zwei Modelle für Windgeschwindigkeit und -leistung als Funktion der Höhe. DWIA=Danish Wind Industry Association; NREL=National Renewable Energy Laboratory. Für beide Modelle wurde die Geschwindigkeit bei 10 m mit 6 m/s angenommen. Für das dänische Windmodell wurde die Rauigkeitslänge auf 0,1 m gesetzt. Unten: Die Energiedichte (Leistung pro senkrechter Fläche) nach beiden Modellen.

Variation der Windgeschwindigkeit mit der Höhe

Höhere Windmühlen sehen höhere Windgeschwindigkeiten. Die Art, mit der die Windgeschwindigkeit als Funktion der Höhe zunimmt, ist kompliziert und hängt von der

Rauhigkeit des umgebenden Terrains und von der Tageszeit ab. Als Faustformel gilt: Verdopplung der Höhe vergrößert die Windgeschwindigkeit um 10% und damit die Leistung um 30%.

Einige Standardformeln für die Geschwindigkeit v als Funktion der Höhe z sind:

1. Nach der Windscherungs-Formel von NREL [ydt7uk] variiert die Geschwindigkeit mit einer Potenz der Höhe:

$$v(z) = v_{10} \left(\frac{z}{10 \text{ m}} \right)^\alpha,$$

wobei v_{10} die Geschwindigkeit bei 10 m Höhe ist und ein typischer Wert für den Exponenten α 0,143 oder $1/7$ ist. Das Ein-Siebtel-Gesetz ($v(z)$ proportional zu $z^{1/7}$) benutzt z.B. auch Elliott et al. (1991).

2. Die Windscherungs-Formel der Danish Wind Industry Association [yaoonz] ist

$$v(z) = v_{\text{ref}} \frac{\log(z/z_0)}{\log(z_{\text{ref}}/z_0)},$$

wobei z_0 ein Parameter namens Rauigkeitslänge und v_{ref} die Geschwindigkeit in einer Referenzhöhe z_{ref} wie etwa 10 m ist. Die Rauigkeitslänge für typische Landschaften (Ackerland mit einigen Häusern und Heckenbiotopen im Abstand einiger 500 m – „Rauigkeitsklasse 2“) ist $z_0 = 0,1$ m.

In der Praxis liefern die beiden Formeln numerisch gleiche Ergebnisse. Was jedoch nicht bedeutet, dass sie immer korrekt wären. Van den Berg (2004) vermutet, dass insbesondere nachts häufig andere Windprofile auftreten.

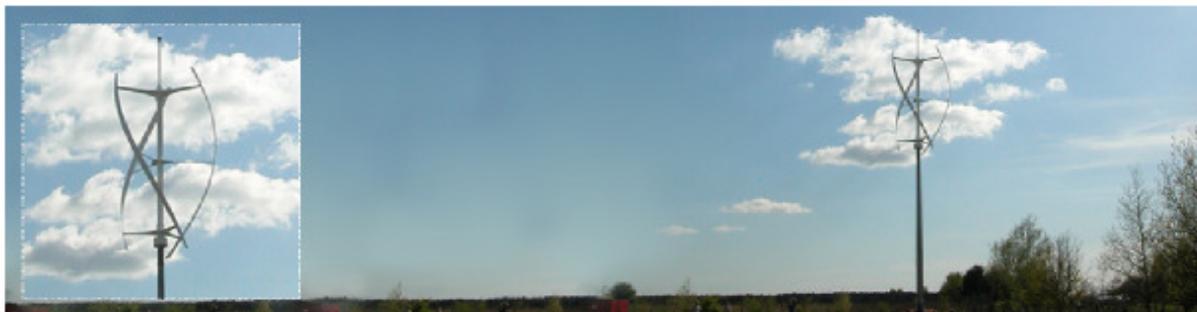


Fig.B.8: Das qr5 von quietrevolution.co.uk. Keine typische Windmühle.

Standardeigenschaften der Windmühlen

Die heute üblichen Windturbinen haben einen Rotordurchmesser von 54 Metern und eine Nabenhöhe von 80 Metern; so eine Maschine hat eine „Kapazität“ von 1 MW. Die „Kapazität“ oder „Spitzenleistung“ ist das Maximum an Leistung, das die Windmühle bei optimalen Verhältnissen generieren kann. Die Turbinen sind gewöhnlich dafür ausgelegt, bei Windgeschwindigkeiten von 3-5 m/s zu starten und bei Sturm über 25 m/s abzuschalten. Die tatsächlich gelieferte Leistung ist die „Kapazität“ multipliziert mit einem Faktor, der den Bruchteil der Zeit beschreibt, zu dem nahezu optimale Bedingungen herrschen. Dieser Faktor, oft „Load Faktor“ oder „Kapazitätsfaktor“ genannt, hängt vom Standort ab. Ein typischer Load-Faktor für einen guten Standort in England ist 30%. In Holland ist ein typischer Load-Faktor 22%, in Deutschland 19%.

Abschätzungen anderer Autoren zur Leistung von Windfarmen pro Flächeneinheit

In einer Regierungsstudie [www.world-nuclear.org/policy/DTI-PIU.pdf] werden englische on-shore Windressourcen mit höchstens 9 W/m^2 (Kapazität, nicht mittlere Leistung) abgeschätzt. Mit einem Kapazitätsfaktor von 33% wären das 3 W/m^2 mittlere Energieproduktion.

Das London Array ist eine off-shore Windfarm, die im äußeren Themsemündungsbereich geplant ist. Mit seiner Kapazität von 1 GW soll es die weltgrößte Windfarm werden. Sie wird aus 271 Turbinen in 245 km^2 [6o86ec] bestehen und eine mittlere Leistung von 3100 GWh pro Jahr (350 MW) erbringen. (Kosten £1.5 Mrd.) Das ist eine Leistungsdichte von $350 \text{ MW}/245 \text{ km}^2 = 1.4 \text{ W/m}^2$. Das ist weniger als bei anderen off-shore-Farmen, weil, wie ich vermute, dieser Standort einen großen Kanal (Knock Deep) enthält, der zu tief (etwa 20 m) für ökonomisch vertretbare Turbinengrundfeste ist.

I'm more worried about what these plans [for the proposed London Array wind farm] will do to this landscape and our way of life than I ever was about a Nazi invasion on the beach.

Bill Boggia of Graveney, where the undersea cables of the wind farm will come ashore.

Fragen

Was ist mit Mikro-Windrädern? Wenn man eine solche Miniturbine auf sein Dach setzt, wie viel Energie kann man daraus erwarten?

Bei einer angenommenen Windgeschwindigkeit von 6 m/s , die wie gesagt schon über der mittleren Windgeschwindigkeit Englands liegt, und einem angenommenen Durchmesser von 1 m wäre die zu erwartende Leistung bei 50 W . Das sind $1,3 \text{ kWh}$ pro Tag – nicht allzu viel. Und in realer Umgebung einer typischen englischen Stadtsiedlung liefert eine solche Turbine lediglich $0,2 \text{ kWh}$ pro Tag – siehe Seite 76.

Die vielleicht schlechtesten Windmühlen der Welt sind einige in Tsukuba City, Japan, die tatsächlich mehr Energie verbrauchen als sie liefern. Ihre Betreiber waren so verstört über die ständig stillstehenden Turbinen, dass sie Energie hineinsteckten, damit sie sich drehten und wenigstens den Anschein erweckten, als würden sie arbeiten! [6bkvbn]



Fig.B.9: Eine Ampair „600W“ Mikroturbine. Die mittlere Leistung, die von dieser Mikroturbine in Lemington Spa erzeugt wird, ist $0,037 \text{ kWh}$ pro Tag ($1,5 \text{ W}$).

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

282 Der maximale Energie-Anteil, den eine Windmühle aus einem ankommenden Luftstrom extrahieren kann 264 *The maximum fraction of the incoming energy that can be extracted by a disc-like windmill...* Eine sehr schöne Erklärung dazu findet sich auf der Website der Danish Wind Industry Association [yekdaa].

285 Die Turbinen sind gewöhnlich dafür ausgelegt, bei Windgeschwindigkeiten von 3-5 m/s zu starten 267 *Usually, wind turbines are designed to start running at wind speeds around 3 to 5 m/s.* [ymfbsn].

285 Ein typischer Load-Faktor für einen guten Standort in England ist 30% – *a typical load factor for a good site is 30%*. Im Jahr 2005 war der durchschnittliche Load-Faktor der größeren englischen Windfarmen 28% [ypvbvd]. Der Load-Faktor variierte im Jahresverlauf, mit einem Minimum von 17% im Juni und Juli. Der Load-Faktor der besten Standorte – Caithness, Orkney und die Shetland-Inseln – war 33%. Die Load-Faktoren der beiden in 2005 betriebenen off-shore-Windfarmen waren 36% für North Hoyle (vor Nord-Wales) und 29% für Scroby Sands (vor Great Yarmouth). Mittlere Load-Faktoren für folgende zehn Regionen waren (2006): Cornwall 25%; Mid-Wales 27%; Cambridgeshire und Norfolk 25%; Cumbria 25%; Durham 16%; Südschottland 28%; Orkney und Shetland-Inseln 35%; Nordost-Schottland 26%; Nordirland 31%; off-shore 29%. [wbd8o]

Nach Watson et al. (2002) wird eine mittlere jährliche Windgeschwindigkeit von 7,0 m/s als notwendig für einen ökonomischen Betrieb einer Windfarm angesehen. Etwa 33% Englands haben solche Windgeschwindigkeiten.



Fig.B.10: Eine Iskra 5 kW Turbine mit 5,5 m Durchmesser [www.iskrawind.com] bei der jährlichen Wartung. Diese Turbine steht in Hertfordshire (nicht einer der windigsten Orte in England) in 12 m Höhe und hat einen mittleren Leistungs-Output von 11 kWh pro Tag. Eine Windfarm mit Maschinen dieser Performance, je eine auf 30 m x 30 m, hätte eine Energiedichte pro Flächeneinheit von 0,5 W/m².

Anhang C: Flugzeuge II

What we need to do is to look at how you make air travel more energy efficient, how you develop the new fuels that will allow us to burn less energy and emit less.

Tony Blair

Hoping for the best is not a policy, it is a delusion.

Emily Armistead, Greenpeace

Wo liegen die fundamentalen Beschränkungen bei Flugreisen? Erfordern die physikalischen Gesetze des Fliegens unvermeidbare Mengen an Energie, pro Tonne, pro Flugkilometer? Was ist die maximale Distanz, die eine 300-Tonnen Boeing 747 fliegen kann? Was ist die einer 1 kg schweren Pfuhlschnepfe, oder einer 100 g schweren Küstenseeschwalbe?

Genau wie Kapitel 3, wo wir den Verbrauch von Autos abschätzten, durch Anhang A weitergeführt wurde, so soll dieses Kapitel die Gedanken aus Kapitel 5 weiterführen und erhellen, wohin die Energie beim Fliegen geht. Die einzigen physikalischen Formeln, die dazu erforderlich sind, sind die Newtonschen Gesetze der Bewegung, die ich an den jeweils erforderlichen Stellen erläutern werde.

Diese Berechnungen werden es uns erlauben, Fragen zu beantworten wie „würde der Flugverkehr viel weniger Treibstoff verbrauchen, wenn wir mit langsameren Propellermaschinen reisen würden?“ Es stehen uns eine Menge Gleichungen bevor: Ich hoffe, Sie genießen sie!

Wie man fliegt

Flugzeuge (und Vögel) bewegen sich durch die Luft, und erfahren dabei genau wie Autos oder Züge eine Luftwiderstandskraft; ein Großteil der benötigten Energie eines Flugzeugs wird verbraucht, indem das Flugzeug gegen diese Kraft vorwärts getrieben wird. Zusätzlich benötigen Flugzeuge im Gegensatz zu Autos oder Zügen Energie, *um oben zu bleiben*.

Flugzeuge bleiben oben, indem sie Luft nach unten drücken. Wenn ein Flugzeug Luft nach unten drückt, drückt diese Luft das Flugzeug nach oben (denn Newtons drittes Gesetz erfordert das). So lange dieser Druck nach oben, genannt Auftrieb, groß genug ist, das nach unten ziehende Gewicht des Flugzeugs aufzuheben, wird das Flugzeug einem Absturz entgehen können.

Wenn das Flugzeug Luft nach unten drückt, gibt es dieser Luft kinetische Energie. Die Erzeugung des Auftriebs erfordert also Energie. Die gesamte benötigte Leistung des Flugzeugs ist die Summe aus der zur Erzeugung des Auftriebs benötigten und der zur Überwindung des Luftwiderstands benötigten Leistung. (Die für den Auftrieb erforderliche



Fig.C.1: Vögel: zwei Küstenseeschwalben, eine Pfuhlschnepfe, eine Boeing 747.

Leistung wird übrigens auch „induzierter Luftwiderstand“ genannt. Aber ich nenne sie hier Auftriebsleistung $P_{\text{lif.}}$)

Die zwei Gleichungen, die wir benötigen, um die Theorie des Fliegens auszuarbeiten, sind das zweite Newtonsche Gesetz:

$$\text{Kraft} = \text{Rate der Impulsänderung} \quad (\text{C.1})$$

und das oben schon erwähnte dritte Newtonsche Gesetz

$$\text{Kraft von A auf B} = - \text{Kraft von B auf A} . \quad (\text{C.2})$$

Wenn Sie keine Gleichungen mögen, kann ich Ihnen jetzt die Pointe verraten: Wir werden herausfinden, dass die für den Auftrieb erforderliche Leistung *gleich* der zur Überwindung des Luftwiderstandes erforderlichen Leistung ist. Die Erfordernis des „oben Bleibens“ *verdoppelt* also die erforderliche Leistung.

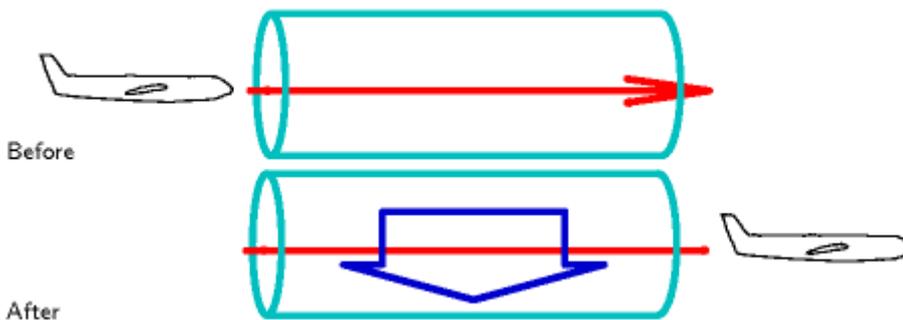


Fig.C.2: Ein Flugzeug durchfliegt eine Röhre von Luft. Sobald das Flugzeug durchgeflogen ist, wurde die Luft nach unten gedrückt. Die Kraft, die das Flugzeug auf die Luft ausübte und die sie nach unten beschleunigte ist gleich groß und entgegengesetzt zu der aufwärtsgerichteten Kraft, die die Luft auf das Flugzeug ausübte.

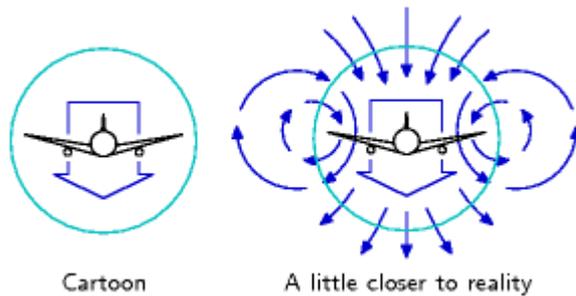


Fig.C.3: Unser Modell nimmt an, dass das Flugzeug eine Wurst von Luft in seinem Kielwasser zurücklässt, die sich nach unten bewegt. Ein realistisches Bild beinhaltet einen komplexeren verwirbelten Fluss. Die realen Verhältnisse sind in Fig.C.4 zu sehen.

Lassen Sie uns ein Modell erstellen für den Auftrieb eines Flugzeugs bei der Geschwindigkeit v . In einer Zeit t fliegt das Flugzeug die Strecke vt weiter und lässt hinter sich eine Wurst nach unten strömender Luft (Fig.C.2). Wir nennen die Querschnittsfläche dieser Wurst A_s . Der Durchmesser der Wurst ist etwa gleich der Flügelspannweite des Flugzeugs. (Innerhalb dieser Wurst ist eine kleinere Wurst wirbelnder Luft mit einer Querschnittsfläche vergleichbar mit der Aufstandsfläche der Flugzeugrumpfes.) Tatsächlich sind die Details der Luftwirbel viel interessanter als das Würste-Bild: Jede Flügelspitze hinterlässt einen Wirbel, in dem die Luft innerhalb der Flügelspitze schnell abwärts strömt, und die Luft jenseits (außerhalb) der Flügelspitze aufwärts (Fig.C.3 und C.4). Diese aufwärts strömende Luft wird von Vögeln genutzt, wenn sie in Formation fliegen: Genau hinter den Flügelspitzen des Vogels ist ein netter kleiner Aufwind. Wie auch immer, zurück zu unseren Würsten.



Fig.C.4: Luftstrom hinter einem Flugzeug. Foto vom NASA Forschungszentrum Langley.

Die Masse der Wurst ist

$$m_{\text{wurst}} = \text{Dichte} \times \text{Volumen} = \rho \, v t \, A_s. \quad (\text{C.3})$$

Sagen wir, die gesamte Wurst bewegt sich nach unten mit der Geschwindigkeit u und bestimmen nun, wie groß u sein muss, damit das Flugzeug eine Kraft erfährt, die gleich seinem Gewicht mg ist. Der Abwärtsimpuls der Wurst, der in der Zeit t erzeugt wird, ist

$$\text{Masse} \times \text{Geschwindigkeit} = m_{\text{wurst}} \, u = \rho \, v t \, A_s \, u. \quad (\text{C.4})$$

Und nach Newtons Gesetz muss dieser Impuls gleich dem Impuls sein, den die auf das Flugzeug wirkende Gewichtskraft in der Zeit t erzeugt, nämlich

$$mgt. \quad (\text{C.5})$$

Umstellen dieser Gleichung liefert

$$\rho \, v t \, A_s \, u = mgt, \quad (\text{C.6})$$

was wir nach der gesuchten Abwärtsgeschwindigkeit der Wurst auflösen können:

$$u = \frac{mg}{\rho v A_s}.$$

Interessant! Die Geschwindigkeit der Wurst ist umgekehrt proportional zur Geschwindigkeit v des Flugzeugs. Ein langsam fliegendes Flugzeug muss die Luft kräftiger nach unten drücken als ein schnelles, weil es weniger Luft pro Zeiteinheit trifft. Das ist auch der Grund, warum landende Flugzeuge, die langsam fliegen, ihre Landeklappen ausfahren: Sie erzeugen so einen größeren und steileren Flügel, der die Luft stärker nach unten drückt.

Was sind nun die Energiekosten für dieses Nach-unten-Drücken der Wurst mit der erforderlichen Geschwindigkeit u ? Die erforderliche Leistung ist

$$P_{\text{lift}} = \frac{\text{kinetische Energie der Wurst}}{\text{Zeit}} \quad (\text{C.7})$$

$$= \frac{1}{t} \frac{1}{2} m_{\text{wurst}} u^2 \quad (\text{C.8})$$

$$= \frac{1}{2t} \rho v t A_s \left(\frac{mg}{\rho v A_s} \right)^2 \quad (\text{C.9})$$

$$= \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v A_s}. \quad (\text{C.10})$$

Die gesamte Leistung, die das Flugzeug zum Fliegen benötigt, ist die Summe der Luftwiderstands- und der Auftriebsleistung:

$$P_{\text{ges}} = P_{\text{Luftwiders}} + P_{\text{lift}} \quad (\text{C.11})$$

$$= \frac{1}{2} c_w \rho A_F v^3 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v A_s}, \quad (\text{C.12})$$

wobei A_F die Aufstandsfläche des Flugzeugs ist und c_w sein Luftwiderstandsbeiwert (wie in Anhang A). Die Treibstoff-Effizienz des Flugzeugs, ausgedrückt in Energie pro Strecke, wäre dann

$$\left. \frac{\text{Energie}}{\text{Strecke}} \right|_{\text{ideal}} = \frac{P_{\text{ges}}}{v} = \frac{1}{2} c_w \rho A_F v^2 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_s}, \quad (\text{C.13})$$

wenn das Flugzeug die Leistung aus seinem Treibstoff mit 100% Effizienz in Luftwiderstands- und Auftriebsleistung umwandelt. (Tatsächlich ist ein anderer Name für „Energie pro zurückgelegter Strecke“ gerade „Kraft“ und wir können auch die beiden Terme oben als Luftreibungskraft $\frac{1}{2}c_W\rho A_F v^2$ und Auftriebskraft $\frac{1}{2}\frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_S}$ identifizieren. Die Summe dieser Kräfte, der „Schub“, beschreibt genau, wie viel die Triebwerke drücken müssen.)

Reale Flugzeugtriebwerke haben eine Effizienz von etwa $\varepsilon = 1/3$, also ist die tatsächliche benötigte Energie eines Flugzeugs bei Geschwindigkeit v

$$\frac{\text{Energie}}{\text{Strecke}} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{1}{2} c_W \rho A_F v^2 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_S} \right) . \quad (\text{C.14})$$

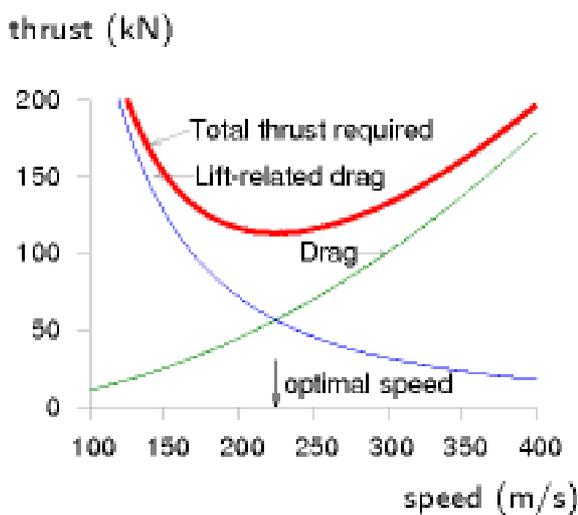


Fig.C.5: Die erforderliche Kraft, um ein Flugzeug in Bewegung zu halten, als Funktion der Geschwindigkeit v , ist die Summe der gewöhnlichen Luftwiderstandskraft $\frac{1}{2}c_W\rho A_F v^2$ - die mit höherer Geschwindigkeit ansteigt - und der Auftriebskraft (auch induzierter Luftwiderstand genannt) $\frac{1}{2}\frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_S}$ - die mit höherer Geschwindigkeit abfällt. Es gibt eine ideale Geschwindigkeit v_{opt} , bei der die Kraft minimal wird. Da Kraft eine Energie pro Weg ist, minimiert man zusammen mit der Kraft auch den Treibstoff pro Weg. Um die Treibstoffeffizienz zu optimieren, fliege bei v_{opt} . Die Grafik zeigt die Modellrechnung des erforderlichen Schubs, in kN, für eine Boeing 747, Masse 319 t, Spannweite 64,4 m, $c_W = 0,03$, Aufstandsfläche 180 m², bei Luftdichte 0,41 kg/m³ (entspricht 10 km Höhe), als Funktion der Geschwindigkeit v in m/s. Unser Modell liefert eine optimale Geschwindigkeit bei $v_{opt}=220$ m/s. Für ein Modell, das auf Würsten basiert, eine gute Übereinstimmung mit der Realität!

Dieser Ausdruck für Energie-pro-Strecke ist relativ kompliziert, er vereinfacht sich aber erheblich, wenn wir annehmen, dass ein Flugzeug so *konstruiert* ist, dass es bei seiner üblichen Reisegeschwindigkeit den Energieverbrauch-pro-Strecke *minimiert*. Die Energie-pro-Strecke hat als Funktion von v ein Optimum, wie man in Fig.C.5 sieht. Die Summe der beiden Größen $\frac{1}{2}c_W\rho A_F v^2$ und $\frac{1}{2}\frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_S}$ ist am kleinsten, wenn beide Größen gleich sind. Das ist ein erfreuliches Phänomen sowohl in der Physik als auch im Maschinenbau: Zwei Größen, die offensichtlich nicht gleich sein *müssen*, *sind* aber tatsächlich gleich groß, oder zumindest vergleichbar innerhalb eines Faktors 2. Dieses Gleichheitsprinzip sagt uns, dass die optimale Geschwindigkeit eines Flugzeugs die Gleichung

$$c_W \rho A_F v^2 = \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_S} \quad (\text{C.15})$$

erfüllt, d.h.

$$\rho v_{opt}^2 = \frac{mg}{\sqrt{c_W A_F A_S}} . \quad (\text{C.16})$$

Dies definiert die optimale Geschwindigkeit, wenn unser Modell des Fliegens zutreffend ist; das Modell versagt, wenn die Triebwerks-Effizienz ε signifikant von der Geschwindigkeit abhängt oder wenn die Fluggeschwindigkeit die Schallgeschwindigkeit

(330 m/s) übersteigt, weil man darüber ein anderes Modell für Luftwiderstand und Auftrieb benötigt.

Lassen Sie uns das Modell überprüfen, indem wir seine Vorhersagen für die optimale Fluggeschwindigkeit einer 747 und eines Albatros auswerten. Wir müssen dabei aufpassen, dass wir die korrekte Luftdichte verwenden: Wenn wir die optimale Fluggeschwindigkeit für eine 747 in 30.000 Fuß Höhe ermitteln wollen, müssen wir berücksichtigen, dass die Luftdichte mit zunehmender Höhe z sinkt wie $\exp(-mgz/kT)$, wobei m die Masse der Stickstoff- oder Sauerstoffmoleküle ist und kT die thermische Energie (Boltzmannkonstante mal absolute Temperatur). Die Dichte ist in dieser Höhe etwa dreimal geringer.

Die vorhergesagten optimalen Geschwindigkeiten (Tabelle C.6) sind genauer als wir erwarten durften! Die optimale Geschwindigkeit der 747 berechnet sich zu 220 m/s (800 km/h) und für den Albatros 14 m/s (50 km/h) – beides sehr nah an den wahren Reisegeschwindigkeiten der beiden Vögel (895 km/h bzw. 50-80 km/h).

Vogel		747	Albatros
Designer		Boeing	natürliche Auslese
Masse (voll beladen)	m	363 000 kg	8 kg
Flügelspannweite	w	64,4m	3,3m
Aufstandsfläche*	A_p	180m ²	0,09m ²
Dichte	ρ	0,4 kg/m ³	1,2 kg/m ³
Luftwiderstand	c_w	0,03	0,1
Geschwindigkeit	v_{opt}	220m/s = 540mph	14m/s = 32mph

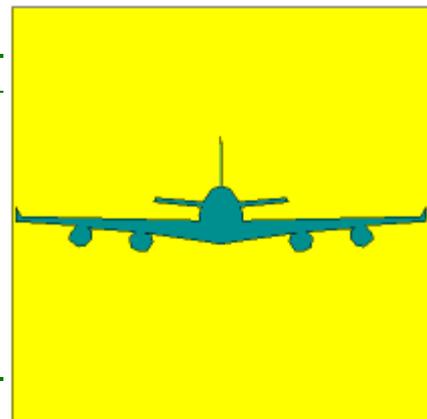


Tabelle C.6: Abschätzung der optimalen Fluggeschwindigkeit für einen Jumbojet und einen Albatros.

* Die Aufstandsfläche der 747 errechnet sich aus der Kabinenbreite (6,1m) mal geschätzte Rumpfhöhe (10m) mal zwei für Flügel, Turbinen und Leitwerk; Aufstandsfläche des Albatros geschätzt auf 1 square-foot nach einem Foto.

Fig.C.7: Vorderansicht einer Boeing 747, zur Abschätzung der Aufstandsfläche A_F des Flugzeugs. Das gelbe Quadrat hat die Fläche A_S (Flügelspannweite zum Quadrat).

Betrachten wir noch weitere Vorhersagen unseres Modells. Wir können vergleichen, ob die Kraft aus Gl. (C.13) vergleichbar mit dem bekannten Schub-Kennzahlen der 747 sind. Erinnern wir uns, dass unter optimalen Bedingungen die beiden Kräfte gleich sind, also müssen wir nur eine davon berechnen und verdoppeln:

$$\text{Kraft} = \frac{\text{Energie}}{\text{Strecke}} \Big|_{\text{ideal}} = \frac{1}{2} c_w \rho A_F v^2 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_S} \quad (\text{C.17})$$

$$= c_w \rho A_F v_{opt}^2 \quad (\text{C.18})$$

$$= c_w \rho A_F \frac{mg}{\rho (c_w A_F A_S)^{1/2}} \quad (\text{C.19})$$

$$= \left(\frac{c_w A_F}{A_S} \right)^{1/2} mg . \quad (\text{C.20})$$

Wir wollen den Füllfaktor f_A definieren als das Flächenverhältnis:

$$f_A = \frac{A_F}{A_S} . \quad (\text{C.21})$$

(Denken Sie sich dabei f_A als den Teil der Fläche des Quadrats aus Fig.C.7, der durch das Flugzeug bedeckt ist.) Dann ist

$$\text{Kraft} = (c_w f_A)^{1/2} (mg). \quad (\text{C.22})$$

Interessant! Unabhängig von der Dichte des durchflogenen Fluidums ist der erforderliche Schub (für ein Flugzeug bei seiner optimalen Geschwindigkeit) nur eine dimensionslose Konstante $(c_w f_A)^{1/2}$ mal dem Gewicht des Flugzeugs.

Diese Konstante, ein Maß für das Luftwiderstands-zu-Auftriebs-Verhältnis des Flugzeugs, ist übrigens das Inverse der beim Flugzeugbau wichtigen sogenannten Gleitzahl (die dem Auftriebs-zu-Luftwiderstands-Verhältnis entspricht und in der englischsprachigen Literatur auch als „lift-to-drag-ratio“ oder kurz „L/D“, „aerodynamic efficiency“ oder „finesse“ benannt ist; einige typische Werte sind in Tabelle C.8 aufgeführt).

Airbus A320	17
Boeing 767-200	19
Boeing 747-100	18
Seeschwalbe	12
Albatros	20

Tabelle C.8: Gleitzahlen



Fig.C.9: Cessna 310N: 60 kWh pro 100 p-km. Eine Cessna 310 Turbo befördert 6 Passagiere (inkl. Pilot) mit einer Geschwindigkeit von 370 km/h. Foto von Adrian Pingstone.

Nehmen wir die Zahlen des Jumbos $c_w \approx 0,03$ und $f_A \approx 0,04$, berechnen wir den erforderlichen Schub zu

$$(c_w f_A)^{1/2} mg = 0,036 mg = 130 \text{ kN}. \quad (\text{C.23})$$

Wie passt dies zu den Spezifikationen der 747? Tatsächlich hat jedes der vier Triebwerke einen Schub von 250 kN, doch dieser maximale Schub wird nur während des Starts genutzt. Während des Flugs ist der Schub viel geringer: bei einer 747 liegt er bei 200 kN, etwa 50% über unserer Modellrechnung. Das Modell weicht ein bisschen ab, weil unsere Annahme für die inverse Gleitzahl etwas zu niedrig lag.

Diesen Schub kann man direkt verwenden, um die Transport-Effizienz eines Flugzeugs zu bestimmen. Hierbei kann man zwei Arten von Effizienz unterscheiden: Die Energiekosten, um Gewicht zu transportieren, gemessen in kWh pro t-km, und die Energiekosten der Personenbeförderung, gemessen in kWh pro 100 p-km.

Effizienz im Hinblick auf Gewicht

Schub ist eine Kraft, und Kraft ist Energie pro Streckeneinheit. Die gesamte benötigte Energie pro Streckeneinheit ist um den Faktor $1/\varepsilon$ größer, wobei ε der Wirkungsgrad der Maschine ist, den wir wieder mit $1/3$ annehmen.

Das sind die gesamten Transportkosten⁴⁰, definiert als die Energie pro Gewichtseinheit (des gesamten Flugzeugs) pro Streckeneinheit:

⁴⁰ Hier wie im folgenden sind mit „Kosten“ stets die Energiekosten gemeint.

$$\text{Transportkosten} = \frac{1 \text{ Kraft}}{\varepsilon \text{ Masse}} \quad (\text{C.24})$$

$$= \frac{1 (c_W f_A)^{1/2} m g}{\varepsilon m} \quad (\text{C.25})$$

$$= \frac{(c_W f_A)^{1/2}}{\varepsilon} g . \quad (\text{C.26})$$

Die Transportkosten sind also nur eine dimensionslose Größe (abhängig von der Form des Flugzeugs und dem Wirkungsgrad seines Antriebs) multipliziert mit der Erdbeschleunigung g . Diese Formel für die Gesamt-Transportkosten gilt für alle Flugzeuge und hängt nur von drei einfachen Eigenschaften des Flugzeugs ab: Seinem c_W -Wert, seiner Form und seinem Antriebs-Wirkungsgrad. Es hängt nicht von der Größe des Flugzeugs ab, auch nicht von seinem Gewicht und auch nicht von der Dichte der Luft. Setzen wir $\varepsilon = 1/3$ ein und nehmen eine Gleitzahl von 20 an, liefert unser Modell für jedes beliebige Flugzeug Transportkosten von

0,15 g

oder (zur Umrechnung vgl. Anhang I)

0,4 kWh/t-km .



Fig.C.10: „Legen Sie Ihre Sicherheits-Manschettknöpfe an!“ Ein Bombardier Learjet 60XR befördert 8 Passagiere mit 780 km/h bei Transportkosten von 150 kWh pro 100 p-km. Foto von Adrian Pingstone.



Fig.C.11: Boeing 737-700: 30 kWh pro 100 p-km. Foto © Tom Collins

Kann man Flugzeuge verbessern?

Wenn der Wirkungsgrad des Triebwerks durch technischen Fortschritt nur begrenzt verbessert werden kann und die Form des Flugzeugs schon weitgehend perfekt ist, dann gibt es wenig, was man an dieser dimensionslosen Größe noch machen könnte. Die Transport-Effizienz ist nahe an ihrem physikalischen Limit. Die Aerodynamik-Spezialisten sagen, dass man durch die sog. Blended Wing Body (BWB) Form ein wenig gewinnen könnte und dass der Luftwiderstand reduziert werden könnte durch Einsatz der sog. LFC-Technik (laminar flow control), bei der etwa Luft durch kleine Öffnungen in der Flügelfläche gesaugt wird und so die Entstehung der Turbulenzen hinter den Flügeln unterdrückt wird (Braslow, 1999). Aufrüsten bestehender Flugzeuge mit LFC würde deren c_W -Wert um etwa 15% verbessern, für den Übergang zu BWB-Formen ist eine c_W -Wert-Verbesserung von 18% vorhergesagt (Green, 2006). Und Gleichung (C.26) sagt, dass die Transportkosten proportional zur Wurzel aus dem c_W -Wert sind, so dass die genannten Verbesserungen um 15% bzw. 18% eine Kostenreduktion von 7,5% bzw. 9% bewirken.

Die gesamten Transportkosten sind die Energiekosten pro bewegttem Gewicht, *einschließlich des Flugzeuggewichts*. Um die Energiekosten zur Frachtbeförderung pro Gewichtseinheit Fracht zu bestimmen, müssen wir durch den Bruchteil dividieren, den die

Fracht am Gesamtgewicht ausmacht. Ein voll beladenes Frachtflugzeug vom Typ Boeing 747 besteht zu etwa 1/3 Fracht, also sind seine Transportkosten

$$0,45 \text{ g ,}$$

oder etwa 1,2 kWh/t-km. Das ist etwas höher als die eines Lastwagens, der bei 1 kWh/t-km liegt.

Transport-Effizienz im Hinblick auf Passagiere

In gleicher Weise können wir nun die Effizienz einer 747 beim Passagiertransport bestimmen:

Transport-Effizienz (pkm pro Liter Treibstoff)

$$= \text{Anzahl Passagiere} \times \frac{\text{Energie pro Liter}}{\text{Schub}} \quad (\text{C.27})$$

$$= \text{Anzahl Passagiere} \times \frac{\varepsilon \times \text{Energie pro Liter}}{\text{Schub}} \quad (\text{C.28})$$

$$= 400 \times \frac{1}{3} \frac{38 \text{ MJ/l}}{200.000 \text{ N}} \quad (\text{C.29})$$

$$= 25 \text{ p - km pro Liter} \quad (\text{C.30})$$

Das ist etwas effizienter als ein Auto mit einem Insassen (12 km/l). Mit dem Flugzeug zu reisen ist also energiesparender als Autofahren, so lange im Auto nur ein oder zwei Leute sitzen; und Autofahren ist energiesparender als Fliegen, wenn drei oder mehr Personen im Auto sind.

Kernpunkte

Wir haben nun schon eine Menge Fragen gelöst. Lassen Sie mich die Kernideen rekapitulieren. Die Hälfte der Arbeit beim Fliegen braucht das oben Bleiben, die andere das in Bewegung Bleiben. Die Treibstoff-Effizienz bei der optimalen Geschwindigkeit, ausgedrückt in Energie-pro-Reisestrecke, fanden wir in der Kraft (C.22), die einfach proportional zum Gewicht des Flugzeugs war; die Proportionalitätskonstante war die inverse Gleitzahl, die durch die Form des Flugzeugs bestimmt ist. Im Gegensatz zu Autos, wo geringere Tempolimits deren Energieverbrauch pro Strecke senken können, gibt es bei Flugzeugen keinen Grund, die Geschwindigkeit zu beschränken. Flugzeuge haben in der Luft ihre optimalen Geschwindigkeiten, jedes Flugzeug seine, abhängig vom Gewicht und sie fliegen bereits bei diesen optimalen Geschwindigkeiten. Würde man Flugzeuge anweisen, langsamer zu fliegen, würde das ihren Verbrauch erhöhen. Der einzige Weg, Flugzeuge noch treibstoffsparender zu machen, ist sie auf dem Boden zu lassen. Flugzeuge sind fantastisch optimiert, und es besteht keine Aussicht auf signifikante Verbesserungen ihrer Effizienz. (Siehe Seite 40 und 149 zur weiteren Diskussion der Aussage, dass neue Superjumbos „weitaus effizienter“ sind als alte, und Seite 39 zur Aussage, dass Turboprop-Maschinen „weitaus effizienter“ als Jets wären.)

Reichweite

Eine weitere Modellvorhersage, die wir treffen können, ist die Reichweite eines Fliegers oder Vogels – was ist die weiteste Entfernung, die er ohne Nachtanken zurücklegen kann? Man könnte annehmen, dass größere Flugzeuge größere Reichweiten haben, doch die Vorhersage unseres Modells ist überraschend einfach. Die Reichweite eines Flugzeugs, die Strecke, die es ohne Auftanken zurücklegen kann, ist proportional zu

seiner Geschwindigkeit und der Gesamtenergie des Treibstoffs, und umgekehrt zur Rate des Verbrauchs:

$$\text{Reichweite} = v_{opt} \frac{\text{Energie}}{\text{Leistung}} = \frac{\text{Energie} \times \varepsilon}{\text{Kraft}}. \quad (\text{C.31})$$

Nun ist die gesamte Energie gerade der Brennwert C des Treibstoffs (in Joule pro kg) mal seiner Masse; und die Masse des Treibstoffs ist ein bestimmter Bruchteil f_{Tr} der Gesamtmasse des Flugzeugs. Also gilt

$$\text{Reichweite} = \frac{\text{Energie} \times \varepsilon}{\text{Kraft}} = \frac{Cm\varepsilon f_{Tr}}{(c_w f_A)^{1/2} (m g)} = \frac{\varepsilon f_{Tr}}{(c_w f_A)^{1/2}} \frac{C}{g}. \quad (\text{C.32})$$

Eine einfachere Vorhersage kann man sich kaum vorstellen: Die Reichweite eines Vogels oder Flugzeugs ist das Produkt aus einem dimensionslosen Faktor $\left(\frac{\varepsilon f_{Tr}}{(c_w f_A)^{1/2}}\right)$, der die Motoreffizienz, den Luftwiderstand und die Vogelgeometrie berücksichtigt, und einer fundamentalen Länge

$$\frac{C}{g},$$

die eine Eigenschaft des Treibstoffs und der Erdanziehung ist, und sonst nichts. Keine Größe des Vogels, keine Masse des Vogels, keine Länge, keine Breite des Vogels; keine Abhängigkeit von der Luftdichte.

Was ist nun diese magische Länge? Es ist dieselbe Länge, egal ob Gänsefett oder Kerosin der Treibstoff ist: Beides ist im Grunde Kohlenwasserstoff $(\text{CH}_2)_n$. Kerosin hat einen Brennwert von $C = 40$ MJ pro kg. Die damit assoziierte Länge ist dann

$$d_{Tr} = \frac{C}{g} = 4000 \text{ km}. \quad (\text{C.33})$$

Die Reichweite des Vogels ist die intrinsische Reichweite des Treibstoffs, 4000 km, mal einem Faktor $\left(\frac{\varepsilon f_{Tr}}{(c_w f_A)^{1/2}}\right)$. Hat unser Vogel einen Motorwirkungsgrad $\varepsilon = 1/3$ und eine inverse Gleitzahl von $(c_w f_A)^{1/2} \approx 1/20$ und ist knapp die Hälfte des Vogels Treibstoff (eine voll beladene 747 ist etwa zu 46% Treibstoff), so finden wir für alle Vögel und Flugzeuge, egal welcher Größe, dieselbe Reichweite: etwa dreimal die intrinsische Reichweite des Treibstoffs – grob 13.000 km.

Die Modellaussagen sind wieder nahe an der Realität: Der Langstreckenrekord einer 747 (aufgestellt am 23.-24. März 1989) liegt bei 16.560 km.

Und die Behauptung, dass die Reichweite unabhängig von der Größe des Vogels ist, wird unterstützt durch die Beobachtung, dass Vögel jeder Größe, von Riesengraugänsen bis zur kleinen Küstenseeschwalbe, interkontinentale Wanderbewegungen machen. Der

Man kann sich d_{Tr} vorstellen als die Strecke, die sich ein Treibstoff selbst schleudern kann, wenn er plötzlich seine gesamte chemische Energie in kinetische Energie umwandelt und sich auf eine parabolische Flugbahn ohne Luftwiderstand begibt. (Um genau zu sein: Die Strecke, die er auf der idealen Parabel erzielen kann, ist zweimal C/g .) Diese Strecke ist zugleich auch die vertikale Höhe, in die sich der Treibstoff katapultieren kann, wenn es keinen Luftwiderstand gibt. Eine andere amüsante Tatsache ist, dass der Brennwert C eines Treibstoffs, den ich in J pro kg angegeben habe, auch eine Geschwindigkeit zum Quadrat ist (so wie das Energie-zu-Masse-Verhältnis in Einsteins Gleichung $E=mc^2$ eine Geschwindigkeit zum Quadrat ist, nämlich c^2). 40×10^6 J pro kg sind $(6000 \text{ m/s})^2$. Man kann sich Fett also auch vorstellen als „Fett ist 6000 Meter pro Sekunde“. Wenn man also Gewicht durch Jogging verlieren will, wären 6.000 m/s (etwa 21.000 km/h) die anstrengswerte Geschwindigkeit, bei der man alles Fett in einer Runde verliert.

längste beobachtete Non-Stop-Flug eines Vogels lag bei 11.000 km, geflogen von einer Pfuhlschnepfe.

