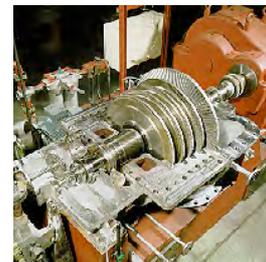
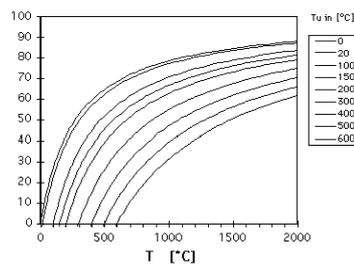
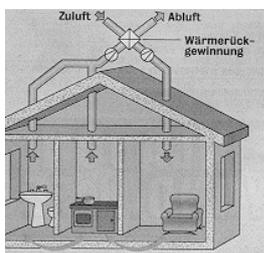
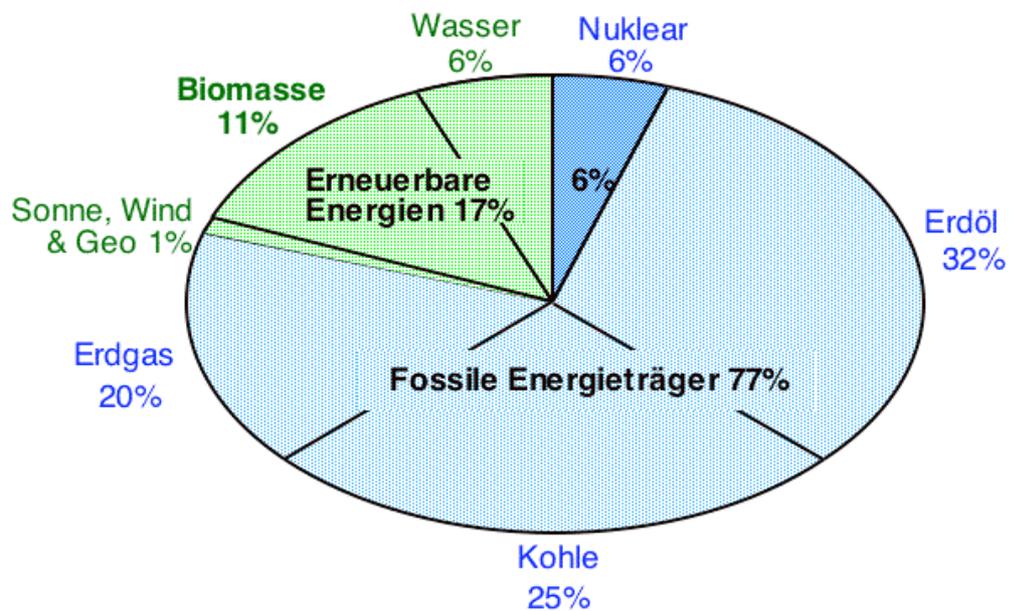

Energietechnik und Umwelt

Thomas Nussbaumer



Vorlesung ETH Zürich D-UWIS 701-0962-02
Sommersemester 2006

ISBN 3-908705-05-3

Anschrift

PD Dr. Thomas Nussbaumer

Verenum

Langmauerstrasse 109

CH – 8006 Zürich (Switzerland)

Telefon +41 (0)44 377 70 70

Telefon direkt +41 (0)44 377 70 71

Telefax +41 (0)44 377 70 77

Email thomas.nussbaumer@verenum.ch

Internet www.verenum.ch

Hintergrund

Thomas Nussbaumer, 1960, hat an der ETH Zürich Maschinenbau mit Vertiefung in Verfahrenstechnik studiert und nach Industriepraktika in Schweiz, USA und Japan 1984 mit dem Diplom abgeschlossen. Nach einer Dissertation über Schadstoffbildung 1989 war er Leiter der Forschungsgruppe Biomasse am Institut für Energietechnik der ETH Zürich. Seit 1990 ist er Inhaber und Geschäftsführer der Firma Verenum, einem Ingenieurunternehmen für Verfahrens-, Energie- und Umwelttechnik, welches Forschung, Entwicklung, Anlagenauslegung, Qualitätssicherung und Beratungen ausführt. Seit 1990 ist er an der ETH Zürich sowie an den Fachhochschulen Biel, Burgdorf und Muttenz als Dozent tätig für die Fächer *Energietechnik und Umwelt* sowie *Technische Energienutzung aus Biomasse*, für das er 1997 die Habilitation an der ETH Zürich erlangte.

