



Energiewirtschaft

Einführung in Theorie und Politik

Von

Dr. Ingo Hensing

Universitätsprofessor

Dr. Wolfgang Pfaffenberger

Universitätsprofessor

Dr. Wolfgang Ströbele

R. Oldenbourg Verlag München Wien

Die Autoren

Dr. Ingo Hensing, Berater, A.T. Kearney, Management Consultants, Düsseldorf

Prof. Dr. Wolfgang Pfaffenberger, Universitätsprofessor für Wirtschaftspolitik an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg und Direktor des Bremer Energie-Instituts

Prof. Dr. Wolfgang Ströbele, Universitätsprofessor für Wirtschaftstheorie an der Westfälischen Wilhelms Universität Münster

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme**Hensing, Ingo:**

Energiewirtschaft : Einführung in Theorie und Politik / von Ingo Hensing ; Wolfgang Pfaffenberger ; Wolfgang Ströbele. – 1. Aufl. - München ; Wien : Oldenbourg, 1998
ISBN 3-486-24315-2

© 1998 R. Oldenbourg Verlag
Rosenheimer Straße 145, D-81671 München
Telefon: (089) 45051-0, Internet: <http://www.oldenbourg.de>

Das Werk einschließlich aller Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Gedruckt auf säure- und chlorfreiem Papier
Gesamtherstellung: R. Oldenbourg Graphische Betriebe GmbH, München

ISBN 3-486-24315-2

Vorwort

Energie ist eine fundamental wichtige Ressource aller Volkswirtschaften. In der modernen Industriegesellschaft hängen Produktion und viele für den Lebensstandard der Menschen wichtige Konsumbereiche von der ausreichenden Verfügbarkeit von Energie ab. Da über 90 % der derzeitigen Weltenergieversorgung auf Brennstoffen beruht, deren Vorrat zwar riesig, aber erschöpfbar ist, stellt sich die Frage nach der optimalen intertemporalen Allokation: Wieviel soll heute, wieviel morgen genutzt werden?

Spätestens seit den Diskussionen zum „sauren Regen“, dem katastrophalen Unfall von Tschernobyl und den langfristig prognostizierten Klimaveränderungen als Folge weiterer Nutzung von Verbrennungsprozessen hat auch eine breite Öffentlichkeit erkannt, daß ein großer Teil der Umweltprobleme direkt oder indirekt mit Energieumwandlungs- und -nutzungsprozessen verbunden ist.

Alleine wegen dieser beiden Aspekte ist eine Beschäftigung mit energiewirtschaftlichen Themen höchst spannend. Hinzu kommt aus der wettbewerbstheoretischen Sicht, daß für die sogenannten leitungsgebundenen Energieträger ein „natürliches Monopol“ vermutet wird, so daß Fragen der Regulierung und Ausgestaltung der energiepolitischen Rahmenbedingungen eine besondere Rolle spielen. Wir haben deshalb bei der Darstellung Wert darauf gelegt, neuere Entwicklungen auf den Teilmärkten für Energie darzustellen.

Eine systematische und umfassende Darstellung aus energiewirtschaftlicher Sicht liegt bisher im deutschen Sprachraum nicht vor. Deshalb haben die drei Autoren, die bis in die erste Hälfte der neunziger Jahre am Institut für Volkswirtschaftslehre an der Universität Oldenburg gearbeitet haben, den Schritt zu diesem Buch gewagt. Ingo Hensing hat während seiner mehrjährigen Tätigkeit am Energiewirtschaftlichen Institut in Köln viele wertvolle Anregungen erhalten, die diesem Buch zugute kamen. Sein Dank hierfür gilt insbesondere Walter Schulz und C. Christian von Weizsäcker.

Adressaten sind Studierende im Hauptstudium der Wirtschafts-, Ingenieur- und Sozialwissenschaften und Praktiker aus Energieunternehmen, Verbänden oder Behörden, die einen Gesamtüberblick suchen. Einfache Grundlagenkenntnisse in Wirtschaftswissenschaften sind hinreichend, um das Buch zu benutzen.

Jedes einzelne Kapitel hätte leicht auf das Doppelte des Umfangs ausgelegt werden können. Wir hoffen, daß unsere Auswahl und Schwerpunktsetzung durch die Leser akzeptiert wird. Verbesserungsvorschläge werden wir dankbar entgegennehmen.

Wir danken allen, die Entwürfe kritisch gegengelesen haben, für die hilfreichen Hinweise, insbesondere Claudia Kemfert, Christoph Otte und Wolfgang Schulz. Christine Tapken gilt der Dank für die Erstellung der Druckvorlage. Unser besondere Dank gilt Heinz Welsch, der das Kapitel 15 verfaßt hat.

Köln, Oldenburg/Bremen, Münster

Ingo Hensing, Wolfgang Pfaffenberger, Wolfgang Ströbele.