Wie weit kam Steve Fossett in seinem speziell konstruierten Scaled Composites Model 311 Virgin Atlantic GlobalFlyer? 41.467 km. [33ptcg] Ein ungewöhnliches Flugzeug: 83% seines Startgewichts waren Treibstoff; beim Fliegen nutzte er geschickt den Jet-Stream aus, um die Reichweite zu verlängern. Das äußerst zerbrechliche Flugzeug hatte einige Probleme während des Flugs.

Ein weiterer interessanter Punkt, den unser Modell zu Tage brachte: Fragen wir nach der optimalen Luftdichte, in der man fliegen sollte, finden wir, dass der erforderliche Schub (C.20) bei der optimalen Geschwindigkeit unabhängig von der Dichte ist. Das Flugzeug aus unserem Modell wäre also in jeder Flughöhe gleich glücklich, es gibt keine optimale Luftdichte, das Flugzeug könnte dieselbe Strecke pro Liter Treibstoff in jeder Dichte leisten. Aber die optimale Geschwindigkeit hängt von der Dichte ab ($v^2 \sim 1 / \rho$, Gleichung (C.16)). Wenn alles andere gleich behalten wird, hätte unser Flugzeug die kürzeste Flugzeit, wenn es in der dünnst-möglichen Luftschicht fliegen würde. Nun sind die Wirkungsgrade realer Treibwerke nicht ganz unabhängig von Geschwindigkeit und Luftdichte. Wenn ein Flugzeug leichter wird, weil es nach und nach Treibstoff verbrennt, geht nach unserem Modell die optimale Geschwindigkeit ($v^2 \sim mg / (\rho(c_w A_F A_S)^{1/2})$) zurück. Ein Flugzeug, das in Luft konstanter Dichte fliegt, sollte also etwas langsamer werden, wenn es leichter wird. Doch ein Flugzeug kann auch bei konstanter Geschwindigkeit im Geschwindigkeitsoptimum bleiben, wenn es an Höhe gewinnt und so die Luftdichte abnimmt. Achten Sie bei Ihrer nächsten Flugreise darauf, ob der Pilot die Flughöhe während des Fluges erhöht, von sagen wir 31.000 Fuß bis 39.000 Fuß gegen Ende der Reise.

Welchen Wirkungsgrad hätte ein Wasserstoff-Flugzeug?

Wir haben bereits gesehen, dass die Effizienz des Fliegens, als Energie pro t-km, nur eine dimensionslose Konstante mal g ist. Die Art des Treibstoffs zu wechseln ändert an diesem Argument nichts. Wasserstoff-betriebene Flugzeuge sind interessant, wenn wir hoffen, damit klimaschädliche Emissionen zu reduzieren. Sie könnten auch höhere Reichweiten erzielen. Erwarten Sie aber nicht, dass sie deutlich energie-effizienter wären.

Verbesserungsmöglichkeiten bei der Flugzeug-Effizienz

Formationsflug im Stil der Gänse könnte etwa 10% mehr Treibstoff-Effizienz bringen (weil die Gleitzahl der Formation höher ist als die eines einzelnen Flugzeugs), doch basiert dieser Trick natürlich wesentlich darauf, dass die Gänse alle zur selben Zeit an denselben Ort wandern wollen.

Optimierung der Zwischenstopp-Längen: Langstreckenflugzeuge (konzipiert für Strecken über ca. 15.000 km) sind nicht ganz so treibstoff-effizient wie Kurzstreckenflieger, weil sie mehr Treibstoff mitnehmen müssen und damit weniger Platz für Ladung und Passagiere haben. Es wäre effizienter, kleinere Teilstrecken in Kurzstreckenflugzeugen zurückzulegen. Das Optimum liegt bei Teilstrecken von etwa 5000 km Länge, also sollten typische Langstreckenflüge zwei Zwischenstopps zum Auftanken haben (Green, 2006). Zwischenstopps könnten Langstreckenflüge etwa 15% effizienter machen, doch würden sie natürlich auch zusätzliche Energiekosten verursachen.

Öko-Flugzeuge

Gelegentlich hört man von Leuten, die ökologisch verträgliche Flugzeuge bauen. Weiter oben in diesem Kapitel machten wir jedoch die Feststellung, dass die Transportkosten jedes Flugzeugs in der Gegend von

0,4 kWh/t-km

liegen. Nach unserem Modell sind die einzigen Möglichkeiten, diesen Wert zu verbessern, eine Reduktion des Luftwiderstandes (vielleicht durch einen neu erfundenen Staubsauger-im-Flügel-Trick) oder eine Veränderung der Flugzeuggeometrie (hin zum Gleiter, mit extrem weiten Flügeln im Vergleich zum Rumpf, oder vielleicht auch als „Nurflügler“ ganz ohne Rumpf).

Blicken wir auf die jüngste Pressemeldung zu ökofreundlichen Flugzeugen und prüfen, ob eines dieser neuen die 0,4 kWh/t-km Marke knacken kann. Braucht ein Flugzeug deutlich weniger als 0,4 kWh/t-km, können wir daraus schließen, dass unser Modell fehlerhaft ist.

Die Elektra, ein Einsitzer aus Holz und Glasfaser, flog in 48 Minuten 50 km in den südlichen Alpen herum [6r32hf]. Die Elektra hat eine Spannweite von 9 m und einen 18 kW Elektromotor mit 48 kg Lithium-Polymer-Batterien. Das Startgewicht dieses Fliegers ist 265 kg (134 kg Flugzeug, 47 kg Batterie und 84 kg menschliche Fracht). Am 3. Dezember 2007 flog es 50 km. Wenn wir annehmen, dass die Energiedichte der Batterie 130 Wh/kg sei und der Flug 90% der vollen Ladung (5,5 kWh) verbrauchte, finden wir für die Transportkosten

0,4 kWh/t-km,

was exakt mit unserer Modellrechnung übereinstimmt. Die Elektra ist kein Niedrigenergieflugzeug, verglichen mit einem normalen Kerosinfresser.

Natürlich heißt das nicht, dass Elektroflugzeuge uninteressant wären. Wenn man traditionelle Maschinen durch Alternativen mit gleichem Energieverbrauch aber ohne Kohlenstoffemissionen ersetzen kann, ist das sicher eine nützliche Technologie. Und als Personentransporter liefert die Elektra respektable 11 kWh pro 100 p-km, vergleichbar mit unserem Elektroauto von Seite 144. Doch in diesem Buch ist die Schlusszeile immer: „Woher soll diese Energie kommen?“



Fig.C.12: Die Elektra F-WMDJ:
11 kWh pro 100 p-km. Foto von
Jean-Bernard Gache. www.apame.eu



Fig.C.13: Tragflügelboot.
Fotografie von Georgios Pazios

Viele Boote sind auch Vögel

Einige Zeit nachdem ich dieses Modell des Fliegens niederschrieb, realisierte ich, dass es auf mehr als nur die Vögel in der Luft anwendbar ist – es gilt auch für Tragflügelboote und auch andere Hochgeschwindigkeitsboote – alle, die höher im Wasser liegen, wenn sie in Bewegung sind.

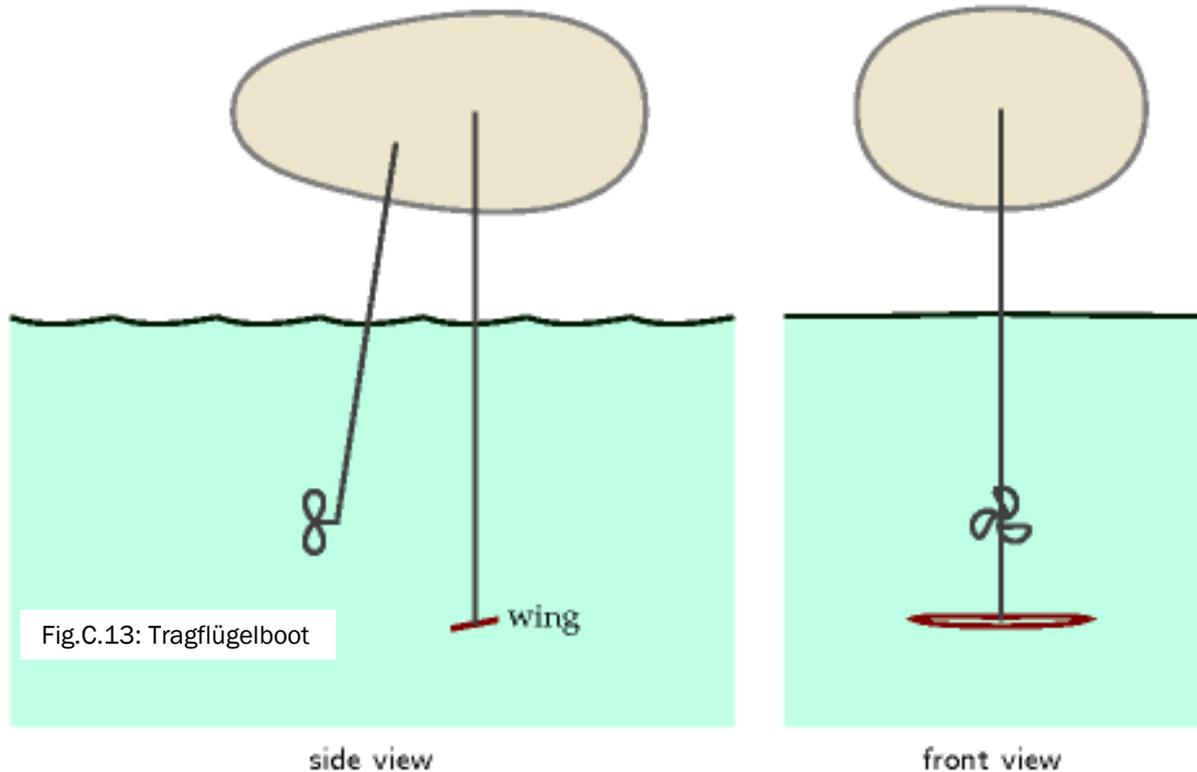


Fig.C.13: Tragflügelboot

Fig.C.13 zeigt das einfache Prinzip der Tragflügelboote. Das Gewicht des Bootes wird getragen von einem geneigten Flügel unter Wasser, der im Vergleich zum Boot recht klein ist. Der Flügel erzeugt Auftrieb, indem er Wasser niederdrückt, genau wie das Flugzeug in Fig.C.2. Wenn wir annehmen, dass der gesamte Widerstand (Luft und Wasser) dominiert wird durch den Wasserwiderstand am Flügel, und dass die Dimensionen des Flügels und die Reisegeschwindigkeit auf minimalen Energieverbrauch pro Strecke optimiert wurden, ergeben sich die bestmöglichen Transportkosten, in Energie pro t-km, genau gemäß Gleichung (C.26):

$$\frac{(c_w f_A)^{1/2}}{\varepsilon} g, \quad (\text{C.34})$$

wobei c_w den Widerstandsbeiwert des Unterwasserflügels bezeichnet und f_A wieder die o.a. dimensionslose Konstante, ε den Motorwirkungsgrad und g die Erdbeschleunigung.

Vielleicht sind c_w und f_A nicht ganz dasselbe wie bei einem optimierten Flugzeug. Doch eine bemerkenswerte Eigenschaft der Theorie ist die Unabhängigkeit von der Dichte des Fluids, in dem der Flügel fliegt. Deshalb wäre die vorausgesagte Größenordnung für die Transportkosten (Energie pro Strecke und Gewicht, einschließlich Fahrzeuggewicht) eines Tragflügelbootes *dieselbe* wie bei einem Flugzeug, nämlich 0,4 kWh/t-km.

Für Geräte, die die Wasseroberfläche berühren, wie Hochgeschwindigkeits-Katamarane oder Wasserskier, sollte ein genaueres Modell auch die Energie berücksichtigen, die in die Produktion von Wellen auf dem Wasser geht, doch bin ich versucht zu glauben, dass diese Tragflügelboot-Theorie im Groben schon stimmt.

Ich konnte bisher keine Daten zu Transportkosten von Tragflügelbooten finden, doch die verfügbaren Daten für einen Katamaran zur Personenbeförderung mit 41 km/h scheinen ganz gut mit der Theorie überein zu stimmen: Es benötigt rund 1 kWh pro t-km.

Es war für mich überraschend zu lernen, dass ein Inselfrager, der mit dem Flugzeug von Insel zu Insel hüpfert nicht nur schneller ist als einer, der mit dem Boot fährt - sondern sehr wahrscheinlich auch noch weniger Energie verbraucht.

Andere Möglichkeiten, oben zu bleiben

Luftschiffe

In diesem Kapitel haben wir festgestellt, dass man Flugzeuge nicht effizienter machen kann, indem man langsamer fliegt, da jeder Vorteil des dabei geringeren Luftwiderstandes dadurch aufgehoben wird, dass man die Luft dann kräftiger nach unten drücken muss. Kann dieses Problem durch einen Strategiewechsel gelöst werden: nicht Luft nach unten drücken, sondern leichter als Luft sein? Ein Luftschiff, ob Blimp oder Zeppelin, benutzt einen enorm großen heliumgefüllten Ballon, der leichter als die Luft ist, um das Gewicht einer kleinen Kanzel zu kompensieren. Der Nachteil dieser Strategie ist, dass der riesige Ballon den Luftwiderstand des Gerätes ziemlich erhöht. Die Energiekosten eines Luftschiffs (pro Gewicht, pro Strecke) kann man klein halten, indem man sich langsam bewegt, eine fischförmige Form wählt und sehr groß und lang ist. Erstellen wir ein Modell zum Energieverbrauch eines idealisierten Luftschiffs.

Ich will annehmen, dass der Ballon ellipsoidal ist, mit einer Querschnittsfläche A und einer Länge L . Das Volumen ist $\frac{2}{3}AL$. Schwebt das Luftschiff stabil in Luft der Dichte ρ , muss die gesamte Masse des Luftschiffs, einschließlich Ladung und Helium $m_{ges} = \rho V$ sein. Bewegt es sich mit der Geschwindigkeit v , hat der Luftwiderstand die Kraft

$$F = \frac{1}{2} c_w A \rho v^2, \quad (C.35)$$

wobei wir den Luftwiderstandsbeiwert c_w basierend auf den Werten für Flugzeuge mit 0,03 annehmen. Die aufzuwendende Energie pro Streckeneinheit ist gleich F dividiert durch den Wirkungsgrad ε des Antriebs. Die Brutto-Transportkosten - die Energie pro Strecken- und Masseneinheit - ist

$$\frac{F}{\varepsilon m_{ges}} = \frac{\frac{1}{2} c_w A \rho v^2}{\varepsilon \rho \frac{2}{3} AL} \quad (C.36)$$

$$= \frac{3}{4\varepsilon} c_w \frac{v^2}{L} \quad (C.37)$$

Das ist ein sehr schönes Ergebnis! Die Brutto-Transportkosten dieses idealisierten Luftschiffs hängen nur von seiner Geschwindigkeit v und der Länge L ab, nicht von der Luftdichte ρ oder der Aufstandsfläche A .

Dieses Modell ist ohne Änderungen auch auf Unterseeboote anwendbar. Die Brutto-Transportkosten (in kWh pro t-km) eines Luftschiffs sind identisch mit denen eines Unterseebootes gleicher Länge und Geschwindigkeit. Das Unterseeboot wird 1000mal mehr Masse beinhalten, da Wasser 1000mal dichter als Luft ist, und es kostet 1000mal



Fig.C.14: Die 239 m lange USS Akron (ZRS-4) über Manhattan. Sie wiegt 100 t und könnte 83 Tonnen zuladen. Die Gesamt-Maschinenleistung ist 3,4 MW, sie befördert 89 Mann Besatzung mit Waffen bei 93 km/h. Sie wurde auch als Flugzeugträger eingesetzt.

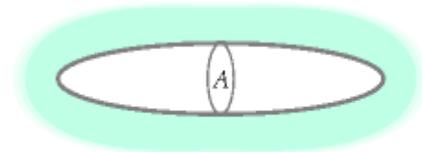


Fig.C.15: Ein ellipsoidales Luftschiff

mehr, es zu bewegen. Der einzige Unterschied zwischen den beiden werden die Werbeeinnahmen sein.

Setzen wir ein paar Zahlen ein. Nehmen wir an, wir wollen mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h reisen (eine Atlantiküberquerung dauert also drei Tage). In SI-Einheiten sind das 22 m/s. Nehmen wir einen Motorwirkungsgrad von $\varepsilon = 1/4$ an. Um die geringsten Transportkosten zu erhalten, müssen wir uns fragen, was die größtmögliche Länge für so einen Zeppelin wäre. Die Hindenburg war 245 m lang. Sagen wir $L = 400$ m, erhalten wir

$$\frac{F}{\varepsilon m_{ges}} = 3 \times 0,03 \frac{(22 \text{ m/s})^2}{400 \text{ m}} = 0,1 \text{ m/s}^2 = 0,03 \text{ kWh/t-km.}$$

Macht Nutzlast die Hälfte der Masse des Luftschiffs aus, sind die Netto-Transportkosten dieses Monster-Luftschiffs bei 0,06 kWh/t-km – vergleichbar mit der Eisenbahn.

Ekranoplan

Ein Ekranoplan, oder Bodeneffektfahrzeug, ist ein Flügelboot: ein Flugzeug, das ganz nah an der Wasseroberfläche fliegt und seinen Auftrieb weder aus dem Niederdrücken von Luft wie ein Flugzeug, noch aus dem Niederdrücken von Wasser wie ein Tragflügelboot erhält, sondern auf einem Kissen von komprimierter Luft, die zwischen den Flügeln und der nahen Wasserfläche eingeschlossen ist, gleitet. Diesen Bodeneffekt kann man nachstellen, indem man eine Spielkarte über einen flachen Tisch schnippt. Das Aufrechterhalten des Luftkissens erfordert sehr wenig Energie, so dass sich ein Bodeneffektfahrzeug fast wie ein normales Fahrzeug ohne Rollwiderstand verhält. Sein Haupt-Energieverbrauch entsteht durch die Luftreibung. Erinnern Sie sich, dass beim normalen Flugzeug die Hälfte der Energie gegen die Luftreibung, die andere Hälfte für den Auftrieb eingesetzt wird. Die Sowjetunion entwickelte das Ekranoplan als Militärtransporter und Raketenträger in der Ära Chruschtschow. Das Lun Ekranoplan lief 500 km/h, der gesamte Schub seiner acht Triebwerke lag bei 1000 kN, wobei dieser Schub nicht mehr benötigt wurde, sobald das Gefährt sich aus dem Wasser erhoben hatte. Nehmen wir an, der Schub während der Fahrt lag bei einem Viertel des Maximums, die Triebwerke wären 30% effizient und von den 400 Tonnen Gesamtgewicht wären 100 Tonnen Fracht, dann ergäben sich Netto-Transportkosten von 2 kWh pro t-km. Ich stelle mir vor, dass das Ekranoplan, wenn es auf zivilen Frachttransport optimiert würde, etwa die Hälfte der Frachtkosten eines herkömmlichen Flugzeugs hätte.

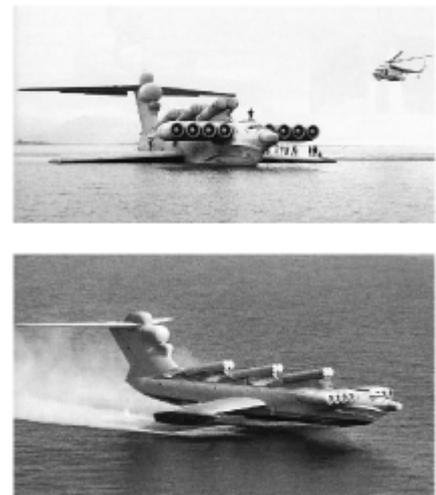


Fig.C.16: Das Lun Ekranoplan – etwas länger und schwerer als eine Boeing 747. Fotografien: A. Belyaev.

Sagen und Mythen

Das Flugzeug wäre ohnehin geflogen, deshalb war mein Flug energie-neutral.

Das ist aus zwei Gründen falsch: Erstens, Ihr zusätzliches Gewicht erfordert zusätzliche Energie, um Sie oben zu halten. Zweitens, Fluggesellschaften reagieren auf Nachfrage und fliegen bei Bedarf mehrere Maschinen.

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 297 **Reale Flugzeugtriebwerke haben eine Effizienz von etwa $\varepsilon = 1/3$** , –*Real jet engines have an efficiency of about $\varepsilon = 1/3$* . Typische Triebwerk-Wirkungsgrade liegen im Bereich 23%–36% [adg.stanford.edu/aa241/propulsion/sfc.html]. Für das typische Flugzeug liegt die Gesamt-Effizienz im Bereich 20% und 40%, die besten Bypass-Triebwerken liefern im Gleitflug 30–37% [www.grida.no/climate/ipcc/aviation/097.htm]. Sie können aber nicht einfach das effizienteste Triebwerk auswählen, weil es eventuell schwerer ist (ich meine, es könnte größere Masse pro Schubeinheit haben) und damit die Gesamteffizienz des Flugzeugs reduzieren.
- 292 **Boeing 747** 272*Boeing 747*. Luftwiderstandsbeiwert der 747 von www.aerospaceweb.org. Übrige 747-Daten von [2af5gw]. Albatros-Daten von [32judd].
- 297 **Der längste beobachtete Non-Stop-Flug eines Vogels** 277*The longest recorded non-stop flight by a bird...* New Scientist 2492. “Bar-tailed godwit is king of the skies. – Pfuhlschnepfe ist der König der Lüfte” 26. März 2005. 11. September 2007: “Schnepfe fliegt 11.500 km non-stop von Alaska nach Neuseeland“. [2qbquv]
- 297 **Das Optimum liegt bei Teilstrecken von etwa 5000 km Länge** 278*Optimizing hop lengths: the sweet spot is when the hops are about 5000 km long*. Quelle: Green (2006).
- 299 **Daten für einen Katamaran zur Personenbeförderung** 280*Data for a passenger-carrying catamaran*. Aus [5h6xph]: Verdrängung (voll beladen) 26,3 Tonnen. Auf einer 1050 Seemeilen langen Fahrt verbrauchte sie 4780 Liter Treibstoff. Ich berechne daraus Fracht-Transportkosten von 0,93 kWh pro t-km. Hier nehme ich übrigens das Gesamtgewicht des Schiffs. Die *Passagier*-Transporteffizienz desselben Schiffs ist etwa 35 kWh pro 100 p-km.
- 301 **Das Lun Ekranoplan** 281*The Lun ekranoplan*. Quellen: www.fas.org [4p3yco], (Taylor, 2002a).

Weiterführende Literatur: Tennekes (1997), Shyy et al. (1999).

Anhang D: Solar II

Auf Seite 47 hatten wir vier Optionen für solare Biomasse aufgezählt:

1. Kohlesubstitution
2. Erdölsubstitution
3. Nahrung für Menschen und andere Tiere
4. Verbrennen von landwirtschaftlichen Nebenprodukten.

Wir werden für jeden dieser Prozesse den maximalen plausiblen Beitrag abschätzen. In der Praxis erfordern viele dieser Methoden so viel Energie, die innerhalb des Prozesses aufgewendet werden muss, dass diese Prozesse schwerlich einen Netto-Beitrag leisten können (Fig.6.14). Doch in den folgenden Überlegungen werde ich solche Kosten der inneren Energie vernachlässigen.



Fig.D.1: Zwei Bäume



Fig.D.2: Raps. Macht man daraus Biodiesel, ist die Leistung pro Landfläche $0,13 \text{ W/m}^2$.
Foto von Tim Dunne

Energiepflanzen als Kohlesubstitution

Wenn wir in England Energiepflanzen wie Weide, Miscanthus oder Pappel (die eine mittlere Energiedichte von $0,5 \text{ W}$ pro Quadratmeter Land haben) anpflanzen und sie dann in ein 40%-effizientes Heizkraftwerk schieben, dann ist die erzielbare Leistung pro Landfläche bei $0,2 \text{ W/m}^2$. Wäre ein Achtel Englands mit diesen Pflanzen bedeckt (500 m^2 pro Person), wäre die erzielbare Gesamtleistung $2,5 \text{ kWh/d}$ pro Person.

Erdölsubstitution

Es gibt einige Möglichkeiten, Pflanzen in Flüssigtreibstoff zu verwandeln. Für jede Methode drücke ich ihr Potenzial in Leistung pro Flächeneinheit aus (wie in Fig. 6.11).

Englands hauptsächliche Biodiesel-Quelle, Raps

Raps wird in England typischerweise im September gesät und im darauffolgenden August geerntet. Derzeit wird auf 450.000 ha Ackerfläche in England jedes Jahr Raps angebaut (das sind etwa 2% Englands). Rapsfelder produzieren 1200 Liter Biodiesel pro Hektar pro Jahr; Biodiesel hat eine Energie von $9,8 \text{ kWh/l}$; also ist das eine Energie pro Fläche von $0,13 \text{ W/m}^2$.

Würden wir 25% der englischen Landfläche zum Rapsanbau nutzen, könnten wir Biodiesel im Umfang von $3,1 \text{ kWh/d}$ pro Person erzeugen.

Ethanol aus Zuckerrüben

Der Zuckerrübenanbau in England liefert beeindruckende 53 t pro ha Jahresertrag. Aus 1 t Zuckerrüben lassen sich 108 Liter Bioethanol gewinnen. Bioethanol hat einen Energiegehalt von 6 kWh pro Liter, also erzielt dieser Prozess eine Leistung pro Landfläche von 0,4 W/m², erforderlichen Energieeinsatz nicht mitgerechnet.

Bioethanol aus Zuckerrohr

Wo Zuckerrohr angebaut werden kann (z.B. in Brasilien), ist dessen Ertrag 80 Tonnen pro Hektar pro Jahr, was 17.600 l Ethanol ergibt. Mit 6 kWh pro Liter (Energiegehalt von Ethanol) erzielt dieser Prozess eine Leistung pro Landfläche von 1,2 W/m².

Bioethanol aus Getreide in den USA

Die Leistung pro Landfläche in Bioethanol aus Getreide ist erstaunlich niedrig. Lassen Sie mich nur zum Spaß die Zahlen zuerst in archaischen Einheiten ausdrücken. 1 Acre produziert 122 Bushel (1 US-Bushel entspricht 8 US-Gallonen) Getreide pro Jahr, was 122 x 2,6 US-Gallonen Ethanol ergibt, was bei einem Energiegehalt von 84.000 BTU pro Gallone eine Leistung pro Landfläche von 0,2 W/m² bedeutet; der benötigte Energie-Input, um das Getreide in Ethanol zu verwandeln, liegt bei 83.000 BTU pro Gallone, also wird 99% der Energie durch den Prozess selbst verbraucht, und es verbleibt eine Netto-Leistung pro Landfläche von 0,002 W/m². Will man signifikant Energie aus dem Getreide-zu-Ethanol-Prozess gewinnen, müsste man auch alle Nebenprodukte ausbeuten. Einschließlich der Energie in den Nebenprodukten kommt die Netto-Leistung pro Landfläche auf etwa 0,05 W/m².

Zellulose-Ethanol aus Rutenhirse

Zellulose-Ethanol – die wundervolle „nächste Generation“ von Biotreibstoffen? Schmer at al. (2008) fanden heraus, dass die Nettoenergie von Rutenhirse, die fünf Jahre lang auf minderwertigem Boden bei 10 US-Framen angebaut wurde, ei 60 GJ pro Hektar pro Jahr lag, das sind 0,2 W/m². „Diese Grundlagenstudie spiegelt das genetische Material und die Agrartechnologie der Jahre 2000 und 2001 wider, in denen die Aussaat erfolgte. Fortschritte in Genetik und Agrartechnologie könnten die energetische Nachhaltigkeit und die Biotreibstoff-Ausbeute der Rutenhirse weiter verbessern.“

Auch Jatropha hat eine geringe Leistungsdichte pro Landfläche

Jatropha ist eine ölhaltige Feldfrucht, die am besten in trockenen tropischen Regionen (300-1000 mm Regen pro Jahr) gedeiht. Sie liebt Temperaturen zwischen 20 und 28 °C. Der erwartete Ertrag in heißen Ländern auf gutem Boden liegt bei 1600 l Biodiesel pro ha pro Jahr. Pro Landfläche sind das 0,18 W/m². Auf Ödland ist der Ertrag 583 l/ha pro Jahr, das sind 0,065 W/m².

	Energiedichte (kWh/kg)
Weichholz	
– luftgetrocknet	4.4
– ofengetrocknet	5.5
Hartholz	
– luftgetrocknet	3.75
– ofengetrocknet	5.0
Schreibpapier	4.0
Hochglanzpapier	4.1
Zeitungspapier	4.9
Karton	4.5
Kohle	8
Stroh	4.2
Hühnermist	2.4
Allg. Industrieabfall	4.4
Mdizinischer Abfall	3.9
Hausmüll	2.6
Aufbereiteter Müll	5.1
Reifen	8.9

Tabelle D.3: Brennwerte von Holz und ähnlichen Dingen. Quellen: Yaros (1997); Ucuncu (1993), Digest of UK Energy Statistics 2005.



Wenn die Menschen entscheiden, 10% von Afrika für die Erzeugung dieser 0,065 W/m² zu nutzen, und man diese Energie auf 6 Milliarden Menschen weltweit verteilt, wie viel würde das jedem von uns bringen? 0,8 kWh/d/p. Zum Vergleich: Der weltweite Ölverbrauch liegt bei 80 Millionen Barrel pro Tag, was auf 6 Milliarden Menschen verteilt 23 kWh/d/p entspricht. Wenn also sogar ganz Afrika mit *Jatropha*-Plantagen überzogen wäre, wäre die so erzeugte Energie gerade ein Drittel des weltweiten Ölverbrauchs.

Wie steht es mit Algen?

Auch Algen sind Pflanzen, daher gilt für sie alles oben Gesagte analog. Schleimige Unterwasserpflanzen sind bei der Photosynthese auch nicht effizienter als ihre Cousinen an Land. Doch es gibt einen Trick, den ich nicht erwähnt habe, der im Algen-zu-Biodiesel-Bereich gängige Praxis ist: Man züchtet die Algen in Wasser, das hoch angereichert ist mit Kohlendioxid, das aus Kraftwerks- oder anderen Industrie-Abgasen gesammelt sein könnte. Pflanzen tun sich viel leichter bei der Photosynthese, wenn das CO₂ für sie bereits konzentriert vorliegt. Ron Putt von der Auburn University sagt, dass Algen auf sonnigen Plätzen in Amerika in Becken, in die auf 10% konzentriertes CO₂ eingeleitet wird, eine Wachstumsrate von 30 g pro qm pro Tag erreichen können und so 0,01 Liter Biodiesel pro qm und Tag produzieren. Das entspricht einer Leistungsdichte pro Beckenfläche von 4 W/m² - vergleichbar mit der einer bayerischen PV-Freiflächenanlage. Wenn man mit einem typischen Auto (12 km pro Liter) 50 km pro Tag fahren will, benötigt man also 420 qm Algenbecken, um das Auto zu betreiben. Zum Vergleich: Die Fläche pro Person in England ist 4000 qm, wovon 69 m² Wasser sind. Vergessen Sie aber nicht, dass es wesentlich ist, diese Becken mit konzentriertem CO₂ zu beschicken. Also ist diese Technik auf Landflächen beschränkt – wie viel von England können wir in Algenbecken verwandeln? – und auf die Verfügbarkeit von konzentriertem CO₂ angewiesen, dessen Einfang mit Energiekosten verbunden ist (ein Thema, das wir in Kapitel 23 und 31 diskutierten). Lassen Sie uns die Beschränkung durch die CO₂-Verfügbarkeit genauer abschätzen. Um Algen mit 30 g pro qm und Tag wachsen zu lassen, benötigt man mindestens 60 g CO₂ pro qm und Tag (weil das CO₂-Molekül mehr Masse pro Kohlenstoffatom hat als die Moleküle in der Alge). Würde man alles CO₂ aller englischer Heizkraftwerke einfangen (etwa 2½ Tonnen pro Jahr pro Person), könnte das 230 qm der genannten Algenbecken pro Person beliefern – etwa 6% der gesamten Landfläche. Diese Fläche würde Biodiesel entsprechend einer Leistung von 24 kWh/d pro Person liefern, wenn wir davon ausgehen, dass die Zahlen aus dem sonnigen Amerika auch für hier zutreffen. Eine plausible Vision? Vielleicht auf einem Zehntel dieses Umfangs? Ich überlasse Ihnen die Entscheidung.

Wie steht's mit Algen im Meer?

Erinnern Sie sich: Die Algen-zu-Biodiesel-Geschichte füttert die Algen immer mit konzentriertem CO₂. Gehen wir damit aufs Meer, wird dieses CO₂-Pumpen wohl nicht möglich sein. Und ohne das konzentrierte CO₂ fällt die Algen-Produktivität auf ein Hundertstel ab. Um mit Algen im Meer einen nennenswerten Beitrag zu leisten, müssten die Algenfarmen Landesgröße haben.

Wie steht's mit Algen, die Wasserstoff produzieren?

Der Ansatz, den Algen-Schleim im Sonnenlicht Wasserstoff produzieren zu lassen, ist eine clevere Idee, weil er eine Menge Schritte überspringt, die normalerweise bei den kohlehydrat-produzierenden Pflanzen erforderlich sind. Jeder chemische Schritt reduziert die Effizienz ein wenig. Wasserstoff kann von einem photosynthetischen System direkt in einem Schritt produziert werden. Eine Studie des National Renewable Energy Laboratory in Colorado behauptet, dass ein Reaktor gefüllt mit genmodifizierten Grünalgen, der

11 ha der Wüste in Arizona belegt, 300 kg Wasserstoff pro Tag produzieren könne. Wasserstoff enthält 39 kWh pro kg, also liefert diese Algen-Wasserstofffabrik eine Leistung pro Reaktorfläche von 4,4 W/m². Zieht man die zum Betrieb der Anlage erforderliche Elektrizität ab, bleibt eine Nettoleistung von 3,6 W/m². Das ist für mich eine sehr vielversprechende Hausnummer – etwa verglichen mit bayerischen PV-Farmen (5 W/m²).

Nahrungsmittel für Menschen und andere Tiere

Getreide wie Weizen, Hafer, Gerste und Mais haben eine Energiedichte um die 4 kWh pro kg. In England sind Weizenerträge von 7,7 t/ha typisch. Wird der Weizen von Tieren gefressen, hat dieser Prozess eine Leistung pro Landfläche von 0,34 W/m². Wenn 2800 m² pro Person in England (die gesamte landwirtschaftliche Fläche) für solche Feldfrüchte verwendet werden, erzeugt das eine chemische Energie von 24 kWh/d pro Person.

Verbrennen landwirtschaftlicher Nebenprodukte

Wir haben gerade ausgerechnet, dass die Leistung pro Flächeneinheit eines Biomasse-Kraftwerks, das die bestmöglichen Energiepflanzen verbrennt, bei 0,2 W/m² liegt. Wenn wir statt dessen Nahrungspflanzen anbauen und nur die Reste, die wir nicht essen, in den Biomasse-Kraftwerken verbrennen – oder wenn wir die Nahrung in Hühner stecken und nur das, was hinten beim Huhn wieder herauskommt in den Biomassekraftwerken verbrennen – wie viel Leistung können wir dann aus einem Quadratmeter Ackerland herausholen? Machen wir zuerst eine grobe Abschätzung und sehen wir uns dann reale Daten an. Für eine wilde Spekulation nehmen wir einfach an, dass die Nebenprodukte aus der Ernte des halben Ackerlandes Englands (2000 m² pro Person) zu Biomasse-Heizkraftwerken gefahren werden und dort (pro Ackerfläche) 10% des Ertrags der besten Energiepflanzen bringen: 0,02 W/m². Multiplizieren wir das mit 2000 m², erhalten wir 1 kWh/d pro Person.

War ich unfair zum landwirtschaftlichen Abfall, indem ich diese wilde Spekulation machte? Wir können die plausible Energie-Produktion aus diesem Abfall nachrechnen, indem wir die Daten des Prototypen für ein Stroh-Heizkraftwerk in Elean, Südengland, hochskalieren. Der Energie-Output von Elean ist 36 MW und es verbrennt 200.000 Tonnen pro Jahr aus Land seiner Umgebung (50 Meilen Radius). Nehmen wir an, dieselbe Dichte könnte in ganz England erzielt werden, eröffnet das Modell Elean ein Potenzial von 0,002 W/m². Bei 4000 m² pro Person sind das 8 W pro Person oder 0,2 kWh/d pro Person.

Rechnen wir noch einmal anders herum. Die britische Strohproduktion beträgt 10 Millionen Tonnen pro Jahr, 0,46 kg pro Tag pro Person. Mit 4,2 kWh pro kg hat dieses Stroh eine chemische Energie von 2 kWh/d/p. Würde das gesamte Stroh in 30% effizienten Heizkraftwerken verbrannt – eine Annahme, die sich nicht gut mit Nutztierhaltung verträgt, die eine anderweitige Verwendung von Stroh erfordert – ergäbe dies 0,6 kWh/d pro Person Elektrizitätserzeugung.

Deponiegas

Gegenwärtig kommt das meiste des Methangases, das aus Mülldeponien entweicht, von biologischem Material, besonders Essensresten. So lange wir also weiter Essen und Zeitungen wegwerfen, ist Deponiegas eine nachhaltige Ressource – dazu kommt, dass aus klimaschützerischer Sicht das Verbrennen des Methans eine gute Idee ist, weil Methan ein stärkeres Treibhausgas ist als CO₂. Eine Deponie, die jährlich 7,5 Millionen Tonnen Haushaltsmüll erhält, kann stündlich 50.000 m³ Methan erzeugen.

Für 1994 wurden die Deponiegas-Emissionen zu 0,05 m³ pro Tag pro Person abgeschätzt, was eine chemischen Energie von 0,5 kWh/d pro Person beinhaltet und 0,2 kWh(el)/d pro Person Elektrizität erzeugen könnte, wenn es komplett mit 40% Effizienz verstromt würde. Deponiegas-Emissionen nehmen auf Grund gesetzlicher Änderungen ab und liegen derzeit um etwa 50% niedriger.

Müllverbrennung

SELCHP ("South East London Combined Heat and Power") [www.selchp.com] ist ein 35 MW Kraftwerk, das pro Jahr 420 kt Haushaltsmüll aus London verbrennt. Der Müll wird dort im gesamten verbrannt, ohne Sortierung. Nach der Verbrennung werden Metalle zum Recycling ausgesondert und Problemüll-Schlacken auf Spezialdeponien verbracht. Die verbleibende Asche wird als Recyclingmaterial im Hoch- und Tiefbau verwendet. Der Brennwert des Mülls ist 2,5 kWh/kg und die Effizienz des Kraftwerks liegt bei 21%, so dass 1 kg Müll etwa 0,5 kWh Strom liefert. Der Kohlenstoffausstoß ist etwa 1000 g CO₂ pro kWh. Von den erzeugten 35 MW werden etwa 4 MW innerhalb des Kraftwerks verwendet, um die Maschinen und Filteranlagen zu betreiben.

Skalieren wir diese Idee hoch und nehmen an, jedes Dorf hätte so eine Anlage und jeder würde täglich 1 kg Müll produzieren, erhalten wird 0,5 kWh(el) pro Tag pro Person aus der Müllverbrennung.

Das ist vergleichbar mit der Hausnummer, die wir oben für den Methaneinfang von Deponien abschätzten. Und man kann natürlich nicht beides haben. Mehr Müllverbrennung bedeutet weniger Methan, das aus Deponien entweicht. Vergleiche Fig.27.2 und Fig.27.3 auf Seite 226 für weitere Daten zur Müllverbrennung.



Fig.D.4: SELCHP – Dein Müll ist ihr Geschäft.

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 303 Die mit Weide, Miscanthus oder Pappel erzielbare Leistung liegt bei 0,2 W/m²** 283 *The power per unit area of using willow, miscanthus, or poplar, for electricity is 0.2 W/m².* Quelle: Select Committee on Science and Technology Minutes of Evidence – Memorandum from the Biotechnology & Biological Sciences Research Council [www.publications.parliament.uk/pa/ld200304/ldselect/ldsctech/126/4032413.htm]. "Typischerweise kann durch nachhaltige Landwirtschaft 10 t/ha/y trockene Holz-Biomasse in Nordeuropa produziert werden... . Eine Fläche von 1 km² kann also 1000 trockene t/y hervorbringen – genug für 150 kW(el) bei niedrigem oder 300 kW(el) bei hohen Umwandlungs-Wirkungsgraden." Das bedeutet 0,15–0,3 W(el)/m². Siehe auch Layzell et al. (2006), [3ap7lc].
- 303 Rapsfelder produzieren 1200 Liter Biodiesel** 283 *Oilseed rape*. Quellen: Bayer Crop Science (2003), Evans (2007), www.defra.gov.uk.
- 304 Zuckerrübenanbau in England –Sugar beet**. Quelle: statistics.defra.gov.uk/esg/default.asp
- 304 Bioethanol aus Getreide** 284 *Bioethanol from corn*. Quelle: Shapouri et al. (1995).
- 304 Zellulose-Ethanol –Bioethanol from cellulose**. Siehe auch Mabee et al. (2006).
- 304 Jatropha**. Quellen: Francis et al. (2005), Asselbergs et al. (2006).

- 305 dass Algen auf sonnigen Plätzen in Amerika in Becken, in die auf 10% konzentriertes CO₂ eingeleitet wird, Algen eine Wachstumsrate von 30 g pro qm pro Tag erreichen können 285 *In America, in ponds fed with concentrated CO₂, algae can grow at 30 grams per square metre per day, producing 0.01 litres of biodiesel per square metre per day.* Source: Putt (2007). Diese Kalkulation vernachlässigte alle Energiekosten in Verbindung mit dem Betrieb des Algenbeckens und der Weiterverarbeitung der Algen zu Biodiesel. Putt beschreibt die Energiebilanz einer geplanten 100-Acre Algenfarm, die durch Methan aus einer Biogasanlage angetrieben wird. Die beschriebene Farm würde in der Tat weniger Energie erzeugen, als der Energie des benötigten Methans entspricht. Die 100-Acre-Farm verbraucht 2.600 kW Methan, was einem Energie-Input von 6,4 W/m² entspricht. Zur Erinnerung: Der Energie-Output in Form von Biodiesel wäre gerade 4,2 W/m². Allen Vorschlägen zur Biotreibstoffproduktion sollte man mit kritischen Augen begegnen!
- 305 Eine Studie des National Renewable Energy Laboratory in Colorado behauptet, dass ein Reaktor gefüllt mit genmodifizierten Grünalgen, der 11 ha der Wüste in Arizona belegt, 300 kg Wasserstoff pro Tag produzieren könne. 286 *A research study from the National Renewable Energy Laboratory predicted that genetically-modified green algae, covering an area of 11 hectares, could produce 300 kg of hydrogen per day.* Quelle: Amos (2004).
- 306 Daten des Prototypen für ein Stroh-Heizkraftwerk in Elean – *Elean power station.* Quelle: Government White Paper (2003). Elean Power Station (36 MW) – the UK's first straw-fired power plant. *Stroh-Produktion:* www.biomassenergycentre.org.uk.
- 306 Deponiegas 287 *Landfill gas.* Quellen: Matthew Chester, City University, London, persönliche Mitteilung; Meadows (1996), Aitchison (1996); Alan Rosevear, UK Representative on Methane to Markets Landfill Gas Sub-Committee, May 2005 [4hamks].