Thomas Nussbaumer ist Delegierter des Bundes in der Internationalen Energie-Agentur (IEA) Bioenergy Task 32 „Biomass Combustion and Co-firing“, Vizepräsident von Holzenergie Schweiz, Autor von über 250 Publikationen, Herausgeber von Planungshandbüchern, Leiter des Holzenergie-Symposiums, Committee member der internationalen Konferenzen *Thermochemical Biomass Conversion* und *Biomass for Energy and Industry* sowie Reviewer verschiedener Fachzeitschriften, darunter *FUEL*, *Energy & Fuels* und *Biomass & Bioenergy*. Daneben ist er als Gutachter für Gerichte tätig und im Auftrag der Direktion für Entwicklung und Zusammenarbeit (DEZA) für Luftreinhaltmassnahmen in Chile engagiert, wo er auch an der Universität in Santiago als Gastdozent unterrichtet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Erscheinungsformen	5
1.2	Versorgungsketten, Primär-, End- und Nutzenergie	5
1.3	Energiebedarf	8
1.4	Kumulierter Energieaufwand und Erntefaktor	15
1.5	Erweiterte Bewertung von Energiesystemen mit KEA und EF	19
1.6	Erntefaktoren mit und ohne Bewertung erneuerbarer Energie	28
1.7	Ressourcen	32
1.8	Erschöpfung der Vorräte	33
1.9	Grenzen des Wachstums	43
1.10	Klimaveränderung	35
2	Physikalische Grundlagen und Prozesse	45
2.1	Bilanzierung	45
2.2	Wärmeübertragung	51
2.3	Energie im Gebäude	68
2.4	Erster Hauptsatz der Thermodynamik	87
2.5	Funktion von Verbrennungsmotoren	90
2.6	T,s-Diagramm und Carnot-Prozess	95
2.7	Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	97
3	Anwendungen der Thermodynamik	100
3.1	Forderungen aus dem 1. und 2. Hauptsatz	100
3.2	Wärmepumpe	101
3.3	Diffusions-Absorptions-Wärmepumpe	113
3.4	Wärmekraftkopplung	116
3.5	Brennstoffzelle	119
4	Kraftwerkstechnik	125
4.1	Dampfturbine (Clausius-Rankine-Prozess)	125
4.2	Offene Gasturbine (Joule-Prozess)	133
4.3	Kombi-Prozess (Gas- und Dampfturbine, GuD)	137
4.4	Vergleich Heizung und Wärmekraftkopplung	140
5	Verbrennungsprozesse	142
5.1	Bedeutung und Definition der Verbrennung	142
5.2	Anwendungen der Verbrennung	143
5.3	Verbrennungsrechnung	151
5.4	Adiabate Verbrennungstemperatur und h,T-Diagramm	153
5.5	Gleichgewicht und Reaktionskinetik	161
5.6	Verweilzeitspektrum und Brennkammgestaltung	166
6	Schadstoffe	168
6.1	Bedeutung der wichtigsten Schadstoffe	168
6.2	Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Russ	175
6.3	Dioxine und Furane (PCDD und PCDF)	179
6.4	Stickoxide	182
6.5	Partikelemissionen und Aerosole	193
6.6	Schwefelemissionen	205
7	Feuerungsanlagen	208
7.1	Öl- und Gasfeuerungen	208
7.2	Holzfeuerungen	213
7.3	Kohleverbrennung	227
8	Anhang	228
8.1	Einheiten und Brennstoffdaten	228
8.2	Vorsätze und Vorzeichen	229
8.3	Literatur	229
8.4	Wärmekraftkopplung mit Dampfprozess	236