Inhaltsübersicht

Teil I: Grundlagen.....	1
1. Einführung: Das Energieproblem	1
2. Die Energiebilanz.....	18
Teil II: Ressourcenökonomische Sicht	26
3. Energieträger als erschöpfbare Ressourcen	26
4. Energie und Umweltrestriktionen	40
Teil III: Energiemärkte	50
5. Stein- und Braunkohle	50
6. Erdöl.....	60
7. Erdgas	77
8. Urannutzung und Kernenergie	90
9. Erneuerbare Energie.....	104
10. Elektrizitätswirtschaft	111
11. Sektorale Energienachfrage und -bedarfsprognosen.....	138
12. Börsenhandel mit Energieträgern	152
Teil IV: Energiepolitik.....	161
13. Zur Begründung von Energiepolitik	161
14. Energiepolitik in Deutschland und Europa	171
15. Klimaschutz als Determinante langfristiger Energiepolitik	182
Mathematischer Anhang	195
16. Einführung in die dynamische Optimierung.....	195
17. Der optimale Kraftwerkspark	202
18. Literatur	209

Inhalt

Teil I: Grundlagen	1
1. Einführung: Das Energieproblem	1
1.1. Natürlicher und anthropogener Energieumsatz	2
1.2. Energie aus natur- und ingenieurwissenschaftlicher Sicht	3
1.2.1. Technische Dimension	3
1.2.2. Ökonomische Dimension	7
a) Sonnenenergie	8
b) Fossile Brennstoffe	8
c) Kernspaltung	9
1.3. Energie aus historischer Sicht	10
1.3.1. Allgemeine Entwicklung	10
1.3.2. Entwicklung in Deutschland	11
1.4. Energie aus ökonomischer Sicht	14
2. Die Energiebilanz	18
2.1. Struktur der Energiebilanz	18
2.2. Elemente der Energiebilanz	19
2.3. Aggregations- und Bewertungsprobleme	21
2.4. Deutsche Energiebilanz 1993	23
Teil II: Ressourcenökonomische Sicht	26
3. Energieträger als erschöpfbare Ressourcen	26
3.1. Erschöpfbare Ressourcen und Weltenergieversorgung	26
3.1.1. Einleitung	26
3.1.2. Ressourcenbasis, Exploration, Reserven	26
3.2. Das Hotelling-Modell der Ressourcen-Ökonomik	29
3.2.1. Intertemporale Allokation aus der Sicht des Ressourcenanbieters	29
3.2.2. Das Hotelling-Modell aus gesamtwirtschaftlicher Sicht	31
a) Das Konsummodell	31
b) Das Produktionsmodell	33
3.3. Energie als „wesentliche Ressource“	36
3.3.1. Berücksichtigung von Kapitalverschleiß	36
3.3.2. Substitutionselastizität $\sigma < 1$ für Energie	37
3.4. Mögliche Backstop-Techniken	37

4. Energie und Umweltrestriktionen	40
4.1. Energie und Umwelteffekte	40
4.2. Klassische Schadstoffe und Vermeidungstechniken	41
4.3. Energie und Umwelt am Beispiel CO ₂	42
4.3.1. Der Treibhauseffekt	42
4.3.2. Realistische Ziele der Umweltpolitik für CO ₂	45
4.3.3. Das CO ₂ -Problem aus ressourcenökonomischer Sicht	47
Teil III: Energiemärkte	50
5. Stein- und Braunkohle.....	50
5.1. Reserven, Förderung und Verbrauch.....	50
5.1.1. Gegenstand.....	50
5.1.2. Reserven.....	50
5.1.3. Förderung, Umwandlung und Verbrauch.....	51
a) Förderung.....	51
b) Umwandlung und Verbrauch.....	52
5.2. Bestimmungsfaktoren der Kohlepreise	53
a) Determinanten der Preisbildung.....	53
b) Internationaler Steinkohlehandel	54
5.3. Kohlewirtschaft in Deutschland	55
5.3.1. Steinkohle	55
a) Förderung und Verbrauch	55
b) Finanzierung der deutschen Steinkohle	56
5.3.2. Braunkohle	57
6. Erdöl.....	60
6.1. Reserven, Förderung und Verbrauch.....	60
6.1.1. Gegenstand.....	60
6.1.2. Reserven.....	60
6.1.3. Förderung, Umwandlung und Verbrauch.....	61
a) Weltölförderung	61
b) Up- und downstream.....	62
c) Technische Aspekte der Mineralölverarbeitung.....	63
d) Ökonomische Grundlagen der Mineralölverarbeitung.....	64
6.2. Bestimmungsfaktoren der Ölpreise	65
6.2.1. Ölpreissprünge 1973, 1979 und 1985	65
6.2.2. Historische Entwicklung des Ölmarkts	66
6.2.3. Erklärungsansätze der Ölpreisentwicklung.....	69

6.3. Mineralölwirtschaft in Deutschland	73
6.3.1. Internationale Ölmärkte	73
6.3.2. Deutscher Ölmarkt	74
7. Erdgas	77
7.1. Reserven, Förderung und Verbrauch	77
7.1.1. Gegenstand	77
a) Abgrenzung	77
b) Historischer Überblick	77
c) Vergleich von Erdgas und Mineralöl	78
7.1.2. Reserven	79
7.1.3. Förderung, Umwandlung und Verbrauch	80
a) Förderung und Welthandel	80
b) Transporttechnik	80
c) Marktstruktur	81
d) Ausgestaltung internationaler Gasprojekte	82
e) Vertikale Integration	83
f) Vertragsausgestaltung	83
7.2. Bestimmungsfaktoren der Gaspreise	84
7.2.1. Anlegbarer Preis	84
7.2.2. Gas-zu-Gas-Wettbewerb	85
7.3. Gaswirtschaft in Deutschland	85
a) Historischer Überblick	85
b) Marktstufen	86
c) Demarkationsverträge und Konzessionsabgaben	87
d) Wettbewerbsfragen	88
8. Urannutzung und Kernenergie	90
8.1. Reserven, Förderung und Verbrauch	90
8.1.1. Gegenstand	90
a) Kernenergiegewinnung durch kontrollierte Kernspaltung	90
b) Geschichte der Kernenergienutzung	91
c) Kernenergie als integriertes System	92
8.1.2. Reserven	93
8.1.3. Förderung, Umwandlung und Verbrauch	93
a) Förderung und Umwandlung	93
b) Kernbrennstoffkreislauf	94
c) Verbrauch	97