Anhang E: Heizung II

Ein perfekt versiegeltes und gedämmtes Haus würde Wärme für immer halten und keine Heizung erfordern. Die zwei Hauptursachen, weswegen Gebäude Wärme verlieren sind

1. Wärmeleitung – Wärme fließt direkt durch Wände, Fenster und Türen,
2. Lüftung – heiße Luft sickert nach draußen durch Ritzen und Spalten, oder absichtlich durch Ventilationskanäle.

Im Standardmodell für Wärmeverlust sind diese beiden Ströme proportional zur Temperaturdifferenz zwischen der Innen- und Außenluft. Für ein typisches englisches Haus ist die Lüftung der größere Energieverlust, wie wir sehen werden.

Wärmeleitungs-Verluste

Die Wärmeleitungs-Verlustrate durch eine Wand, eine Decke, einen Boden oder ein Fenster ist das Produkt aus drei Faktoren: Die Fläche der Wand, einem Maß der Leitfähigkeit des Materials, aus Verkaufsprospekten bekannt als der „U-Wert“ oder Wärmedurchgangskoeffizient, und der Temperaturdifferenz:

$$\text{Leistungsverlust} = \text{Fläche} \times U \times \text{Temperaturdifferenz} .$$

Der U-Wert wird allgemein in $\text{W/m}^2/\text{K}$ angegeben. (Ein Kelvin (1 K) ist das selbe wie ein Grad Celsius (1 °C).) Größere U-Werte stehen für größeren Leistungsverlust. Je dicker eine Wand ist, um so kleiner ist ihr U-Wert. Doppelverglasung ist fast so gut wie eine massive Steinwand. (Siehe Tabelle E.2.)

Die U-Werte von Objekten, die „in Reihe“ liegen, etwa eine Wand und der daraufliegende Innenputz, können in derselben Weise kombiniert werden wie elektrische Leitfähigkeiten

$$u_{\text{Reihenschaltung}} = 1 / \left(\frac{1}{u_1} + \frac{1}{u_2} \right) .$$

Ein praktisches Beispiel für die Anwendung dieser Regel ist auf Seite 315.

Küche	2	Tabelle E.1: Luftwechsel pro Stunde: typische Werte von N für abgedichtete Räume. Die zugigsten Räume können $N=3$ Luftwechsel pro Stunde aufweisen. Die geforderte Minimum-Rate sind 0,5 bis 1 Luftwechsel pro Stunde, um ausreichend Frischluft für die Bewohner sicherzustellen und Gebäudeschäden wegen überhöhter Luftfeuchtigkeit zu vermeiden (EST 2003)
Bad	2	
Flur	1	
Schlafzimmer	0,5	

Lüftungsverluste

Um die Wärme zu berechnen, die man zum Erwärmen kalter hereinfließender Luft benötigt, brauchen wir die Wärmekapazität von Luft: $1,2 \text{ kJ/m}^3/\text{K}$.

In der Gebäudebeurteilung ist es üblich, die Leistungsverluste durch Lüftung zu beschreiben als Produkt der Anzahl N der Luftwechsel pro Stunde mit dem Volumen V



	U-Werte (W/m ² /K)		
	alte Gebäude	moderner Standard	beste Methode
Wände		0,45-0,6	0,12
Gemauerte Wand	2,4		
Außenwand: 24cm Ziegel	2,2		
Blockziegel-Hohlwand, unverfüllt	1,0		
Blockziegel-Hohlwand, gedämmt	0,6		
Böden		0,45	0,14
abgesetzter Dielenboden	0,7		
massiver Betonboden	0,8		
Dächer		0,25	0,12
Flachdach mit 25mm Dämmung	0,9		
Schrägdach mit 100mm Dämmung	0,3		
Fenster			1,5
Einfachverglasung	5,0		
Doppelverglasung	2,9		
Doppelverglasung, 20mm Abstand	1,7		
Dreifachverglasung	0,7-0,9		

Tabelle E.2: U-Werte für Wände, Böden, Dächer und Fenster



Fig.E.3: U-Wert-Anforderungen englischer und schwedischer Bauvorschriften

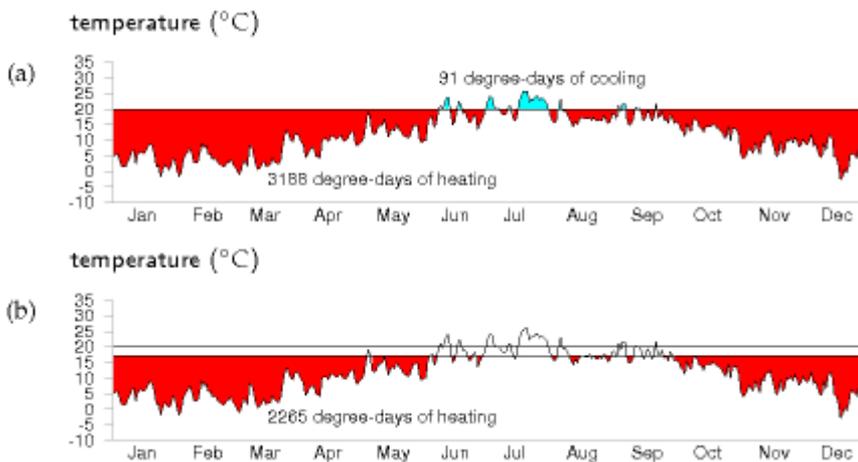


Fig.E.4: Temperaturerfordernis in Cambridge, 2006, visualisiert als Fläche in der grafischen Darstellung der Tagesmittelwerte im Temperaturverlauf. (a) Thermostat auf 20°C, einschließlich Kühlung im Sommer; (b) Thermostat im Winter auf 17°C.

des Raumes in Kubikmetern, der Wärmekapazität C und der Temperaturdifferenz ΔT zwischen innen und außen.

$$\text{Leistung (Watt)} = C \frac{N}{1 \text{ h}} V(\text{m}^3) \Delta T(\text{K}) \quad (\text{E.1})$$

$$= (1,2 \text{ kJ/m}^3/\text{K}) \frac{N}{3600 \text{ s}} V(\text{m}^3) \Delta T(\text{K}) \quad (\text{E.2})$$

$$= \frac{1}{3} NV \Delta T. \quad (\text{E.3})$$

Energieverlust und Temperaturerfordernis (Grad-Tage)

Weil Energie ja Leistung x Zeit ist, kann man den Energieverlust durch eine Fläche in einer kurzen Zeitspanne schreiben als

$$\text{Energieverlust} = \text{Fläche} \times U \times (\Delta T \times \text{Zeitspanne}),$$

und den Energieverlust durch Lüftung als

$$\frac{1}{3} NV \times (\Delta T \times \text{Zeitspanne}).$$

Beide Energieverluste haben die Form

$$\text{Etwas} \times (\Delta T \times \text{Zeitspanne}),$$

wobei das „Etwas“ in Watt pro °C gemessen wird. Im Laufe des Tages und der Jahreszeiten ändert sich die Temperaturdifferenz; und wir können uns eine längere Zeitspanne gedanklich in viele kleine Stücke teilen, während derer die Temperatur immer nahezu konstant ist. Von einem Zeitspanne-Teilstück zum nächsten ändert sich die Temperatur, jedoch nicht das „Etwas“. Wenn wir also den Energieverlust eines Raumes (durch Wärmeleitung und Lüftung) über ein langes Zeitintervall vorhersagen wollen, müssen wir zwei Dinge multiplizieren:

1. Die Summe aller „Etwas“se (alle Terme $\text{Fläche} \times U$ für Wände, Dächer, Böden und Fenster und alle Terme $\frac{1}{3} NV$ für die Volumina); und
2. Die Summe aller (Temperaturdifferenz x Zeitspanne)-Faktoren (für alle Zeitspannen-Teilstücke).

Der erste Faktor ist eine Eigenschaft des Gebäudes, gemessen in Watt pro °C. Ich nenne sie die Leckrate des Gebäudes. (Die Leckrate heißt manchmal auch *Wärmeverlustkoeffizient*.) Der zweite Faktor ist eine Eigenschaft des Wetters, häufig ausgedrückt in „Grad-Tagen“, da die Temperaturdifferenz in Grad gemessen wird und Tage ein bequemes Maß für Zeitspannen darstellen. Wenn beispielsweise Ihr Haus innen 18 °C hat und die Außentemperatur für eine Woche 8 °C beträgt, dann sagen wir, dass diese Woche mit $10 \times 7 = 70$ Grad-Tagen zur $(\Delta T \times \text{Zeitspanne})$ -Summe beiträgt. Ich werde die Summe all dieser $(\Delta T \times \text{Zeitspanne})$ -Faktoren die *Temperaturerfordernis* eines Zeitraums nennen.

$$\text{Energieverlust} = \text{Leckrate} \times \text{Temperaturerfordernis}$$

Wir können den Energieverlust unseres Gebäudes reduzieren, indem wir die Leckrate verringern oder die Temperaturerfordernis, oder beides. Die nächsten beiden Abschnitte beschäftigen sich näher mit diesen beiden Faktoren, an Hand einer Fallstudie eines Hauses in Cambridge.

Es gibt einen dritten Faktor, den wir zudem diskutieren müssen. Die verlorene Energie wird durch das Heizsystem des Gebäudes wieder ersetzt und durch andere

Wärmequellen wie Bewohner, ihre Elektro- und Kochgeräte und die Sonne. Betrachtet man das Heizsystem, ist die *gelieferte* Energie nicht identisch mit der durch das Gebäude *verbrauchten* Energie. Sie sind über den thermischen Wirkungsgrad der Heizung (die sog. Leistungszahl) miteinander verknüpft.

$$\text{Verbrauchte Energie} = \text{gelieferte Energie} / \text{Leistungszahl.}$$

Für einen Gas-Brennwertkessel ist beispielsweise die Leistungszahl 90 %, da 10% der Energie durch den Kamin verloren geht.

Zusammengefasst können wir also den Energieverbrauch eines Gebäudes auf drei Arten reduzieren:

1. durch Verringern der Temperaturerfordernis,
2. durch Verringern der Leckrate oder
3. durch Erhöhen der Leistungszahl.

Wir wollen nun die Einsparpotenziale dieser drei Optionen bestimmen. (Eine vierte Option – Erhöhen der zusätzlichen Energiegewinne des Gebäudes, insbesondere durch Sonneneinstrahlung – könnte ebenfalls nützlich sein, doch will ich sie hier nicht behandeln.)

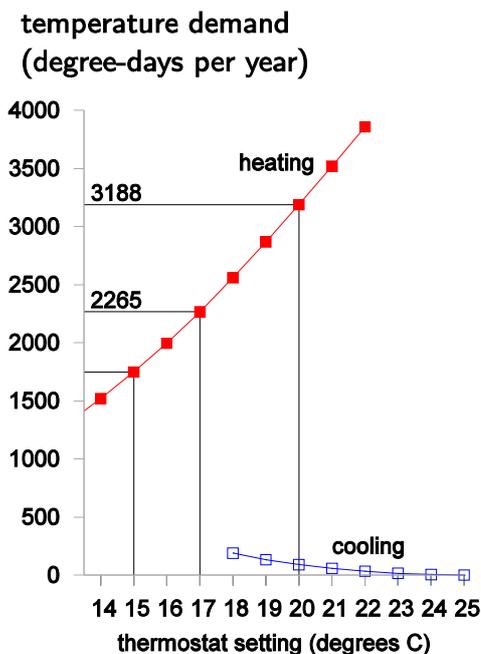


Fig.E.5: Temperaturerfordernis (Definition siehe Text Seite 311) in Cambridge, in Grad-Tagen pro Jahr, als Funktion der Thermostateinstellung (°C). Dreht man im Winter den Thermostaten von 20°C auf 17°C zurück, reduziert das die Temperaturerfordernis für Heizen um 30%, von 3.188 auf 2.265 Grad-Tage. Stellt man im Sommer den Thermostaten von 20°C auf 23°C hoch, reduziert das die Temperaturerfordernis für Kühlen um 82%, von 91 auf 16 Grad-Tage.

Temperaturerfordernis

Wir können die Temperaturerfordernis (Definition siehe oben Seite 311) schön in einer Grafik des Außentemperaturverlaufs über der Zeit visualisieren (Fig.E.4). Für ein Gebäude, dessen Innentemperatur auf 20°C gehalten wird, ist die gesamte Temperaturerfordernis zwischen der horizontalen Linie bei 20°C und dem Temperaturverlauf. In Fig.E.4 (a) sehen wir für ein Jahr in Cambridge, dass die Temperaturerfordernis 3.188 Grad-Tage Heizen und 91 Grad-Tage Kühlen beträgt. Diese Zahlen lassen uns leicht erkennen, wie sich Zurückdrehen des Thermostaten oder Leben ohne Klimaanlage auswirken. Den Thermostaten im Winter auf 17°C zurückzudrehen verringert die Temperaturerfordernis für Heizen von 3.188 Grad-Tagen auf 2.265 Grad-Tage (Fig.E.4 (b)), was eine 30%ige Reduktion der Heizkosten bedeutet. Den

Thermostaten auf 15 °C zurückzudrehen verringert die Erfordernis von 3.188 auf 1748 Grad-Tage, eine Einsparung von 45%.

Diese Berechnungen geben uns eine Größenordnung, welche Einsparungen durch Zurückdrehen des Thermostaten möglich sind, doch bringen sie nur dann exakte Vorhersagen hervor, wenn wir zwei Details mit berücksichtigen: Erstens: Gebäude absorbieren von Natur aus Energie der Sonne, sodass die Innentemperatur auch ohne Heizung höher als die Außentemperatur liegt; und zweitens: die Bewohner und ihre Geräte strahlen Wärme ab, was wiederum den Bedarf an Heizung gegenüber der Theorie verringert. Die Temperaturerfordernis aus gedrückt in Grad-Tagen ist zudem eine recht unhandliche Sache. Werte wie „3.500 Grad-Tage“ sind schwer zu merken. (Und Akademiker könnten die Einheit verwirrend finden, weil sie sie an die Zeit erinnert, als sie mit Doktorhüten verkleidet herumliefen und ihren akademischen Grad feierten.) Wir können dieser Größe noch mehr Anschaulichkeit verleihen, wenn wird sie durch 365 teilen, die Anzahl der Tage im Jahr, und so die Temperaturerfordernis in „Grad-Tagen pro Tag“ oder wenn Sie wollen einfach in „Grad“ erhalten. Fig.E.6. zeigt das umskalierte Diagramm. So ausgedrückt ist die Temperaturerfordernis einfach die *mittlere* Temperaturdifferenz zwischen innen und außen. Die hervorgehobenen Werte sind 8,7 °C für eine Thermostateinstellung von 20 °C, 6,2 °C für eine Einstellung von 17 °C und 4,8 °C für eine Einstellung von 15 °C.

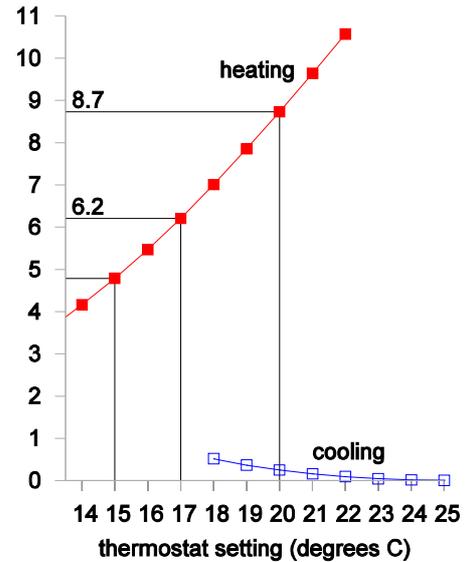


Fig.E.6: Die Temperaturerfordernis in Cambridge, umskaliert in Grad-Tagen pro Tag, auch bekannt als Grad. In diesen Einheiten ist die Erfordernis gerade der Temperaturunterschied zwischen innen und außen.

Fig.E.6. zeigt das umskalierte Diagramm. So ausgedrückt ist die Temperaturerfordernis einfach die *mittlere* Temperaturdifferenz zwischen innen und außen. Die hervorgehobenen Werte sind 8,7 °C für eine Thermostateinstellung von 20 °C, 6,2 °C für eine Einstellung von 17 °C und 4,8 °C für eine Einstellung von 15 °C.

Leckrate – Beispiel: mein Haus

Mein Haus ist eine Doppelhaushälfte mit drei Schlafzimmern aus dem Jahr 1940 (Fig.E.7). 2006 wurde die Küche etwas erweitert und die meisten Fenster sind doppelverglast. Vorder- und Hintertür waren beide noch einfach verglast. Meine Abschätzung der Leckrate aus 2006 ist in Tabelle E.8 dargestellt. Die gesamte Leckrate damals war 322 W/°C (oder 7,7 kWh/d/°C), wobei Wärmeleitungs-Lecks mit 72% und Lüftungs-Lecks mit 28% beitrugen. Die Wärmeleitungsverluste verteilten sich nahezu gleichmäßig auf die drei Bereiche Fenster, Wände und Boden/Decke.

Um die Leckrate zweier unterschiedlich großer Gebäude vergleichen zu können, könne wir die Leckrate durch die Wohnfläche teilen, das gibt den Wärmeverlustkoeffizienten des Gebäudes, in W/°C/m². Für dieses Haus (gesamte Wohnfläche 88 m²) ist er

$$3,7 \text{ W/°C/m}^2 .$$

Nehmen wir diese Werte und schätzen den täglichen Energiebedarf des Hauses ab, an einem kalten Wintertag und im Jahresmittel.



Fig.E.7: Mein Haus

Wärmeleitungsverluste	Fläche (m ²)	U-Wert (W/m ² /°C)	Leckrate (W/°C)
Horizontale Flächen			
Schrägdach	48	0.6	28.8
Flachdach	1.6	3	4.8
Boden	50	0.8	40
Vertikale Flächen			
Wände im Anbau	24.1	0.6	14.5
Außenwände	50	1	50
einfache Wand (12cm)	2	3	6
Einfachvergeraste Fendter u. Türen	7.35	5	36.7
Doppelverglaste Fenster	17.8	2.9	51.6
Wärmeleitungsverluste gesamt			232.4

Tabelle E.8: Aufschlüsselung der Leckraten meines Hauses aus Wärmeleitung und Lüftung, vor 2006. Ich habe die Trennwand zwischen den Doppelhaushälften als perfekt isolierte Wand betrachtet, aber das könnte falsch sein, weil der Zwischenraum durchlüftet ist. Ich habe die Parameter hervorgehoben, die ich nach 2006 durch bauliche Modifikation (siehe Text) verändert habe.

Lüftungsverluste	Volumen (m ³)	N (Luftaustausch pro St.d)	Leckrate (W/°C)
Schlafzimmer	80	0.5	13.3
Küche	36	2	24
Flur	27	3	27
Andere Räume	77	1	25.7
Lüftungsverluste gesamt			90

An einem kalten Tag bei einer Außentemperatur von -1°C und einer Innentemperatur 19°C ist die Temperaturdifferenz $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$. Wird diese Temperaturdifferenz 6 Stunden am Tag aufrechterhalten, dann ist der Energieverlust

$$322 \text{ W/}^{\circ}\text{C} \times 120 \text{ Grad-Stunden} \approx 39 \text{ kWh} .$$

Wird die Temperatur 24 Stunden bei 19°C gehalten, ist der Energieverlust pro Tag
155 kWh/d.

Um einen jährlichen Mittelwert für den Energieverlust zu erhalten, können wir die Temperaturerfordernis von Cambridge aus Fig.E.5 verwenden. Mit dem Thermostat auf 19°C lag diese bei 2.866 Grad-Tagen. Also ist die mittlere Verlustrate, wenn das Haus stetig auf 19°C gehalten wird:

$$7,7 \text{ kWh/d/}^{\circ}\text{C} \times 2866 \text{ Grad-Tage/y/(365 d/y)} = 61 \text{ kWh/d.}$$

Dreht man den Thermostaten runter auf 17°C , sinkt die Verlustrate auf 48 kWh/d. Dreht man hoch auf tropische 21°C , ist die Verlustrate 75 kWh/d.

Die Wirkung zusätzlicher Wärmedämmung

Im Jahre 2007 machte ich die folgenden Veränderungen am Haus:

1. zusätzliche Zwischenwanddämmung (die fehlte in den Hauptwänden des Hauses) – Fig.21.5
2. Verstärkung der Dachisolation
3. Zusätzliche Vordertür außerhalb der vorhandenen – Fig.21.6
4. Ersatz der Hintertür durch eine doppelverglaste.
5. Ersatz des letzten einfachverglasten Fensters durch Isolierverglasung.

Welche Veränderung am Wärmeverlust ist zu erwarten?

Die gesamte Leckrate vorher war $322 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$.

Die Zwischenwanddämmung (neuer U-Wert 0,6) der Hauptwände verringerte die Leckrate um 20 W/°C. Die Dachdämmung (neuer U-Wert 0,3) sollte die Leckrate um 14 W/°C verringern. Die verbesserte Verglasung (neuer U-Wert 1,6 – 1,8) sollte die Wärmeleitung um 23 W/°C reduzieren und die Lüftungsverluste um etwa 24 W/°C. Das ist eine Gesamtverbesserung um etwa 25%; von etwa 320 auf 240 W/°C (7,7 auf 5 kWh/d/°C). Tabelle E.9 zeigt die vorhergesagten Einsparungen der einzelnen Maßnahmen.

Der Wärmeverlustkoeffizient des Hauses (Wohnfläche 88 m²) ist damit hoffentlich um 25 % reduziert, von 3,7 auf 2,7 W/°C/m². (Es ist ein weiter Weg bis zu den 1,1 W/°C/m² die ein „nachhaltiges“ Haus nach den neue Bauvorschriften erreichen soll.)

Es ist frustrierend schwer, wirklich große Fortschritte in der Leckrate eines Altbaus zu machen! Wie wir oben sahen, ist es viel einfacher, große Fortschritte durch Zurückdrehen es Thermostaten zu erzielen. Reduktion von 20°C auf 17°C ergab eine Verringerung des Wärmeverlustes um 30%.

Nimmt man diese beiden Maßnahmen zusammen – nachträgliche Dämmung und Thermostat runterdrehen – sagt das Modell eine Einsparung von knapp 50% voraus. Da noch zusätzliche Wärme im Haus generiert wird, sollte die Reduktion der Gasrechnung über 50% ausfallen.

Ich führte alle diese Modifikationen durch und las meine Zähler wöchentlich ab. Ich kann bestätigen, dass meine Heizkostenrechnung tatsächlich um mehr als 50% zurückging. Wie in Fig.21.4 gezeigt, ging meine Gasrechnung von 40 kWh/d auf 13 kWh/d zurück – eine Reduktion von 67%.

--- Hohlwandisolierung (an 2/3 der Wandfläche)	4,8 kWh/d
--- Verbesserte Dachdämmung	3,5 kWh/d
--- Verringerte Wärmeleitung in zwei Türen und einem Fenster (durch Doppelverglasung)	1,9 kWh/d
--- Geringerer Luftzug in Flur und Küche durch verbesserte Dichtungen in Türen und Fenstern	2,9 kWh/d

Tabelle E.9: Aufschlüsselung der vorausberechneten Einsparungen beim Wärmeverlust meines Hauses an einem kalten Wintertag

Leckraten-Verbesserung durch Innen-Wandverkleidung

Können Sie die Leckrate einer Wand verringern, indem Sie *innen* die Wand mit Isolierung bedecken? Die Antwort ist ja, doch kann es zwei Komplikationen geben. Erstens: Die Dicke der Zusatzdämmung ist größer als Sie vielleicht erwarten. Um eine 24er Vollziegelwand (U-Wert 2,2 W/m²/K) in eine nette 0,30 W/m²/K Isolierwand zu verwandeln, braucht man etwa 6 cm stark isolierte Trockenbauplatten. Zweitens kann Kondensation an den Zwischenoberflächen auftreten, die eventuell zu Dampf- und Feuchtigkeitsproblemen führt.

Wenn Sie keine so große Reduktion der Leckrate anstreben, können Sie sich auch mit dünnerer Isolierung begnügen. Es werden beispielsweise 1,8 cm starke isolierte Wandplatten mit einem U-Wert von 1,7 W/m²/K angeboten. Mit einer solchen Platte vor der bestehenden Wand reduziert man den U-Wert von 2,2 W/m²/K auf

$$1 / \left(\frac{1}{2,2} + \frac{1}{1,7} \right) \approx 1 \text{ W/m}^2/\text{K} .$$

Definitiv eine lohnenswerte Reduktion.

Luft-Austausch

Ist ein Gebäude einmal richtig gut gedämmt, erfolgt der wesentliche Energieverlust durch Ventilation (Luftaustausch) statt durch Wärmeleitung. Den Wärmeverlust durch Lüftung kann man reduzieren, indem man die Wärme der ausströmenden Luft auf die einströmende Luft überträgt. Bemerkenswert: Der Großteil der Wärme kann tatsächlich ohne zusätzlichen Energieaufwand übertragen werden. Der Trick ist, eine Nase zu benutzen, genau wie die natürliche Selektion. Eine Nase wärmt einströmende Luft, indem sie ausströmende Luft abkühlt. Es entsteht ein Temperaturgradient in der Nase, die Nasenwände sind am kältesten nahe den Nasenlöchern. Je länger Ihre Nase, desto besser arbeitet sie als Gegenstrom-Wärmetauscher. In natürlichen Nasen wechselt gewöhnlich die Richtung des Luftstroms. Eine andere Art, so eine Nase zu organisieren ist zwei Luftdurchlässe zu haben, eine für die Einwärts- und einen für die Auswärts-Stromrichtung, aus Sicht des Luftstroms voneinander getrennt, doch eng miteinander gekoppelt, so dass ein Wärmefluss zwischen beiden einfach stattfinden kann. So funktionieren Nasen in Gebäuden. Es ist üblich, diese Nasen Wärmetauscher zu nennen.

Ein energie-effizientes Haus

Im Jahr 1984 baute der Energieberater Alan Foster ein energie-effizientes Haus nahe Cambridge; er überließ mir freundlicherweise seine detaillierten Messergebnisse. Das Haus ist ein Bungalow in Holzrahmen-Bauweise basierend auf dem skandinavischen „Heatkeeper Serrekunda“ Design (Fig.E.10), mit 140 m² Wohnfläche, aufgeteilt in drei Schlafzimmer, ein Arbeitszimmer, zwei Bäder, ein Wohnzimmer, eine Küche und einen Flur. Die hölzernen Außenwände wurden in Fertigbauweise von einer schottischen Firma geliefert, der Rohbau wurde in wenigen Tagen erstellt. Die Wände sind 30 cm stark und haben einen U-Wert von 0,28 W/m²/°C. Von innen nach außen ist sie aufgebaut mit 13 mm Gipskartonplatten, 27 mm Luftspalt, eine Dampfsperre, 8 mm Sperrholz, 90 mm Steinwolle, 12 mm bitumen-imprägnierte Faserplatte, 50 mm Hohlraum, und 103 mm Ziegel. Die Deckenkonstruktion ist ähnlich mit 100-200 mm Steinwolle-Dämmung. Die Decke hat einen U-Wert von 0,27 W/m²/°C, der Fußboden 0,22 W/m²/°C. Die Fenster sind doppelverglast (U-Wert 2 W/m²/°C), wobei die Außenflächen der inneren Scheiben speziell beschichtet sind, um die Abstrahlung zu minimieren. Die Fenster sind so angeordnet, dass sie nennenswerte solare Einstrahlungsgewinne ermöglichen, die etwa 30% zur Raumheizung beitragen. Das Haus ist gut versiegelt, jede Tür und jedes Fenster mit Neopren-dichtungen versehen. Das Haus wird beheizt durch Warmluft, die über Roste im Fußboden einströmt. Im Winter entfernen Pumpen verbrauchte Luft aus einigen Zimmern und führen sie nach draußen, und sie saugen über den Dachstuhlbereich Frischluft herein. Beide Luftströme passieren einen Wärmetauscher (Fig.E.11), der 60% der Wärme aus der Abluft rettet. Der Wärmetauscher ist ein passives Bauteil, das keine Energie benötigt: Es funktioniert wie eine große Metallnase, die die einströmende Luft an der ausströmenden wärmt. An



Fig.E.10: Das Heatkeeper Serrekunda



Fig.E.11: Der Wärmetauscher im „Heatkeeper“

einem kalten Wintertag war die Außenluft-Temperatur bei -8°C , die Temperatur am Lufteinlass im Dachstuhl war 0°C und die Frischluft nach dem Wärmetauscher hatte $+8^{\circ}\text{C}$.

In den ersten 10 Jahren wurde die gesamte benötigte Wärme über Elektroheizgeräte bereitgestellt, die einen 650 l Wärmespeicher mit billigem Nachtstrom aufheizten. Erst kürzlich wurde das Haus an die Gasversorgung angeschlossen und seitdem erwärmt ein Gas-Brennwertkessel den Wärmespeicher.

Der Wärmeverlust durch Wärmeleitung und Lüftung liegt bei $4,2 \text{ kWh/d/}^{\circ}\text{C}$. Der Wärmeverlustkoeffizient (Leckrate pro m^2 Wohnfläche) liegt bei $1,25 \text{ W/m}^2$ (vgl. mein Haus mit $2,7 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$).

Mit zwei Bewohnern und Thermostatstellung bei 19 oder 20°C tagsüber lag der mittlere Energieverbrauch des Hauses für Heizung bei 8.100 kWh pro Jahr oder 22 kWh/d oder $6,6 \text{ W/m}^2$; der Gesamtenergieverbrauch für alle Verbraucher war 15.000 kWh pro Jahr oder 40 kWh/d . Ausgedrückt als mittlere Leistung pro Flächeneinheit sind das $12,2 \text{ W/m}^2$.

Fig.E.12 vergleicht die Leistungsaufnahme dieses Hauses pro Flächeneinheit mit meinem Haus (vor und nach der Effizienzsteigerung) und mit dem europäischen Durchschnitt. Der Verbrauch meines Hauses nach der Effizienzsteigerung liegt nahe an der des Heatkeepers, dank der verringerten Thermostat-Einstellungen.

Kenngößen für Häuser und Büros

Der deutsche Passivhaus-Standard zielt auf einen Energiebedarf für Heizung und Kühlung von $15 \text{ kWh/m}^2/\text{y}$ ($1,7 \text{ W/m}^2$) und einen Gesamtenergiebedarf von $120 \text{ kWh/m}^2/\text{y}$ d.h. $13,7 \text{ W/m}^2$ ab.

Der mittlere Energieverbrauch im englischen Dienstleistungssektor pro Einheit Geschäftsfläche ist 30 W/m^2 .

Ein energie-effizientes Büro

Die National Energy Foundation baute sich ein preiswertes Niedrigenergie-Bürogebäude. Es hat solarthermische Brauchwassermodule sowie eine PV-Anlage mit max. $6,5 \text{ kW}$ Leistung und wird mit einer 14-kW -Erdwärmepumpe beheizt, gelegentlich auch mit einem Holzofen. Die Bürofläche ist 400 m^2 für etwa 30 Personen. Es ist ein einstöckiges Gebäude. Die Wände beinhalten 300 mm Steinwolle-Dämmung. Die Leistungszahl (COP) der Wärmepumpe im Winter war $2,5$. Die benötigte Energie liegt bei 65 kWh pro Jahr und Quadratmeter Bürofläche ($7,4 \text{ W/m}^2$). Die PV-Anlage liefert fast 20% dieser Energie.

Moderne Bürogebäude

Neue Bürogebäude werden häufig als besonders umweltverträglich angepriesen. Sehen wir uns ein paar Zahlen dazu an.

Das William Gates Building der Universität Cambridge beheimatet die Forscher der Computerwissenschaften, Verwaltung und ein kleines Cafe. Seine Fläche ist 11.110 m^2 und sein Energiebedarf 2.392 MWh/y . Pro Flächeneinheit ist das eine Leistung von $215 \text{ kWh/m}^2/\text{y}$ oder 25 W/m^2 . Das Gebäude gewann den RIBA Award 2001 für seine angekündigten Energie-Einsparungen. „Die Architekten haben viele umweltfreundliche Aspekte in das Gebäude integriert.“ [5dhups]

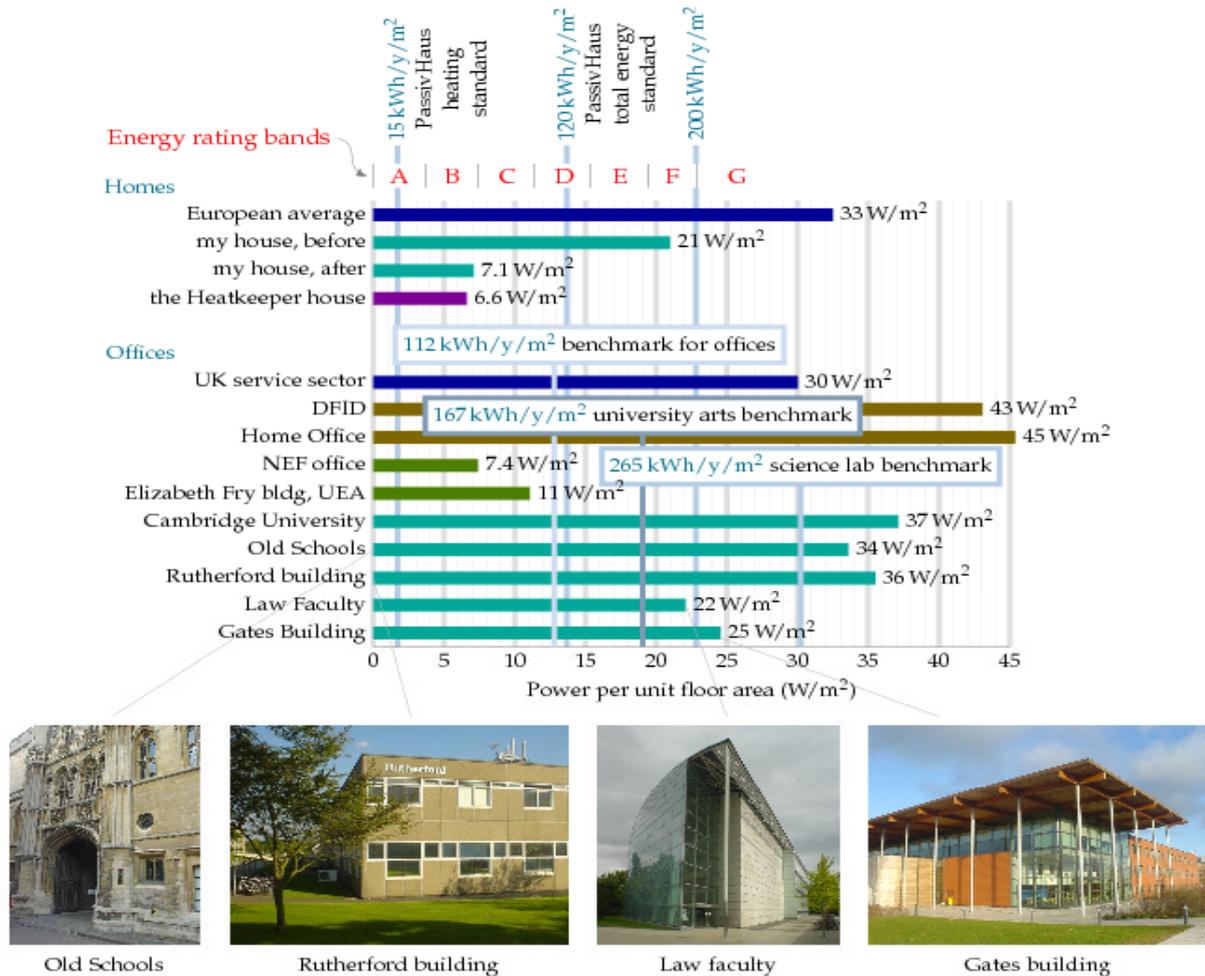


Fig.E.12. Gebäude-Kennzahlen. Energiebedarf pro Fläche in verschiedenen Wohn- und Bürogebäuden⁴¹

Doch sind diese Gebäude beeindruckend? Eine Tür weiter steht das Rutherford Building, erbaut 1970 ohne Öko-Schnickschnack – sogar ohne Doppelverglasung – hat eine Fläche von 4.998 m² und verbraucht 1.557 MWh/y; das sind 0,85 kWh/d/m² oder 36 W/m². Das RIBA-ausgezeichnete Haus ist also nur 30% besser, im Hinblick auf Energieverbrauch pro Fläche, als sein Nachbar aus den 1970ern. Fig.E.12 vergleicht diese beiden Gebäude und einen weiteren Neubau, die juristische Fakultät, mit den Old Schools, einem Altbau aus der Zeit vor 1890. Für all das Getöse ist der Unterschied zwischen neuen und alten Bauten wirklich recht enttäuschend! Beachten Sie bitte, dass der Energieverbrauch eines Gebäudes in denselben Einheiten (W/m²) dargestellt wird wie die Erneuerbaren Energiequellen, die wir auf Seite 48, 52 und 197 diskutierten. Der Vergleich zwischen diesen Erzeugungs- und Verbrauchszahlen hilft uns zu verstehen, wie schwierig es ist, moderne Gebäude aus direkt vor Ort produzierten Erneuerbaren zu versorgen. Die Leistung pro Flächeneinheit für Biotreibstoffe (Fig.6.11, Seite 48) ist 0,5 W/m², von Windfarmen 2 W/m², von PV 20 W/m² (Fig.6.18, Seite 52); nur solarthermische Warmwassermodule kommen in die richtige Größenordnung mit 53 W/m² (Fig.6.3, Seite 43).

⁴¹ Der Wert für „the Heatkeeper House“ (Zeile vier der Tabelle, bei „Homes“) ist nach Angaben in den Errata des Autors nicht korrekt, sondern müsste bei 12,2 W/m² liegen. An derselben Stelle führt der Autor aus: Ein anderes Problem mit Fig.E.12 ist, dass der PassivHaus-Standard einer anderen Konvention der Leistungsverbrauchs-Bestimmung folgt: Leistung wird dort nach „Primärenergieverbrauch“ gemessen, wozu Kenntnis des Quellen für Strom und Brennstoff erforderlich ist und evtl. auch Umwandlungskoeffizienten. Das bedeutet, dass der PassivHaus-Standard noch strenger ist als hier angegeben, um wie viel strenger hängt allerdings vom Energiemix ab.

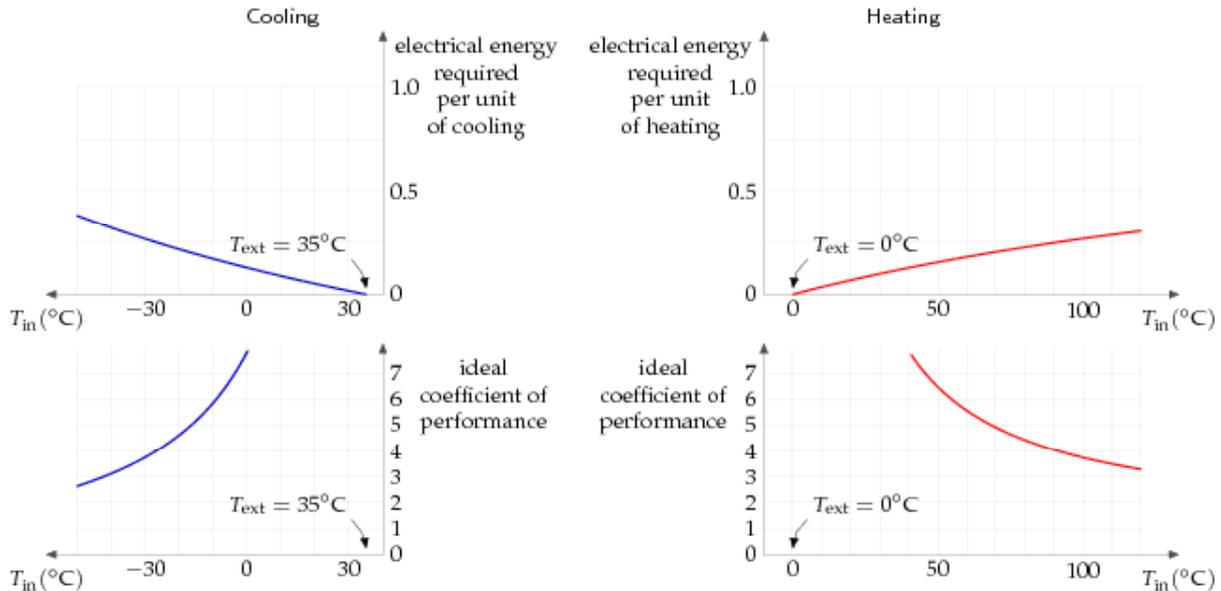


Fig.E.13: Effizienz idealer Wärmepumpen. Oben links: die idealerweise erforderliche Energie nach den Gesetzen der Thermodynamik, um Wärme aus einem Raum der Temperatur T_{in} zu pumpen, wenn die Temperatur des Außenraums, wo die Wärme hingepumpt wird, $T_{out} = 35^\circ\text{C}$ beträgt. Rechts: die idealerweise erforderliche Energie, um Wärme in einen Raum der Temperatur T_{in} zu pumpen, wenn die Temperatur des Außenraums, wo die Wärme hergenommen wird, $T_{out} = 0^\circ\text{C}$ beträgt. Untere Reihe: Die Effizienz ist üblicherweise als Leistungszahl (*Coefficient of Performance, COP*) angegeben, dem Verhältnis zwischen gepumpter Wärme und eingesetzter elektrischer Energie. In der Praxis erreichen fachgerecht installierte Erdwärmepumpen und die besten Luftwärmepumpen Leistungszahlen von 3 oder 4; doch gesetzliche Vorschriften haben in Japan die Leistungszahlen bis 6,6 hochgeschraubt.

Verbesserung des Wirkungsgrades

Man könnte denken, dass der Wirkungsgrad eines Brennwertkessels, typisch bei 90%, schwer zu schlagen sein wird. Und doch kann man mit Wärmepumpen erheblich darüber kommen. Der Brennwertkessel benutzt chemische Energie und wandelt sie zu 90% in Nutzwärme, doch eine Wärmepumpe benutzt elektrische Energie und *schiebt* damit Wärme von einem Platz zu einem anderen (z.B. von außerhalb des Gebäudes nach innen). Gewöhnlich ist dabei die Menge nützlicher Wärme erheblich größer als die erforderliche elektrische Energie. Ein Wirkungsgrad, eine sog. Leistungszahl von 3 oder 4 (300 oder 400 %) ist normal.

Theorie der Wärmepumpen

Das sind die Formeln der Effizienz für eine ideale Wärmepumpe, also für die elektrische Energie, die für eine Einheit gepumpter Wärme-Energie erforderlich ist. Wenn wir Wärme von draußen (Außentemperatur T_1) an einen wärmeren Ort (Innentemperatur T_2) pumpen wollen, ist die Effizienz im Idealfall

$$\text{Effizienz} = \frac{T_1}{T_2 - T_1},$$

wobei T_1 und T_2 relativ zum absoluten Nullpunkt anzugeben sind (d.h. T_2 in Kelvin berechnet man aus der Celsius-Temperatur T_{in} durch $273,15 + T_{in}$). Wollen wir Wärme von einem Ort der Temperatur T_2 in das wärmere Äußere bei Temperatur T_1 pumpen, ist die Effizienz im Idealfall

$$\text{Effizienz} = \frac{T_1}{T_1 - T_2},$$

Diese theoretischen Limits erreichen Systeme nur dann, wenn sie unendlich langsam pumpen. Man sieht, dass die Effizienz um so größer ist, je näher die Außen- an der Innentemperatur ist. In der Theorie sollten Erdwärmepumpen die größere Effizienz haben, weil die Bodentemperatur gewöhnlich näher an der Innentemperatur ist als die Außenlufttemperatur, doch in der Praxis sollten Luftwärmepumpen die beste und einfachste Wahl sein. In Städten gibt es Unsicherheit über die zukünftige Effizienz einer Grundwärmepumpe, weil der Boden um so kälter wird, je mehr Leute eine Grundwärmepumpe betreiben; dasselbe Problem andersherum kann im Sommer auftreten, wenn die Wärmepumpen zum Klimatisieren verwendet werden.

Wärmekapazität:	$C = 820 \text{ J/kg/K}$
Leitfähigkeit:	$\kappa = 2.1 \text{ W/m/K}$
Dichte:	$\rho = 2750 \text{ kg/m}^3$
Wärmekapazität pro Volumeneinheit:	$C_v = 2.3 \text{ MJ/m}^3/\text{K}$

Tabelle E.14: Statistik für Granit (Ich benutze Granit als Beispiel eines typischen Gesteins)

	(W/m/K)
Wasser	0.6
Quarz	8
Granit	2.1
Edkruste	1.7
Trockener Boden	0.14

Tabelle E.15: Wärmeleitfähigkeiten. Für mehr Daten vergleiche Tabelle E.18 auf Seite 324.

Heizen und der Boden

Hierzu kann man eine interessante Berechnung anstellen. Stellen Sie sich vor, sie hätten solarthermische Wassererwärmung auf dem Dach und würden immer dann, wenn das Wasser über 50°C erhitzt wird, dieses durch einen großen Felsen unter Ihrem Haus pumpen. Kommt nun ein nasskalter grauer Monat, könnten Sie die Wärme im Felsen verwenden, um Ihr Haus zu heizen. Wie groß müsste der 50°C -Felsen sein, damit er genug Energie hätte, um Ihr Haus einen Monat lang zu heizen? Nehmen wir an, wir benötigten 24 kWh pro Tag für 30 Tage und das Haus wäre bei 16°C . Die Wärmekapazität von Granit ist $0,195 \cdot 4.200 \text{ J/kg/K} = 820 \text{ J/kg/K}$. Die erforderliche Masse Granit ist

$$\begin{aligned} \text{Masse} &= \frac{\text{Energie}}{\text{Wärmekapazität} \times \text{Temperaturdifferenz}} \\ &= \frac{24 \times 30 \times 3,6 \text{ MJ}}{(820 \text{ J/kg/}^\circ\text{C})(50^\circ\text{C} - 16^\circ\text{C})} \\ &= 100.000 \text{ kg,} \end{aligned}$$

100 Tonnen, was einem Quader der Größe $6\text{m} \times 6\text{m} \times 1\text{m}$ entspricht.

Erdspeicherung ohne Wände

OK, wir haben die Größe eines nutzbaren Erdspeichers herausgefunden. Aber ist es schwierig, die Wärme darin zu halten? Müssen wir den Felsquader mit einer besonderen Isolierung umgeben? Es zeigt sich, dass der Erdboden selbst ein relativ guter Isolator ist. Eine kleine Spitze Wärme, die in ein Loch eingebracht wird, breitet sich aus gemäß

$$\frac{1}{\sqrt{4\pi\kappa t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4(\kappa/(C\rho))t}\right)$$

wobei κ die Leitfähigkeit des Bodens, C seine Wärmekapazität und ρ seine Dichte bezeichnet. Dies beschreibt eine Glockenkurve mit der Breite

$$\sqrt{2 \frac{\kappa}{C\rho} t};$$

nach sechs Monaten beispielsweise ($t = 1,6 \times 10^7$ s) ist mit den Daten für Granit ($C = 0,82$ kJ/kg/K, $\rho = 2500$ kg/m³, $\kappa = 2,1$ W/m/K) die Breite **6 m**. Mit den Daten für Wasser ($C = 4.2$ kJ/kg/K, $\rho = 1000$ kg/m³, $\kappa = 0,6$ W/m/K) ist die Breite 2 m. Ist die Speicherregion größer als 20m x 20m x 20m ist also die meiste gespeicherte Wärme nach sechs Monaten noch da (weil 20 m signifikant größer als 6 m bzw. 2 m sind).

Grenzen der Erdwärmepumpen

Die geringe Wärmeleitfähigkeit des Erdbodens ist ein zweischneidiges Schwert. Dank dieser geringen Leitfähigkeit hält der Boden die Wärme gut für eine längere Zeit. Andererseits bedeutet geringe Leitfähigkeit, dass es nicht einfach ist, Wärme schnell in den und aus dem Erdboden zu pumpen. Sehen wir uns an, wie die Leitfähigkeit den Einsatz von Erdwärmepumpen limitiert.

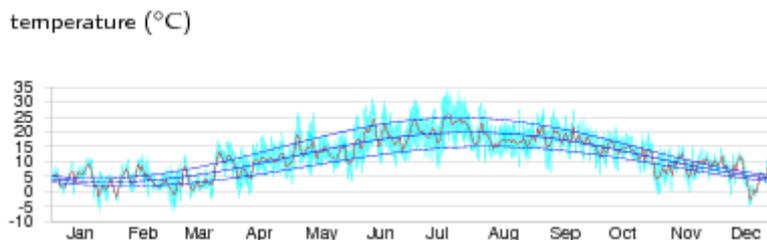


Fig.E.16: Die Temperaturkurve von Cambridge und ein Fit, der die Temperatur als Überlagerung einer jährlichen Sinusschwankung zwischen 3°C und 20°C und einer täglichen Sinusschwankung mit bis zu 11,3°C Amplitude annähert. Die mittlere Temperatur ist 11,5°C.

Betrachten wir eine Nachbarschaft mit ziemlich hoher Bevölkerungsdichte. Kann jeder Erdwärmepumpen betreiben, ohne aktive Rückführung im Sommer (wie auf Seite 169 beschrieben)? Die Befürchtung ist, dass wir, wenn wir alle zugleich Wärme aus dem Boden saugen, diesen zu Eis gefrieren könnten. Ich werde mich dieser Frage mit zwei Berechnungen nähern. Zuerst bestimme ich den natürlichen Wärmefluss in den und aus dem Boden im Sommer und im Winter. Ist der Wärmefluss, den wir im Winter aus dem Boden saugen wollen, signifikant höher als der natürliche Fluss, dann wissen wir, dass unser Saugen die Bodentemperatur signifikant verändern wird und deshalb wohl nicht funktionieren kann. Für diese Berechnung nehme ich an, dass sich die Bodentemperatur durch die verschiedenen Einflüsse von Sonne, Wolken und Nachthimmel langsam im Jahresverlauf auf und ab bewegt (Fig.E.16).

Die Auswirkungen externer Temperaturveränderung

Um die Wirkung der Außentemperatur in den Boden und die verschiedenen Energieflüsse in den und aus dem Boden zu bestimmen, braucht man etwas höhere Mathematik, die ich in Box E.19 ans Ende dieses Kapitels ausgelagert habe.

Das Ergebnis dieser Berechnung ist ein hübsches Diagramm (Fig.E.17), das zeigt, wie die Temperatur in jeder Tiefe verläuft. Es ist für jedes Bodenmaterial anwendbar, da die Materialeigenschaften allein in der charakteristischen Länge z_0 (Gleichung E.7)) liegen, die von der Leitfähigkeit κ und der Wärmekapazität C_v sowie von der Frequenz ω der Temperaturänderung abhängt. (Wir können tägliche und jahreszeitliche Variationen gleichermaßen mit dieser Theorie beschreiben.) In der Tiefe $2z_0$ beträgt die Temperaturschwankung noch ein Siebtel von der an der Oberfläche, und ist um etwa eine

Drittelperiode verzögert. In der Tiefe $3z_0$ beträgt die Schwankung noch ein Zwanzigstel und ist um eine halbe Periode verzögert.

Im Falle der täglichen Schwankungen in Granit beträgt die charakteristische Länge $z_0 = 0,16$ m. (Also sind 32 cm Stein die Dicke, die man braucht, um tägliche Temperaturschwankungen abzuschirmen.) Für die jahreszeitlichen Schwankungen in Granit ist die charakteristische Länge $z_0 = 3$ m.

Konzentrieren wir uns auf jährliche Schwankungen und betrachten wir einige andere Materialien. Charakteristische Längen für verschiedene Materialien stehen in der dritten Spalte von Tabelle E.18. Für feuchte Sandböden oder für Beton sind die charakteristischen Längen vergleichbar mit der von Granit – etwa 2,6 m. In trockenen oder torfigen Böden ist die charakteristische Länge z_0 kürzer – etwa 1,3 m. Das ist vielleicht eine gute Nachricht, denn sie bedeutet, dass Sie dort nicht so tief graben müssen, um Boden mit konstanter Temperatur zu finden. Doch es ist auch eine schlechte Nachricht: Die natürlichen Flüsse sind in trockenen Böden ebenfalls geringer.

Der natürliche Fluss variiert übers Jahr und hat einen Spitzenwert (Gleichung (E.9)), der um so kleiner ist, je kleiner die Leitfähigkeit ist.

Im Falle von Granit ist der maximale Fluss 8 W/m^2 . Für trockene Böden liegt der maximale Fluss zwischen $0,7 \text{ W/m}^2$ und $2,3 \text{ W/m}^2$, für feuchte Böden zwischen 2 W/m^2 und 8 W/m^2 .

Was bedeutet das? Ich schlage vor, wir nehmen eine Fluss in der Mitte dieser Zahlen an, 5 W/m^2 , als eine praktische Kenngröße, um eine Abschätzung zu erhalten, welche Leistung wir mit einer Erdwärmepumpe pro Flächeneinheit aus dem Boden pumpen können. Saugen wir einen Fluss signifikant kleiner als diese 5 W/m^2 , wird die Störung, die wir gegenüber dem natürlichen Fluss bewirken, klein sein. Saugen wir dagegen mit einem Fluss größer als 5 W/m^2 , müssen wir damit rechnen, dass wir die Bodentemperatur signifikant vom natürlichen Wert wegschieben und solche Flüsse gar nicht erreicht werden können.

Die Bevölkerungsdichte einer typischen englischen Vorstadtsiedlung entspricht etwa 160 m^2 pro Person (Doppelhaus-Reihen mit 400 m^2 pro Haus, einschließlich Straßen und Höfen. Bei dieser Siedlungsdichte können wir die Größenordnung für die Schranke der Wärmepumpen-Leistung ausrechnen:

$$5 \text{ W/m}^2 \times 160 \text{ m}^2 = 800 \text{ W} = 19 \text{ kWh/d pro Person.}$$

Das ist ungemütlich nahe an der Leistung, die wir im Winter gerne pumpen würden: Es ist anzunehmen, dass unser Spitzenbedarf im Winter für Warmluft und Warmwasser bei einem alten Haus wie dem meinen gut 40 kWh/d pro Person erreichen kann.

Diese Berechnung legt nahe, dass in einer städtischen Siedlung *nicht jeder eine Erdwärmepumpe benutzen kann*, außer wenn man im Sommer darauf achtet, aktiv Wärme in den Boden zurückzupumpen.

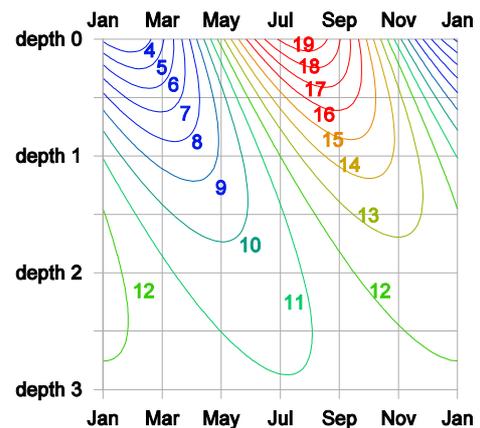


Fig.E.17: Temperatur (in °C) vs. Tiefe und Zeit. Die Tiefe ist in Vielfachen der charakteristischen Länge z_0 angegeben, die für Granit 3 m beträgt. In der „Tiefe 2“ (6 m) ist die Temperatur immer bei 11 oder 12 °C. Bei „Tiefe 1“ taumelt sie noch zwischen 8 und 15 °C.

Lassen Sie mich noch eine zweite Rechnung anstellen und ableiten, welche Leistung man stetig mit einer Rohrschleife in einer Tiefe $h = 2\text{ m}$ saugen kann. Wir erlauben uns, die Temperatur bei der Rohrschleife um $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ unter die mittlere Bodentemperatur an der Oberfläche abfallen zu lassen und nehmen eine konstante Bodentemperatur an der Oberfläche an. Dann können wir den Wärmefluss von der Oberfläche berechnen. Bei einer angenommenen Leitfähigkeit von $1,2\text{ W/m/K}$ (typisch für feuchten Lehmboden)

$$\text{Fluss} = \kappa \times \frac{\Delta T}{h} = 3\text{ W/m}^2.$$

Wenn wir wieder wie oben eine Bevölkerungsdichte von 160 m^2 pro Person annehmen, ist das Maximum der Wärmeleistung einer Erdwärmepumpe, wenn jeder in der Nachbarschaft eine hat, 480 W oder 12 kWh/d pro Person.

Wieder kommen wir also zu dem Ergebnis, dass in einer typischen Siedlung mit schlecht isolierten Häusern wie dem meinen *nicht jeder ein Erdwärmepumpe betreiben kann*, außer wenn man im Sommer darauf achtet, aktiv Wärme in den Boden zurückzupumpen. In Großstädten mit noch höherer Bevölkerungsdichte sind Erdwärmepumpen wahrscheinlich gar nicht einsetzbar.

Deshalb rate ich zu Luftwärmepumpen als die beste Heizmöglichkeit für die meisten Leute.

	Wärme- Leitfähigkeit κ (W/m/K)	Wärme- Kapazität C_V (MJ/m ³ /K)	Charakt. Länge z_0 (m)	Fluss $A\sqrt{C_V\kappa\omega}$ (W/m ²)
Luft	0.02	0.0012		
Wasser	0.57	4.18	1.2	5.7
Granit	2.1	2.3	3.0	8.1
Beton	1.28	1.94	2.6	5.8
<i>Sandboden</i>				
trocken	0.30	1.28	1.5	2.3
50% feucht	1.80	2.12	2.9	7.2
100% feucht	2.20	2.96	2.7	9.5
<i>Lehmboden</i>				
trocken	0.25	1.42	1.3	2.2
50% feucht	1.18	2.25	2.3	6.0
100% feucht	1.58	3.10	2.3	8.2
<i>Torfboden</i>				
trocken	0.06	0.58	1.0	0.7
50% feucht	0.29	2.31	1.1	3.0
100% feucht	0.50	4.02	1.1	5.3

Tabelle E.18: Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität verschiedener Materialien und Böden, die daraus abgeleitete charakteristische Länge

$z_0 = \sqrt{\frac{2\kappa}{C_V\omega}}$ und der maximale Fluss $A\sqrt{C_V\kappa\omega}$ für jährliche Temperaturschwankungen mit einer Amplitude von $8,3^\circ\text{C}$. Die Sand- und Lehmböden haben eine Porosität von 0,4; Torfboden hat die Porosität 0,8.

Thermische Masse

Hilft eine Erhöhung der thermischen Masse eines Gebäudes, die Heiz- und Kühlkosten zu verringern? Das kommt darauf an. Die Außentemperatur kann im Tagesverlauf um etwa 10°C schwanken. Ein Gebäude mit großer thermischer Masse (etwa mit dicken Steinwänden) wird diese Schwankungen auf natürliche Weise ausgleichen und ohne Heizung oder Kühlung seine Innentemperatur etwa auf der mittleren Außentemperatur halten. Solche Gebäude benötigen in England über viele Monate weder Kühlung noch Heizung. Im Gegensatz dazu könnte ein schlecht isoliertes

Haus geringer thermischer Masse tagsüber als zu warm und nachts als zu kalt empfunden werden, was zu größerem Heiz- und Kühlaufwand führt.

Doch ist große thermische Masse nicht immer ein Vorteil. Ist ein Zimmer im Winter nur für wenige Stunden pro Tag genutzt (etwa ein Leseraum), ist die erforderliche Energie, um den Raum auf angenehme Temperatur zu bringen um so größer, je größer auch seine thermische Masse ist. Die zusätzlich investierte Wärme wird länger in einem thermisch massiven Raum gehalten, doch wenn keiner da ist, der sich darüber freut, ist diese Energie vergeudet. Im Falle unregelmäßig benutzter Räume macht es Sinn, eine Bauweise mit geringer thermischer Masse anzustreben und die geringe Masse bei Bedarf schnell aufzuheizen.

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

323 **Tabelle E.18** Quelle: Bonan (2002),
www.hukseflux.com/thermalScience/thermalConductivity.html

Wenn wir annehmen, dass der Boden aus festem, homogenem Material mit Leitfähigkeit κ und Wärmekapazität C_V besteht, dann folgt die Temperatur in Tiefe z unter der Oberfläche, zur Zeit t , der anstehenden Temperatur an der Oberfläche entsprechend der Diffusionsgleichung

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \frac{\kappa}{C_V} \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2}. \quad (\text{E.4})$$

Liegt an der Oberfläche $z = 0$ ein sinusförmiger Temperaturverlauf mit der Frequenz ω und der Amplitude A vor,

$$T(0,t) = T_{\text{Oberfläche}}(t) = T_{\text{mittel}} + A \cos(\omega t), \quad (\text{E.5})$$

dann ist die resultierende Temperatur in der Tiefe z zur Zeit t eine abfallende und oszillierende Funktion

$$T(z,t) = T_{\text{mittel}} + A e^{-z/z_0} \cos(\omega t - z/z_0), \quad (\text{E.6})$$

wobei z_0 eine charakteristische Länge sowohl für den Abfall als auch für die Oszillation ist

$$z_0 = \sqrt{\frac{2\kappa}{C_V \omega}}. \quad (\text{E.7})$$

Der Wärmefluss (die Leistung pro Einheitsfläche) in der Tiefe z ist

$$\kappa \frac{\partial T}{\partial z} = \kappa \frac{A}{z_0} \sqrt{2} e^{-z/z_0} \sin(\omega t - z/z_0 - \pi/4). \quad (\text{E.8})$$

Beispielsweise ist an der Oberfläche der maximale Fluss

$$\kappa \frac{A}{z_0} \sqrt{2} = A \sqrt{C_V \kappa \omega}. \quad (\text{E.9})$$

Box E.19: Herleitung des natürlichen Wärmeflusses verursacht durch sinusförmige Temperaturschwankungen.

Anhang F: Wellen II

Die Physik von Wellen in tiefem Wasser

Wellen enthalten Energie in zwei Formen: potentielle Energie und kinetische Energie. Potentielle Energie ist die Energie, die benötigt ist, um das Wasser vom Wellental auf den Wellenkamm zu befördern. Die kinetische Energie ist mit der Bewegung des Wassers verknüpft.

Manche Leute denken, dass, wenn sich ein Wellenkamm mit 50 km/h über das Meer bewegt, auch das Wasser mit 50 km/h in dieselbe Richtung strömen muss. Doch das ist nicht der Fall. Es ist wie bei einer LaOla-Welle. Wenn die Welle um das Stadion läuft, laufen deswegen nicht alle beteiligten Leute im Stadion herum, sie hopsen nur ein wenig auf und ab. Die Bewegung eines Stück Wassers im Ozean ist ähnlich: Wenn man ein Stück Seegrass beobachtet, das im Wasser schwebt während eine Welle durchläuft, wird man sehen, dass es sich ein Stück auf und ab bewegt, und auch ein Stück hin und her in Laufrichtung der Welle – der exakte Effekt könnte in einer LaOla-Welle erzeugt werden, wenn die Leute sich wie ein Fensterputzer bewegen und ein großes Stück Glas in kreisförmiger Bewegung putzen würden. Die Welle hat potentielle Energie wegen der Erhöhung der Käme über die Wellentäler. Und sie hat kinetische Energie wegen der kleinen kreisförmig schwingenden Bewegung des Wassers.

Unsere grobe Abschätzung der Energie, die in Ozeanwellen steckt, benötigt drei Inputs: Eine Abschätzung der Schwingungsperiode T der Wellen (die Zeit zwischen den Kämmen), eine Abschätzung der Höhe h der Wellen und eine Formel, die uns gestattet, die Geschwindigkeit v der Welle aus ihrer Periode zu bestimmen. Die Wellenlänge λ und die Periode der Welle (der Abstand bzw. die Zeit zwischen den Wellenkämmen) hängen beide von der Geschwindigkeit des Windes ab, der die Wellen erzeugt, gemäß Fig.F.1. Die Höhe h der Welle hängt nicht von der Windgeschwindigkeit ab, sondern davon, wie lange der Wind die Wasseroberfläche überstreicht.

Sie können die Periode von Ozeanwellen abschätzen, wenn Sie sich an den Zeitabstand zwischen zwei nacheinander ankommenden Wellen am Strand erinnern. Ist 10 Sekunden vernünftig? Für die Höhe der Ozeanwellen lassen Sie uns eine Amplitude von 1 m annehmen, was einen Abstand von 2 m zwischen Tal und Kamm bedeutet. In Wellen dieser Höhe könnte ein Mann in einem kleinen Boot nicht über den Kamm der nächsten Welle sehen, wenn er im Tal ist; ich denke, das ist über dem Durchschnitt, doch wir können diesen Wert ja

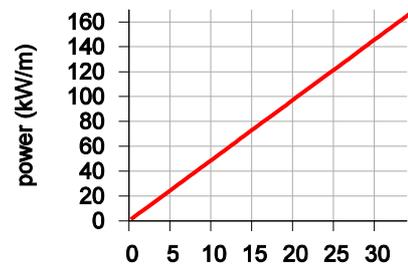
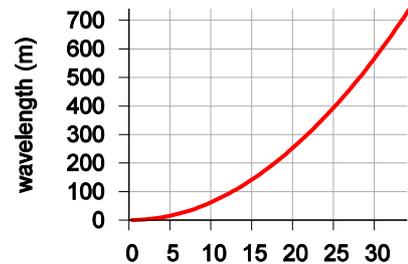
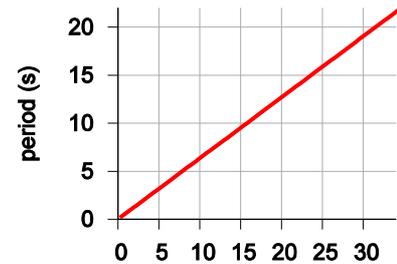
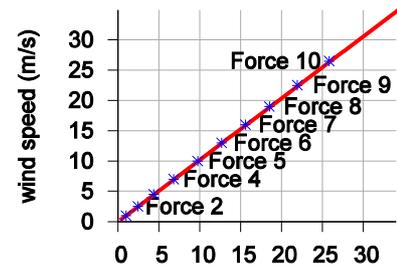


Fig.F.1: Fakten zu Wellen im tiefen Wasser. In allen vier Diagrammen ist die horizontale Achse die Wellengeschwindigkeit in m/s. Die einzelnen Grafiken zeigen (von oben nach unten): Windgeschwindigkeit (in m/s), die erforderlich ist um Wellen dieser Geschwindigkeit zu erzeugen; Periode der Welle (in Sekunden); Wellenlänge (in m) und Leistungsdichte (in kW/m) einer Welle mit 1 m Amplitude.

revidieren, wenn wir es für erforderlich halten. Die Geschwindigkeit von Wellen in tiefem Wasser ist mit der Zeit T zwischen zwei Kämmen verknüpft durch die Formel (siehe Faber (1995), S.170):

$$v = \frac{gT}{2\pi},$$

worin g die Erdbeschleunigung ($9,8 \text{ m/s}^2$) bezeichnet. Ist beispielsweise $T = 10 \text{ s}$, folgt $v = 16 \text{ m/s}$. Die Wellenlänge einer solchen Welle – Der Abstand zwischen den Kämmen – ist $\lambda = vT = gT^2/2\pi = 160 \text{ m}$.

Für eine Welle der Wellenlänge λ und der Periode T ist bei einer Kammhöhe und Tal-Tiefe von je 1 m die potentielle Energie, die pro Zeiteinheit vorbeiläuft, pro Längeneinheit

$$P_{pot} \approx m^* gh'/T, \quad (\text{F.1})$$

Wobei m^* die Masse pro Längeneinheit ist, die etwa $\frac{1}{2} \rho h(\lambda/2)$ (bei Näherung der schraffierten Wellenfläche aus Fig.F.2 durch die Fläche eines Dreiecks), und h' die Änderung der Schwerpunktshöhe des durch die Welle angehobenen Wasser-Anteils, die näherungsweise gleich h ist. Also gilt

$$P_{pot} \approx \frac{1}{2} \rho h \frac{\lambda}{2} gh/T. \quad (\text{F.2})$$

(Um die potentielle Energie korrekt zu ermitteln, hätte man hier integrieren müssen, was dasselbe Ergebnis geliefert hätte). Nun ist λ/T gerade die Geschwindigkeit v , mit der die Welle sich fortbewegt, also

$$P_{pot} \approx \frac{1}{4} \rho gh^2 v. \quad (\text{F.3})$$

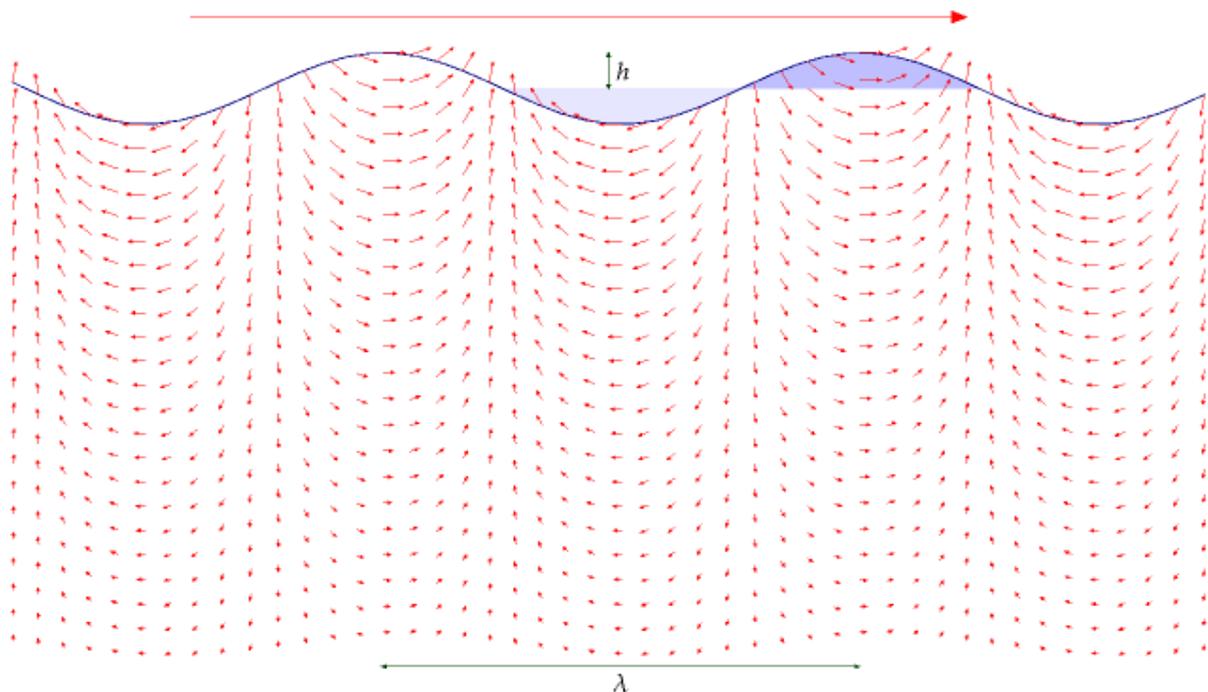


Fig.F.2: Wellen beinhalten Energie in zwei Formen: potentielle Energie durch das Anheben von Wasser aus dem hell schraffierten Talbereich in den dunkel schraffierten Kamm; und kinetische Energie durch Bewegung von Wasser bis zu einigen Wellenlängen unter der Oberfläche – die Geschwindigkeiten sind durch kleine rote Pfeile angedeutet. Die Geschwindigkeit der Welle selbst, ist durch den viel größeren Pfeil oben repräsentiert.

Wellen haben neben der potentiellen auch kinetische Energie und interessanterweise sind beide genau gleich, auch wenn ich die Herleitung hier nicht wiedergebe. Die Gesamtleistung ist also exakt das Doppelte der berechneten Leistung aus der potentiellen Energie.

$$P_{ges} \approx \frac{1}{2} \rho g h^2 v . \quad (F.4)$$

Allerdings ist eine Sache falsch an diesem Ergebnis: Es ist zu groß, weil wir eine wesentliche Eigenschaft dispersiver Wellen vernachlässigt haben: Die Energie in der Welle läuft nicht mit derselben Geschwindigkeit wie die Wellenkämme, sondern breitet sich mit einer Geschwindigkeit, die Gruppengeschwindigkeit bezeichnet wird, aus. Für Wellen im tiefen Wasser ist die Gruppengeschwindigkeit halb so groß wie die Geschwindigkeit v . Sie können beobachten, dass die Energie sich langsamer fortbewegt als die Wellenkämme, wenn Sie einen Kieselstein in einen Teich werfen und sorgfältig die Wellen beobachten. Das bedeutet, Gleichung (F.4) ist falsch, wir müssen sie halbieren. Die korrekte Leistung pro Einheitslänge einer Wellenfront ist

$$P_{ges} = \frac{1}{4} \rho g h^2 v . \quad (F.5)$$

Setzen wir nun $v = 16$ m/s und $h = 1$ m ein, finden wir

$$P_{ges} = \frac{1}{4} \rho g h^2 v = 40 \text{ kW/m} . \quad (F.6)$$

Diese grobe Abschätzung stimmt gut mit Messungen im Atlantik überein (Mollison, 1986). (Siehe Seite 85.)

Die Verluste wegen der Viskosität sind minimal. Eine Welle mit 9 Sekunden Periode müsste dreimal um den Erdball laufen, um 10% ihrer Amplitude zu verlieren.

Praktische Wellenkraftwerke

Anlagen für tiefes Wasser

Wie effektiv sind reale Systeme beim Umwandeln der Leistung aus den Wellen? Die „Enten“ von Stephen Salter verdienen ihren Namen: Eine Reihe Enten mit je 16 m Durchmesser fressen Atlantikwellen auf mit einer mittleren Leistung von 45 kW/m und könnten 19 kW/m liefern, einschließlich Übertragung nach Zentral-Schottland (Mollison, 1986).

Die „Pelamis“ der Ocean Power Delivery hat Salters „Enten“ mittlerweile als führendes Hochsee-Wellenkraftwerk abgelöst. Jedes dieser schlangenförmigen Gebilde ist 130 m lang und besteht aus einer Kette mit vier Segmenten, jedes 3,5 m im Durchmesser. Der maximale Leistungs-Output ist 750 kW. Die Pelamis' sind dafür gedacht, in Tiefen von 50 m vertäut zu werden. In einer Wellenfarm könnten 39 Geräte in drei Reihen in Haupt-Wellenrichtung ausgerichtet werden. Sie würden dann eine Ozeanfläche von etwa 400 m x 2,5 km (1 km²) belegen. Der effektive Wirkungsquerschnitt einer einzelnen Pelamis ist 7 m (d.h. für eine gute Welle extrahiert sie 100% der Energie, die 7 m durchströmt). Die Firma behauptet, dass solche Wellenfarmen 10 kW/m liefern könnten.

Anlagen für seichtes Wasser

Um die 70% der Energie in Ozeanwellen geht durch Bodenreibung verloren, wenn die Tiefe von 100 m auf 15 m abnimmt. Die mittlere Wellenenergie pro Längeneinheit Küstenlinie in seichtem Wasser ist also auf etwa 12% reduziert. Die „Auster“, entwickelt von Queen’s University Belfast and Aquamarine Power Ltd [www.aquamarinepower.com], ist eine bodenmontierte Klappe, etwa 12 m hoch, die für etwa 12 m tiefes Wasser gedacht ist, an Stellen, wo die mittlere auftretende Wellenkraft größer als 16 kW/m ist. Ihre Maximalleistung ist 600 kW. Ein Einzelgerät könnte 270 kW bei einer Wellenhöhe von 3,5 m liefern. Nach Voraussage sollte eine „Auster“ mehr Leistung pro Maschinenmasse liefern als eine Pelamis.

„Austern“ könnten auch benutzt werden, um direkt Meerwasserentsalzung durch reverse Osmose zu betreiben. „Der Frischwasser-Ausstoß einer „Auster“-Entsalzungsanlage liegt zwischen 2000 und 6000 m³ Spitze pro Tag.“ Diese Produktion entspricht, wenn man die Leistungsdaten der Anlage von Jersey zu Grunde legt (die 8 kWh pro m³ benötigt), einer elektrischen Leistung von 600-2000 kW.

Anhang G: Gezeiten II

Leistungsdichte von Gezeitenbecken

Um die Leistung eines künstlichen Gezeitenbeckens abzuschätzen, nehmen wir an, es würde sich schnell bei Flut füllen und bei Ebbe auch schnell wieder leeren. Energieerzeugung findet in beiden Flussrichtungen statt, bei Ebbe und bei Flut. Die Änderung der potentiellen Energie des Wassers alle sechs Stunden ist mgh , wobei h die Höhenänderung des Schwerpunkts des Wassers ist, die die Hälfte des Tidenhubs ist (der Tidenhub ist die Differenz der Wasserhöhe bei Ebbe und bei Flut, siehe Fig.G.1. Die Masse pro Flächeneinheit, die das Gezeitenbecken fasst, ist $\rho \times (2h)$, wobei ρ die Dichte des Wassers (1000 kg/m^3) bezeichnet. Die Leistung pro Flächeneinheit des Gezeitenbeckens ist damit

$$\frac{2\rho h g h}{6 \text{ Stunden}} ,$$

wenn man perfekt effiziente Generatoren annimmt. Setzt man $h = 2 \text{ m}$ (d.h. einen Tidenhub von 4 m) ein, liefert die Formel eine Leistungsdichte des Gezeitenbeckens von $3,6 \text{ W/m}^2$. Mit einem realen Generator-Wirkungsgrad von 90% erhalten wir

$$\text{Leistung pro Flächeneinheit beim Gezeitenbecken} \approx 3 \text{ W/m}^2 .$$

Um 1 GW mittlere Leistung zu generieren, benötigen wir eine Gezeitenbecken von etwa 300 km^2 . Ein kreisförmiges Becken mit 20 km Durchmesser würde das schaffen. (Zum Vergleich: Die Severnmündung hinter dem geplanten Sperrwerk fasst etwa 550 km^2 , und die Fläche in „The Wash“ ist über 400 km^2 .)

Produziert ein Gezeitenbecken nur in einer Fließrichtung Strom, erzeugt es so die Hälfte dieser Leistung. Die mittlere Leistungsdichte des Gezeitenperrwerks in La Rance, wo der mittlere Tidenhub $10,9 \text{ m}$ beträgt, lag jahrzehntelang bei $2,7 \text{ W/m}^2$ (Seite 100).

Die natürlichen Ressourcen der Gezeiten

Die Gezeiten rund um England sind echte Flutwellen. (Tsunamis, die auch manchmal „Flutwellen“ genannt werden, haben nichts mit Ebbe und Flut zu tun: Sie werden durch unterseeische Erdbeben oder Seebeben ausgelöst.) Die Position des Flut-Hochwassers (der Kamm der Flutwelle) bewegt sich viel schneller als der Gezeitenfluss – um die 100 Seemeilen pro Stunde etwa, dagegen bewegt sich das Wasser lediglich mit etwa einer Seemeile pro Stunde.

Die Energie, die wir aus diesen Gezeiten mit Becken oder Gezeitenfarmen gewinnen können, kann niemals mehr sein als die Energie der atlantischen Gezeitenwellen. Wir können die Energie dieser großen atlantischen Gezeitenwellen auf dieselbe Weise bestimmen wie bei normalen, windgenerierten Wellen. Der nächste Abschnitt beschreibt ein Standardmodell für die Energie in einer ankommenden Welle bei einer Wassertiefe d , die im Vergleich zur Wellenlänge seicht ist (Fig.G.2). Die Leistung pro Einheitslänge Wellenkamm einer Gezeitenwelle in seichtem Wasser ist

$$\rho g^{3/2} \sqrt{d h^2 / 2} . \tag{G.1}$$

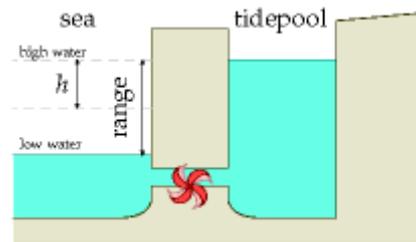


Fig.G.1: Ein Gezeitenbecken im Querschnitt. Das Becken wurde bei Flut gefüllt, im Bild dargestellt ist Ebbe. Wir lassen das Wasser aus dem Becken und durch einen Stromgenerator fließen und verwandeln so die potentielle Energie in Elektrizität.

Tabelle G.3 zeigt die Leistung pro Einheitslänge für einige plausible Werte. Bei $d = 100$ m und $h = 1$ oder 2 m liegt die Leistung pro Einheitslänge Wellenfront bei 150 kW/m bzw. 600 kW/m. Das sind beeindruckende Zahlen im Vergleich mit der natürlichen Leistung einer normalen Atlantik-Hochseewelle von 40 kW/m (Anhang F). Atlantikwellen und atlantische Gezeiten haben ähnliche Amplituden (etwa 1 m), doch die natürliche Leistung in den Gezeiten ist etwa 10mal höher als bei normalen windgenerierten Wellen.

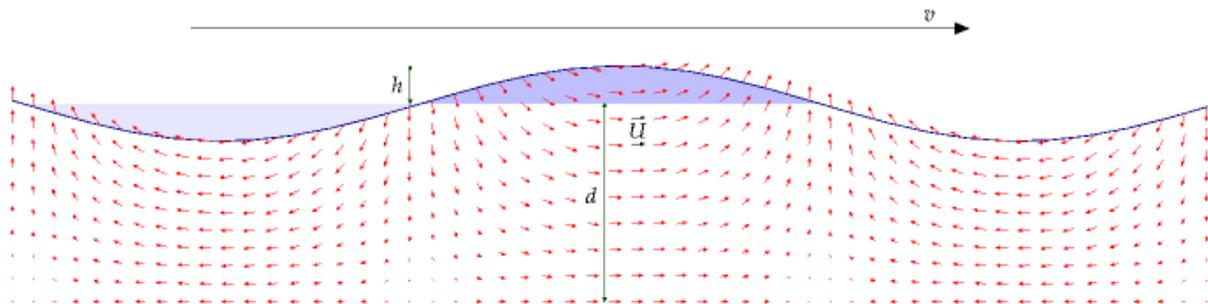


Fig.G.2: Eine Welle im seichten Wasser. Wie die Welle im tiefen Wasser trägt sie Energie in zwei Formen: Potentielle Energie in Verbindung mit dem Hochheben des Wassers aus dem hellerschraffierten Tal in den dunkel schraffierten Kamm; und kinetische Energie aus all den kleinen Bewegungen des Wassers, wie sie durch die kleinen roten Pfeile angedeutet sind. Die Geschwindigkeit der Welle, die von links nach rechts läuft, ist durch den viel größeren Pfeil oben angedeutet. Für Gezeitenwellen könnte eine typische Wassertiefe 100 m sein, die Geschwindigkeit des Kamms 30 m/s, die vertikale Amplitude an der Oberfläche 1 oder 2 m, und die Amplitude der Wassergeschwindigkeiten 0,3 oder 0,6 m/s.

Taylor (1920) erarbeitete ein detaillierteres Modell der Gezeitenkraft, das auch wichtige Details wie die Corioliskraft (ein Effekt aus der Erdrotation), die Existenz gegenläufiger Gezeitenwellen und den direkten Effekt des Mondes auf den Energiefluss in der Irischen See berücksichtigt. Seitdem haben experimentelle Messungen und Computermodelle diese Studien von Taylor bestätigt und erweitert. Flather (1976) erstellte ein detailliertes numerisches Modell der lunaren Gezeiten, indem er das Kontinentalschelf um England in etwa 1000 quadratische Einzelzellen unterteilte. Flather schätzte die gesamte mittlere Energie, die diese Region trifft, mit 215 GW ab. Nach diesem Modell fließen 180 GW in den Bereich zwischen Frankreich und Irland. Von Nordirland bis herum zu den Shetlandinseln liegt die ankommende Leistung bei 49 GW. Zwischen Shetland und Norwegen ist der Nettoverlust 5 GW. Wie in Fig.G.4 gezeigt, bestimmten Cartwright et al. (1980) die mittleren Leistungsflüsse experimentell zu 60 GW zwischen Malin Head (Irland) und Florø (Norwegen) und zu 190 GW zwischen Valentia (Irland) und der bretonischen Küste nahe Ouessant. Die Leistung, die in die Irische See fließt, bestimmten sie zu 45 GW, und den Leistungsfluss in die Nordsee durch die Straße von Dover zu 16,7 GW.

h (m)	$\rho g^{3/2} \sqrt{d h^2 / 2}$ (kW/m)
0.9	125
1.0	155
1.2	220
1.5	345
1.75	470
2.0	600
2.25	780

Tabelle G.3: Leistungsflüsse (Leistung pro Einheitslänge Wellenfront) für Wassertiefe 100 m.

Die Leistung von Tidenwellen

Dieser Abschnitt, der gefahrlos übersprungen werden kann, behandelt weitere Details hinter der Formel für Gezeitenkraft, die im letzten Abschnitt verwendet wurde. Ich möchte in dieses Modell der Gezeitenkraft tiefer einsteigen, weil die meisten offiziellen Abschätzungen englischer Gezeitenressourcen auf einem Modell beruhen, das ich für fehlerhaft halte.

Fig.G.2. zeigt ein Modell für Gezeitenwellen, die durch relativ seichtes Wasser laufen. Das Modell ist beispielsweise für Flutwellen gedacht, die den Kanal von England oder die Nordsee entlang laufen. Es ist wichtig, zwischen der Geschwindigkeit U , mit der das Wasser selbst fließt (etwa eine Seemeile pro Stunde), und der Geschwindigkeit v , mit der die Flutwelle läuft (etwa 100 oder 200 Seemeilen pro Stunden), zu unterscheiden.

Die Wassertiefe ist d . Kämme und Täler kommen von links, erzeugt von den 12-stündlichen Ozeantiden. Sie bewegen sich mit der Geschwindigkeit

$$v = \sqrt{gd} . \quad (\text{G.2})$$

Wir nehmen an, dass die Wellenlänge viel größer als die Wassertiefe ist, und wir vernachlässigen Details wie die Corioliskraft oder Dichteschwankungen im Wasser. Die vertikale Amplitude der Tide nennen wir h . Unter der Standard-Annahme der nahezu wirbelfreien Strömung ist die horizontale Wassergeschwindigkeit nahezu tiefenunabhängig. Diese Horizontalgeschwindigkeit U ist proportional zur Auslenkung an der Oberfläche und kann aus der Erhaltung der Masse abgeleitet werden:

$$U = vh/d . \quad (\text{G.3})$$

Mit zunehmender Tiefe nimmt die Wellengeschwindigkeit v ab (Gleichung (G.2)). Für die folgende Diskussion werde ich die Tiefe als konstant annehmen. Energie fließt von links nach rechts mit einer gewissen Rate. Wie kann diese gesamte Gezeitenleistung abgeschätzt werden? Und was ist die maximale Leistung, die extrahiert werden kann?