8.2. Bestimmungsfaktoren der Uranpreise	98
8.3. Kernenergiewirtschaft in Deutschland	99
a) Erzeugung	100
b) Kernbrennstoffkreislauf/Entsorgung.....	101
c) Kosten eines Kernenergieausstiegs	102
8.4. Umwelteffekte der Kernenergie	102
9. Erneuerbare Energie	104
9.1. Gegenstand	104
9.2. Potentiale	104
9.3. Kosten und Preise	106
9.4. Erneuerbare Energie in Deutschland	109
10. Elektrizitätswirtschaft	111
10.1. Merkmale des Stromsektors	111
10.2. Verbundvorteile bei Angebot und Nachfrage.....	113
10.2.1. Nachfrage	114
a) Bestimmungsfaktoren der Nachfrage.....	114
b) Die Jahresdauerlinie.....	116
10.2.2. Angebot.....	117
a) Erzeugungsalternativen	117
b) Größendegression	120
c) Kurzfristige Angebotsplanung	120
d) Langfristige Angebotsplanung	122
e) Kraft-Wärme-Kopplung	124
10.2.3. Verbund- und Verteilungsnetz	126
10.3. Koordination des Systems	127
10.3.1. Vom integrierten Monopol zum Wettbewerb	127
10.3.2. Wettbewerb durch Ausschreibung	130
10.3.3. Wettbewerb durch Netzzugang	130
10.3.4. Strombörse (Pool)	130
10.3.5. Preise	131
a) Erzeugung	131
b) Preise für Netzleistungen	131
10.4. Elektrizitätswirtschaft in Deutschland	132
10.4.1. Nachfrage	132
10.4.2. Angebot.....	134
10.4.3. Kosten und Preise.....	135

11. Sektorale Energienachfrage und -bedarfsprognosen	138
11.1. Nachfrage nach Energiedienstleistungen.....	138
11.2. Industrie.....	141
11.3. Haushalte und Kleinverbraucher	143
11.4. Verkehr.....	145
11.5. Nationale und weltweite Energiebedarfsprognosen	148
12. Börsenhandel mit Energieträgern	152
12.1. Börsenhandel als Marktkonzept	152
12.1.1. Einführung	152
12.1.2. Charakterisierung von Börsenhandel	153
12.1.3. Terminkontrakthandel.....	153
a) Funktionsweise	153
b) Voraussetzungen.....	154
c) Transaktionsarten.....	155
12.1.4. Funktionen im Energiebereich	156
12.2. Charakterisierung nach Energieträgern	157
12.2.1. Mineralöl.....	157
a) Historische Entwicklung	157
b) Das „Brent-System“.....	158
12.2.2. Erdgas	158
12.2.3. Elektrizität.....	159
Teil IV: Energiepolitik.....	161
13. Zur Begründung von Energiepolitik	161
13.1. Verringerung der Substitutionskosten	162
13.1.1. Substitutions- und Transaktionskosten.....	162
13.1.2. Substitutionshemmnisse im Energiesektor.....	163
13.2. Wettbewerbsförderung	164
13.2.1. Energiewirtschaft und natürliches Monopol	164
a) Definition	164
b) Natürliches Monopol in der Stromerzeugung.....	165
c) Netze und natürliches Monopol	166
d) Verteilung und natürliches Monopol	167
13.2.2. Zugang zu Netzen	167
13.3. Infrastrukturbereitstellung	168
13.4. Regulierung der Umweltnutzung.....	169
13.5. Förderung der wirtschaftlichen Entwicklung	169
13.6. Förderung der Integration.....	169

14. Energiepolitik in Deutschland und Europa	171
14.1. Markt und Wettbewerb.....	171
14.1.1. Der Ordnungsrahmen in Deutschland.....	171
14.1.2. Die europäische Richtlinie	173
14.2. Abbau von Substitutionshemmnissen.....	174
14.2.1. Information und Beratung der Verbraucher	175
14.2.2. Finanzielle Zuschüsse und Steuererleichterungen.....	176
14.2.3. Ordnungsrechtliche Regelungen	176
a) Wärme als Nebenprodukt.....	176
b) Gebäudebereich	177
14.3. Förderung erneuerbarer Energie.....	180
15. Klimaschutz als Determinante langfristiger Energiepolitik	182
15.1. Ökonomische Probleme der Klimaschutzpolitik.....	182
15.2. Gesamtwirtschaftliche Kosten der CO ₂ -Minderung.....	183
15.2.1. Ansatzpunkte der CO ₂ -Minderung und gesamtwirtschaftlicher Kostenbegriff.....	183
15.2.2. Ansätze der Kostenschätzung und Bestimmungsgründe geschätzter Kosten.....	185
15.3. Internationale Klimaschutzabkommen.....	190
15.3.1. Kriterien zur Gestaltung internationaler CO ₂ -Abkommen.....	190
15.3.2. Ein CO ₂ -Abkommen mit flexiblen Quoten.....	191
15.4. Klimaschutz und Primärenergieangebot.....	193
Mathematischer Anhang.....	195
16. Einführung in die dynamische Optimierung.....	195
16.1. Grundlagen	195
16.2. Ökonomische Spezialfälle	197
16.3. Anwendungsbeispiel	199
17. Der optimale Kraftwerkspark	202
17.1. Verwendete Symbole.....	202
17.2. Optimaler Kraftwerkspark bei gegebener Nachfrage	203
17.3. Optimaler Kraftwerkspark bei Least Cost Planning.....	204
17.4. Optimaler Kraftwerkspark und Umwelteffekte	205
17.4.1. Emissionssteuer.....	205
17.4.2. Emissionsbeschränkung	206
17.5. Optimaler Kraftwerkspark in einem regionalen Verbundsystem	207
17.6. Lösung und Ergebnisse.....	208