Ein Ansatz ist, eine Querschnittsfläche zu nehmen, den mittleren kinetischen Energiefluss durch diese Fläche abzuschätzen und dann anzunehmen, dass diese Größe die extrahierbare Leistung beinhaltet. Diese Energiefluss-Methode wurde von Black and Veatch zur Abschätzung der englischen Ressourcen verwendet. In unserem Modell können wir die Gesamtleistung auf andere Art bestimmen. Wir werden herausfinden, dass die kinetische-Energiefluss-Methode eine signifikant zu kleine Leistung ergibt.

Der Spitzenfluss an kinetischer Energie in einer Querschnittsfläche A ist

$$K_{BV} = \frac{1}{2} \rho A U^3 , \quad (\text{G.4})$$

(Das ist die Formel für den Fluss kinetischer Energie, die wir auch in Anhang B verwendeten.)

Die gesamte auftretende Leistung ist nicht gleich dem kinetischen Energiefluss. Die gesamte auftretende Leistung in einer Welle ist eine Standard-Lehrbuchrechnung; eine Art sie zu ermitteln ist, die Energie in einer ganzen Welle zu bestimmen und sie dann durch

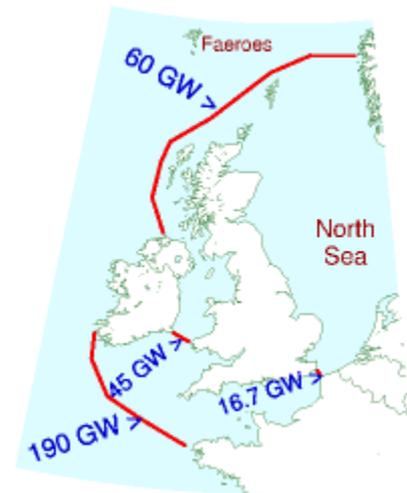


Fig.G.4: Mittlere Gezeitenleistung nach Messungen von Cartwright et al. (1980)

die Periode zu teilen. Die Gesamtenergie einer Welle ist die Summe aus ihrer potentiellen und ihrer kinetischen Energie. Kinetische und potentielle Energie sind in der Tat gleich groß (Das ist eine Standardeigenschaft fast aller schwingenden Systeme, seien es Massen an Federn oder Kinder auf Schaukeln.) Um die Gesamtenergie zu bestimmen reicht es also aus, einen dieser beiden Anteile - die potentielle Energie einer Wellenlänge oder die kinetische Energie einer Wellenlänge - zu berechnen und dann zu verdoppeln. Die potentielle Energie einer Welle (pro Wellenlänge und pro Einheitslänge einer Wellenfront) kann durch Integration bestimmt werden zu

$$\frac{1}{4} \rho g h^2 \lambda . \quad (\text{G.5})$$

Durch Verdoppeln und Teilen durch die Periode erhält man daraus die tatsächliche Gesamtleistung der Modellwelle (Tide im seichten Wasser)

$$\text{Leistung} = \frac{1}{2} (\rho g h^2 \lambda) \times w / T = \frac{1}{2} \rho g h^2 v \times w , \quad (\text{G.6})$$

wobei w die Breite der Wellenfront ist. Mit der Substitution $v = \sqrt{gd}$ folgt

$$\text{Leistung} = \rho g h^2 \sqrt{gd} \times w / 2 = \rho g^{3/2} \sqrt{d} h^2 \times w / 2 . \quad (\text{G.7})$$

Vergleichen wir diese Leistung mit dem Fluss der kinetischen Energie K_{BV} . Offensichtlich skalieren beide Ausdrücke unterschiedlich mit der Amplitude h . Benutzen wir die Umrechnungsformel für die Amplitude, Gleichung (G.3), die Kammgeschwindigkeit Gl. (G.2) und $A = wd$, so können wir den Fluss der kinetischen Energie umschreiben zu

$$K_{BV} = \frac{1}{2} \rho A U^3 = \frac{1}{2} \rho w d (v h / d)^3 = \rho (g^{3/2} / \sqrt{d}) h^3 \times w / 2 . \quad (\text{G.8})$$

Die kinetische-Energiefluss-Methode legt also nahe, dass die Gesamtleistung der Welle mit der *dritten Potenz* der Amplitude skaliert (Gleichung (G.8)); doch die korrekte Formel zeigt, dass die Leistung mit dem *Quadrat* der Amplitude skaliert (Gleichung G.7)).

Das Verhältnis ist

$$\frac{K_{BV}}{\text{Leistung}} = \frac{\rho w (g^{3/2} / \sqrt{d}) h^3}{\rho g^{3/2} h^2 \sqrt{d} w} = \frac{h}{d} . \quad (\text{G.9})$$

Da h gewöhnlich viel kleiner als d ist (h ist etwa 1 m oder 2 m, dagegen ist d aber 100 m oder 10 m), sind Schätzungen der Leistungsressourcen auf Basis des Flusses kinetischer Energie wohl viel zu gering, jedenfalls in Fällen, wo das Modell der Tidenwelle im seichten Wasser anwendbar ist.

Darüber hinaus gehen Modelle auf Basis des Flusses von kinetischer Energie fälschlicherweise davon aus, dass die Leistung bei Springtiden (den höchsten Tiden) achtmal höher als bei Nipptiden (den niedrigsten Tiden) sei, mit einem angenommenen Amplitudenverhältnis Spring- zu Nipptide von 2:1. Doch richtig ist, dass die gesamte Leistung einer laufenden Welle mit dem Quadrat der Amplitude skaliert, woraus sich das Leistungsverhältnis einlaufender Spring- zu Nipptiden mit vier zu eins ergibt.

Effekte aus der Abstufung des Meeresbodens und der Corioliskraft

Wenn die Tiefe d schrittweise abnimmt und die Breite konstant bleibt, so dass die Reflexion und die Absorption der ankommenden Leistung minimal sind, bleibt die Leistung der Welle konstant. Das bedeutet, $\sqrt{d} h^2$ ist eine Konstante, woraus wir ableiten,

dass der Tidenhub mit der Tiefe skaliert wie $h \sim 1/d^{1/4}$. Das ist ein grobes Modell. Ein vernachlässigtes Detail ist der Corioliseffekt. Die Corioliskraft drückt die Gezeitenkämme und Täler in Laufrichtung nach rechts – beispielsweise ist im Kanal auf der französischen Seite die Flut höher und die Ebbe niedriger. Durch Vernachlässigung dieses Effektes kommt ein gewisser Fehler in die Abschätzungen.

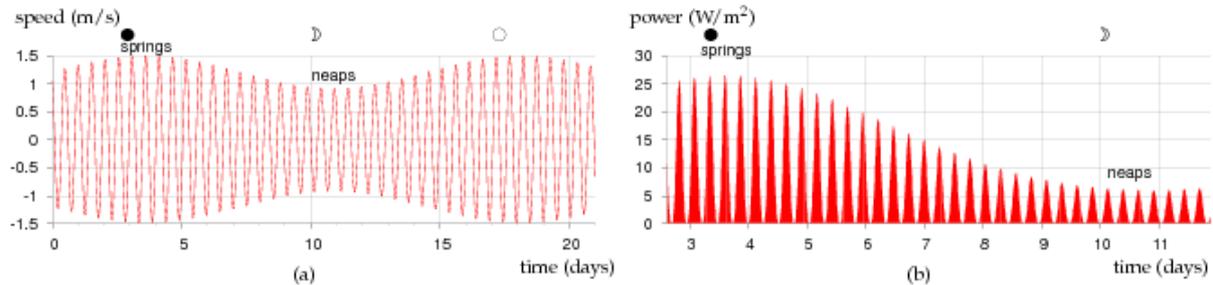


Fig.G.5: (a) Gezeitenstrom über einen Zeitraum von 21 Tagen an einer Stelle, bei der der maximale Strom bei Springtide 2,9 Knoten (1,5 m/s) und bei Nipptide 1,8 Knoten (0,9 m/s) beträgt. (b) Die Leistung pro Meeresboden-Flächeneinheit über eine Zeitspanne von neun Tagen von Spring- zu Nipptide. Die Leistung hat vier Spitzen pro Tag, mit bis zu 27 W/m². Die mittlere Leistung der Gezeitenfarm ist 6,4 W/m².

Leistungsdichte von Gezeitenstromfarmen

Stellen Sie sich vor, wir stellen Unterwasser-Windmühlen am Meeresgrund auf. Der Wasserfluss wird die Windmühlen antreiben. Weil die Dichte des Wassers etwa 1000mal größer als die der Luft ist, ist auch die Leistung 1000mal größer als bei Wind gleicher Geschwindigkeit.

Wie viel Leistung können Gezeitenfarmen extrahieren? Das hängt kritisch davon ab, ob sich die Beiträge benachbarter Gebiete addieren oder nicht. Für Wind ist diese Additivitäts-Annahme recht gut gewährleistet: So lange die Windmühlen genügend weit voneinander entfernt sind, ist die Leistung von zehn benachbarten Windfarmen die Summe der Leistungen, die jede liefert, wenn sie alleine da stünde.

Stimmt das auch für Gezeitenfarmen? Oder interagieren Unterwasser-Windmühlen mit der Leistungsentnahme der anderen auf unterschiedliche Weise? Ich glaube nicht, dass die Antwort darauf in voller Allgemeinheit bekannt ist. Wir können aber zwei alternative Annahmen treffen und Modellsituationen bestimmen, in denen jede davon zutrifft. Die Annahme „Gezeiten sind wie der Wind“ besagt, dass man Gezeitenturbinen über den gesamten Meeresgrund aufstellen kann, etwa 5 Durchmesser voneinander entfernt, und dass diese sich nicht gegenseitig stören, egal wie viele sie sind.

Die Annahme „nur eine Reihe“ besagt, dass die maximal extrahierbare Leistung einer Gegend diejenige ist, die eine quer zur Strömung angeordnete Reihe von Turbinen erzeugt. Eine Situation, in der dies zutrifft, ist ein Staudamm, wenn das Wasser aus dem Staubeereich durch eine einzige richtig dimensionierte Turbine fließt. Es gibt dann keine Möglichkeit, weitere Turbinen dahinter zu schalten. Man kann nicht 100mal mehr Leistung erzeugen, wenn man weitere 99 Turbinen stromabwärts dazunimmt. Die Power wird in der ersten extrahiert, es bleibt nichts mehr für die weiteren übrig. Die Annahme „nur eine Reihe“ ist zutreffend bei der Berechnung der extrahierbaren Leistung an einer Stelle, wo Wasser durch eine enge Verbindung zwischen einem nahezu stationären Wasser einer gegebenen Höhe in ein tiefergelegenes Becken strömt. (Dieser Fall ist in Garrett und Cummins (2005, 2007) analysiert.)

Meine persönliche Vermutung ist, dass an vielen Stellen rund um England die Annahme „Gezeiten sind wie der Wind“ eine gute Näherung darstellt. Vielleicht haben

manche Stellen die Charakteristik eines engen Durchflusses. An diesen Stellen wäre die Annahme „wie der Wind“ eine Überschätzung des Potenzials.

Nehmen wir an, dass die Regeln zur Planung einer Gezeitenfarm ähnlich denen einer Windfarm sind, und dass die Effizienz der Gezeitenmühlen vergleichbar mit der der besten Windmühlen ist, also etwa 1/2. Wir können dann die Formel für die Leistung von Windfarmen (pro Landfläche) von Seite 283 (Gl. (B.8)) übernehmen. Die Leistung pro Flächeneinheit Meeresgrund ist dann:

$$\frac{\text{Leistung pro Turbine}}{\text{Fläche pro Turbine}} = \frac{\pi}{200} \frac{1}{2} \rho U^3 . \quad (\text{G.10})$$

Tabelle G.6 zeigt die Leistung von Gezeitenfarmen bei verschiedenen Gezeitenströmen nach dieser Formel.

U (m/s) (Knoten)	Gezeitenleistung (W/m ²)
0.5	1
1	8
2	60
3	200
4	500
5	1000

Tabelle G.6: Gezeitenfarm-Leistungsdichte (in Watt pro qm Meeresboden) als Funktion der Fließgeschwindigkeit U . (1 Knoten = 1 Seemeile pro Stunde = 0,514 m/s.) Die Leistungsdichte berechnet sich nach $\frac{\pi}{200} \frac{1}{2} \rho U^3$ (Gleichung (G.10)).

Was sind typische Gezeitenströme? Tabellen beinhalten meist die Ströme in Verbindung mit dem größten Tidenhub (Springtide) und dem kleinsten Tidenhub (Nipptide). Springtiden treten kurz nach jedem Voll- oder Neumond auf, Nipptiden bei Halbmond nach dem ersten bzw. dritten Quartal des Mondzyklus. Die Leistung einer Gezeitenfarm würde über den Tag in einer voraussagbaren Weise schwanken. Fig.G.5 illustriert die Leistungsdichte einer Gezeitenfarm mit einem maximalen Gezeitenstrom von 1,5 m/s. Die mittlere Leistung dieser Farm läge bei 6,4 W/m². Es gibt viele Plätze um die britischen Inseln, wo 6 W/m² oder mehr erzielbar wären. Dieser Wert ist vergleichbar mit unsren Abschätzungen für Windfarmen (2-3 W/m²) und Solarparks (5-10 W/m²).

Wir verwenden die „Gezeiten sind wie Wind“-Theorie um die durch Gezeitenfarmen extrahierbare Leistung in vielversprechenden Regionen um die britischen Inseln abzuschätzen. Als Konsistenzcheck berechnen wir auch die gesamte Gezeitenleistung, die durch jede dieser Regionen fließt, nach der Theorie der „Leistung von Gezeitenwellen“, und stellen damit sicher, dass unsere Abschätzung für die Gezeitenfarm nicht größer als die gesamte verfügbare Leistung ausfällt. Die wichtigsten Regionen mit hohen Gezeitenströmen sind in Fig.G.7 gezeigt.

Ich schätzte die Spitzenströme für vielversprechende sechs Regionen ab mit den Daten aus „Reed’s Nautical Almanac“ (Diese Daten können leicht 30% falsch sein.) Habe ich die Flächen der einen oder anderen Region über- oder unterschätzt? Ich habe den Meeresgrund nicht untersucht – gut möglich, dass der auf die eine oder andere Weise unpassend ist, zu tief, zu seicht oder zu kompliziert zu bebauen.

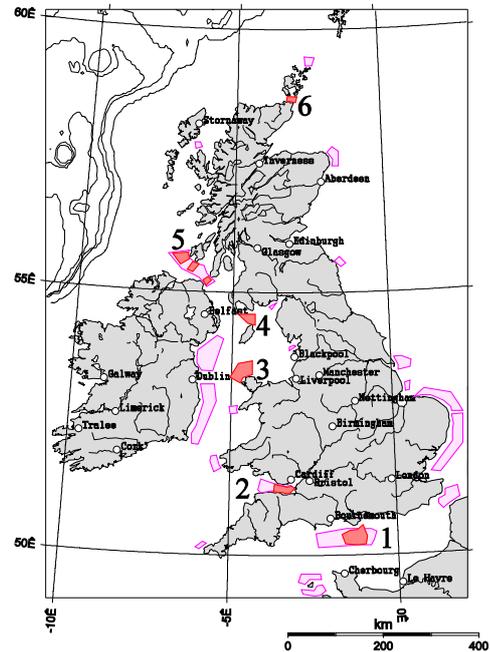
Mit diesen ganzen Unsicherheiten gelangte ich zu einer Abschätzung für die Gesamtleistung aus Gezeitenfarmen von **9 kWh/d pro Person**. Das korrespondiert mit 9% der natürlichen ankommenden Wellenleistung, die ich auf Seite 95 erwähnte, 100 kWh pro Tag pro Person. (Die Leistung von 1,1 kWh/d/p im Kanal von Bristol, Region 2, könnte in Konkurrenz stehen zum Severn-Stauwehr; das hängt davon ab, ob die

Gezeitenfarm sich zur natürlichen durch den Kanal erzeugten Reibung addiert, oder diese ersetzt.)

Fig.G.7: Regionen um die britischen Inseln, wo der Spitzen-Gezeitenfluss 1 m/s übersteigt. Die sechs dunkel schraffierten Stellen sind in Tabelle G.8 aufgeführt:

1. Kanal von England (südlich der Isle of Wight)
2. Der Kanal von Bristol
3. nördlich von Anglesey
4. nördlich des Isle of Man
5. zwischen Nordirland, Mull of Kintyre und Islay; und
6. der Pentland Firth (zwischen Orkney und Schottland) und zwischen den Orkney-Inseln.

Zudem gibt es gewaltige Strömungen um die Kanalinseln, doch stehen die nicht unter englischer Verwaltung. Weitere vielversprechende Regionen finden sich in der Nordsee, von der Themse (London) bis zu The Wash (Kings Lynn). Die Konturen zeigen Wassertiefen über 100 m. Gezeitendaten stammen aus Reed's Nautical Almanac und DTI Atlas of UK Marine Renewable Energy Resources (2004).



Region	U (Knoten)		Leist.- dichte (W/m ²)	Fläche (km ²)	mittlere Leistung (kWh/d/p)	natürl. Leistung				
	N	S				d (m)	w (km)	N (kWh/d/p)	S (kWh/d/p)	
1	1.7	3.1	7	400	1.1	30	30	2.3	7.8	
2	1.8	3.2	8	350	1.1	30	17	1.5	4.7	
3	1.3	2.3	2.9	1000	1.2	50	30	3.0	9.3	
4	1.7	3.4	9	400	1.4	30	20	1.5	6.3	
5	1.7	3.1	7	300	0.8	40	10	1.2	4.0	
6	5.0	9.0	170	50	3.5	70	10	24	78	
Gesamt						9				

Tabelle G.8: (a) Abschätzungen Gezeitenleistung unter der Annahme, dass Gezeitenfarmen wie Windfarmen sind. Die Leistungsdichte ist die mittlere Leistung pro Flächeneinheit Meeresboden. Die genannten sechs Regionen sind in Fig.G.7 eingezeichnet. N=Nipptide, S=Springtide. (b) zum Vergleich, Abschätzung der ankommenden natürlichen Leistung nach Gleichung (G.1) (Seite 331).

v (m/s)	v (Knoten)	Reibungs-Leistungsdichte (W/m ²)		Leistungsdichte Gezeitenfarm (W/m ²)
		R _f = 0.01	R _f = 0.003	
0,5	1	1,25	0,4	1
1	2	10	3	8
2	4	80	24	60
3	6	270	80	200
4	8	640	190	500
5	10	1250	373	1000

Tabelle G.9: Reibungs-Leistungsdichte $P_f \rho U^3$ (in Watt pro qm Meeresboden) als Funktion der Flussgeschwindigkeit, unter der Annahme $R_f=0,01$ oder $0,003$. Flather (1976) benutzt $R_f=0,01$ oder $0,003$; Taylor (1920) benutzt $0,002$. (1 Knoten = 1 Seemeile pro Stunde = 0,514 m/s.) Die letzte Spalte zeigt die Gezeitenfarm-Leistung wie in Tabelle G.6 abgeschätzt. Als weiterführende Literatur siehe Kowalik (2004), Sleath (1984).

Abschätzung der Gezeiten-Ressourcen aus der Bodenreibung

Eine andere Möglichkeit, die verfügbare Leistung aus den Gezeiten herzuleiten, ist auszurechnen, wie viel Leistung schon durch die Reibung am Meeresboden verloren geht. Ein Mantel aus Turbinen, knapp über dem Meeresboden montiert, könnte wie ein Bodenersatz wirken und annähernd denselben Widerstand dem vorbeifließenden Wasser entgegensetzen wie der normale Boden, ohne die Gezeitenströmungen nennenswert zu beeinflussen.

Welche Leistung geht also in der Bodenreibung verloren? Leider gibt es kein konsistentes Modell der Bodenreibung. Die Reibung hängt von der Rauigkeit des Meeresbodens ab und vom Material, aus dem er besteht – und auch wenn man diese Parameter kennt, ist nicht klar, welche Formel man benutzen sollte. Ein häufig benutztes Modell sagt, dass die Größe der mechanischen Scherspannung (Kraft pro Fläche) gegeben ist durch $R_I \rho U^2$, wobei U die mittlere Flussgeschwindigkeit ist und R_I eine dimensionslose Größe namens Scher-Reibungskoeffizient (shear friction coefficient). Wir können die verlorene Leistung abschätzen, indem wir die Scherkraft mit der Geschwindigkeit multiplizieren. Tabelle G.9 zeigt die in der Reibung verlorene Leistung bei angenommenem $R_I = 0,01$ oder $R_I = 0,003$. Liegt der Wert des Scher-Reibungskoeffizienten in diesem Bereich, erhält man für die Reibungsleistung ganz ähnliche Werte wie bei obigen Abschätzungen für die Gezeitenfarmen. Das ist eine gute Nachricht, weil es nahe legt, dass ein Wald von Unterwasser-Windmühlen, jeweils 5 Durchmesser voneinander entfernt auf dem Meeresgrund, die Strömungen nicht tiefgreifend verändern wird. Die natürliche Reibung hat bereits einen Effekt in ähnlicher Größenordnung.

Gezeitenbecken mit Pumpen

„Der Pump-Trick“ erhöht künstlich die Amplitude der Gezeiten in einem Becken und verstärkt so die erzielbare Leistung. Der Energieeinsatz für das Einpumpen zusätzlicher Wassermassen bei Flut wird mit Zinsen wieder zurückgewonnen, wenn man dasselbe Wasser bei Ebbe wieder herausfließen lässt. Genauso kann man bei Ebbe zusätzlich Wasser aus dem Becken pumpen und es bei Flut wieder einfließen lassen. Der Pump-Trick wird in La Rance manchmal angewandt und erhöht die Netto-Leistung um 10% (Wilson und Balls, 1990). Sehen wir uns die theoretischen Limits dieser Technologie an. Ich werde annehmen, dass die Generatoren einen Wirkungsgrad von $\varepsilon_G = 0,9$ haben und die Pumpen $\varepsilon_P = 0,85$. Der Tidenhub sei $2h$. Der Einfachheit halber nehme ich an, dass die Preise zum Kauf und Verkauf von Elektrizität gleich und konstant sind. Dann ist die optimale Zusatz-Pumphöhe b , auf die das Becken über den Flut-Füllstand vollgepumpt werden soll, gegeben durch (Grenzkosten fürs Zusatzpumpen = Grenznutzen des zusätzlichen Wassers)

$$b/\varepsilon_P = \varepsilon_G(b + 2h) .$$

Mit der Zyklus-Effizienz $\varepsilon = \varepsilon_G \varepsilon_P$ erhalten wir

$$b = 2h \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} .$$

Mit einem Tidenhub von $2h = 4$ m beispielsweise und einer Zyklus-Effizienz von $\varepsilon = 76\%$ ist die optimale Zusatzhöhe $b = 13$ m. Das ist die maximale Zusatzhöhe, bis zu der Pumpen ökonomisch sinnvoll ist bei konstanten Strompreisen.

Nehmen wir an, der umgekehrte Trick würde bei Ebben angewandt. (Das erfordert, dass das Becken eine senkrechte Ausdehnung von 30 m hat!) Dann ist die abgegebene Leistung pro Flächeneinheit

$$\left(\frac{1}{2} \rho g \varepsilon_G (b + 2h)^2 - \frac{1}{2} \rho g \frac{1}{\varepsilon_P} b^2 \right) / T ,$$

wobei T die Zeit zwischen Flut und Ebbe ist. Wir können dies ausdrücken als die maximal mögliche Leistungsdichte ohne Pumpen, $\varepsilon_G 2 \rho g h^2 / T$, erhöht um den Pumpfaktor

$$\left(\frac{1}{1 - \varepsilon} \right) ,$$

der etwa einen Faktor 4 ausmacht. Tabelle G.10 zeigt die theoretischen Leistungsdichten, die man mit Pumpen erreichen kann. Leider wird der Pump-Trick nur sehr selten in vollem Umfang auszubeuten sein wegen der Ökonomie des Becken-Bauens: Volles Ausnutzen des Pump-Tricks erfordert ein Becken, das etwa 4mal so hoch wie der Tidenhub ist, und erhöht die erzeugte Leistung 4fach. Doch die Menge erforderlichen Materials beim Bau eines Stauwehrs der Höhe H skaliert mit H^2 , also sind die Baukosten einer 4mal höheren Wand mehr als 4mal größer. Zusätzliche Geldmittel sind wahrscheinlich besser in einer horizontalen Vergrößerung des Beckens angelegt als in einer vertikalen.

Tiden-Amplitude (halber Hub) h (m)	optimale Pumphöhe b (m)	Leistung mit Pumpen (W/m ²)	Leistung ohne Pumpen (W/m ²)
1,0	6,5	3,5	0,8
2,0	13	14	3,3
3,0	20	31	7,4
4,0	26	56	13

Tabelle G.10: Theoretische Leistungsdichte der Gezeitenkraft unter Verwendung des Pump-Tricks, wenn es keine Beschränkungen aus der Beckenhöhe gibt.

Der Pump-Trick kann aber dennoch ohne Zusatzkosten angewandt werden an jedem Tag, an dem der natürliche Tidenhub kleiner ist als die maximale Beckenhöhe: Der Wasserlevel bei Flut kann hochgepumpt werden bis zum Maximal-Pegel. Tabelle G.11 gibt die Leistung an, wenn nur eine Höhe h gepumpt wird ($b = h$), d.h. die Höhe im Becken ist gerade zweimal die externe Tidenhöhe. Verdoppeln der Höhe ist bei Nipptide einfach, weil Nipptiden gewöhnlich nur halb so groß wie Springtiden sind. Die Becken bei Nipptide bis zum Springtiden-Level zu pumpen, verdoppelt etwa die Leistung bei Nipptide im Vergleich zum ungepumpten Betrieb. Ein System mit Pumpen würde also zweiwöchige Variationen nur um den Faktor 2 anstatt um den Faktor 4 zeigen.

Tiden-Amplitude (halber Hub) h (m)	Pumphöhe b (m)	Leistung mit Pumpen (W/m ²)	Leistung ohne Pumpen (W/m ²)
1,0	1,0	1,6	0,8
2,0	2,0	6,3	3,3
3,0	3,0	14	7,4
4,0	4,0	25	13

Tabelle G.11: Leistungsdichte, die der Pump-Trick eröffnet, wenn die Zusatz-Pumphöhe so hoch wie der Tidenhub ist. Diese Annahme ist z.B. bei Nipptide erfüllt, wenn durch Pumpen der Tidenhub auf die Größenordnung der natürlichen Springtide angehoben werden soll.

Wie man ein „dauernd laufendes“ Gezeitenkraftwerk mit zwei Becken macht

Hier eine nette Idee: Man nehme zwei Becken, eines davon ist das „volle“ und eines das „leere“; bei jeder Flut wird das „volle“ wieder aufgefüllt; bei jeder Ebbe wird das „leere“ vollständig geleert. Das Füllen und das Leeren kann entweder passiv mittels Schleusen geschehen oder (zusätzlich) durch Pumpen mit dem oben erwähnten Pump-Trick. Immer wenn Leistung benötigt wird, lässt man Wasser vom „vollen“ Becken ins „leere“ laufen oder (für die Leistungsausbeute noch besser) von einem Becken ins offene Meer. Die Kapitalkosten einer Zwei-Becken-Lösung (einer sog. Tidenlagune) dürften höher liegen, weil zusätzliche Sperrwände erforderlich werden, doch ist der große Vorteil, dass Leistung jederzeit verfügbar ist, so dass das Kraftwerk dem Energiebedarf folgen kann.

Wir können Leistung, die im „leeren“ Becken erzeugt wird, benutzen, um bei Flut zusätzliches Wasser ins „volle“ Becken zu pumpen und in gleicher Weise Leistung aus dem „vollen“ Becken zum Absenken des Wasserspiegels im „leeren“ Becken bei Ebbe. Mit diesem „Pumpen aus eigener Kraft“ könnte man die Leistung des Kraftwerks

erhöhen, ohne dafür Energie aus dem Netz ziehen zu müssen. Es ist eine erfreuliche Eigenschaft dieser Zwei-Becken-Lösung, dass der optimale Zeitpunkt, Wasser ins „volle“ Becken zu pumpen gerade bei Flut ist, was auch der optimale Zeitpunkt ist, um Leistung mit dem „leeren“ Becken zu gewinnen. Genauso ist umgekehrt Ebbe die beste Zeit, das „leere“ Becken auszupumpen und zugleich auch der perfekte Zeitpunkt zur Energiegewinnung im „vollen“ Becken. In einer einfachen Simulation konnte ich zeigen, dass ein Zwei-Becken-System an einer Stelle mit 4 m natürlichem Tidenhub eine Dauerleistung von 4,5 W/m² liefern kann (MacKay, 2007a). Dies ist um 50% höher als die maximal erzielbare mittlere Leistung eines gewöhnlichen Gezeitenbeckens an derselben Stelle (3 W/m²). Zudem wäre die stetige Leistungsabgabe des Zwei-Becken-Systems wertvoller als die intermittierende und weniger flexible Energieerzeugung bei herkömmlichen Gezeitenbeckens.

Ein Zwei-Becken-System könnte auch als Pumpspeicherwerk betrieben werden.

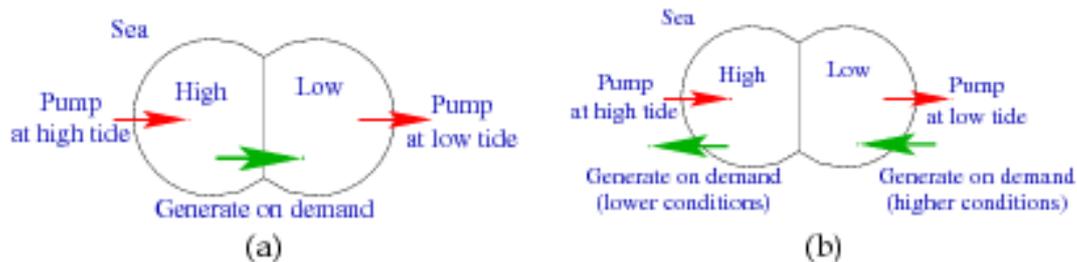


Fig.G.12: Verschiedene Anwendungen des Pump-Tricks bei Gezeiten. Die zwei Becken (Lagunen) liegen auf Meereshöhe. (a) Eine einfache Möglichkeit zwei Becken zu nutzen ist, das eine als das „volle“ und das andere als das „leere“ Becken zu markieren; ist das umgebende Meer nahe dem Flutpegel, lässt man Wasser in das „volle“ Becken, oder man pumpt es aktiv (mit Energie aus anderer Quelle); genauso leert man bei Ebbe das „leere“ Becken entweder passiv oder durch Pumpen. (b) Eine andere Anordnung, die noch mehr Leistung pro Beckenfläche liefern könnte, sieht keinen Wasserfluss zwischen den beiden Becken vor. Während ein Becken gerade voll oder leer gepumpt wird, kann das andere stetig Leistung nach Bedarf ins Netz abgeben. Die Pumpenergie könnte auch durch kurzzeit-schwankende Ressourcen wie Wind oder zusätzliche Quellen im Netz (etwa Kernkraftwerke) geliefert werden, oder durch die andere Hälfte des Beckensystems, indem die Energie des einen Beckens verwendet wird, um das andere Becken voll oder leer zu pumpen.

Anmerkungen

Seite

329 Generator-Wirkungsgrad von 90% [311Efficiency of 90%...](#) Turbinen erreichen etwa 90% Effizienz bei Kopfdurchmessern von 3,7 m oder darüber. Baker et al. (2006).

337 ein „dauernd laufendes“ Gezeitenkraftwerk mit zwei Becken [320Getting “always-on” tidal power by using two basins.](#) Es gibt eine Tidenlagunen-Kraftwerk mit zwei Becken in Haishan, Maoyan Island, China. Ein einzelner Generator zwischen den beiden Becken (Anordnung wie in Fig.G.12(a)) liefert kontinuierliche Leistung mit 39 kW im Mittel [2bqapk].

Weiterführende Literatur: Shaw and Watson (2003b); Blunden and Bahaj (2007); Charlier (2003a,b). Zur Bodenreibung und der Abhängigkeit des Flusses von der Tiefe, siehe Sleath (1984). Für weiterführende Abschätzungen der englischen Gezeitenressourcen siehe MacKay (2007b), zu Tidenlagunen MacKay (2007a).

Anhang H: Dinge des täglichen Gebrauchs II

Importierte Energie

Dieter Helm und seine Kollegen schätzten den Fußabdruck der Importe aus einem Land X auf Basis ihres Geldwertes ab, indem sie die CO₂-Intensität der Wirtschaft im Land X (das ist das Verhältnis der CO₂-Emission zum Bruttonationaleinkommen) zu Grunde legten. Sie kamen zu dem Schluss, dass die CO₂-Belastung aus der grauen (d.h. der zu Herstellung und Transport erforderlichen) Energie der nach England importierten Waren (die an sich ja zum offiziellen CO₂-Fußabdruck Englands von 11 Tonnen CO₂e pro Jahr pro Person addiert werden sollte) etwa 16 Tonnen CO₂e pro Jahr pro Person beträgt. Eine detailliertere Nachfolgestudie der DEFRA bezifferte dieses importierte „graue CO₂“ mit einem kleineren, aber dennoch signifikanten Wert: etwa 6,2 Tonnen CO₂e pro Jahr pro Person. In Energieeinheiten entsprechen 6 t CO₂e etwa 60 kWh/d. Wir wollen nun versuchen, diese Folgerungen zu reproduzieren, indem wir nicht die Geldwerte, sondern das Gewicht der Importe benutzen.



Fig.H.1: Strangguss von Stahl in einer koreanischen Eisen- und Stahlfabrik

Fig.H.2 zeigt Englands Importe im Jahr 2006 auf drei verschiedene Arten: Links ist der gesamte Wert der Importe nach Herkunftsland aufgeschlüsselt. In der Mitte ist dasselbe Finanzvolumen aufgeteilt nach Warengruppen gemäß der Klassifikation der Steuerbehörde. Rechts sind die Seeimporte nach ihrem Gewicht und aufgeschlüsselt nach der Klassifikation des Verkehrsministeriums, die nicht unterscheidet zwischen Lederwaren und Tabak, sondern nach dem Gewicht der Waren, ob fest oder flüssig, ob Containerfracht oder Schüttgut.

Die Energiekosten importierter Brennstoffe (oben rechts) sind bereits in den Standardrechnungen zum englischen Energiebedarf mit berücksichtigt; die Energiekosten aller anderen Waren nicht. Für die meisten Materialien ist die graue Energie pro Gewichtseinheit größer oder gleich 10 kWh pro kg – die selbe wie die Energie pro Gewichtseinheit fossiler Brennstoffe. Das gilt für alle Metalle und Legierungen, alle Polymere und Verbundstoffe, die meisten Papierprodukte und keramische Materialien. Ausnahmen sind Rohmaterialien wie Erze, poröse Keramik wie Beton, Ziegel oder Porzellan, deren Energiekosten etwa 10mal niedriger liegen; Holz und Gummi, und Glas, dessen Energiekosten etwas geringer als 10 kWh pro kg sind. [r22oz]

Damit können wir eine grobe Abschätzung des energetischen Fußabdrucks unserer Importe einfach aus deren Gewicht erhalten, wenn wir Dinge wie Erz oder Holz ausnehmen. Bei der vorliegenden Ungenauigkeit unserer verwendeten Zahlen werden wir sicherlich abgleiten und unabsichtlich Dinge aus Holz oder Glas mit einschließen, doch können wir hoffen, dass solche Ausrutscher durch Unterschätzung der grauen Energie in den meisten Metall- und Plastikartikeln und in komplexeren Gütern aufgehoben wird, die häufig statt der angenommenen 10 kWh/kg eher 30 kWh/kg oder mehr aufweisen.

Für die Berechnung nehme ich mir aus der rechten Spalte der Fig.H.2 die Eisen- und Stahlprodukte heraus („Iron, steel products“), sowie die Massen- („dry bulk“), Container- und sonstige („other“) Fracht, die eine Summe von 98 Millionen Tonnen pro Jahr ausmacht. Davon ziehe ich noch geschätzte 25 Millionen Tonnen Lebensmittel ab, die wohl größtenteils in der sonstigen Fracht versteckt sind (die gesamten Lebensmittelimporte 2006 waren 34 Millionen Tonnen), verbleiben somit 73 Millionen Tonnen.

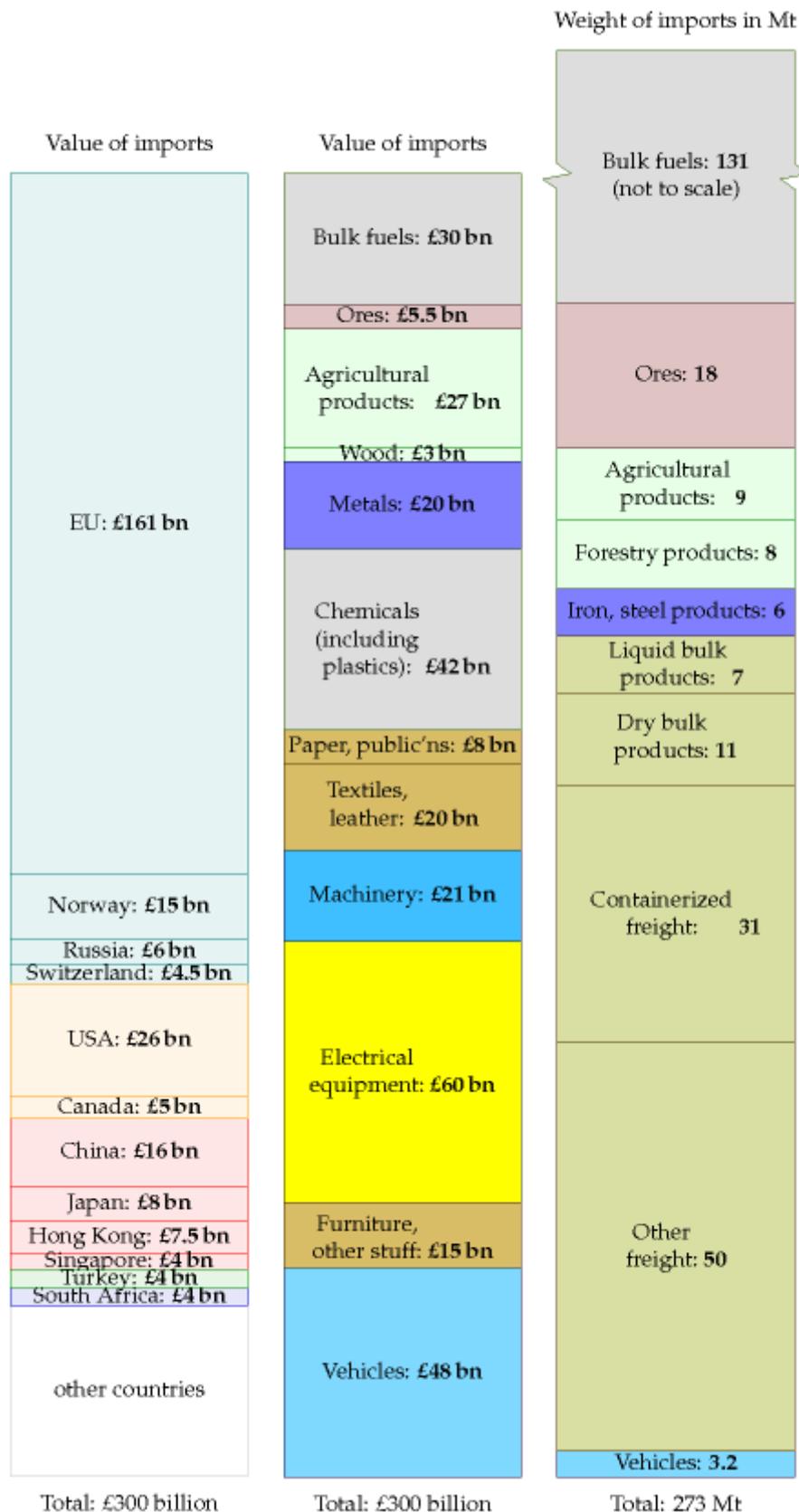


Fig.H.2: Warenimporte nach England, 2006

Bewerten wir diese 73 Mio Tonnen mit der oben genannten grauen Energierate und teilen das durch 60 Millionen Menschen, erhalten wir 33 kWh/d pro Person.

Für die Autos müssen wir weniger aus der hohlen Hand schätzen, weil wir mehr wissen: Die Anzahl importierter Autos im Jahr 2006 war 2,4 Millionen. Nehmen wir 76.000 kWh grauer Energie (der Zahl von Seite 104) pro Fahrzeug, tragen die Autoimporte zur grauen Energie im Umfang von 8 kWh/d pro Person bei.

Ich habe die flüssige Massenfracht („liquid bulk“) vernachlässigt, weil ich nicht sicher bin, welche Produkte damit gemeint sind. Sollte es sich größtenteils um flüssige Chemikalien handeln, wäre ihr Beitrag möglicherweise signifikant.

Zusammengenommen haben wir 41 kWh/d pro Person an grauer Energie in Importen – tatsächlich in der Größenordnung der Abschätzung von Dieter Helm und seinen Kollegen.

Ich vermute, dass die 41 kWh/d pro Person zu gering geschätzt sind, weil die angenommene Energieintensität (10 kWh/kg) zu gering ist für die meisten Waren-Endprodukte wie Maschinen oder Elektrogeräte. Doch ohne jetzt das genaue Gewicht aller Import-Kategorien zu kennen, ist das die bestmögliche Abschätzung.



Fig.H.3: Niob-Tagebau in Brasilien

Lebenszyklus-Analyse für Gebäude

Die Tabellen H.4 und H.5 zeigen Abschätzungen der erforderlichen Prozessenergie für Bau- und Konstruktionsmaterialien. Sie beinhalten auch den Energieaufwand für den Transport der Rohmaterialien in die Herstellerfabrik, nicht jedoch die für den Transport des Fertigprodukts an die Baustelle.

Tabelle H.6 benutzt diese Zahlen, um die Prozessenergie für den Bau eines Einfamilienhauses abzuschätzen. Der Brutto-Energieverbrauch zieht die Grenze noch weiter und berücksichtigt auch die anteilige graue Energie aus der städtischen Versorgungs-Infrastruktur und z.B. die graue Energie der zur Herstellung der Baumaterialien erforderlichen Maschinen. Als Faustregel gilt, dass der Brutto-Energieverbrauch etwa das Doppelte des Prozessenergie-Verbrauchs ist [3kmcks].

Verteilen wir die 42.000 kWh über 100 Jahre und verdoppeln das, um auf die Brutto-Energiekosten zu kommen, ergibt das 2,3 kWh/d für die gesamte graue Energie eines Gebäudes. Dabei ist nur die Gebäudehülle gemeint – die Steine, Ziegel, Dachbalken.



Material	Graue Energie	
	(MJ/kg)	(kWh/kg)
Weichholz, ofengetrocknet, geschnitten	3,4	0,94
Hartholz, ofengetrocknet, geschnitten	2,0	0,56
Hartholz, luftgetrocknet, geschnitten	0,5	0,14
Hartfaserplatte	24,2	6,7
Spanplatte	8,0	2,2
MDF	11,3	3,1
Sperrholz	10,4	2,9
Leimholz	11	3,0
Furnierschichtholz	11	3,0
Stroh	0,24	0,07
Terracotta	0,7	0,19
Dimensionierter Granit, Import	13,9	3,9
Dimensionierter Granit, lokal	5,9	1,6
Gipsputz	2,9	0,8
Gipskartonplatte	4,4	1,2
Fasermzement	4,8	1,3
Zement	5,6	1,6
Ortbeton	1,9	0,53
Betonfertigteile, dampfgehärtet	2,0	0,56
Betonfertigteile, ausgegossen	1,9	0,53
Ziegel	2,5	0,69
Betonstein	1,5	0,42
Porenbeton	3,6	1,0
Kunststoff – allgemein	90	25
PVC	80	22
synthetischer Kautschuk	110	30
Acrylfarbe	61,5	17
Glas	12,7	3,5
Glasfaser (Glaswolle)	28	7,8
Aluminium	170	47
Kupfer	100	28
galvanisierter Stahl	38	10,6
rostfreier Stahl	51,5	14,3

Tabelle H.4: Graue Energie in Baumaterialien (unter der Annahme, dass kein Recyclingmaterial verwendet wird). (Dimensionierter Stein ist Naturstein oder Fels, der in passende Form und Größe geschnitten wurde). Quellen: [3kmcks], Lawson (1996).

	Graue Energie (kWh/m ²)
Wände	
Holzrahmen, Holz-Außenverkleidung, Gipskarton	52
Holzrahmen, Klinker, Gipskarton	156
Holzrahmen, Alu-Außenverkleidung, Gipskarton	112
Metallrahmen, Klinker, Gipskarton	168
Doppelte Klinkerwand, Gipskarton	252
Zement-stabilisierte Lehmziegel	104
Böden	
Dielenlagerboden	81
110 mm Betonplatte	179
200 mm Betonfertigteile (T-Träger, verfüllt)	179
Dächer	
Holzsparren, Betonziegel, Gipskartonverkleidung	70
Holzsparren, Ziegeltdeckung, Gipskartonverkleidung	75
Holzsparren, Blechdach, Gipskartonverkleidung	92

Tabelle H.5: Graue Energie in verschiedenen Wand- Boden und Dachmaterialien. Quelle : [3kmcks], Lawson (1996).

	Fläche x (m ²)	Energiedichte (kWh/m ²)	=	Energie (kWh)
Böden	100 x	81	=	8.100
Dach	75 x	75	=	5.600
Außenwände	75 x	252	=	19.000
Innenwände	75 x	125	=	9.400
Gesamt				42.000

Tabelle H.6 : Prozessenergie für die Herstellung eines Einfamilienhauses

Fig.H.7: Das Millau-Viadukt in Frankreich, die höchste Brücke der Welt. Stahl und Beton, 2,5 km lang und 353 m hoch.



Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

339 Eine detailliertere Nachfolgestudie der DEFRA 322A subsequent more-detailed study commissioned by DEFRA estimated that the embodied carbon in imports is about 6.2 tons CO_{2e} per person. Wiedmann et al. (2008).

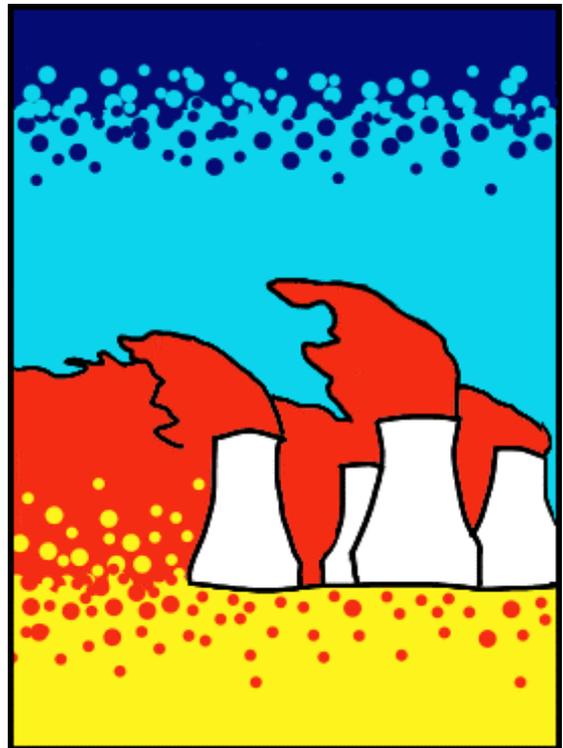
Weitere Quellen:

www.greenbooklive.com zu Lebenszyklen-Bewertungen von Bauprodukten.

Einige hilfreiche Warnungen zur Lebenszyklen-Analyse: www.gdrc.org/uem/lca/life-cycle.html.

Weitere Links: www.epa.gov/ord/NRMRL/lcaccess/resources.htm.

Teil IV: Nützliche Daten



Anhang I: Schnellreferenz

SI-Einheiten

The watt. This SI unit is named after James Watt. As for all SI units whose names are derived from the proper name of a person, the first letter of its symbol is uppercase (W). But when an SI unit is spelled out, it should always be written in lowercase (watt), with the exception of the “degree Celsius.”⁴²

from wikipedia

SI steht für Système Internationale. SI-Einheiten sollten alle Ingenieure benutzen, damit sie keine Raumschiffe verlieren.

Energie	ein Joule	1 J
Leistung	ein Watt	1 W
Kraft	ein Newton	1 N
Länge	ein Meter	1 m
Zeit	eine Sekunde	1 s
Temperatur	ein Kelvin	1 K

Präfix	Kilo	Mega	Giga	Tera	Peta	Exa
Symbol	k	M	G	T	P	E
Faktor	10 ³	10 ⁶	10 ⁹	10 ¹²	10 ¹⁵	10 ¹⁸

Präfix	Zenti	Milli	Mikro	Nano	Pico	Femto
Symbol	c	m	μ	n	p	f
Faktor	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁶	10 ⁻⁹	10 ⁻¹²	10 ⁻¹⁵

Tabelle I.1: SI-Einheiten und Präfixe

Meine bevorzugten Einheiten für Energie, Leistung und Transport-Effizienz

Energie	eine Kilowattstunde	1 kWh	3 600 000 J
Leistung	eine Kilowattstunde pro Tag	1 kWh/d	(1000/24)W ≈ 40W
Kraft	eine Kilowattstunde pro 100 km	1 kWh/100 km	36N
Zeit	eine Stunde	1 h	3600 s
	ein Tag	1 d	24 x 3600 s ≈ 10 ⁵ s
	ein Jahr	1 y	365,25 x 24 x 3600 s ≈ π x 10 ⁷ s
Kraft pro Masse	Kilowattstunde pro Tonnen-km	1 kWh/t-km	3,6m/s ² (≈ 0,37g)

⁴² Diese Schreibweisen-Konvention gilt nur für englischsprachige Texte!

Weitere Einheiten und Symbole

	Maßeinheit	Symbol	Wert
Menschen	Person	p	
Masse	Tonne	t	1 t = 1000 kg
	Gigatonne	Gt	1Gt = $10^9 \times 1000 \text{ kg} = 1 \text{ Pg}$
Transport	Personen-Kilometer	p-km	
Transport	Tonnen-Kilometer	t-km	
Volumen	Liter	l	1 l = 0.001m^3
Fläche	Quadratkilometer	qkm, km^2	1 qkm = 10^6m^2
	Hektar	ha	1 ha = 10^4m^2
	Wales		1 Wales = 21 000 km^2
	London (Greater London)		1 London = 1580 km^2
Energie	Dinorwig		1 Dinorwig = 9 GWh

Milliarden, Millionen und die Präfixe anderer Autoren

In englischen Texten wird eine Milliarde häufig nach dem amerikanischen Standard als „a billion“ (1 bn) benannt⁴³. Diese Einheit steht für 1000 Millionen oder 10^9 . Eine Billion steht dagegen für 1000 Milliarden oder 10^{12} . Eine (europäische) Billion wird nach amerikanischem Standard „a trillion“ bezeichnet. Das Standard-Präfix für die Milliarde (10^9) ist „Giga-“, für die Billion (10^{12}) „Tera-“.

Million und Milliarde werden im kontinental-europäischen Raum mit Mio und Mrd abgekürzt.

Häufig wird im englischsprachigen Raum m als Abkürzung für die Million verwendet, doch ist das inkompatibel mit dem SI-Standard, wo m als Präfix für 1/1000stel gebraucht wird (etwa in mg). Bei Zitaten, in denen m für Million steht, ersetze ich dies durch M. Beispielsweise benutze ich Mtoe für Millionen Tonnen Öl-Äquivalent und MtCO₂ für Millionen Tonnen CO₂.

Nervige Einheiten

Es gibt eine ganze Reihe allgemein benutzter Einheiten, die aus verschiedensten Gründen nerven. Für einige von ihnen fand ich heraus, was sie bedeuten. Ich stelle dies hier zusammen, damit Sie die Pressemeldungen übersetzen können.

Haushalte

Die Einheit „Haushalte“ wird üblicherweise benutzt, wenn die Leistung Erneuerbarer Energiequellen beschrieben werden soll. Beispiel: „Die Turbinen der 300 Mio £ teuren Whitelee Windfarm erzeugen 322 MW – genug um 200.000 Haushalte zu versorgen.“ Der Haushalt ist laut der British Wind Energy Association definiert als 4.700 kWh pro Jahr [www.bwea.com/ukwed/operational.asp]. Das sind 0.54 kW oder **13 kWh pro Tag**. (Wenige Organisationen benutzen auch 4000 kWh/y pro Haushalt.)

Die Einheit „Haushalte“ nervt mich, weil ich befürchte, dass manche Leute sie mit der *Gesamtleistung, die die Menschen eines Haushalts verbrauchen*, durcheinanderbringen. Letztere ist aber etwa 24mal größer. Der „Haushalt“ berücksichtigt lediglich den mittleren häuslichen *Elektrizitätsbedarf* eines Haushalts. Nicht die benötigte Heizenergie des

⁴³ Dies kann auch bei den nichtübersetzten Teilen (Bezeichnungen in den Originalgrafiken, Anmerkungen am Ende der Kapitel) dieser Übersetzung vorkommen. Im laufenden Text wird für 10^9 durchwegs der Begriff „Milliarde“ verwendet, für 10^{12} der Begriff „Billion“.

Haushalts. Nicht den Arbeitsplatz. Nicht den Transport. Nicht die energiefressenden öffentlichen Leistungen, die für die Haushaltsmitglieder erbracht werden.

Wenn wir über die CO₂-Emissionen eines „Haushalts“ sprechen sollten, wäre hier der offizielle Umwandlungsfaktor bei 4 Tonnen CO₂ pro Haushalt pro Jahr.

Kraftwerke

Ideen zur Energie-Einsparung werden oftmals in eingesparten „Kraftwerken“ formuliert. Etwa wäre nach einem BBC-Bericht durch neue unverwüstliche LEDs in Ampeln „die Energie-Einsparung riesig – der Betrieb der englischen Ampeln erfordert etwa zwei mittelgroße Kraftwerke“. news.bbc.co.uk/1/low/sci/tech/specials/shffield_99/449368.stm

Was ist ein mittelgroßes Kraftwerk? 10 MW? 50 MW? 100 MW? 500 MW? Ich habe keine Idee. Eine Suche mit Google ergab, dass manche Leute glauben, es wären 30 MW, manche 250 MW, manche 500 MW (die häufigste Wahl) und manche 800 MW. Was für eine sinnlose Einheit!

Wäre es nicht erhellender für den Artikel über die Ampeln, wenn man die Einsparung in einem Prozentsatz ausdrückte? „Der Betrieb der englischen Ampeln erfordert 11 MW Elektrizität, das sind 0,03 % des nationalen Verbrauchs.“ Das würde klarstellen, wie „riesig“ die Einsparungen wären.

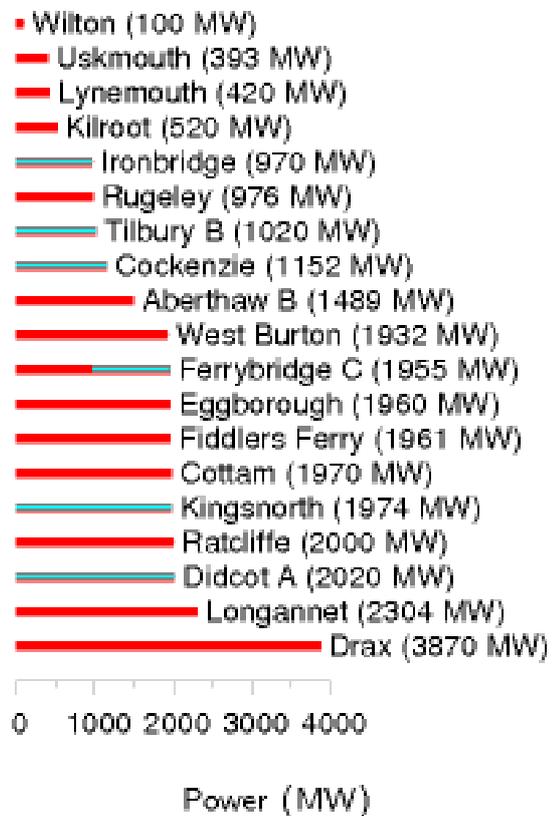


Fig.1.2: Leistungen britischer Kohlekraftwerke. In blau sind die 8 GW hervorgehoben, die 2015 stillgelegt werden. 2.500 MW über England verteilt ergeben 1 kWh/d pro Person.

Autos auf der Straße

Einige Ankündigungen beschreiben CO₂-Einsparungen als „Äquivalent an Autos, die von der Straße verschwinden“. Richard Branson sagte beispielsweise, wenn die Voyager-Flotte der Virgin Trains auf 20% Biodiesel umstellte – übrigens, finden Sie es nicht auch übertrieben, einen Zug als „grünen Biodiesel-betriebenen Zug“ zu bezeichnen, wenn er mit 80% fossilen und nur 20% grünem Treibstoff fährt? – Entschuldigung, ich schweife ab. Richard Branson sagte, wenn die Voyager-Flotte der Virgin Trains auf 20% Biodiesel umstellte – ich betone das „wenn“, da Leute wie er immer Medieninteresse erhalten, wenn sie verkünden, dass sie mit dem Gedanken spielen, etwas Gutes tun zu wollen, doch viele dieser laut angekündigten Initiativen werden dann später still und leise wieder fallengelassen, so wie die Idee, Flugzeuge auf den Flughäfen mit Schleppfahrzeugen zu bewegen um sie grüner zu machen – Entschuldigung, ich schweife schon wieder ab. Richard Branson sagte, wenn die Voyager-Flotte der Virgin Trains auf 20% Biodiesel umstellte, wäre dies eine Reduktion der CO₂-Belastung von 34.500 Tonnen pro Jahr, was äquivalent sei zu „23.000 Autos, die von der Straße verschwinden.“ Diese Äußerung gibt uns einen Hinweis auf den Umrechnungsfaktor:

„ein Auto von der Straße verschwunden“ ↔ -1,5 t CO₂ pro Jahr.

Kalorien

Kalorien nerven, weil in der Diät-Community eine Kilokalorie (kcal) auch „Kalorie“ heißt. Eine solche Lebensmittel-„Kalorie“ (in Anführungsstrichen) entspricht also 1000 (physikalischen) Kalorien ($1000 \text{ cal} = 1 \text{ kcal}$).

$$2.500 \text{ kcal} = 3 \text{ kWh} = 10.000 \text{ kJ} = 10 \text{ MJ}.$$

Barrel

Eine nervige Einheit, die von der Öl-Community geliebt wird, ist das Barrel, und auch die Tonne Rohöl. Warum können sie nicht bei einer Einheit bleiben? Ein Barrel Öl ist 6,1 GJ oder 1.700 kWh.

Barrels sind doppelt nervig, weil es verschiedene Definitionen gibt und jede ein anderes Volumen bezeichnet.

Hier ist alles zusammengefasst, was man über Barrels wissen muss: Ein Barrel ist 42 US-Gallonen oder 159 Liter. Ein Barrel Öl ist 0,1364 Tonnen Öl. Ein Barrel Rohöl hat eine Energie von 5,75 GJ. Ein Barrel Öl wiegt 136 kg. Eine Tonne Rohöl ist 7,33 Barrels und 42,1 GJ. Die Kohlenstoff-Verschmutzungsrate von Rohöl ist 400 kg CO₂ pro Barrel. www.chemlink.com.au/conversions.htm

Das bedeutet, dass bei einem Ölpreis von 100 \$ pro Barrel die Energiekosten bei 6 US-Cent pro kWh liegen. Wäre die CO₂-Abgabe bei 250\$ pro Tonne CO₂, würde diese Steuer den Barrel-Preis um 100\$ erhöhen.

Gallonen

Die Gallone wäre eine nette menschenfreundliche Einheit, hätten die Yankees sie nicht mit einer Definition verdorben, die im Widerspruch zu der aller anderen Menschen steht, ähnlich wie ihre Definition des Pint oder des Quart. Die US-Volumenmaße sind alle etwa 5/6 der korrekten Maße.

$$1 \text{ US gal} = 3,785 \text{ l} = 0,83 \text{ imperial gal},$$

$$1 \text{ imperial gal} = 4,545 \text{ l}.$$

Tonnen

Tonnen sind im englischsprachigen Raum nervig, weil es die „short ton“, „long ton“ und die „metric ton“ gibt. Diese Definitionen liegen nahe genug beieinander, so dass ich sie hier nicht unterscheiden brauchte. 1 short ton (2.000 lb) = 907 kg, 1 long ton (2.240 lb) = 1.016 kg, 1 metric ton (1 Tonne) = 1.000 kg.

BTU und „Quad“

British Thermal Units (BTU) sind nervig, weil sie weder Teil des *Système Internationale* sind, noch eine praktische Größe haben. Wie das unpraktische Joule sind auch sie zu klein, so dass man unsinnige Präfixe wie⁴⁴ „quadrillion“ (10^{15}) verwenden muss, um sie in der Praxis anwenden zu können.

$$1 \text{ kJ} = 0,947 \text{ BTU}, 1 \text{ kWh} = 3.409 \text{ BTU}.$$

$$\text{Ein „Quad“ ist } 1 \text{ Billiarde BTU} = 293 \text{ TWh}.$$

⁴⁴ Es ist hier wiederum die amerikanische Bezeichnung gemeint. Die amerikanische „quadrillion“ entspricht der europäischen Billiarde, vgl. dazu auch die Fußnote auf Seite 346

Witzige Einheiten

Tassen Tee

Kann man so Solar-Module in ein gutes Licht rücken? „Wenn alle 7.000 PV-Module⁴⁵ angebracht sind, werden sie jedes Jahr 180.000 Einheiten Ökostrom liefern – genug, um 9 Millionen Tassen Tee zu kochen.“ Diese Ankündigung setzt ein 1kW mit 50 Tassen Tee gleich.

Als Volumeneinheit gibt es offiziell eine Tasse: 1 US cup (ein halber US-Pint) mit 0,24 l; doch eine Tasse Tee oder Kaffee hat üblicherweise 0,18 l. Um 50 Tassen Wasser mit je 0,18 l von 15 °C auf 100 °C zu erwärmen benötigt man 1 kWh.

Also ist „Neun Millionen Tassen Tee pro Jahr“ eine andere Formulierung für „20 kW“.

Doppeldeckerbusse, Albert-Halls, Wembley-Stadien

„Wenn in England jeder, bei dem es möglich ist, Hohlwandisolierung installieren würde, könnten wir damit gigantische 7 Millionen Tonnen Kohlendioxid-Emissionen verhindern. Das ist genug Kohlendioxid, um 40 Millionen Doppeldeckerbusse zu füllen oder das neue Wembley-Stadion 900 mal!“ Woraus wir die hilfreiche Tatsache lernen können, dass ein Wembley 44.000 Doppeldeckerbusse ist. Tatsächlich hat der Kessel des Wembley-Stadions ein Volumen von 1.140.000 m³.

„Wenn jeder Haushalt nur eine Energiesparlampe installiert, wäre genug CO₂ eingespart, um die Royal Albert Hall 1.980 mal zu füllen!“ (Eine Albert Hall ist 100.000 m³.)

Die Mengen von CO₂ in Volumen statt in Masse auszudrücken ist eine zuverlässige Möglichkeit, sie groß erscheinen zu lassen. Sollte „1 kg CO₂ pro Tag“ nach zu wenig klingen, sagen Sie einfach „200.000 Liter CO₂ pro Jahr“ !

Masse von CO ₂ ↔ Volumen
2 kg CO ₂ ↔ 1m ³
1 kg CO ₂ ↔ 500 Liter
44 g CO ₂ ↔ 22 Liter
2 g CO ₂ ↔ 1 Liter

Tabelle I.3: Volumen-zu-Masse-Umrechnung

Hektar	= 10 ⁴ m ²
Acre	= 4050 m ²
Square Mile	= 2,6 km ²
Square Foot	= 0,093 m ²
Square Yard	= 0,84 m ²

Tabelle I.5: Flächen

Noch mehr Volumen

Ein Container ist 2,4 m breit und 2,6 m hoch und (6,1 oder 12,2) Meter lang (entsprechend dem 20-Fuß-Containermaß TEU bzw. dem 40-Fuß-Containermaß FEU). Ein TEU ist die Größe eines kleinen 20-Fuß-Containers – ein Innenvolumen von etwa 33 m³. Die meisten gängigen Container, die man sieht, sind 40 Fuß mit dem Volumen von 2 TEU. Ein 40-Fuß-Container wiegt 4 Tonnen und kann 26 Tonnen Fracht tragen, sein Volumen ist 67,5 m³.

Ein Schwimmbecken hat ein Volumen von etwa 3000 m³.

Ein Doppeldeckerbus hat das Volumen von 100 m³.

Ein Heißluftballon ist 2500 m³.

Die große Pyramide von Gizeh hat ein Volumen von 2.500.000 Kubikmetern.



Fig.I.4: Ein 20-Fuß-Container (1 TEU)

⁴⁵ Das wären dann sehr kleine Module mit ca. 25 Wp pro Modul

Flächen

Die Erdoberfläche ist $500 \times 10^6 \text{ km}^2$, die Landfläche ist $150 \times 10^6 \text{ km}^2$. Mein typisches englisches Haus mit drei Schlafzimmern hat eine Wohnfläche von 88 m^2 . In den USA ist die mittlere Größe eines Einfamilienhauses 2330 square-feet (216 m^2).

Leistung

Schreiben wir das Suffix (el) oder (e) hinter eine Leistungsabgabe, bedeutet das, dass wir explizit über elektrische Leistung sprechen. Der Output eines Kraftwerks könnte z.B. $1 \text{ GW}(\text{el})$ sein, während es chemische Leistung mit einer Rate von $2,56 \text{ GW}$ verbraucht. In gleicher Weise bezeichnet das Suffix (th) bei einer Leistungsgröße, dass es sich um thermische Leistung handelt. Dasselbe gilt für Suffixe an Energiegrößen. „Mein Haus verbraucht $2 \text{ kWh}(\text{el})$ Strom pro Tag.“

Stellen wir das Suffix p oder (peak) hinter eine Leistungsangabe, bedeutet das die Peak-(Spitzen)-Leistung oder Kapazität. 10 m^2 PV-Module könnten z.B. eine Leistung von 1 kWp haben.

$$1 \text{ kWh/d} = \frac{1}{24} \text{ kW.}$$

$$1 \text{ toe/y} = 1,33 \text{ kW.}$$

Öl kommt aus einer Förderpumpe mit etwa einem halben Liter pro Sekunde. Das sind 5 kWh pro Sekunde oder 18 MW .

Die Leistung eines Formel-1-Rennwagens ist 560 kW .

Der englische Stromverbrauch ist 17 kWh pro Tag pro Person, oder $42,5 \text{ GW}$ englandweit.

„Eine Tonne“ Raum-Klimatisierung ist $3,5 \text{ kW}$.

Welt-Energieverbrauch

Der weltweite Energieverbrauch entspricht einer Leistung von 15 TW , der Stromverbrauch von 2 TW .

Nützliche Umwandlungsfaktoren

Um TWh pro Jahr in GW zu wandeln, teile durch 9.

1 kWh/d pro Person ist das gleiche wie $2,5 \text{ GW}$ englandweit, oder 22 TWh/y englandweit.

Um mpg (Meilen pro britischer Gallone) in km pro Liter zu wandeln, teile durch 3.

Bei Zimmertemperatur ist $1 \text{ kT} = \frac{1}{40} \text{ eV}$.

Bei Zimmertemperatur ist 1 kT pro Molekül = $2,5 \text{ kJ/mol}$.

Zählerablesung

Wie man die Gas-Zählerwerte in Kilowattstunden wandelt:

Wenn Ihr Gaszähler in Kubik-Fuß geeicht ist, nehmen Sie die Hunderter und multiplizieren Sie sie mit 32,32, um kWh zu erhalten.

Wenn Ihr Gaszähler in Kubikmeter geeicht ist, multiplizieren Sie die Anzeige mit 11,42, um kWh zu erhalten.

Brennwerte von Treibstoffen

Rohöl: 37 MJ/l; 10,3 kWh/l.

Erdgas: 38 MJ/m³. (Methan hat eine Dichte von 1,819 kg/m³.)

1 Tonne Kohle: 29,3 GJ; 8000 kWh.

Fusionsenergie gewöhnlichen Wassers: 1800 kWh pro Liter.

Siehe auch Tabelle 26.14 Seite 218 und Tabelle D.3 Seite 304.

Wärmekapazitäten

Die Wärmekapazität von Luft ist 1 kJ/kg/°C oder 29 J/mol/°C. Die Dichte von Luft ist 1,2 kg/m³. Die Wärmekapazität pro Volumeneinheit ist also 1.2 kJ/m³/°C.

Die latente Wärme beim Verdunsten von Wasser: 2257,92 kJ/kg. Wärmekapazität von Wasserdampf: 1,87 kJ/kg/°C. Die Wärmekapazität von Wasser ist 4,2 kJ/l/°C. Die Dichte von Dampf ist 0,590 kg/m³.

Druck

Atmosphärischer Druck: 1 bar \approx 10⁵ Pa (Pascal). Druck in 1000 m Wassertiefe: 100 bar. In 3000 m Wassertiefe: 300 bar.

Geld

Ich habe die folgenden Umrechnungskurse den Diskussionen über Geld zu Grunde gelegt: 1 € = 1,26 \$, 1 £ = 1,85 \$, 1 \$ = 1,12 kanadische \$. Dies waren die korrekten Wechselkurse Mitte 2006.

Treibhausgas-Umrechnungsfaktoren

Frankreich	83
Schweden	87
Kanada	220
Österreich	250
Belgien	335
Europ. Union	353
Finnland	399
Spanien	408
Japan	483
Portugal	525
Großbritannien	580
Luxemburg	590
Detuschland	601
USA	613
Niederlande	652
Italien	667
Irland	784
Griechenland	864
Dänemark	881

Fig.I.9: Kohlenstoffintensität der Stromproduktion (g CO₂ pro kWh Elektrizität)

Brennstoff	Emissionen (gCO ₂ pro kWh chemischer Energie)
Erdgas	190
Raffineriegas	200
Äthan	200
Flüssiggas	210
Kerosin	240
Benzin	240
Diesel	250
schweres Heizöl	260
Rohbenzin	260
Koks	300
Kohle	300
Petrolkoks	340

Fig.I.10: Emissionen bei der Treibstoffverbrennung. Quelle: DEFRA's Environmental Reporting Guidelines for Company Reporting on Greenhouse Gas Emissions.

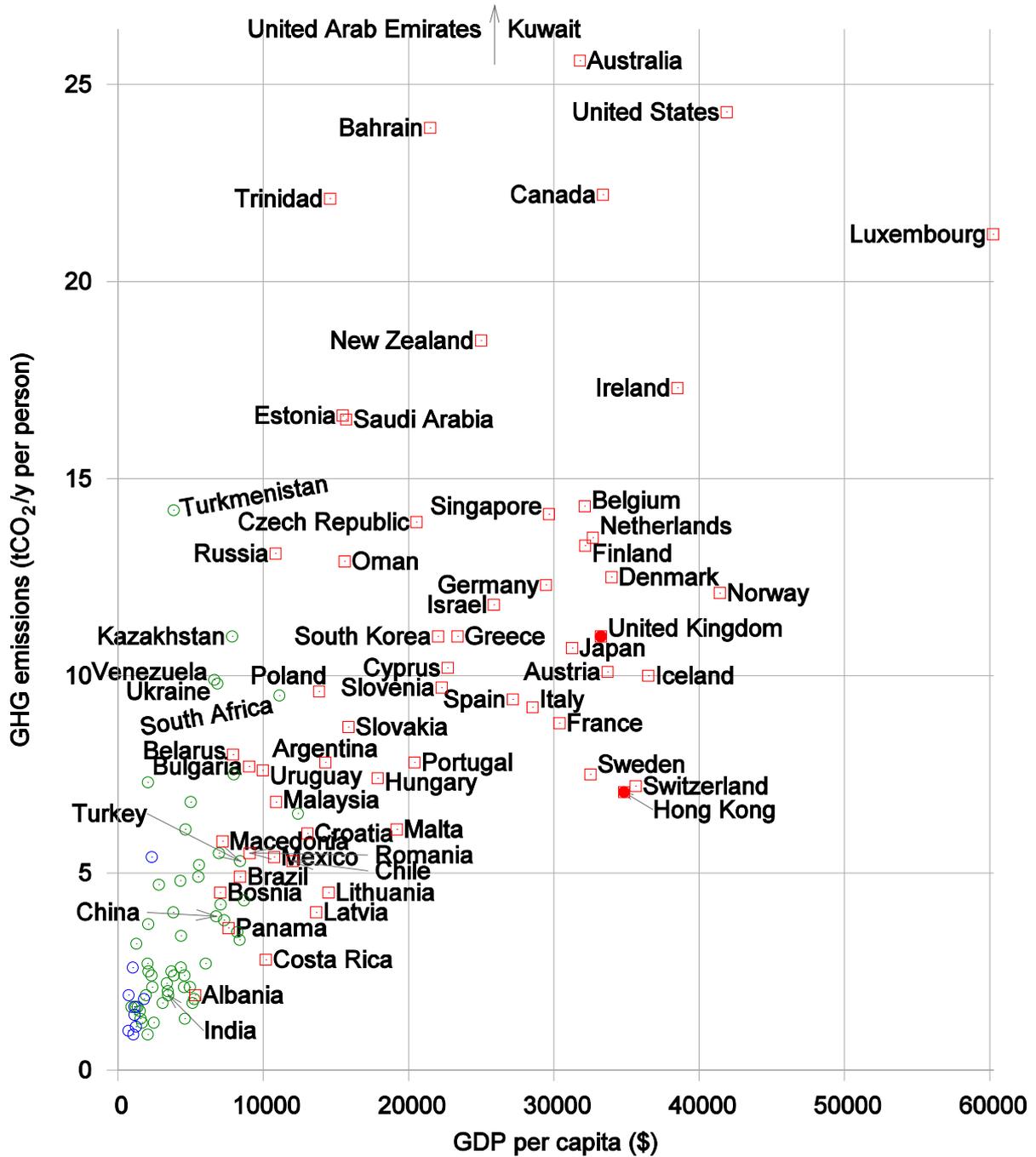


Fig.I.11: Treibhausgas-Emissionen pro Kopf vs. BSP pro Kopf, in Kaufkraftäquivalent US-\$. Quadrate bezeichnen Länder mit „hohem Entwicklungsniveau“, Kreise „mittleres“ oder „niedriges“. Vergleiche auch Fig.30.1 (Seite 250) und Fig.18.4 (Seite 121). Quelle: UNDP Human Development Report, 2007. [3av4s9]

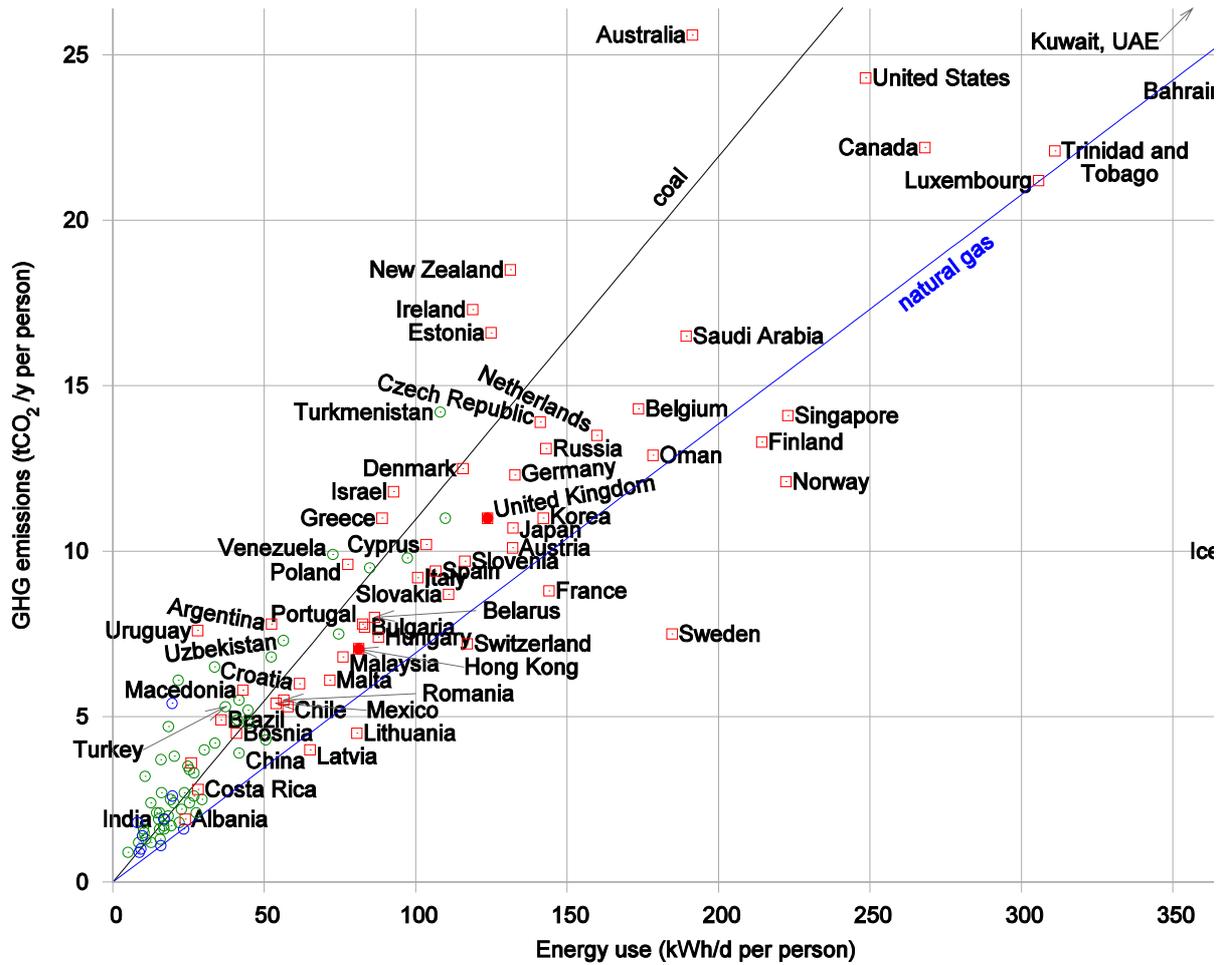


Fig.I.12: Treibhausgas-Emissionen pro Kopf vs. Energieverbrauch pro Kopf. Die Linien zeigen die Emissions-Intensitäten von Kohle und Erdgas. Quadrate bezeichnen Länder mit „hohem Entwicklungsniveau“, Kreise mit „mittleres“ oder „niedriges“. Vergleiche auch Fig.30.1 (Seite 250) und Fig.18.4 (Seite 121). Quelle: UNDP Human Development Report, 2007.

Anhang J: Bevölkerungsdichten

Fig.J.1 zeigt die Flächen verschiedener Regionen, aufgetragen gegen ihre Bevölkerung. Diagonalen im Diagramm sind Linien gleicher Bevölkerungsdichte. Bangladesch, auf der zweiten Linie von rechts, hat eine Bevölkerungsdichte von 1000 pro Quadratkilometer; Indien, England, die Niederlande und Japan haben etwa ein Drittel davon: 350 pro km². Viele europäische Länder haben um die 100 pro km². Am anderen Extrem liegen Kanada, Australien und Libyen mit Bevölkerungsdichten von etwa 3 Menschen pro km². Die mittlere Diagonale markiert die Bevölkerungsdichte der Erde: 43 Menschen pro km². Aus dieser Sicht ist Amerika ein durchschnittliches Land: Die 48 Kernstaaten der USA haben dieselbe Bevölkerungsdichte wie die Erde. Besonders flächenreiche Regionen, deren Bevölkerungsdichte unter dem Weltdurchschnitt liegt, sind Russland, Kanada, Lateinamerika, Sudan, Algerien und Saudi Arabien.

Von diesen großen, flächenreichen Staaten sind folgende nahe an England, sodass England zu ihnen besonders freundlich sein sollte: Kasachstan, Libyen, Saudi Arabien, Algerien und Sudan.

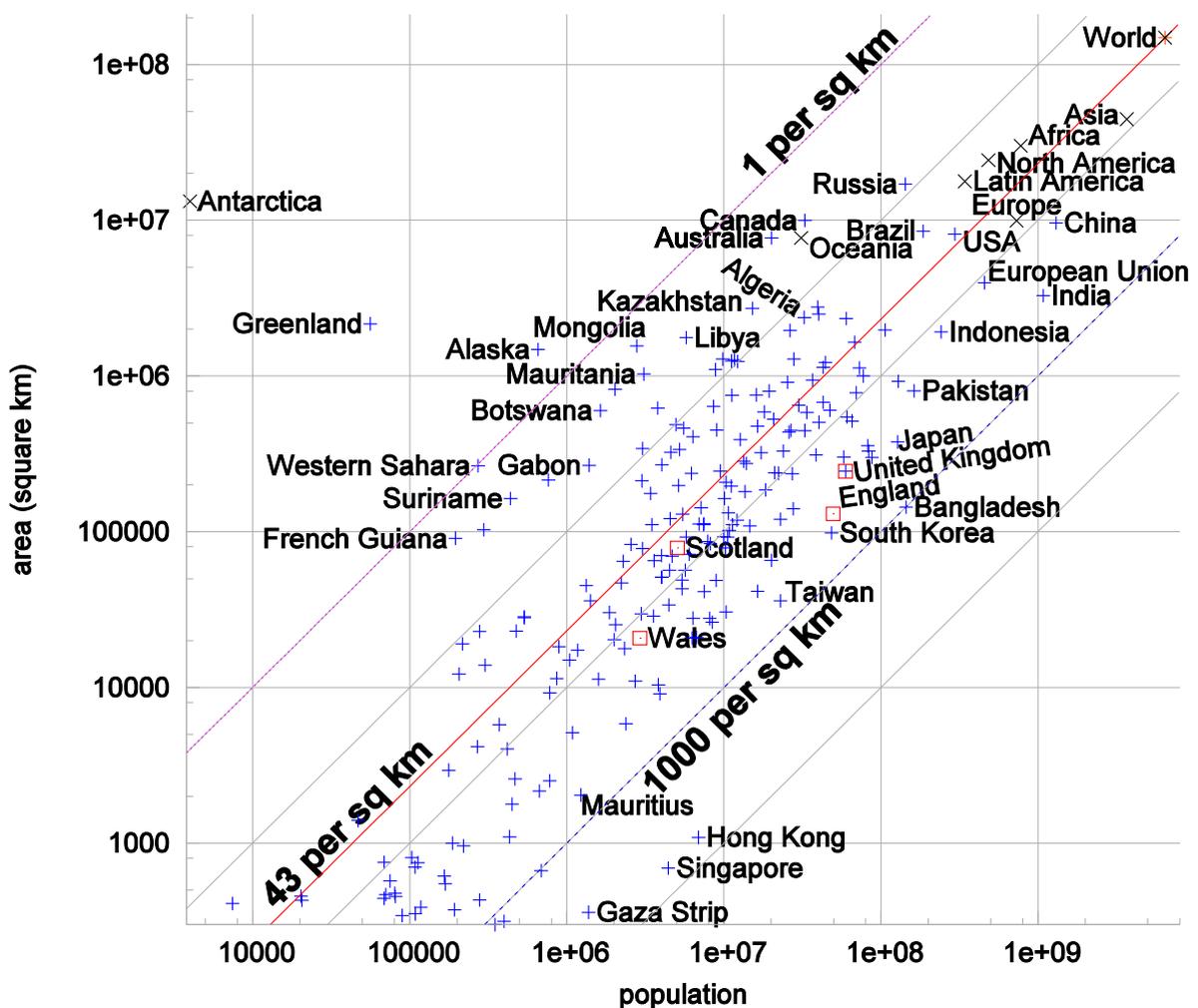


Fig.J.1: Bevölkerung und Fläche von Ländern und Regionen der Welt. Beide Skalen sind logarithmisch. Jede Linie identifiziert eine spezielle Bevölkerungsdichte; Länder mit den höchsten Dichten liegen unten rechts, geringere Bevölkerungsdichten oben links. Diese Daten liegen tabellarisch unten auf Seite 356 vor.

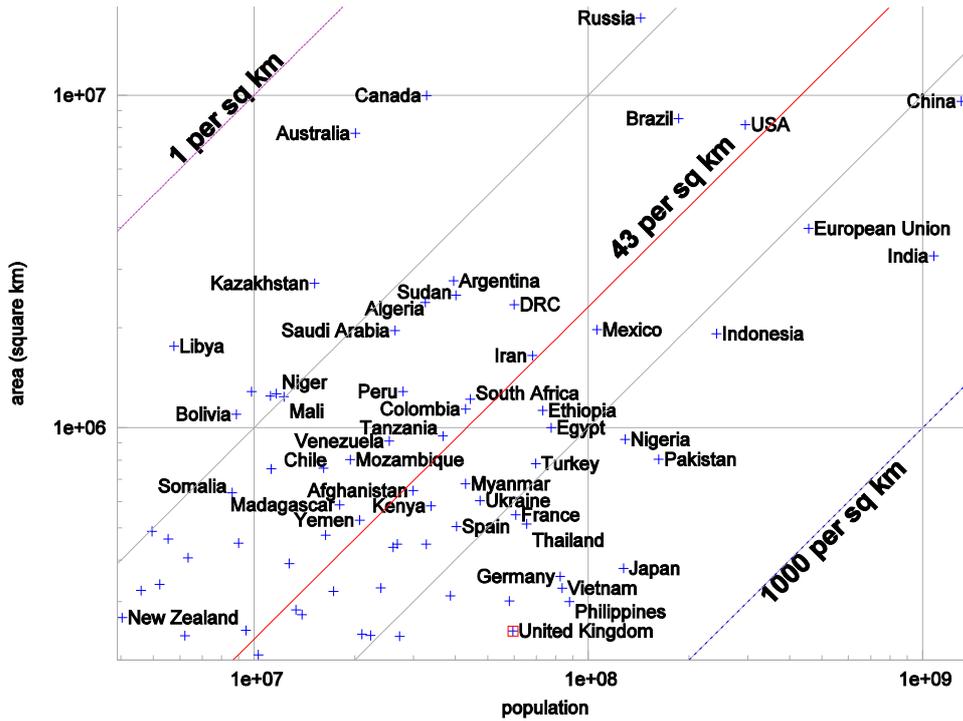


Fig.J.2: Bevölkerung und Fläche von Ländern und Regionen der Welt. Beide Skalen sind logarithmisch. Jede Linie identifiziert eine spezielle Bevölkerungsdichte; Diese Grafik zeigt einen Ausschnitt aus Fig.J.1. Diese Daten liegen tabellarisch unten auf Seite 356 vor.