18. Literatur	209
18.1. Statistiken	209
18.2. Literatur.....	211
18.3. Wichtige energiewirtschaftliche Zeitschriften.....	216
Index.....	218

Teil I: Grundlagen

1. Einführung: Das Energieproblem

Energieökonomik befaßt sich mit einem zentralen Thema der Menschheitsgeschichte, ja des Lebens überhaupt. Leben bedeutet im Kern, dem ständig wirkenden Naturgesetz zum Einebnen von geordneten Strukturen entgegen zu wirken. Gebäude verrotten, Sandburgen werden glatt gespült, Gebirge werden abgetragen, Lebewesen sterben, ... - ohne Eingriffe und immer wieder neuen Aufbau geordneter Strukturen tendiert alles zu Gleichförmigkeit. Dies ist der Kern des Gesetzes von der **Zunahme der Entropie** (Gleichförmigkeit) in einem geschlossenen System.

Die geordneten Strukturen von Gebirgen und Landschaften auf der Erde wie die Alpen oder der Himalaya sind durch Prozesse entstanden, die durch Reste einer Glut aus der Erdentstehungszeit angetrieben werden: Das nach wie vor extrem **heiße Erdinnere** sorgt für Bewegungen der Erdkruste, faltet sie auf, läßt anderswo Massen wieder versinken etc. In einigen Milliarden Jahren ist diese Glut so weit erkaltet, daß dann Erdbeben o.ä. aufhören werden. Die großräumigen Wasserbewegungen in den Weltmeeren als Aufeinanderfolge von Ebbe und Flut verdanken ihren Antrieb der Bewegungsenergie von Erde und Mond, die dadurch, praktisch kaum meßbar, über die Jahrtausende etwas langsamer werden (**Gravitationsenergie**).

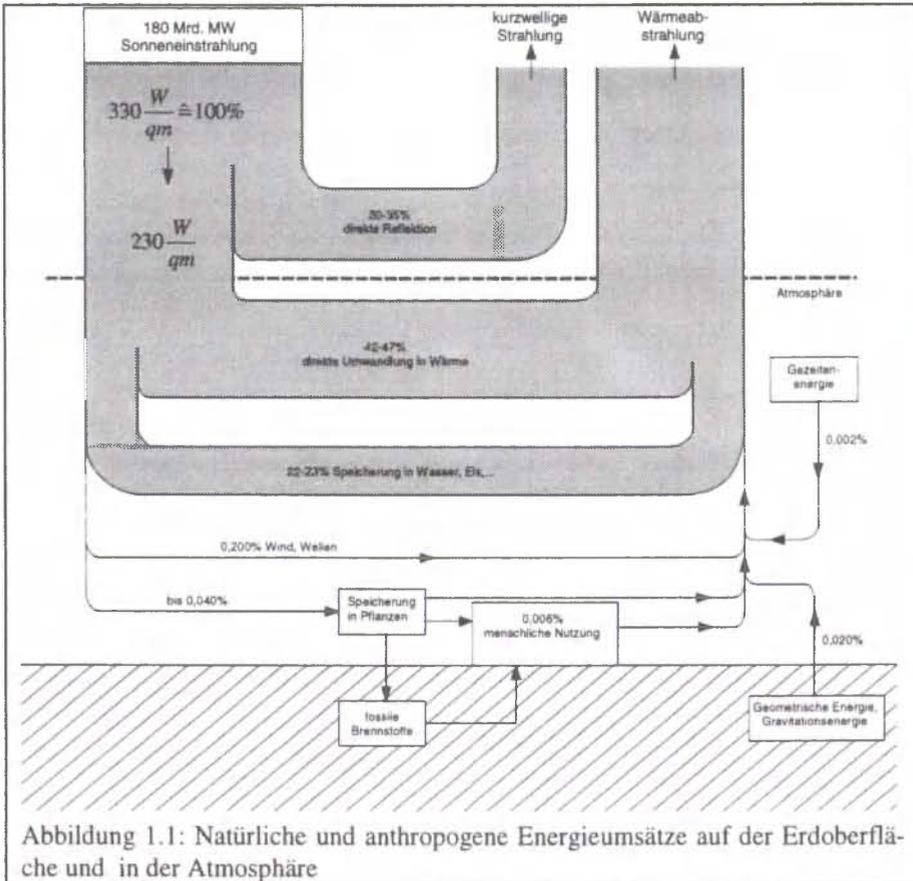
Daß überhaupt Leben und damit zumindest vorübergehend geordnete Strukturen auf der Erdoberfläche möglich wurden, verdanken wir vor allem einem riesigen, ständig vor sich hin explodierenden Fusionsreaktor, von dessen unvorstellbar großen Mengen an freigesetzter Energie ein winziger Bruchteil die Erde erreicht. Ohne die **Sonnenenergie** gäbe es kein Leben für Pflanzen und Tiere. Letztere arbeiten dem Entropieanstieg entgegen, indem sie in Nahrungsketten Energiespeicher der vorgelagerten Ebene nutzen und selbst verwerten. Am Beginn jeder Nahrungskette steht deshalb die Photosynthese von Algen, Gras, Getreide o.ä. In diesem Sinne lebt auch der rein fleischfressende Gepard indirekt von der Sonnenenergie, haben doch seine Beutetiere das Gras der Steppe oder Savanne genutzt. Dem Gefälle der Energienutzung entspricht dann auch der Befund, daß Fleischfresser in geringerer Zahl vorkommen (müssen) als ihre Beutetiere: Es muß mehr Antilopen geben als Geparden oder Löwen.