Region	Bevölkerung	Landfläche (km ²)	Einwohner pro km ²	Fläche pro EW (m ²)
Welt	6 440 000 000	148 000 000	43	23 100
Asien	3 670 000 000	44 500 000	82	12 100
Afrika	778 000 000	30 000 000	26	38 600
Europa	732 000 000	9 930 000	74	13 500
Nordamerika	483 000 000	24 200 000	20	50 200
Lateinamerika	342 000 000	17 800 000	19	52 100
Ozeanien	31 000 000	7 680 000	4	247 000
Antarktika	4 000	13 200 000		

Tabelle J.3: Bevölkerungsdichten der Kontinente. Die Daten sind in Fig.J.1 und J.2 grafisch dargestellt. Daten aus 2005

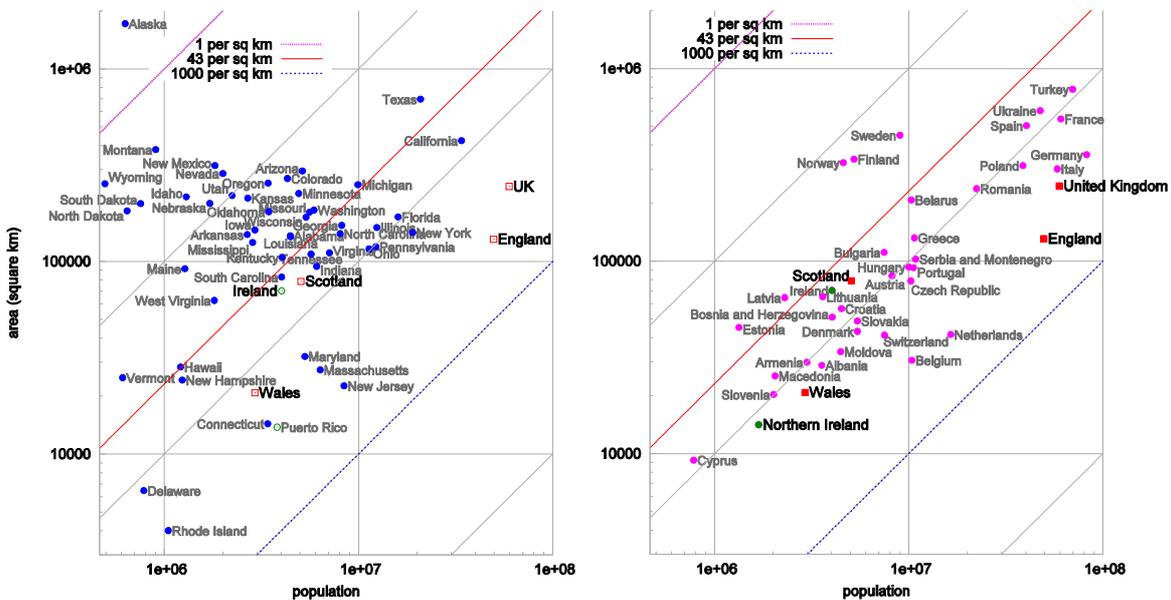


Fig.J.4: Bevölkerung und Fläche der US-Bundesstaaten und von Regionen in und um Europa.

Region	Population	Area (km ²)	People per km ²	Area per person (m ²)
Afghanistan	29 900 000	647 000	46	21 600
Africa	778 000 000	30 000 000	26	38 600
Alaska	655 000	1 480 000	0.44	2 260 000
Albania	3 560 000	28 700	123	8 060
Algeria	32 500 000	2 380 000	14	73 200
Angola	11 100 000	1 240 000	9	111 000
Antarctica	4 000	13 200 000	.	.
Argentina	39 500 000	2 760 000	14	69 900
Asia	3 670 000 000	44 500 000	82	12 100
Australia	20 000 000	7 680 000	2.6	382 000
Austria	8 180 000	83 800	98	10 200
Bangladesh	144 000 000	144 000	1 000	997
Belarus	10 300 000	207 000	50	20 100
Belgium	10 000 000	31 000	340	2 945
Bolivia	8 850 000	1 090 000	8	124 000
Bosnia & Herzegovina	4 020 000	51 100	79	12 700
Botswana	1 640 000	600 000	2.7	366 000
Brazil	186 000 000	8 510 000	22	45 700
Bulgaria	7 450 000	110 000	67	14 800
CAR	3 790 000	622 000	6	163 000
Canada	32 800 000	9 980 000	3.3	304 000
Chad	9 820 000	1 280 000	8	130 000
Chile	16 100 000	756 000	21	46 900
China	1 300 000 000	9 590 000	136	7 340
Colombia	42 900 000	1 130 000	38	26 500
Croatia	4 490 000	56 500	80	12 500
Czech Republic	10 200 000	78 800	129	7 700
DRC	60 000 000	2 340 000	26	39 000
Denmark	5 430 000	43 000	126	7 930
Egypt	77 500 000	1 000 000	77	12 900
England	49 600 000	130 000	380	2 630
Estonia	1 330 000	45 200	29	33 900
Ethiopia	73 000 000	1 120 000	65	15 400
Europe	732 000 000	9 930 000	74	13 500
European Union	496 000 000	4 330 000	115	8 720
Finland	5 220 000	338 000	15	64 700
France	60 600 000	547 000	110	9 010
Gaza Strip	1 370 000	360	3 820	261
Germany	82 400 000	357 000	230	4 330
Greece	10 600 000	131 000	81	12 300
Greenland	56 300	2 160 000	0.026	38 400 000
Hong Kong	6 890 000	1 090	6 310	158
Hungary	10 000 000	93 000	107	9 290
Iceland	296 000	103 000	2.9	347 000
India	1 080 000 000	3 280 000	328	3 040
Indonesia	241 000 000	1 910 000	126	7 930
Iran	68 000 000	1 640 000	41	24 200
Ireland	4 010 000	70 200	57	17 500
Italy	58 100 000	301 000	192	5 180
Japan	127 000 000	377 000	337	2 960
Kazakhstan	15 100 000	2 710 000	6	178 000
Kenya	33 800 000	582 000	58	17 200
Latin America	342 000 000	17 800 000	19	52 100
Latvia	2 290 000	64 500	35	28 200
Libya	5 760 000	1 750 000	3.3	305 000
Lithuania	3 590 000	65 200	55	18 100
Madagascar	18 000 000	587 000	31	32 500
Mali	12 200 000	1 240 000	10	100 000
Malta	398 000	316	1 260	792
Mauritania	3 080 000	1 030 000	3	333 000

Mexico	106 000 000	1 970 000	54	18 500
Moldova	4 450 000	33 800	131	7 590
Mongolia	2 790 000	1 560 000	1.8	560 000
Mozambique	19 400 000	801 000	24	41 300
Myanmar	42 900 000	678 000	63	15 800
Namibia	2 030 000	825 000	2.5	406 000
Netherlands	16 400 000	41 500	395	2 530
New Zealand	4 030 000	268 000	15	66 500
Niger	11 600 000	1 260 000	9	108 000
Nigeria	128 000 000	923 000	139	7 170
North America	483 000 000	24 200 000	20	50 200
Norway	4 593 000	324 000	14	71 000
Oceania	31 000 000	7 680 000	4	247 000
Pakistan	162 000 000	803 000	202	4 940
Peru	27 900 000	1 280 000	22	46 000
Philippines	87 800 000	300 000	292	3 410
Poland	39 000 000	313 000	124	8 000
Portugal	10 500 000	92 300	114	8 740
Republic of Macedonia	2 040 000	25 300	81	12 300
Romania	22 300 000	237 000	94	10 600
Russia	143 000 000	17 000 000	8	119 000
Saudi Arabia	26 400 000	1 960 000	13	74 200
Scotland	5 050 000	78 700	64	15 500
Serbia & Montenegro	10 800 000	102 000	105	9 450
Singapore	4 420 000	693	6 380	156
Slovakia	5 430 000	48 800	111	8 990
Slovenia	2 010 000	20 200	99	10 000
Somalia	8 590 000	637 000	13	74 200
South Africa	44 300 000	1 210 000	36	27 500
South Korea	48 400 000	98 400	491	2 030
Spain	40 300 000	504 000	80	12 500
Sudan	40 100 000	2 500 000	16	62 300
Suriname	438 000	163 000	2.7	372 000
Sweden	9 000 000	449 000	20	49 900
Switzerland	7 480 000	41 200	181	5 510
Taiwan	22 800 000	35 900	636	1 570
Tanzania	36 700 000	945 000	39	25 700
Thailand	65 400 000	514 000	127	7 850
Turkey	69 600 000	780 000	89	11 200
Ukraine	47 400 000	603 000	78	12 700
United Kingdom	59 500 000	244 000	243	4 110
USA (ex. Alaska)	295 000 000	8 150 000	36	27 600
Venezuela	25 300 000	912 000	28	35 900
Vietnam	83 500 000	329 000	253	3 940
Wales	2 910 000	20 700	140	7 110
Western Sahara	273 000	266 000	1	974 000
World	6 440 000 000	148 000 000	43	23 100
Yemen	20 700 000	527 000	39	25 400
Zambia	11 200 000	752 000	15	66 800

Tabelle J.5: Regionen und ihre Bevölkerungsdichte. Populationen über 50 Millionen Menschen und Flächen über 5 Millionen km² sind hervorgehoben. Diese Daten sind in Fig.J.1 (Seite 354) grafisch dargestellt. Daten von 2005.

Die Energiegeschichte Englands

Primärbrennstoff	kWh/d/p	kWh(el)/d/p
Öl	43	
Erdgas	47	
Kohle	20	
Nuklear	9 →	3.4
Wasser		0.2
andere Erneuerbare		0.8

Tabelle K.1: Aufschlüsselung der Primärenergiequellen in Großbritannien (2004-2006)

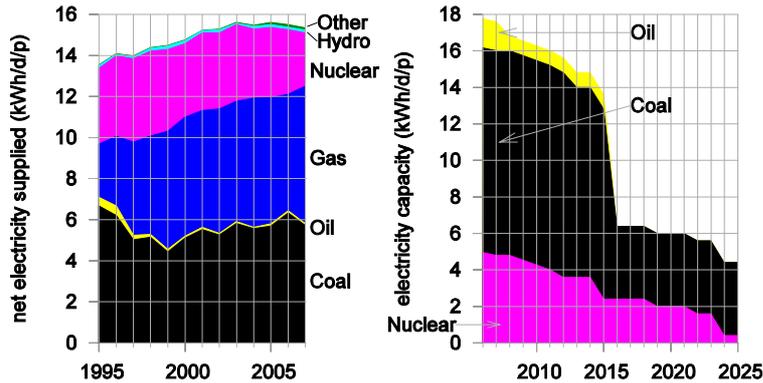


Fig.K.2: Links: Netto-Elektrizitäts-erzeugung Englands, nach Quellen, in kWh pro Tag pro Person. (Weitere 0,9 kWh/d/p werden erzeugt und von den Erzeuger-Einrichtungen selbst verbraucht.)

Rechts: Die Energielücke, die durch Kraftwerksschließungen in England erzeugt wird, nach Prognosen des Energieversorgers EdF. Diese Grafik zeigt die Kapazitäten der Kern-, Kohle- und Ölkraftwerke, in kWh pro Tag pro Person. Die Kapazität ist die maximal erzeugbare Leistung einer Quelle.

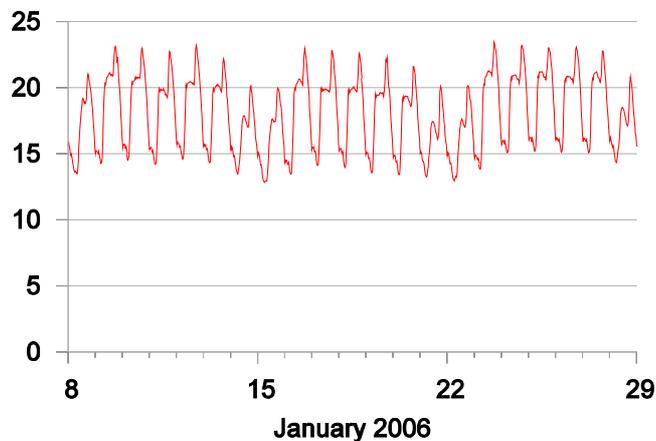


Fig.K.3: Elektrizitätsbedarf in Großbritannien (in kWh/d pro Person) während zweier Winterwochen im Jahr 2006. Die Spitzen sind täglich um 18 Uhr. (Wenn Sie am landesweiten Bedarf interessiert sind: Die obere Bildgrenze, 24 kWh/d pro Person, entspricht 60 GW englandweit.)

	2006	2007
„primäre Einheiten“ (die ersten 2 kWh/d)	10,73 p/kWh	17,43 p/kWh
„sekundäre Einheiten“ (der Rest)	8,13 p/kWh	9,70 p/kWh

Tabelle K.4: Strompreise für Haushalte (2006, 2007) für Powergen-Kunden in Cambridge, inkl. Steuer.

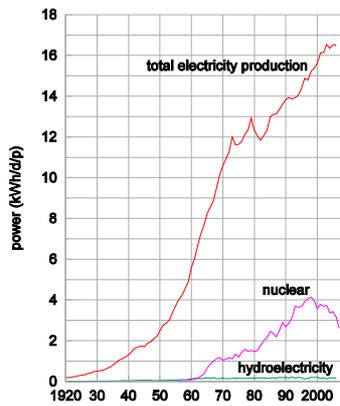


Fig.K.5: geschichtliche Entwicklung der englischen Elektrizitätsproduktion, Wasser- und Kernkraft separat.
Leistungen pro Person bei angenommenen 60 Millionen EW.

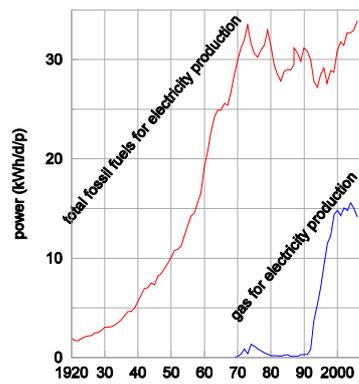


Fig.K.6: geschichtliche Entwicklung des englischen fossilen Brennstoffeinsatzes zur Verstromung.
Leistungen pro Person bei angenommenen 60 Millionen EW.

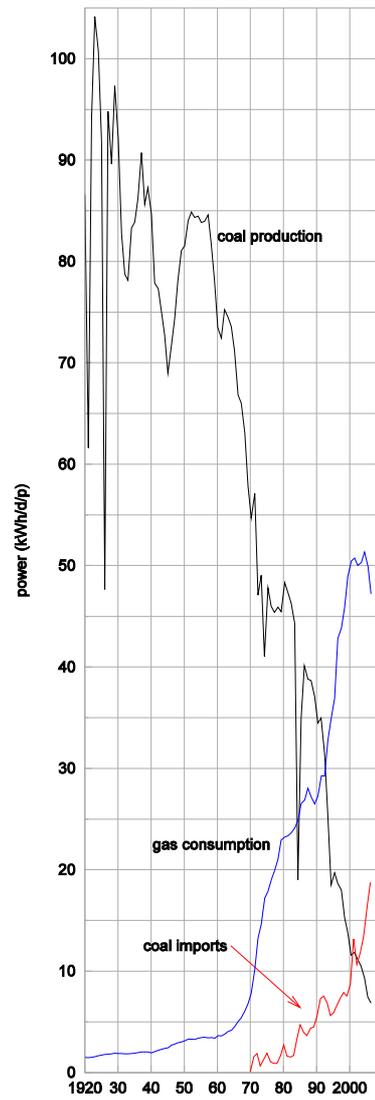


Fig.K.7: Englische Kohleproduktion und -einfuhr, englischer Gasverbrauch.
Leistungen pro Person bei angenommenen 60 Millionen EW.

Liste der Weblinks

Hier sind die expliziten Links für die korrespondierenden “tinyURLs”, die im Text genannt sind. Die hier angegebenen Seitennummern beziehen sich auf die englische Originalausgabe und weichen von der Nummerierung dieses Buches ab. Auf <http://tinyurl.com/yh8xse> (oder www.inference.phy.cam.ac.uk/sustainable/book/tex/cft.url.html) sind anklickbare Verknüpfungen für alle URLs dieses Buches. Sollte ein URL nicht mehr funktionieren, hilft eventuell das Internetarchiv der Wayback Machine [f754] weiter.

p tinyURL Full web link.

18 ydoobr www.bbc.co.uk/radio4/news/anyquestions_transcripts_20060127.shtml
18 2jhve6 www.ft.com/cms/s/0/48e334ce-f355-11db-9845-000b5df10621.html
19 25e59w news.bbc.co.uk/1/low/uk_politics/7135299.stm
19 5o7mxk www.guardian.co.uk/environment/2007/dec/10/politics
19 5c4olc www.foe.co.uk/resource/press_releases/green_solutions_undermined_10012008.html
19 2fztd3 www.jalopnik.com/cars/alternative-energy/now-thats-some-high-quality-h2o-car-runs-on-water-177788.php
19 26e8z news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/3381425.stm
19 ykhayj politics.guardian.co.uk/terrorism/story/0,,1752937,00.html
20 l6y5g www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/fig3-1.htm
20 5qfkw www.nap.edu/catalog.php?record_id=12181
21 2z2xg7 assets.panda.org/downloads/2_vs_3_degree_impacts_1oct06_1.pdf
21 yyxq2m www.bp.com/genericsection.do?categoryId=93&contentId=2014442
21 dzcqq www.defra.gov.uk/environment/climatechange/internet/pdf/avoid-dangercc.pdf
21 y98ys5 news.bbc.co.uk/1/hi/business/4933190.stm
30 5647rh www.dft.gov.uk/pgr/statistics/datatablespublications/tsgb/
31 27jdc5 www.dft.gov.uk/pgr/statistics/datatablespublications/energyenvironment/tsgb-chapter3energyandtheenvi1863
31 28abpm corporate.honda.com/environmentology/
31 nmn4l www.simetric.co.uk/si_liquids.htm
31 2hcgdh cta.ornl.gov/data/appendix_b.shtml
34 vxhjh www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/weather/
34 tdvml www.phy.hw.ac.uk/resrev/aws/awsarc.htm
36 3fbufz www.ipcc.ch/ipccreports/sres/aviation/004.htm
36 3asmgy news.independent.co.uk/uk/transport/article324294.ece
36 9ehws www.boeing.com/commercial/747family/technical.html
36 3exmgv www.ryanair.com/site/EN/about.php?page=About&sec=environment
36 yrnmm www.grida.no/climate/ipcc/aviation/124.htm
37 36w5gz www.rolls-royce.com/community/downloads/environment04/products/air.html
44 2rqlc www.metoffice.gov.uk/climate/uk/location/scotland/index.html
44 2szckw www.metoffice.gov.uk/climate/uk/stationdata/cambridgedata.txt
45 5hrxls eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?+s01
45 6z9epq www.solarcentury.com/knowledge_base/images/solar_pv_orientation_diagram
47 2tl7t6 www.reuk.co.uk/40-Percent-Efficiency-PV-Solar-Panels.htm
47 6hobq2 www.azonano.com/news.asp?newsID=4546
47 2lsx6t www.udel.edu/PR/UDaily/2008/jul/solar072307.html
47 62ccou www.nrel.gov/news/press/2008/625.html
48 5hzs5y www.ens-newswire.com/ens/dec2007/2007-12-26-093.asp
48 39z5m5 news.bbc.co.uk/1/hi/world/europe/6505221.stm
48 2uk8q8 www.powerlight.com/about/press2006_page.php?id=59
48 2ahcep www.aps.org/meetings/multimedia/upload/The_Status_and_Outlook_for_the_Photovoltaics_Industry_David_E_Carlson.pdf
48 6kqq77 www.defra.gov.uk/erdp/pdfs/ecs/miscanthus-guide.pdf
58 ynzej www.aceee.org/conf/06modeling/azevado.pdf
64 wbd8o www.ref.org.uk/energydata.php
66 25e59w news.bbc.co.uk/1/low/uk_politics/7135299.stm
66 2t2vjq www.guardian.co.uk/environment/2007/dec/11/windpower_renewableenergy
66 57984r www.businessgreen.com/business-green/news/2205496/critics-question-government
66 6oc3ja www.independent.co.uk/environment/green-living/donnachadh-mccarthy-my-carbonfree-year-767115.html
66 5soql2 www.housebuildersupdate.co.uk/2006/12/eco-bollocks-award-windsave-ws1000.html
66 6g2jm5 www.carbontrust.co.uk/technology/technologyaccelerator/small-wind
79 5h69fm www.thepoultrysite.com/articles/894/economic-approach-to-broiler-production
80 5pwojp www.fertilizer.org/ifa/statistics/STATSIND/pkann.asp
80 5bj8k3 www.walkerscarbonfootprint.co.uk/walkers_carbon_footprint.html
80 3s576h www.permatopia.com/transportation.html
87 6xrm5q www.edf.fr/html/en/decouvertes/voyage/usine/retour-usine.html
94 yx7zm4 www.cancentral.com/funFacts.cfm
94 r22oz www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/energy-cost/NS6Chart.html
94 yhrest www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/1106.pdf
94 y5as53 www.aluminum.org/Content/NavigationMenu/The_Industry/Government_Policy/Energy/EnergyJ.htm
94 y2ktgg www.ssab.com/templates/Ordinary_573.aspx
95 6lbrab www.lindenau-shipyard.de/pages/newsb.html
95 5ctx4k www.wilhelmsen.com/SiteCollectionDocuments/WW_Miljorapport_engelsk.pdf
95 yqbz13 www.normanbaker.org.uk/downloads/Supermarkets_Report_Final_Version.doc
102 ytg7p budget2007.treasury.gov.uk/page_09.htm
102 fcfqw www.mod.uk/DefenceInternet/AboutDefence/Organisation/KeyFactsAboutDefence/DefenceSpending.htm
102 2e4fcs press.homeoffice.gov.uk/press-releases/security-prebudget-report
102 33x5kc www.mod.uk/NR/rdonlyres/95BBA015-22E9-43EF-B2DC-FFF14482A590/0/gep_200708.pdf
102 35ab2c www.dasa.mod.uk/natstats/ukds/2007/c1/table103.html

102 yg5fsj siteresources.worldbank.org/DATASTATISTICS/Resources/GDP.pdf
102 yfjgna [www.sipri.org/contents/milap/milex/mex major spenders.pdf/download](http://www.sipri.org/contents/milap/milex/mex%20major%20spenders.pdf/download)
102 sibae www.wisconsinproject.org/countries/israel/plut.html
102 yh45h8 [www.usec.com/v2001_02/HTML/Aboutusec swu.asp](http://www.usec.com/v2001_02/HTML/Aboutusec%20swu.asp)
102 t2948 www.world-nuclear.org/info/inf28.htm
102 2ywzee www.globalsecurity.org/wmd/intro/u-centrifuge.htm
112 uzek2 www.dti.gov.uk/energy/inform/dukes/
112 3av4s9 hdr.undp.org/en/statistics/
112 6frj55 news.independent.co.uk/environment/article2086678.ece
129 5qhvcv www.tramwayinfo.com/Tramframe.htm?www.tramwayinfo.com/tramways/Articles/Compair2.htm
134 4qgg8q www.newsweek.com/id/112733/output/print
135 5o5x5m www.cambridgeenergy.com/archive/2007-02-08/cef08feb2007kemp.pdf
135 5o5x5m www.cambridgeenergy.com/archive/2007-02-08/cef08feb2007kemp.pdf
135 5fbeg9 www.cfiit.gov.uk/docs/2001/racomp/racomp/pdf/racomp.pdf
135 679rpc www.tfi.gov.uk/assets/downloads/environmental-report-2007.pdf
136 5cp27j www.eaton.com/EatonCom/ProductsServices/Hybrid/SystemsOverview/HydraulicHLA/index.htm
137 4wm2w4 www.citroenet.org.uk/passenger-cars/psa/berlingo/berlingo-electrique.html
137 658ode www.greencarcongress.com/2008/02/mitsubishi-moto.html
139 czjjo [corporate.honda.com/environment/fuel cells.aspx?id=fuel cells fcx](http://corporate.honda.com/environment/fuel%20cells.aspx?id=fuel%20cells%20fcx)
139 5a3ryx automobiles.honda.com/fcx-clarity/specifications.aspx
154 yok2nw [www.eca.gov.uk/eti/find/P Heatpumps/detail.htm?ProductID=9868&FromTechnology=S WaterSourcePackaged](http://www.eca.gov.uk/eti/find/P%20Heatpumps/detail.htm?ProductID=9868&FromTechnology=S%20WaterSourcePackaged)
154 2dtx8z www.eca.gov.uk/NR/rdonlyres/6754FE19-C697-49DA-B482-DA9426611ACF/0/ETCL2007.pdf
154 2fd8ar www.geothermalint.co.uk/commercial/hydroneheatpumpranges.html
159 5kpkj8 blogs.reuters.com/environment/2008/09/09/a-silver-bullet-or-just-greenwash/
159 yebuk8 www.dti.gov.uk/energy/sources/coal/index.html
160 yhx8b www.worldenergy.org/wec-geis/publications/reports/ser/coal/coal.asp
160 e2m9n www.coal.gov.uk/resources/cleanercoaltechnologies/ucgoverview.cfm
173 5qntkb www.world-nuclear.org/info/reactors.htm
174 y3wnzr npc.sarov.ru/english/digest/132004/appendix8.html
174 32t5zt [web.ift.uib.no/~lillestol/Energy Web/EA.html](http://web.ift.uib.no/~lillestol/Energy%20Web/EA.html)
174 2qr3yr documents.cern.ch/cgi-bin/setlink?base=generic&categ=public&id=cer-0210391
174 ynk54y doc.cern.ch//archive/electronic/other/generic/public/cer-0210391.pdf
174 yl7tkm minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/1999/mcs99.pdf
174 yju4a4 www.uic.com.au/nip67.htm
175 yeyr7z taylorandfrancis.metapress.com/index/W7241163J23386MG.pdf
175 4f2ekz www.publications.parliament.uk/pa/cm/199900/cmhansrd/vo000505/text/00505w05.htm
175 2k8y7o www.nei.org/resourcesandstats/
175 3pvf4j www.sustainableconcrete.org.uk/main.asp?page=210
175 4r7zpg csereport2005.bluescopesteel.com/
175 49hcnw [www.ace.mmu.ac.uk/Resources/Fact Sheets/Key Stage 4/Waste/pdf/02.pdf](http://www.ace.mmu.ac.uk/Resources/Fact%20Sheets/Key%20Stage%204/Waste/pdf/02.pdf)
175 3kduo7 www.esrcsocietytoday.ac.uk/ESRCInfoCentre/facts/UK/index29.aspx?ComponentId=7104&SourcePagelD=18130
176 69vt8r www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=7200593
176 6oby22 www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=6773271&query_id=0
176 63l2lp pubs.acs.org/cgi-bin/abstract.cgi/jacsat/2002/124/i18/abs/ja003472m.html
176 wncchw www.feasta.org/documents/wells/contents.html?one/horelacy.html
176 shrln www.enviros.com/vrepository/
201 2wmuw7 [news.yahoo.com/s/ap/20071231/ap on hi te/solar roads; ylt=AuEFouXxz16nP8MRllnTJMms0NUE](http://news.yahoo.com/s/ap/20071231/ap%20on%20hi%20te%20solar%20roads;ylt=AuEFouXxz16nP8MRllnTJMms0NUE)
201 2hxf6c www.eirgrid.com/EirGridPortal/DesktopDefault.aspx?tabid=WindGenerationCurve&TreeLinkModID=1451&TreeLinkItemID=247
201 2199ht www.reuters.com/article/domesticNews/idUSN2749522920080228
201 3x2kvv www.reuters.com/article/rbssIndustryMaterialsUtilitiesNews/idUSL057816620080305
202 5o2xgu [www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web sites/03-04/wind/content/storageavailable.html](http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web%20sites/03-04/wind/content/storageavailable.html)
202 2n3pmb [www.dynamicdemand.co.uk/pdf/fridge test.pdf](http://www.dynamicdemand.co.uk/pdf/fridge%20test.pdf)
202 2k8h4o www.int.iol.co.za/index.php?art_id=vn20080201045821205C890035
202 5cp27j www.eaton.com/EatonCom/ProductsServices/Hybrid/SystemsOverview/HydraulicHLA/index.htm
202 2sxlyj www.batteryuniversity.com/partone-3.htm
202 ktd7a www.vrbpower.com/docs/news/2006/20060830-PR-TapburySale-IrelandWindfarm.pdf
202 627ced www.vrbpower.com/docs/whitepapers/SEItechpaper1.pdf
202 5fasl7 [www.indexmundi.com/en/commodities/minerals/vanadium/vanadium t7.html](http://www.indexmundi.com/en/commodities/minerals/vanadium/vanadium%20t7.html)
202 2wmuw7 [news.yahoo.com/s/ap/20071231/ap on hi te/solar roads; ylt=AuEFouXxz16nP8MRllnTJMms0NUE](http://news.yahoo.com/s/ap/20071231/ap%20on%20hi%20te%20solar%20roads;ylt=AuEFouXxz16nP8MRllnTJMms0NUE)
213 5os7dy tinyurl.com/5os7dy
213 yrw2oo tinyurl.com/ywr2oo
217 6eoyhg news.bbc.co.uk/1/hi/uk/7215688.stm
217 yu8em5 [www.foe.co.uk/resource/reports/paying for better transport.pdf](http://www.foe.co.uk/resource/reports/paying%20for%20better%20transport.pdf)
219 3x2cr4 news.bbc.co.uk/1/hi/england/london/6151176.stm
219 2dd4mz [news.bbc.co.uk/1/low/uk politics/6391075.stm](http://news.bbc.co.uk/1/low/uk%20politics/6391075.stm)
219 7vlxp [www.lse.ac.uk/collections/pressAndInformationOffice/newsAndEvents/archives/2005/IDCard FinalReport.htm](http://www.lse.ac.uk/collections/pressAndInformationOffice/newsAndEvents/archives/2005/IDCard%20FinalReport.htm)
219 6x4nvv www.statoil.com/statoilcom/svg00990.nsf?opendatabase&artid=F5255D55E1E78319C1256FEF0044704B
219 39g2wz www.dillinger.de/dh/referenzen/linepipe/01617/index.shtml.en
219 3ac8sj www.hydro.com/ormenlange/en/
219 y7kg26 [www.politics.co.uk/issue-briefs/economy/taxation/tobacco-duty/tobacco-duty-\\$366602.htm](http://www.politics.co.uk/issue-briefs/economy/taxation/tobacco-duty/tobacco-duty-$366602.htm)
219 r9fct [en.wikipedia.org/wiki/War on Drugs](http://en.wikipedia.org/wiki/War%20on%20Drugs)
221 ysncks [news.bbc.co.uk/1/low/uk politics/6205174.stm](http://news.bbc.co.uk/1/low/uk%20politics/6205174.stm)
221 2vq59t [www.boston.com/news/globe/editorial opinion/oped/articles/2007/08/01/the 63 billion sham/](http://www.boston.com/news/globe/editorial%20opinion/oped/articles/2007/08/01/the%2063%20billion%20sham/)
221 ym46a9 <https://www.cia.gov/cia/publications/factbook/print/xx.html>
221 99bpt www.guardian.co.uk/Iraq/Story/0,2763,1681119,00.html
221 2bmuod www.guardian.co.uk/environment/2007/aug/13/renewableenergy.energy
221 3g8nn8 image.guardian.co.uk/sys-files/Guardian/documents/2007/08/13/RenewablesTargetDocument.pdf
221 3jo7q2 [www.viewsofscotland.org/library/docs/HoL STC RE Practicalities 04.pdf](http://www.viewsofscotland.org/library/docs/HoL%20STC%20RE%20Practicalities%2004.pdf)
230 2ykfgw www.guardian.co.uk/environment/2007/jan/09/travelsenvironmentalimpact.greenpolitics
230 2nsvx2 www.number-10.gov.uk/output/Page10300.asp
230 yxq5xk [commentisfree.guardian.co.uk/george monbiot/2007/01/an open letter to the prime mi.html](http://commentisfree.guardian.co.uk/george%20monbiot/2007/01/an%20open%20letter%20to%20the%20prime%20mi.html)
238 3doaeq web.archive.org/web/20040401165322/members.cox.net/weller43/sunshine.htm
239 3lcv9c knol.google.com/k/-/15x31uzlqeo5n/1
248 voxbz news.bbc.co.uk/1/low/business/6247371.stm
248 yofchc news.bbc.co.uk/1/low/uk/7053903.stm
248 3e28ed [www.grida.no/climate/ipcc tar/wg1/118.htm](http://www.grida.no/climate/ipcc%20tar/wg1/118.htm)
258 2bhu35 [www.lafn.org/~dave/trans/energy/rail vs auto EE.html](http://www.lafn.org/~dave/trans/energy/rail%20vs%20auto%20EE.html)

262 6by8x encarta.msn.com/encyclopedia/761553622/Internal-Combustion-Engine.html
262 348whs www.cleangreencar.co.nz/page/prius-petrol-engine
266 ydt7uk www.nrel.gov/business_opportunities/pdfs/31235sow.pdf
266 yaooonz www.windpower.org/en/tour/wres/shear.htm
267 6o86ec www.londonarray.com/london-array-project-introduction/offshore/
268 6bkvbn www.timesonline.co.uk/tol/news/world/asia/article687157.ece
268 yekdaa www.windpower.org/en/stat/betzpro.htm
268 ymfbsn www.windpower.org/en/tour/wres/powdensi.htm
268 ypvbvd www.ref.org.uk/images/pdfs/UK-Wind-Phase-1-web.pdf
268 wbd8o www.ref.org.uk/energydata.php
277 33ptcg www.stevfossett.com/html/main_pages/records.html
278 6r32hf www.theaustralian.news.com.au/story/0,25197,23003236-23349,00.html
282 2af5gw www.airliners.net/info/stats.main?id=100
282 32judd www.wildanimalsonline.com/birds/wanderingalbatross.php
282 2qbquv news.bbc.co.uk/1/low/sci/tech/6988720.stm
282 5h6xph www.goldcoastyachts.com/fastcat.htm
282 4p3yco www.fas.org/man/dod-101/sys/ship/row/rus/903.htm
288 3ap7lc www.biocap.ca/files/Ont/bioenergy-OPA-Feb23-final.pdf
288 4hamks www.methanetomarkets.org/resources/landfills/docs/uk-If-profile.pdf
296 65h3cb www.dorset-technical-committee.org.uk/reports/U-values-of-elements-Sept-2006.pdf
298 5dhups www.arct.cam.ac.uk/UCPB/Place.aspx?rid=943658&p=6&ix=8&pid=1&prcid=27&ppid=201
321 2bqapk www.phys.murdoch.edu.au/rise/reslab/resfiles/tidal/text.html
322 r22oz www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/energy-cost/NS6Chart.html
325 3kmcks www.yourhome.gov.au/technical/index.html
324 3kmcks www.yourhome.gov.au/technical/index.html
333 3b7zdf www.communities.gov.uk/publications/planningandbuilding/generalizedlanduse
336 3av4s9 hdr.undp.org/en/statistics/
344 f754 www.archive.org/web/web.php

Literaturverzeichnis

- Aitchison, E. (1996). Methane generation from UK landfill sites and its use as an energy resource. *Energy Conversion and Management*, 37(6/8):1111–1116. doi: doi:10.1016/0196-8904(95)00306-1.
www.ingentaconnect.com/content/els/01968904/1996/00000037/00000006/art00306.
- Amos, W. A. (2004). Updated cost analysis of photobiological hydrogen production from *Chlamydomonas reinhardtii* green algae – milestone completion report.
www.nrel.gov/docs/fy04osti/35593.pdf.
- Anderson, K., Bows, A., Mander, S., Shackley, S., Agnolucci, P., and Ekins, P. (2006). Decarbonising modern societies: Integrated scenarios process and workshops. Technical Report 48, Tyndall Centre. www.tyndall.ac.uk/research/theme2/final_reports/t3_24.pdf.
- Archer, M. D. and Barber, J. (2004). Photosynthesis and photoconversion. In M. D. Archer and J. Barber, editors, *Molecular to Global Photosynthesis*. World Scientific. ISBN 978-1-86094-256-3. www.worldscibooks.com/lifesci/p218.html.
- Ashworth, W. and Pegg, M. (1986). *The history of the British coal industry. Vol. 5, 1946–1982: the nationalized industry*. Clarendon, Oxford. ISBN 0198282958.
- Asplund, G. (2004). Sustainable energy systems with HVDC transmission. In *Power Engineering Society General Meeting*, volume 2, pages 2299–2303. IEEE. doi: 10.1109/PES.2004.1373296. www.trec-uk.org.uk/reports/HVDC_Gunnar_Asplund_ABB.pdf.
- Asselbergs, B., Bokhorst, J., Harms, R., van Hemert, J., van der Noort, L., ten Velden, C., Vervuurt, R., Wijnen, L., and van Zon, L. (2006). Size does matter – the possibilities of cultivating *Jatropha curcas* for biofuel production in Cambodia. environmental.scum.org/biofuel/jatropha/.
- Baer, P. and Mastrandrea, M. (2006). High stakes: Designing emissions pathways to reduce the risk of dangerous climate change. www.ippr.org/publicationsandreports/.
- Bahrman, M. P. and Johnson, B. K. (2007). The ABCs of HVDC transmission technology. *IEEE Power and Energy Magazine*, 5(2).
- Baines, J. A., Newman, V. G., Hanna, I. W., Douglas, T. H., Carlyle, W. J., Jones, I. L., Eaton, D. M., and Zeronian, G. (1983). Dinorwig pumped storage scheme. *Institution of Civil Engineers Proc. pt. 1*, 74:635–718.
- Baines, J. A., Newman, V. G., Hanna, I. W., Douglas, T. H., Carlyle, W. J., Jones, I. L., Eaton, D. M., and Zeronian, G. (1986). Dinorwig pumped storage scheme. *Institution of Civil Engineers Proc. pt. 1*, 80:493–536.
- Baker, C., Walbancke, J., and Leach, P. (2006). Tidal lagoon power generation scheme in Swansea Bay. www.dti.gov.uk/files/file30617.pdf. A report on behalf of the Dept. of Trade and Industry and the Welsh Development Agency.
- Bayer Crop Science. (2003). Potential of GM winter oilseed rape to reduce the environmental impact of farming whilst improving farmer incomes. tinyurl.com/5j99df.
- Bickley, D. T. and Ryrie, S. C. (1982). A two-basin tidal power scheme for the Severn estuary. In *Conf. on new approaches to tidal power*.
- Binder, M., Faltenbacher, M., Kentzler, M., and Schuckert, M. (2006). Clean urban transport for Europe. deliverable D8 final report. www.fuel-cell-bus-club.com/.
- Black and Veatch. (2005). The UK tidal stream resource and tidal stream technology. report prepared for the Carbon Trust Marine Energy Challenge.
www.carbontrust.co.uk/technology/technologyaccelerator/tidal_stream.htm.

- Blunden, L. S. and Bahaj, A. S. (2007). Tidal energy resource assessment for tidal stream generators. *Proc. IMechE*, 221 Part A: 137–146.
- Bonan, G. B. (2002). *Ecological Climatology: Concepts and Applications*. Cambridge Univ. Press. ISBN 9780521804769.
- Boyer, J. S. (1982). Plant productivity and environment. *Science*, 218 (4571):443–448. doi: 10.1126/science.218.4571.443.
- Braslow, A. L. (1999). *A history of suction-type laminar-flow control with emphasis on flight research*. Number 13 in Monographs in Aerospace History. NASA. www.nasa.gov/centers/dryden/pdf/88792mainLaminar.pdf.
- Broecker, W. S. and Kunzig, R. (2008). *Fixing Climate: What Past Climate Changes Reveal About the Current Threat—and How to Counter It*. Hill and Wang. ISBN 0809045028.
- Burnham, A., Wang, M., and Wu, Y. (2007). Development and applications of GREET 2.7 – the transportation vehicle-cycle model. www.transportation.anl.gov/software/GREET/publications.html.
- Carbon Trust. (2007). Micro-CHP accelerator – interim report. Technical Report CTC726. www.carbontrust.co.uk/publications/publicationdetail.htm?productid=CTC726.
- Carlsson, L. (2002). “Classical” HVDC: still continuing to evolve. *Modern Power Systems*.
- Cartwright, D. E., Edden, A. C., Spencer, R., and Vassie, J. M. (1980). The tides of the northeast Atlantic Ocean. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A*, 298(1436):87–139.
- Catling, D. T. (1966). Principles and practice of train performance applied to London Transport’s Victoria line. Paper 8, Convention on Guided Land Transport (London, 27–28 October 1966).
- Charlier, R. H. (2003a). Sustainable co-generation from the tides: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7:187213.
- Charlier, R. H. (2003b). A “sleeper” awakes: tidal current power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7:515529.
- Charney, J. G., Arakawa, A., Baker, D. J., Bolin, B., Dickinson, R. E., Goody, R. M., Leith, C. E., Stommel, H. M., and Wunsch, C. I. (1979). Carbon dioxide and climate: A scientific assessment. www.nap.edu/catalog.php?record_id=12181.
- Chisholm, S. W., Falkowski, P. G., and Cullen, J. J. (2001). Discrediting ocean fertilisation. *Science*, 294(5541):309–310.
- Chitrakar, R., Kanoh, H., Miyai, Y., and Ooi, K. (2001). Recovery of lithium from seawater using manganese oxide adsorbent ($\text{H}_{1.6}\text{Mn}_{1.6}\text{O}_4$) derived from $\text{Li}_{1.6}\text{Mn}_{1.6}\text{O}_4$. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 40(9):2054–2058. pubs.acs.org/cgi-bin/abstract.cgi/ienced/2001/40/i09/abs/ie000911h.html.
- Church, R. A., Hall, A., and Kanefsky, J. (1986). *The history of the British coal industry. Vol. 3, 1830–1913: Victorian pre-eminence*. Clarendon, Oxford. ISBN 0198282842.
- Cohen, B. L. (1983). Breeder reactors: A renewable energy source. *American Journal of Physics*, 51(1):75–76. sustainablenuclear.org/PADs/pad11983cohen.pdf.
- Coley, D. (2001). Emission factors for walking and cycling. www.centres.ex.ac.uk/cee/publications/reports/91.html.
- Committee on Radioactive Waste Management. (2006). Managing our radioactive waste safely. www.corwm.org.uk/Pages/Current%20Publications/700%20-%20CoRWM%20July%202006%20Recommendations%20to%20Government.pdf.
- CUTE. (2006). Clean urban transport for Europe. detailed summary of achievements. www.fuel-cell-bus-club.com/.
- David, J. and Herzog, H. (2000). The cost of carbon capture. [sequestration.mit.edu/pdf/David and Herzog.pdf](http://sequestration.mit.edu/pdf/David%20and%20Herzog.pdf), presented at the Fifth International Conf. on Greenhouse Gas Control Technologies, Cairns, Australia, August 13 - August 16 (2000).

- Davidson, E. A. and Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440:165–173. doi: doi:10.1038/nature04514. www.nature.com/nature/journal/v440/n7081/full/nature04514.html.
- Deffeyes, K. S. and MacGregor, I. D. (1980). World uranium resources. *Scientific American*, pages 66–76.
- Denholm, P., Kulcinski, G. L., and Holloway, T. (2005). Emissions and energy efficiency assessment of baseload wind energy systems. *Environ Sci Technol*, 39(6):1903–1911. ISSN 0013-936X. www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=pubmed&dopt=Abstract&listuids=15819254.
- Denison, R. A. (1997). Life-cycle assessment for paper products. In E. Ellwood, J. Antle, G. Eyring, and P. Schulze, editors, *Wood in Our Future: The Role of Life-Cycle Analysis: Proc. a Symposium*. National Academy Press. ISBN 0309057450. books.nap.edu/openbook.php?recordid=5734.
- Dennis, C. (2006). Solar energy: Radiation nation. *Nature*, 443:23–24. doi: 10.1038/443023a.
- Dept. for Transport. (2007). Transport statistics Great Britain. www.dft.gov.uk/pgr/statistics/datatablespublications/tsgb/.
- Dept. of Defense. (2008). More fight – less fuel. Report of the Defense Science Board Task Force on DoD Energy Strategy.
- Dept. of Trade and Industry. (2004). DTI Atlas of UK marine renewable energy resources. www.offshore-sea.org.uk/.
- Dept. of Trade and Industry. (2002a). Energy consumption in the United Kingdom. www.berr.gov.uk/files/file11250.pdf.
- Dept. of Trade and Industry. (2002b). Future offshore. www.berr.gov.uk/files/file22791.pdf.
- Dept. of Trade and Industry. (2007). Impact of banding the renewables obligation – costs of electricity production. www.berr.gov.uk/files/file39038.pdf.
- Dessler, A. E. and Parson, E. A. (2006). *The Science and Politics of Global Climate Change – A Guide to the Debate*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. ISBN 9780521539418.
- di Prampero, P. E., Cortili, G., Mognoni, P., and Saibene, F. (1979). Equation of motion of a cyclist. *J. Appl. Physiology*, 47:201–206. jap.physiology.org/cgi/content/abstract/47/1/201.
- Diamond, J. (2004). *Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed*. Penguin.
- E4tech. (2007). A review of the UK innovation system for low carbon road transport technologies. www.dft.gov.uk/pgr/scienceresearch/technology/lctis/e4techlcpdf.
- Eckhartt, D. (1995). Nuclear fuels for low-beta fusion reactors: Lithium resources revisited. *Journal of Fusion Energy*, 14(4):329–341. ISSN 0164-0313 (Print) 1572-9591 (Online). doi: 10.1007/BF02214511. www.springerlink.com/content/35470543rj8t2gk1/.
- Eddington, R. (2006). Transport's role in sustaining the UK's productivity and competitiveness.
- Eden, R. and Bending, R. (1985). Gas/electricity competition in the UK. Technical Report 85/6, Cambridge Energy Research Group, Cambridge.
- Elliott, D. L., Wendell, L. L., and Gower, G. L. (1991). An assessment of windy land area and wind energy potential in the contiguous United States. www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/5252760-ccu0pk/.
- Energy for Sustainable Development Ltd. (2003). English partnerships sustainable energy review. www.englishpartnerships.co.uk.

- Erdincler, A. U. and Vesilind, P. A. (1993). Energy recovery from mixed waste paper. *Waste Management & Research*, 11(6):507–513. doi: 10.1177/0734242X9301100605.
- Etheridge, D., Steele, L., Langenfelds, R., Francey, R., Barnola, J.-M., and Morgan, V. (1998). Historical CO₂ records from the Law Dome DE08, DE08-2, and DSS ice cores. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Dept. of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA. cdiac.ornl.gov/trends/co2/lawdome.html.
- European Commission. (2007). Concentrating solar power – from research to implementation. www.solarpaces.org/Library/library.htm.
- Evans, D. G. (2007). Liquid transport biofuels – technology status report. www.nnfcc.co.uk/.
- Evans, R. K. (2008). An abundance of lithium. www.worldlithium.com.
- Faber, T. E. (1995). *Fluid dynamics for physicists*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Faiman, D., Raviv, D., and Rosenstreich, R. (2007). Using solar energy to arrest the increasing rate of fossil-fuel consumption: The southwestern states of the USA as case studies. *Energy Policy*, 35:567576.
- Fies, B., Peterson, T., and Powicki, C. (2007). Solar photovoltaics – expanding electric generation options. [mydocs.epri.com/docs/SEIG/1016279 Photovoltaic White Paper 1207.pdf](http://mydocs.epri.com/docs/SEIG/1016279%20Photovoltaic%20White%20Paper%201207.pdf).
- Fisher, K., Wallén, E., Laenen, P. P., and Collins, M. (2006). Battery waste management life cycle assessment. www.defra.gov.uk/environment/waste/topics/batteries/pdf/erm-lcareport0610.pdf.
- Flather, R. A. (1976). A tidal model of the north-west European continental shelf. *Memoires Soci´et´e Royale des Sciences de Liège*, 10 (6):141–164.
- Flinn, M. W. and Stoker, D. (1984). *The history of the British coal industry. Vol. 2, 1700–1830: the Industrial Revolution*. Clarendon, Oxford. ISBN 0198282834.
- Francis, G., Edinger, R., and Becker, K. (2005). A concept for simultaneous wasteland reclamation, fuel production, and socio-economic development in degraded areas in India: Need, potential and perspectives of *Jatropha* plantations. *Natural Resources Forum*, 29(1):12–24. doi: 10.1111/j.1477-8947.2005.00109.x.
- Franklin, J. (2007). Principles of cycle planning. www.cyclenetwork.org.uk/papers/071119principles.pdf.
- Freeston, D. H. (1996). Direct uses of geothermal energy 1995. geoheat.oit.edu/bulletin/bull17-1/art1.pdf.
- Gabrielli, G. and von Kármán, T. (1950). What price speed? *Mechanical Engineering*, 72(10).
- Garrett, C. and Cummins, P. (2005). The power potential of tidal currents in channels. *Proc. Royal Society A*, 461(2060):2563–2572. [dx.doi.org/10.1098/rspa.2005.1494](https://doi.org/10.1098/rspa.2005.1494).
- Garrett, C. and Cummins, P. (2007). The efficiency of a turbine in a tidal channel. *J Fluid Mech*, 588:243–251. journals.cambridge.org/production/action/cjoGetFulltext?fulltextid=1346064.
- Gellings, C. W. and Parmenter, K. E. (2004). Energy efficiency in fertilizer production and use. In C. W. Gellings and K. Blok, editors, *Efficient Use and Conservation of Energy*, Encyclopedia of Life Support Systems. Eolss Publishers, Oxford, UK. www.eolss.net.
- German Aerospace Center (DLR) Institute of Technical Thermodynamics Section Systems Analysis and Technology Assessment. (2006). Concentrating solar power for the Mediterranean region. www.dlr.de/tt/med-csp. Study commissioned by Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Germany.
- Goodstein, D. (2004). *Out of Gas*. W. W. Norton and Company, New York. ISBN 0393058573.
- Green, J. E. (2006). Civil aviation and the environment – the next frontier for the aerodynamicist. *Aeronautical Journal*, 110(1110): 469–486.

- Grubb, M. and Newbery, D. (2008). Pricing carbon for electricity generation: national and international dimensions. In M. Grubb, T. Jamasb, and M. G. Pollitt, editors, *Delivering a Low Carbon Electricity System: Technologies, Economics and Policy*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Gummer, J., Goldsmith, Z., Peck, J., Eggar, T., Hurd, N., Miraj, A., Norris, S., Northcote, B., Oliver, T., Strong, D., Twitchen, K., and Wilkie, K. (2007). Blueprint for a green economy. www.qualityoflifechallenge.com.
- Halkema, J. A. (2006). Wind energy: Facts and fiction. www.countryguardian.net/halkema-windenergyfactfiction.pdf.
- Hammond, G. and Jones, C. (2006). Inventory of carbon & energy (ICE). www.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodied/. version 1.5a Beta.
- Hammons, T. J. (1993). Tidal power. *Proc. IEEE*, 8(3):419–433.
- Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., Russell, G., Lea, D., and Siddall, M. (2007). Climate change and trace gases. *Phil. Trans. Royal. Soc. A*, 365:1925–1954. doi: 10.1098/rsta.2007.2052. [pubs.giss.nasa.gov/abstracts/2007/Hansen etal 2.html](http://pubs.giss.nasa.gov/abstracts/2007/Hansen%20etal%20.html).
- Hastings, R. and Wall, M. (2006). *Sustainable Solar Housing: Strategies And Solutions*. Earthscan. ISBN 1844073254.
- Hatcher, J. (1993). *The History of the British Coal Industry: Towards the Age of Coal: Before 1700 Vol 1*. Clarendon Press.
- Heaton, E., Voigt, T., and Long, S. (2004). A quantitative review comparing the yields of two candidate C4 perennial biomass crops in relation to nitrogen, temperature, and water. *Biomass and Bioenergy*, 27:21–30.
- Helm, D., Smale, R., and Phillips, J. (2007). Too good to be true? The UK's climate change record. [www.dieterhelm.co.uk/publications/Carbon record 2007.pdf](http://www.dieterhelm.co.uk/publications/Carbon%20record%202007.pdf).
- Helweg-Larsen, T. and Bull, J. (2007). Zero carbon Britain – an alternative energy strategy. zerocarbonbritain.com/.
- Herring, J. (2004). Uranium and thorium resource assessment. In C. J. Cleveland, editor, *Encyclopedia of Energy*. Boston Univ., Boston, USA. ISBN 0-12-176480-X.
- Herzog, H. (2003). Assessing the feasibility of capturing CO₂ from the air. [web.mit.edu/coal/working_folder/pdfs/Air Capture Feasibility.pdf](http://web.mit.edu/coal/working_folder/pdfs/Air%20Capture%20Feasibility.pdf).
- Herzog, H. (2001). What future for carbon capture and sequestration? *Environmental Science and Technology*, 35:148A–153A. sequestration.mit.edu/.
- Hird, V., Emerson, C., Noble, E., Longfield, J., Williams, V., Goetz, D., Hoskins, R., Paxton, A., and Dupee, G. (1999). Still on the road to ruin? An assessment of the debate over the unnecessary transport of food, five years on from the food miles report.
- Hodgson, P. (1999). *Nuclear Power, Energy and the Environment*. Imperial College Press.
- Hopfield, J. J. and Gollub, J. (1978). Introduction to solar energy. www.inference.phy.cam.ac.uk/sustainable/solar/HopfieldGollub78/scan.html.
- Horie, H., Tanjo, Y., Miyamoto, T., and Koga, Y. (1997). Development of a lithium-ion battery pack system for EV. *JSAE Review*, 18 (3):295–300.
- HPTCJ. (2007). Heat pumps: Long awaited way out of the global warming. www.hptcj.or.jp/about_e/contribution/index.html.
- Indermuhle, A., Stocker, T., Joos, F., Fischer, H., Smith, H., Wahlen, M., Deck, B., Mastroianni, D., Tschumi, J., Blunier, T., Meyer, R., and Stauffer, B. (1999). Holocene carbon-cycle dynamics based on CO₂ trapped in ice at Taylor Dome, Antarctica. *Nature*, 398:121–126.

- International Energy Agency. (2001). Things that go blip in the night – standby power and how to limit it. www.iea.org/textbase/nppdf/free/2000/blipinthenight01.pdf.
- Jackson, P. and Kershaw, S. (1996). Reducing long term methane emissions resulting from coal mining. *Energy Conversion and Management*, 37(6-8):801–806. doi: 10.1016/0196-8904(95)00259-6.
- Jevons, W. S. (1866). *The Coal Question; An Inquiry concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of our Coal-mines*. Macmillan and Co., London, second edition. oll.libertyfund.org/.
- Jones, I. S. F. (2008). The production of additional marine protein by nitrogen nourishment. www.oceannourishment.com/files/Jc08.pdf.
- Jones, P. M. S. (1984). Statistics and nuclear energy. *The Statistician*, 33(1):91–102. www.jstor.org/pss/2987717.
- Judd, B., Harrison, D. P., and Jones, I. S. F. (2008). Engineering ocean nourishment. In *World Congress on Engineering WCE 2008*, pages 1315–1319. IAENG. ISBN 978-988-98671-9-5.
- Juniper, T. (2007). *How Many Lightbulbs does it take To Change a Planet?* Quercus, London.
- Kammen, D. M. and Hassenzahl, D. M. (1999). *Should We Risk It? Exploring Environmental, Health, and Technological Problem Solving*. Princeton Univ. Press.
- Kaneko, T., Shimada, M., Kujiraoka, S., and Kojima, T. (2004). Easy maintenance and environmentally-friendly train traction system. *Hitachi Review*, 53(1):15–19. www.hitachi.com/ICSFiles/afiedfile/2004/05/25/r2004_01_103.pdf.
- Keeling, C. and Whorf, T. (2005). Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Dept. of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA.
- Keith, D. W., Ha-Duong, M., and Stolaroff, J. K. (2005). Climate strategy with CO₂ capture from the air. *Climatic Change*. doi: 10.1007/s10584-005-9026-x. www.ucalgary.ca/~keith/papers/51.Keith.2005.ClimateStrat WithAirCapture.e.pdf.
- King, J. (2007). The King review of low-carbon cars. Part I: the potential for CO₂ reduction. hm-treasury.gov.uk/king.
- King, J. (2008). The King review of low-carbon cars. Part II: recommendations for action. hm-treasury.gov.uk/king.
- Koomey, J. G. (2007). Estimating total power consumption by servers in the US and the world. blogs.business2.com/greenwombat/files/serverpowerusecomplete-v3.pdf.
- Kowalik, Z. (2004). Tide distribution and tapping into tidal energy. *Oceanologia*, 46(3):291–331.
- Kuehr, R. (2003). *Computers and the Environment: Understanding and Managing their Impacts (Eco-Efficiency in Industry and Science)*. Springer. ISBN 1402016808.
- Lackner, K. S., Grimes, P., and Ziock, H.-J. (2001). Capturing carbon dioxide from air. www.netl.doe.gov/publications/proceedings/01/carbon_seq/7b1.pdf. Presented at First National Conf. on Carbon Sequestration, Washington DC.
- Lawson, B. (1996). Building materials, energy and the environment: Towards ecologically sustainable development.
- Layzell, D. B., Stephen, J., and Wood, S. M. (2006). Exploring the potential for biomass power in Ontario. www.biocap.ca/files/Ont_bioenergy_OPA_Feb23_final.pdf.

- Le Quéré, C., Rödenbeck, C., Buitenhuis, E., Conway, T. J., Langenfelds, R., Gomez, A., Labuschagne, C., Ramonet, M., Nakazawa, T., Metz, N., Gillett, N., and Heimann, M. (2007). Saturation of the southern ocean CO₂ sink due to recent climate change. *Science*, 316:1735–1738. doi: 10.1126/science.1136188. gmaweb.env.uea.ac.uk/e415/publications.html.
- Lemofouet-Gatsi, S. (2006). *Investigation and optimisation of hybrid electricity storage systems based on compressed air and supercapacitors*. PhD thesis, EPFL. library.epfl.ch/theses/?nr=3628.
- Lemofouet-Gatsi, S. and Rufer, A. (2005). Hybrid energy systems based on compressed air and supercapacitors with maximum efficiency point tracking. www.epfl.ch/publications/lemofouet_rufer_epe_05.pdf.
- Lomborg, B. (2001). *The skeptical environmentalist: measuring the real state of the world*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. ISBN 0-521-80447-7.
- Mabee, W. E., Saddler, J. N., Nielsen, C., Henrik, L., and Steen Jensen, E. (2006). Renewable-based fuels for transport. www.risoe.dk/rispubl/Energy-report5/ris-r-1557_49-52.pdf. Riso Energy Report 5.
- MacDonald, J. M. (2008). The economic organization of US broiler production. www.ers.usda.gov/Publications/EIB38/EIB38.pdf. Economic Information Bulletin No. 38. Economic Research Service, US Dept. of Agriculture.
- MacDonald, P., Stedman, A., and Symons, G. (1992). The UK geothermal hot dry rock R&D programme. In *Seventeenth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.
- MacKay, D. J. C. (2007a). Enhancing electrical supply by pumped storage in tidal lagoons. www.inference.phy.cam.ac.uk/mackay/abstracts/Lagoons.html.
- MacKay, D. J. C. (2007b). Under-estimation of the UK tidal resource. www.inference.phy.cam.ac.uk/mackay/abstracts/TideEstimate.html.
- MacLeay, I., Harris, K., and Michaels, C. (2007). Digest of United Kingdom energy statistics 2007. www.berr.gov.uk.
- Malanima, P. (2006). Energy crisis and growth 1650–1850: the European deviation in a comparative perspective. *Journal of Global History*, 1:101–121. doi: 10.1017/S1740022806000064.
- Marland, G., Boden, T., and Andres, R. J. (2007). Global, regional, and national CO₂ emissions. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Dept. of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA. cdiac.ornl.gov/trends/emis/tre_glob.htm.
- Massachusetts Institute of Technology. (2006). The future of geothermal energy. geothermal.inel.gov/publications/future_of_geothermal_energy.pdf.
- McBride, J. P., Moore, R. E., Witherspoon, J. P., and Blanco, R. E. (1978). Radiological impact of airborne effluents of coal and nuclear plants. *Science*, 202(4372):1045–1050. doi: 10.1126/science.202.4372.1045.
- Meadows, M. (1996). Estimating landfill methane emissions. *Energy Conversion and Management*, 37(6-8):1099–1104. doi: 10.1016/0196-8904(95)00304-5.
- B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, and L. Meyer, editors. (2005). *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. ISBN 978-0-521-68551-1. www.ipcc.ch/ipccreports/srccs.htm.
- Mills, D. R. and Lièvre, P. L. (2004). Competitive solar electricity. www.ausra.com/pdfs/PaperCompetitiveSolarElectricity.pdf.

- Mills, D. R. and Morgan, R. G. (2008). Solar thermal electricity as the primary replacement for coal and oil in US generation and transportation. www.ausra.com/technology/reports.html.
- Mills, D. R. and Morrison, G. L. (2000). Compact Linear Fresnel Reflector solar thermal powerplants. *Solar Energy*, 68(3):263–283. doi: 10.1016/S0038-092X(99)00068-7.
- Mills, D. R., Le Lièvre, P., and Morrison, G. L. (2004). First results from Compact Linear Fresnel Reflector installation. [solarheatpower.veritel.com.au/MILLS CLFR ANZSES FINAL.pdf](http://solarheatpower.veritel.com.au/MILLS_CLFR_ANZSES_FINAL.pdf).
- Mindl, P. (2003). Hybrid drive super-capacitor energy storage calculation. [www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2003/Supcap6 EDPE.pdf](http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2003/Supcap6_EDPE.pdf).
- Mollison, D. (1986). Wave climate and the wave power resource. In D. Evans and A. de O. Falcao, editors, *Hydrodynamic of Ocean Wave-Energy Utilization*, pages 133–156, Berlin. Springer. www.ma.hw.ac.uk/~denis/wave.html.
- Mollison, D. (1991). The UK wave power resource. In *Wave Energy (Institution of Mechanical Engineers – Seminar)*, pages 1–6. John Wiley & Sons. www.ma.hw.ac.uk/~denis/wave.html.
- Mollison, D., Buneman, O. P., and Salter, S. H. (1976). Wave power availability in the NE Atlantic. *Nature*, 263(5574):223–226. www.ma.hw.ac.uk/~denis/wave.html.
- Monteith, J. L. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos. Trans. R. Soc. London*, 281:277–294.
- National Bureau of Economic Research. (2001). NBER macrohistory database. [www.nber.org/databases/macrophistory/ contents/](http://www.nber.org/databases/macrophistory/contents/).
- Neftel, A., Friedli, H., Moor, E., Ltscher, H., Oeschger, H., Siegenthaler, U., and Stauffer, B. (1994). Historical CO₂ record from the Siple station ice core. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Dept. of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA. cdiac.ornl.gov/trends/co2/siple.htm.
- Netherlands Environmental Assessment Agency. (2006). History database of the global environment. www.mnp.nl/hyde/.
- Nickol, C. L. (2008). Silent Aircraft Initiative concept risk assessment. ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20080012497_2008011089.pdf.
- Norrström, H. (1980). Low waste technology in pulp and paper industries. *Pure & Appl. Chem.*, 52:1999–2004. www.iupac.org/publications/pac/1980/pdf/5208x1999.pdf.
- Nuttall, W. J. (2004). *Nuclear Renaissance*. Institute of Physics Publishing. OECD Nuclear Energy Agency. (2006). *Forty Years of Uranium Resources, Production and Demand in perspective*. OECD Publishing. ISBN 9264028064. books.google.com/books?id=HIT1o985uKYC.
- Ongena, J. and Van Oost, G. (2006). Energy for future centuries. Will fusion be an inexhaustible, safe and clean energy source? www.fusie-energie.nl/artikelen/ongena.pdf.
- Oswald, J., Raine, M., and Ashraf-Ball, H. (2008). Will British weather provide reliable electricity? *Energy Policy*, in press. doi: 10.1016/j.enpol.2008.04.03.
- Price, R. and Blaise, J. (2002). Nuclear fuel resources: Enough to last? www.ingentaconnect.com/content/oeecd/16059581/2002/00000020/00000002/6802021e.
- Putt, R. (2007). Algae as a biodiesel feedstock: A feasibility assessment. www.eere.energy.gov/afdc/pdfs/algae.pdf.
- Quayle, R. G. and Changery, M. J. (1981). Estimates of coastal deepwater wave energy potential for the world. *Oceans*, 13:903–907. ieeexplore.ieee.org/iel6/8271/25889/01151590.pdf.
- Rice, T. and Owen, P. (1999). *Decommissioning the Brent Spar*. Taylor and Francis.

- Richards, B. S. and Watt, M. E. (2007). Permanently dispelling a myth of photovoltaics via the adoption of a new net energy indicator. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(1):162172. www.sciencedirect.com/science/journal/13640321.
- Richards, H. G., Parker, R. H., Green, A. S. P., Jones, R. H., Nicholls, J. D. M., Nicol, D. A. C., Randall, M. M., Richards, S., Stewart, R. C., and Willis-Richards, J. (1994). The performance and characteristics of the experimental hot dry rock geothermal reservoir at Rosemanowes, Cornwall (1985-1988). *Geothermics*, 23(2):73-109. ISSN 0375-6505.
- Ridley, T. M. and Catling, D. T. (1982). The energy implications of the design of mass transit railways. Presented at Tunnelling '82 (Third International Symposium), Brighton.
- Rogner, H.-H. (2000). Energy resources. In *World Energy Assessment – Energy and the challenge of sustainability*, chapter 5. UNDP, New York, USA. www.undp.org/energy/activities/wea/draft-start.html.
- Ross, A. (2008). The Loch Sloy hydro-electric scheme 1950. www.arrocharheritage.com/LochSloyHydroElectricScheme.htm.
- Royal Commission on Environmental Pollution. (2004). Biomass as a renewable energy source. www.rcep.org.uk.
- Royal Society working group on biofuels. (2008). Sustainable biofuels: prospects and challenges. royalsociety.org. Policy document 01/08.
- Rubbia, C., Rubio, J., Buono, S., Carminati, F., Fiétier, N., Galvez, J., Gelès, C., Kadi, Y., Klapisch, R., Mandrillon, P., Revol, J., and Roche, C. (1995). Conceptual design of a fast neutron operated high power energy amplifier. Technical Report CERN/AT/95-44 (ET), European Organization for Nuclear Research. [doc.cern.ch//archive/electronic/other/generic/public/cer-0210391.pdf](http://doc.cern.ch/archive/electronic/other/generic/public/cer-0210391.pdf).
- Ruddell, A. (2003). Investigation on storage technologies for intermittent renewable energies: Evaluation and recommended r&d strategy. www.itpower.co.uk/investire/pdfs/flywheelrep.pdf.
- Rydh, C. J. and Karlström, M. (2002). Life cycle inventory of recycling portable nickel-cadmium batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, 34:289-309. homepage.te.hik.se/personal/tryca/battery/abstracts.htm.
- Salter, S. H. (2005). Possible under-estimation of the UK tidal resource. www.berr.gov.uk/files/file31313.pdf. Submission for DTI Energy Review.
- Schellnhuber, H. J., Cramer, W., Nakicenovic, N., Wigley, T., and Yohe, G. (2006). *Avoiding Dangerous Climate Change*. Cambridge Univ. Press. www.defra.gov.uk/environment/climatechange/internat/pdf/avoid-dangercc.pdf.
- Schiermeier, Q., Tollefson, J., Scully, T., Witze, A., and Morton, O. (2008). Energy alternatives: Electricity without carbon. *Nature*, 454:816-823. doi: 10.1038/454816a.
- Schlaich, J., Bergermann, R., Schiel, W., and Weinrebe, G. (2005). Design of commercial solar updraft tower systems – utilization of solar induced convective flows for power generation. *Journal of Solar Energy Engineering*, 127(1):117-124. doi: 10.1115/1.1823493. www.sbp.de/de/html/contact/download/TheSolarUpdraft.pdf.
- Schlaich, J., Schiel, W. (2001) *Solar Chimneys*. In R.A. Meyers(ed) Encyclopedia of Physical Science and Technology, 3rd Edition, Academic Press, London. ISBN 0-12-227410-5. www.solarmillennium.de/pdf/SolarCh.pdf.
- Schmer, M. R., Vogel, K. P., Mitchell, R. B., and Perrin, R. K. (2008). Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass. *PNAS*, 105(2):464-469. doi: 10.1073/pnas.0704767105. www.pnas.org/cgi/content/full/105/2/464.

- Schuiling, R. and Krijgsman, P. (2006). Enhanced weathering; an effective and cheap tool to sequester CO₂. *Climatic Change*, 74(1-3): 349–354.
- S. I. Schwartz, editor. (1998). *Atomic Audit: Costs and Consequences of US Nuclear Weapons Since 1940*. Brookings Institution Press, Washington, D.C.
www.brook.edu/fp/projects/nucwcost/schwartz.htm.
- Seko, N., Katakai, A., Hasegawa, S., Tamada, M., Kasai, N., Takeda, H., Sugo, T., and Saito, K. (2003). Aquaculture of uranium in seawater by a fabric-adsorbent submerged system. *Nuclear Technology*, 144(2):274–278.
- Shapouri, H., Duffield, J. A., and Graboski, M. S. (1995). Estimating the net energy balance of corn ethanol. www.ethanol-gec.org/corn_eth.htm. United States Dept. of Agriculture Agricultural Economic Report Number 721.
- Sharman, H. (2005). Why wind power works for Denmark. *Proc. ICE Civil Engineering*, 158:6672. incoteco.com/upload/CIEN.158.2.66.pdf.
- Shaw, T. L. and Watson, M. J. (2003a). The effects of pumping on the energy potential of a tidal power barrage. *Engineering Sustainability*, 156(2):111–117. ISSN 1478-4637. doi: 10.1680/ensu.156.2.111.37018.
- Shaw, T. L. and Watson, M. J. (2006). Flexible power generation from a Severn barrage. www.dti.gov.uk/files/file31332.pdf.
- Shaw, T. L. and Watson, M. J. (2003b). Flexible power generation from the tides. *Engineering Sustainability*, 156(2):119–123. ISSN 1478-4629.
- Shepherd, D. W. (2003). *Energy Studies*. Imperial College Press.
- Shockley, W. and Queisser, H. J. (1961). Detailed balance limit of efficiency of *p-n* junction solar cells. *Journal of Applied Physics*, 32 (3):510–519.
- Shyy, W., Berg, M., and Ljungqvist, D. (1999). Flapping and flexible wings for biological and micro air vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*, 35(5):455–505.
- Siegenthaler, U., Monnin, E., Kawamura, K., Spahni, R., Schwander, J., Stauffer, B., Stocker, T., Barnola, J.-M., and Fischer, H. (2005). Supporting evidence from the EPICA Dronning Maud Land ice core for atmospheric CO₂ changes during the past millennium. *Tellus B*, 57(1):51–57. doi: 10.1111/j. 1600-0889.2005.00131.x.
<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/antarctica/maud/edml-co2-2005.xls>.
- Sims, R., Schock, R., Adegbulugbe, A., Fenhann, J., Konstantinaviciute, I., Moomaw, W., Nimir, H., Schlamadinger, B., Torres-Martinez, J., Turner, C., Uchiyama, Y., Vuori, S., Wamukonya, N., and Zhang, X. (2007). Energy supply. In B. Metz, O. Davidson, P. Bosch, R. Dave, , and L. Meyer, editors, *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-chapter4.pdf.
- Sinden, G. (2005). Variability of UK marine resources. Technical report, Oxford.
www.carbontrust.co.uk/NR/rdonlyres/EC293061-611D-4BC8-A75C-9F84138184D3/0/variability_uk_marine_energy_resources.pdf.
- Sleath, J. F. A. (1984). *Sea bed mechanics*. Wiley, New York. ISBN 047189091X.
- Socolow, R. (2006). Stabilization wedges: An elaboration of the concept. In H. J. Schellnhuber, W. Cramer, N. Nakicenovic, T. Wigley, and G. Yohe, editors, *Avoiding Dangerous Climate Change*. Cambridge Univ. Press.
- Steinberg, M. and Dang, V. (1975). Preliminary design and analysis of a process for the extraction of lithium from seawater. Technical Report 20535-R, Brookhaven National Lab., Upton, N.Y.(USA). www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=7351225. Presented at Symposium on United States lithium resources and requirements by the year 2000; 22 Jan 1976; Lakewood, CO, USA.

- Stern, N. (2007). *The Economics of Climate Change*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Subcommittee on Poultry Nutrition, National Research Council. (1994). *Nutrient Requirements of Poultry*. National Academy Press, Washington, ninth revised edition edition. www.nap.edu/openbook.php?isbn=0309048923.
- Supple, B. (1987). *The history of the British coal industry. Vol. 4, 1913–1946: the political economy of decline*. Clarendon, Oxford. ISBN 019828294X.
- Taylor, G. I. (1920). Tidal friction in the Irish Sea. *R. Soc. Lond. Ser. A*, 220:1–33. doi: 10.1098/rsta.1920.0001.
- Taylor, G. K. (2002a). Are you missing the boat? the ekranoplan in the 21st century – its possibilities and limitations. www.hypercraftassociates.com/areyoumissingtheboat2002.pdf. Presented at the 18th Fast Ferry Conf., Nice, France.
- Taylor, S. J. (2002b). The Severn barrage – definition study for a new appraisal of the project. www.dti.gov.uk/files/file15363.pdf. ETSU REPORT NO. T/09/00212/00/REP.
- Tennekes, H. (1997). *The Simple Science of Flight*. MIT Press.
- Thakur, P. C., Little, H. G., and Karis, W. G. (1996). Global coalbed methane recovery and use. *Energy Conversion and Management*, 37 (6/8):789–794.
- The Earthworks Group. (1989). *50 Simple things you can do to save the earth*. The Earthworks Press, Berkeley, California. ISBN 0-929634-06-3.
- Treloar, G. J., Love, P. E. D., and Crawford, R. H. (2004). Hybrid life-cycle inventory for road construction and use. *J. Constr. Engrg. and Mgmt.*, 130(1):43–49.
- Trieb, F. and Knies, G. (2004). A renewable energy and development partnership EU-ME-NA for large scale solar thermal power and desalination in the Middle East and in North Africa. www.gezen.nl/wordpress/wp-content/uploads/2006/09/sanaa-paper-and-annex_15-04-2004.pdf.
- Tsuruta, T. (2005). Removal and recovery of lithium using various microorganisms. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 100(5):562–566. www.jstage.jst.go.jp/article/jbb/100/5/100_562/article.
- Turkenburg, W. C. (2000). Renewable energy technologies. In *World Energy Assessment – Energy and the challenge of sustainability*, chapter 7. UNDP, New York, USA. www.undp.org/energy/activities/wea/draft-start.html.
- Ucuncu, A. (1993). Energy recovery from mixed paper waste. Technical report, NC, USA. www.p2pays.org/ref/11/10059.pdf.
- Van den Berg, G. (2004). Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. *Journal of Sound and Vibration*, 277:955–970. www.nowap.co.uk/docs/windnoise.pdf.
- van Voorthuysen, E. d. M. (2008). Two scenarios for a solar world economy. *Int. J. Global Environmental Issues*, 8(3):233247.
- Ventour, L. (2008). The food we waste. news.bbc.co.uk/1/shared/bsp/hi/pdfs/foodwewaste_fullreport08_05_08.pdf.
- Warwick HRI. (2007). Direct energy use in agriculture: opportunities for reducing fossil fuel inputs. www2.warwick.ac.uk/fac/sci/whri/research/climatechange/energy/direct_energy_use_in_agriculture.pdf.
- Water UK. (2006). Towards sustainability 2005–2006. www.water.org.uk/home/policy/reports/sustainability/indicators-2005-06/towards-sustainability-2005-2006.pdf.
- Watson, J., Hertin, J., Randall, T., and Gough, C. (2002). Renewable energy and combined heat and power resources in the UK. Technical report. www.tyndall.ac.uk/publications/working_papers/wp22.pdf. Working Paper 22.
- Wavegen. (2002). Islay Limpet project monitoring – final report. www.wavegen.co.uk/pdf/art.1707.pdf.
- Weber, C. L. and Matthews, H. S. (2008). Food-miles and the relative climate impacts of food choices in the United States. *Environ. Sci. Technol.*, 42(10):3508–3513. doi: 10.1021/es702969f.

- Weightman, M. (2007). Report of the investigation into the leak of dissolver product liquor at the Thermal Oxide Reprocessing Plant (THORP), Sellafield, notified to HSE on 20 April 2005. www.hse.gov.uk/nuclear/thorpreport.pdf.
- Wiedmann, T., Wood, R., Lenzen, M., Minx, J., Guan, D., and Barrett, J. (2008). Development of an embedded carbon emissions indicator producing a time series of input-output tables and embedded carbon dioxide emissions for the UK by using a MRIO data optimisation system. randd.defra.gov.uk/Document.aspx?Document=EV02033_7331_FRP.pdf.
- Williams, D. and Baverstock, K. (2006). Chernobyl and the future: Too soon for a final diagnosis. *Nature*, 440:993–994. doi:10.1038/440993a.
- Williams, E. (2004). Energy intensity of computer manufacturing: hybrid assessment combining process and economic input-output methods. *Environ Sci Technol*, 38(22):6166–6174. ISSN 0013-936X. [\url{www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=pubmed&dopt=Abstract&list_uids=15573621}](http://url{www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=pubmed&dopt=Abstract&list_uids=15573621}).
- Williams, R. H. (2000). Advanced energy supply technologies. In *World Energy Assessment – Energy and the challenge of sustainability*, chapter 8. UNDP, New York, USA. www.undp.org/energy/activities/wea/draft-start.html.
- Wilson, E. M. and Balls, M. (1990). Tidal power generation. In P. Novak, editor, *Developments in Hydraulic Engineering*, chapter 2. Taylor & Francis. ISBN 185166095X.
- Wood, B. (1985). Economic district heating from existing turbines. *Institution of Civil Engineers Proc. pt. 1*, 77:27–48.
- Yaros, B. (1997). Life-cycle thinking for wood and paper products. In E. Ellwood, J. Antle, G. Eyring, and P. Schulze, editors, *Wood in Our Future: The Role of Life-Cycle Analysis: Proc. a Symposium*.
- Zaleski, C. P. (2005). The future of nuclear power in France, the EU and the world for the next quarter-century. www.npec-web.org/Essays/Essay050120Zalenski-FutureofNuclearPower.pdf. tinyurl.com/32louu.
- Zhu, X.-G., Long, S. P., and Ort, D. R. (2008). What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? *Current Opinion in Biotechnology*, 19:153159.

Über den Autor

Sustainable Energy – without the hot air

David JC MacKay

About the author

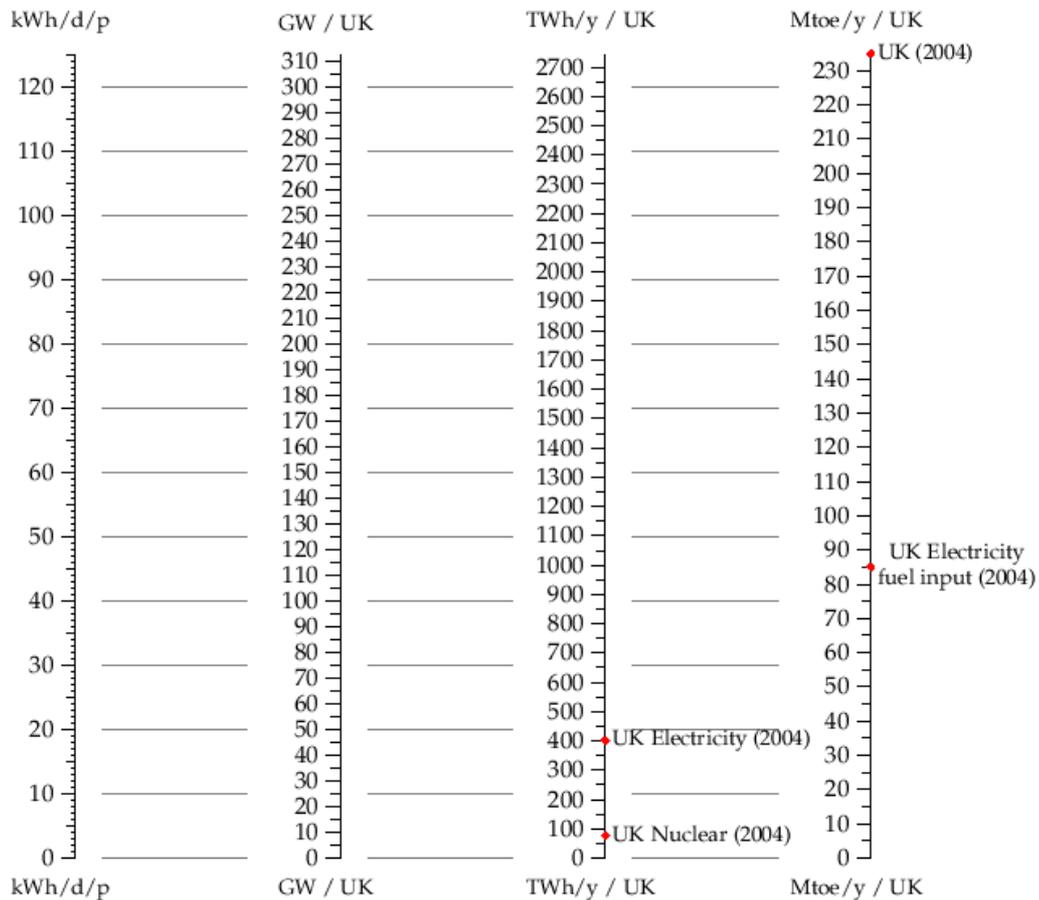
David MacKay is a Professor in the Department of Physics at the University of Cambridge. He studied Natural Sciences at Cambridge and then obtained his PhD in Computation and Neural Systems at the California Institute of Technology. He returned to Cambridge as a Royal Society research fellow at Darwin College. He is internationally known for his research in machine learning, information theory, and communication systems, including the invention of Dasher, a software interface that enables efficient communication in any language with any muscle. He has taught Physics in Cambridge since 1995. Since 2005, he has devoted much of his time to public teaching about energy. He is a member of the World Economic Forum Global Agenda Council on Climate Change.



The author, July 2008.
Photo by David Stern.

Umrechnungstabellen

Power translation chart



1 kWh/d the same as $\frac{1}{24}$ kW

“UK” = 60 million people

GW often used for ‘capacity’ (peak output)

TWh/y often used for average output

USA energy consumption: 250 kWh/d per person

1 Mtoe ‘one million tons of oil equivalent’

Europe energy consumption: 125 kWh/d per person

The most commonly used units in public documents discussing power options are:

terawatt-hours per year (TWh/y).

1000 TWh/y per United Kingdom is roughly equal to 45 kWh/d per person.

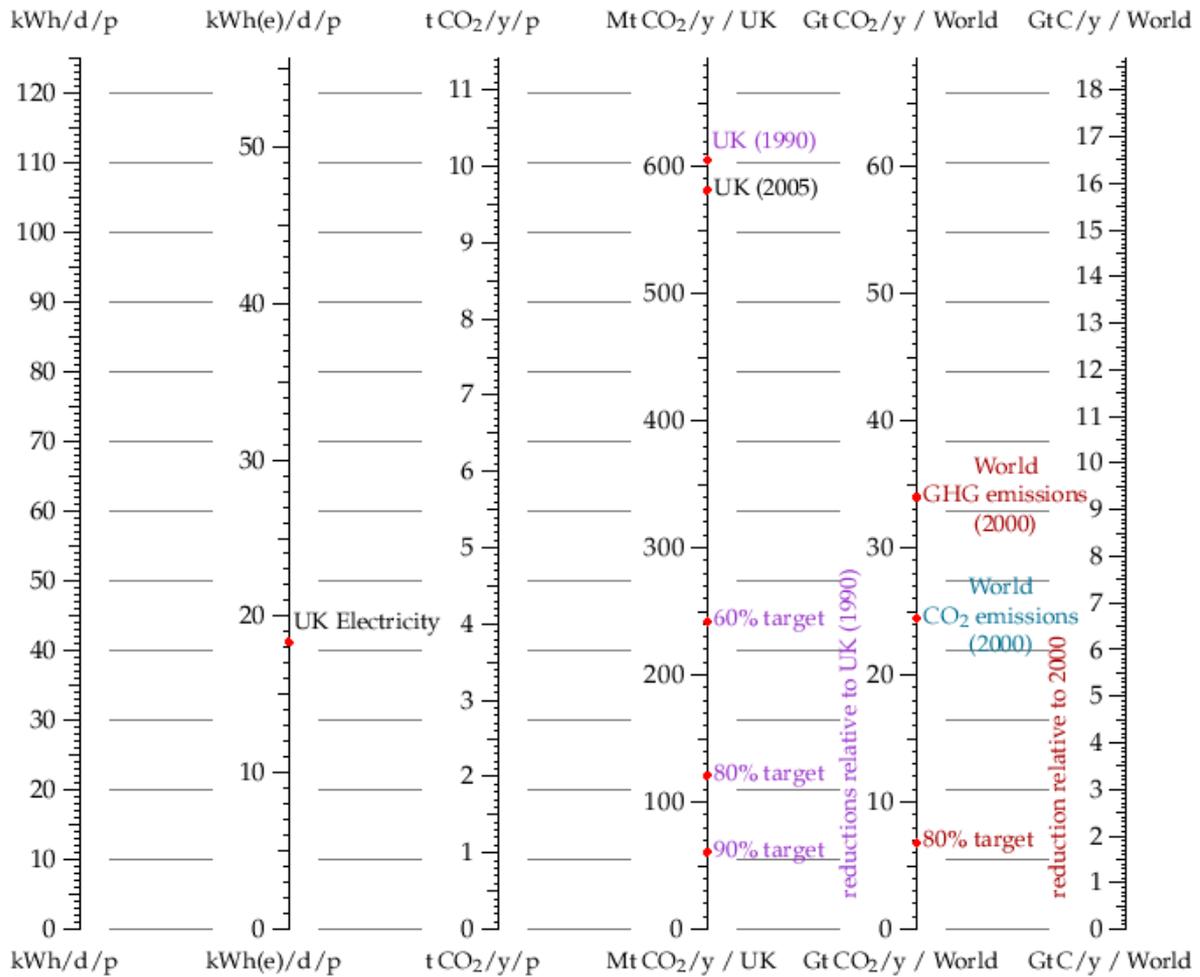
gigawatts (GW).

2.5 GW per UK is 1 kWh/d per person.

million tons of oil equivalent per year (Mtoe/y).

2 Mtoe/y per UK is roughly 1 kWh/d per person.

Carbon translation chart



kWh *chemical* energy exchange rate:
 1 kWh ↔ 250 g of CO₂ (oil, petrol)
 (for gas, 1 kWh ↔ 200 g)
 kWh(e) *electrical* energy is more costly:
 1 kWh(e) ↔ 445 g of CO₂ (gas)
 (Coal costs twice as much CO₂)
 tCO₂ ton of CO₂
 MtC million tons of carbon

"UK" = 60 million people
 "World" = 6 billion people