Für das menschliche Leben und die Produktionsprozesse ist deshalb eine ausreichende Energieverfügbarkeit von größter Bedeutung. Insbesondere die industrielle Produktionsweise ist auf Energiequellen angewiesen.

Auf Aluminiumbleche, Weihnachtsbäume oder Erdbeermarmelade kann die Menschheit zur Not verzichten: Energieressourcen sind hingegen absolut notwendig für die Aufrechterhaltung jeglicher Produktion und des Lebens schlechthin.

1.1. Natürlicher und anthropogener Energieumsatz

Menschliche Energienutzungen sind nur ein geringer Bruchteil der **natürlichen Energieumsätze**, die ständig im Bereich der Erde, ihrer Atmosphäre und auf der Erdoberfläche registriert werden können. Die Größenordnungen verdeutlicht die Abbildung 1.1.



Von den rund 180 Mrd. MW Sonnenenergieeinstrahlung, die ständig die Erde erreichen, wird rund ein Drittel bereits vor dem Auftreffen auf die erdnahen Schichten der Atmosphäre reflektiert (Albedo).¹ Rund zwei Drittel wandeln sich in Wärme um, indem sie Luft, Wasser oder Landmassen erwärmen. Unter den derzeitigen Bedingungen der Atmosphäre wird mit geringer Verzögerung diese Wärme wieder in das (beliebig) kalte Weltall zurückgestrahlt.

Eine Größenordnung von 300 - 400 Mill. MW ($\approx 0,2\%$ der Sonneneinstrahlung) wird in Wind- und Wellenbewegungsenergie umgewandelt, 70 - 80 Mill.

¹ Die Maßeinheit für die „Leistung“ ist WATT. Zu den Energiemaßeinheiten vgl. Abschnitt 1.2.

MW durch Photosynthese in Pflanzen verschiedenster Art in Form von chemischer Energie als Stärke oder Holz o.ä. gespeichert ($\approx 0,04\%$). Der derzeitige **zivilisatorische Energieumsatz der gesamten Menschheit** beläuft sich auf rund 8 Mrd t ROE, was bei Gleichverteilung auf die 8760 Jahresstunden einer durchschnittlich beanspruchten Leistung von 11 Mill. MW, d.h. etwa $0,006\%$ der ständigen Sonnenenergieeinstrahlung entspricht.

Der **biologische Energiebedarf** für die Menschen beträgt bei der derzeitigen Erdbevölkerung rund 0,6 - 0,7 Mill. MW, die durch Nahrungsmittel, d.h. letztlich aus Photosynthese gedeckt werden müssen. Daß die Landwirtschaft durch ihre direkte und indirekte Nahrungsmittelproduktion erheblich mehr als diese 0,6 MW bereitstellen muß, liegt an den unter energetischen Aspekten unbefriedigenden Wirkungsgraden der Erzeugung von großen Mengen tierischen Eiweißes für Fleischkonsum und ähnlicher „Verschwendung“, wobei dieser Terminus lediglich nach thermodynamischen Aspekten greift.

Die **Erdoberfläche** (samt den Bereichen 25 km oberhalb und 10 km unterhalb) ist somit unter Energieaspekten **kein geschlossenes System**, sondern weist eine Energiezufuhr von Sonne und in geringerem Ausmaß Erdwärme und umgewandelter Gravitationsenergie auf. Diese Energiezufuhr würde die Erde immer wärmer werden lassen, wenn sie sich nicht in einer Balance mit Wärmeabstrahlung ins kalte Weltall befände. Die anthropogene Energiezufuhr aus Verbrennungsprozessen, Kernspaltung u.ä. erzeugt in den heutigen Größenordnungen keine globalen Wärmebalanceprobleme, sondern in ungünstigen Fällen eher lokale und regionale „Hitzeinseln“, die in entsprechenden Wetterkonstellationen schlimmstenfalls Unwetter oder andere regionale Ereignisse wie Hagelschauer oder extreme Wärmetage beeinflussen können.

Das Leben auf der Erdoberfläche wäre ohne eine gewisse Wärmeausgleichsfunktion im Tag-Nacht-Rhythmus nicht möglich. Da das Weltall extrem kalt ist, wären ohne eine abschirmende **Atmosphäre** die Nächte sehr kalt und auch im „Sommer“ mit Frost verbunden, was der Vegetation schaden würde. Bei ungehinderter Sonneneinstrahlung wären umgekehrt die Tage sehr heiß. Zudem würden für das Leben gefährliche Bestandteile der Sonnenstrahlen ungefiltert und ungebremst zu Verbrennungen und Zellschäden führen. Die mit wenigen Kilometern Höhe sehr dünne Atmosphäre sowie die darüber liegenden Schichten geben somit eine für das Leben **wünschenswerte Treibhaus-Konstellation**. Seit einigen Jahren wird darüber diskutiert, inwieweit bestimmte Kuppelprodukte der Energieerzeugung dieses Gleichgewicht beeinträchtigen können. Auf diesen globalen Aspekt der Energieerzeugung wird in späteren Kapiteln separat eingegangen.

1.2. Energie aus natur- und ingenieurwissenschaftlicher Sicht

1.2.1. Technische Dimension

Der Physiker bezeichnet **Energie als Fähigkeit, (physikalisch) Arbeit zu leisten**. Dies kann sich auf den atomaren oder molekularen Bereich beziehen (chemische Umwandlungen, Schmelzen o.ä.), auf mechanische Arbeit wie das Heben einer Masse in den 3. Stock eines Gebäudes oder den Transport von Massen in endlicher Zeit von einem Ort zum anderen oder ganz einfach auf das Verändern von

Temperaturen wie das Bereitstellen von warmem Wasser im Haushalt oder Prozeßwärme in der Industrie.

Während es früher eine Vielzahl von **Maßeinheiten für Energie** gab, die zudem im amerikanischen und angelsächsischen Raum wieder anders aussahen als im kontinentaleuropäischen und bei Ingenieuren anders üblich waren als bei Physikern oder Energiewirtschaftlern, hat sich seit einigen Jahren die internationale Konvention mit der Maßeinheit Joule (J) durchgesetzt. Das Problem dieser Maßeinheit für den Energiewirtschaftler ist ihre für praktische Anwendungen ungünstige „Kleinheit“:

1 J = 1 Watt-Sekunde = Arbeit, um einen Körper mit Masse 102 g um einen Meter (frikionslos) anzuheben (für Experten: Differenz der Höhenenergie bei Standardgravitationskraft).

Da eine Stunde 3600 Sekunden hat, entspricht 1 kWh = 3600 J = 3,6 kJ. Wenn man bedenkt, daß ein normal elektrifizierter Haushalt in Deutschland rund 4000 kWh Stromverbrauch im Jahr aufweist, kommt man beim Rechnen mit J für Branchen oder die gesamte Volkswirtschaft sehr schnell in Milliarden J oder noch größere Zahlen, was die Einführung von Mega-, Giga-, u.ä. Skalen nahelegt. Es gelten die folgenden **Skalen**:

Tabelle 1.1 : Abkürzungen für 10-er Potenzen

Kilo = K = Tausend = 10^3	Tera = T = Billion = 10^{12}
Mega = M = Million = 10^6	Peta = P = Billiarde = 10^{15}
Giga = G = Milliarde = 10^9	Exa = E = Trillion = 10^{18}

Die verschiedenen Formen der Energie können über die **Wärmeäquivalente** ineinander umgerechnet werden. Dies beruht auf dem Energiegesetz, daß sich jede Form von Energie in Wärme umwandeln läßt. Um den Energiegehalt eines Brennstoffs zu ermitteln, gibt es zwei verschiedene Konventionen. Beim sogenannten Brennwert (H_o) wird die Verdampfungswärme von Wasserdampf, der beim Verbrennen mit entsteht, zum „reinen“ Heizwert (H_u) hinzugerechnet. Da in den Statistiken H_u ausgewiesen wird, kann beispielsweise ein sogenannter Brennwertkessel einen rechnerischen „Wirkungsgrad“ von über 100 % erzielen, was thermodynamisch unmöglich ist, hier aber aus der statistischen Konvention folgt. Bei mechanischen Energieträgern wie Wasser- oder Windenergie rechnet man bis 1995 als fiktiven Primärenergiegehalt diejenige Wärmemenge aus, die die entsprechende Strommenge in einem Wärmekraftwerk mit einer Dampfturbine benötigt hätte. Ebenso verfuhr man bei der Stromerzeugung in Kernkraftwerken. Daraus ergibt sich beispielsweise die Umrechnungstabelle für die gebräuchlichen Energieträger.

Tabelle 1.2 : Umrechnungsfaktoren für Energieträger ²

	kJ	kcal	kWh	kg SKE	kg RÖE	m ³ Erdgas
1 Kilojoule (kJ)	-	0,2388	0,000278	0,000034	0,000024	0,000032
1 Kilocalorie (kcal)	4,1868	-	0,001163	0,000143	0,0001	0,00013
1 Kilowattstunde (kWh)	3.600	860	-	0,123	0,086	0,113
1 Steinkohleeinheit (SKE)	29.308	7.000	8,14	-	0,7	0,923
1 Rohöleinheit (RÖE)	41.868	10.000	11,63	1,428	-	1,319
1 m ³ Erdgas	31.736	7.580	8,816	1,083	0,758	-
International gebräuchliche Energieeinheiten:						
1 barrel (b) Öl = 159 l Öl; 7,3 b = 1 t Öl Durchschnittswert						
1 Mill. b/d (barrel pro Tag) ≅ 50 Mill. t/a (Tonnen pro Jahr)						

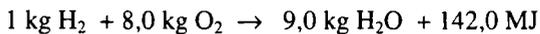
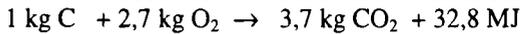
Die statistische **Erfassung des elektrischen Stroms** ist dabei an zwei Stellen möglich: Für Strom als Endenergieträger kann man ermitteln, wieviel Wärme bei Umwandlung aus 1 kWh Strom zu gewinnen ist. Da bei Strom eine fast verlustfreie Umwandlung in Wärme technisch möglich ist, ist natürlich 1 kWh Strom mit 3600 kJ zu bewerten. In der Stromerzeugung kann man fragen, wieviel Energieträger (Kohle, Gas, ...) eingesetzt werden müssen, um 1 kWh zu erzeugen. Da der Wirkungsgrad eines Wärmekraftwerks mit einer Dampfturbine derzeit bei 33 - 42 % liegt, ist dementsprechend Strom in dieser Betrachtung energetisch etwa um den Faktor 2,5 höher auszuweisen. Diese Kennzahl hängt aber offensichtlich von der technischen Effizienz des jeweiligen Kraftwerksparks einer Volkswirtschaft ab. Seit 1995 wird Kernenergiestrom mit dem tatsächlichen Wirkungsgrad von 33 % zurück gerechnet, was seinen Beitrag zur „Primärenergie“ statistisch erhöht). Wasserkraft- und Windenergiestrom werden mit 100 % als Primärenergie eingesetzt, was ihren Beitrag in der Primärenergiebilanz gegenüber der früheren Konvention entsprechend niedriger ausweist.

Der **erste Hauptsatz der Thermodynamik** besagt nun, daß in einem geschlossenen System die Energiemenge nicht verändert werden kann, sondern lediglich zwischen verschiedenen Erscheinungsformen umgewandelt wird. Demnach kann es eigentlich aus physikalischer Sicht keinen **Energieverbrauch** geben, sondern nur -umwandlungen. Dies zeigt sich beispielsweise daran, daß das Wasser unterhalb der Niagara-Wasserfälle etwas wärmer ist als oberhalb: Die potentielle Energie der Höhe hat sich (durch das Reiben und Aufeinanderschlagen der Wassermoleküle) in Wärme umgewandelt.

Der **zweite Hauptsatz der Thermodynamik** besagt, daß tendenziell alle Energieformen in einem geschlossenen System (potentielle, kinetische Energie, Hochtemperaturwärme, ...) in „minderwertige“, d.h. gleichförmig verteilte Wärme (etwa auf Umgebungstemperatur) umgewandelt werden. Sie verlieren somit ihre Fähigkeit, qualitativ hochwertige Arbeit zu leisten. In diesem Sinne und weil die Erde derartige „minderwertige“ Wärme letztlich ständig ins Weltall abstrahlt, gibt

² Die Zahlenangaben beziehen sich grundsätzlich auf den Heizwert (=„unterer Heizwert“).

es aus ökonomisch-technischer Sicht doch etwas wie Energieverbrauch: Verbraucht wird die qualitativ hochwertige Form von Energieträgern, die für Produktions- und Konsumprozesse benötigt wird. Da derzeit der größte Teil der Weltenergieversorgung auf **Verbrennungsprozessen** beruht,³ bei denen zwei chemische Reaktionen dominieren, nämlich die (schnelle) Kohlenstoffoxidation und die (schnelle) Wasserstoffoxidation, sollen die Reaktionen (in gerundeten Zahlen) genauer betrachtet werden:



Wenn die unvermeidlichen **Kuppelprodukte der Verbrennung** Kohlendioxid bzw. Wasser beide harmlos wären, könnte man die Umweltaspekte der Verbrennungsprozesse vernachlässigen. Leider haben die Erkenntnisse der Klimaforschung über die letzten 20 Jahre sukzessive enthüllt, daß eine weitere Anreicherung der Erdatmosphäre mit CO₂ langfristig das Weltklima negativ verändern kann. Auf diesen sogenannten Treibhauseffekt wird in den Kapiteln 4 und 15 gesondert eingegangen. Unter diesem Aspekt wären für Verbrennungsprozesse Energieträger auf der Basis Wasserstoff offensichtlich vorzuziehen, zumindest solche, die aus einer Mischung von Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen (Erdgas, Mineralöl). Noch besser wären Energieträger, die nicht auf Verbrennungsprozessen von Kohlenstoff basieren. Für zahlreiche heute wichtige Anwendungen stehen diese aber (noch) nicht in technisch-wirtschaftlich ausgereifter Form zur Verfügung, zumal die kohlenstoffhaltigen Energieträger mit niedrigen Förderkosten derzeit noch reichlich verfügbar sind.

Andere Kuppelprodukte, die aus Umwandlungsprozessen chemisch verunreinigter Brennstoffe entstehen (z.B. schwefelhaltige Kohle oder Mineralöl) oder die in Reaktionen mit den anderen Bestandteilen der Luft (z.B. Umwandlung von Luftstickstoff in Stickoxide NO_x) erzeugt werden, können zumindest grundsätzlich durch geeignete Reinigungstechniken entweder im Verbrennungsprozeß selbst oder nachträglich im Abgas durch Filter oder Katalysatoren wieder eliminiert werden.

Die Kohlenstoff- und Kohlenwasserstoffverbindungen der Lagerstätten, die von der Menschheit seit etwa knapp 300 Jahren für ihre **kommerzielle Energieversorgung** genutzt werden, sind zum größten Teil auf Lebensvorgänge früherer Jahrmillionen zurückzuführen: tierische und pflanzliche Überreste gespeicherter Sonnenenergie wurden unter günstigen Bedingungen vor dem Verrotten bewahrt und stehen deshalb heute zum Verbrennen zur Verfügung.

Der Mensch als Lebewesen nimmt natürlich mit der Nahrung täglich in Pflanzen und Fleisch gespeicherte Sonnenenergie auf: Die Landwirtschaft, Jagd und Fischerei sind also unter energetischen Aspekten nichts weiter als Wirtschaftssektoren

³ Größenordnung 1994: Mineralöl 40 %, Erdgas 23 %, Kohle 27 %, Atomenergie 7 %, Wasserkraft 2,5 %. Quelle: BP Statistical Review of World Energy, London, June 1995, S. 34.

zur Ernte und Umwandlung schmackhafter Formen von Sonnenenergie. Der tägliche **biologische Nahrungs- d.h. Energiebedarf** richtet sich im wesentlichen danach, welcher Energieverbrauch des Körpers unterstützt werden muß: Ein Hochleistungssportler oder Schwerarbeiter benötigt leicht über 4000 kcal pro Tag, ein Büromensch kommt gut mit 1500 - 2000 kcal aus, andernfalls speichert der Körper die überschüssige Energiezufuhr in Form von Fettzellen.

Die **technische Bereitstellung von Energie** verlangt danach, einen Zustand (potentiell) hochwertiger Energie in einen Prozeß einzusetzen, einen möglichst großen Teil dieser Energie für gewünschte Zwecke zu nutzen und schließlich in einen Zustand minderwertiger Energie (Wärme auf oder nur geringfügig über Umgebungstemperatur) umzuwandeln. Der Autofahrer wandelt den Energiegehalt seines Benzintanks durch einen kontrollierten Explosionsprozeß im Motor in Bewegungsenergie um, wobei der Wirkungsgrad (Verhältnis von effektiv für den Transport genutzter Energie zu eingesetzter Energie) hier sehr niedrig ist. Am Ende ist neben der Fortbewegung die Energie in Wärme (Rollreibung der Reifen, Abwärme des Motors, die im Winter für Heizzwecke des Fahrzeugs teils mitgenutzt wird) umgewandelt worden.

1.2.2. Ökonomische Dimension

Ob ein in der Natur vorhandener Stoff als Energieträger interessant ist, hängt also davon ab, ob die derzeit beherrschbare und bekannte **Technik** einen nutzbaren energetischen Einsatz erlaubt:

- Ab 1709 waren **Steinkohlevorräte** als Energieträger für die Eisenverhüttung einsetzbar, nachdem A. Darby in Wales den ersten Hochofen mit dieser Technik gebaut hatte. Diese Technik löste die bis dahin dominierende Holzkohletechnik mit ihren negativen Auswirkungen auf die Wälder ab.
- Die Erfindung des Otto- und des Dieselmotors schuf einen großen Einsatzbereich für das Mineralöl, das erst in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts als Leuchtmittel seinen Aufstieg als Energieträger begonnen hatte.
- Erst die **kontrollierte Kernspaltung** in einem Atomreaktor, wie sie nach 1950 entwickelt wurde, machte das spaltbare Uran U_{235} zu einem energetisch nutzbaren Energieträger.
- Der derzeitige Status der **Kernfusionsforschung** zeigt, daß ein im Labor für sehr kurze Zeit darstellbarer Prozeß noch lange nicht zu einem nutzbaren Energiesystem führen muß.

Als großtechnisch nutzbare Energiesysteme stehen derzeit zur Verfügung:

- Sonnenenergie mit ihren abgeleiteten Nutzungsformen Licht, Wind, Wasser, Biomassennutzung u.ä.,
- fossile Brennstoffe (Kohle, Mineralöl, Erdgas, ...),
- Kernspaltungsprozesse in Reaktoren auf Basis von Uran, Plutonium oder Thorium.

Jede dieser drei Möglichkeiten wird im folgenden näher betrachtet, da sie eigene Marktformen und Nutzungssysteme hervor bringen. Hier sollen lediglich in einer ersten Übersicht die Vor- und Nachteile der jeweiligen Systeme benannt werden.

a) Sonnenenergie

Die **Vorteile** der Sonnenenergie:

- Eine **thermische Umweltbelastung** existiert **nur im lokalen Maßstab**.
- Es besteht **kein erhebliches Katastrophenrisiko**.
- Für die meisten Zwecke, insbesondere für Heizung und Warmwasserbereitung, ist Sonnenenergie sehr **umweltfreundlich**.
- Sie ist als „Small scale technology“ auch für die **Dritte Welt** interessant - zumal diese auch in für die Sonnenenergienutzung günstigen Klimazonen liegt.

Die **Nachteile** der Sonnenenergie:

- An einer Erntestelle auf der Erde steht sie in der direkten Nutzung nachts nicht zur Verfügung, d.h. es sind **Speichertechnologien** notwendig.
- Sie ist geographisch und über die Jahreszeiten **nicht gleichmäßig verteilt**.
- Wegen der geringen Energiedichte beansprucht sie **große Landschaftsflächen** und eventuell erhebliche Mengen an Material.
- Die Produktpalette umfaßt bisher nur die Sekundärenergieformen **Wärme und Strom**.

b) Fossile Brennstoffe

Die **Vorteile** der fossilen Brennstoffe:

- Sie sind sehr **kostengünstig** zu fördern.
- Sie bieten eine relativ **hohe Energiedichte** pro Gewichts- oder Volumeneinheit, was für die Nutzung der Energie technische und wirtschaftliche Vorteile bringt. Ein Pkw mit einem spezifischen Verbrauch von 7l/ 100 km kann z. B. mit einer Tankfüllung von 35l 500 km fahren. Wäre die Energiedichte des Kraftstoffes niedriger, würde die Nutzlast des Fahrzeugs sinken oder die Tankintervalle würden kleiner. Beides würde die Nutzungskosten erhöhen.
- In den meisten Verwendungsarten haben sie ein **geringes Katastrophenrisiko**.
- Aus Mineralöl, Erdgas und Kohle lassen sich leicht Sekundärenergieträger herstellen, die ein sehr **bequemes „handling“** erlauben. Transport- und Lagerfähigkeit sind dann praktisch immer gegeben.

Die **Nachteile** der fossilen Brennstoffe:

- Da die Energie nur durch Verbrennungsprozesse frei wird, entsteht bei jeder Nutzung fossiler Brennstoffe **CO₂**.
- Bei fehlenden Filteranlagen und/oder durch unsaubere Verbrennung sowie durch Verbrennungszusätze ist des weiteren eine Umweltbelastung durch **SO₂, Stickoxide und Verbrennungsrückstände (Ruß)** gegeben.