Definitionen

Energieia (die), griechisch: (in der Aristotelischen Philosophie gleichbedeutend mit) Tätigkeit, Tatkraft, Bereitschaft zum Handeln.¹

Energie ist das, was im Tun, im Vollzug, *im Werk* erfahren wird. Davon leitet sich das altgriechische Wort »*energeia*« her, das wörtlich »im Werk« bedeutet. Das Substantiv »*ergon*« ist mit unserem »*Werk*« sprachverwandt. *Energieia* ist eine sprachliche Neubildung des griechischen Philosophen Aristoteles. Sie bedeutet das, was »*werkt*« und »*wirkt*«. Wirklichkeit ist also auch von ihrem ethymologischen Ursprung her *Energie*, Vollzug einer Bewegung, im Gegensatz zur »*dynamis*«: dem Wort, das Aristoteles aufnahm, um die noch ruhende Potentialität zu bezeichnen.²

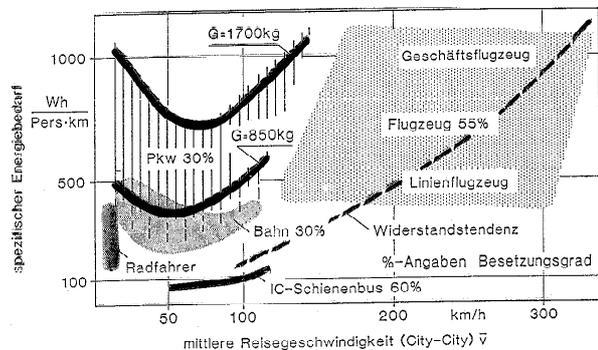
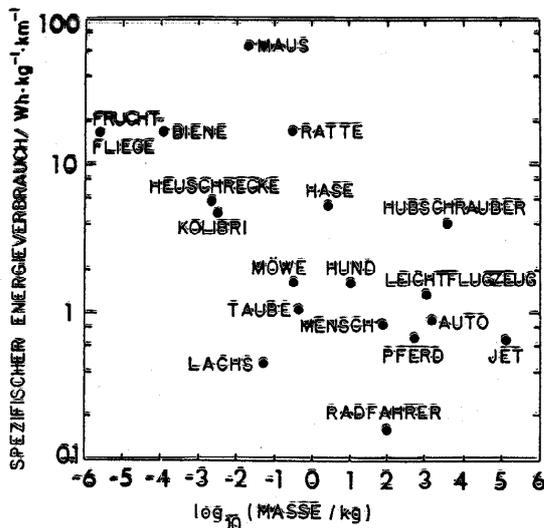
Unter *Energie* versteht man den in einem physikalischen System gespeicherten *Vorrat an Arbeitsvermögen*, unter *Arbeit* versteht man das Produkt aus Kraft und Weg. (*Energie* und *Arbeit* sind gleichartige physikalische Größen, die *Arbeit* ist eine Energiedifferenz).

Die *Energie* kann

1. auf einen anderen Körper übertragen werden
2. an dem gleichen Körper in anderer Form in Erscheinung treten.³

Albert Einstein: $E = mc^2$ (Gesetz der Äquivalenz von Energie und Materie)

Denkwürdiges



New York wirft weg

Die Stadt New York will in Zukunft auf das Recycling von Glas- und Plastikflaschen sowie Dosen verzichten. Bürgermeister Michael Bloomberg begründete seinen Beschluss mit dem riesigen Finanzloch im Etat. Das Recycling-Programm koste 240 Dollar pro Tonne, die normale Müllabfuhr dagegen nur 130 Dollar, rechnete Bloomberg den Umweltschutzverbänden vor. (SDA)

Tages-Anzeiger · Dienstag, 23. April 2002

¹ DUDEN Band 5

² Peter Schellenbaum, Die Wunde der Ungeliebten, dtv München 1991

³ Oskar Höfling, Physik Band II, 11. Auflage, Dümmler Würzburg 1978

1 Einleitung

1.1 Erscheinungsformen

Energie tritt in der Natur in verschiedenen Formen in Erscheinung:

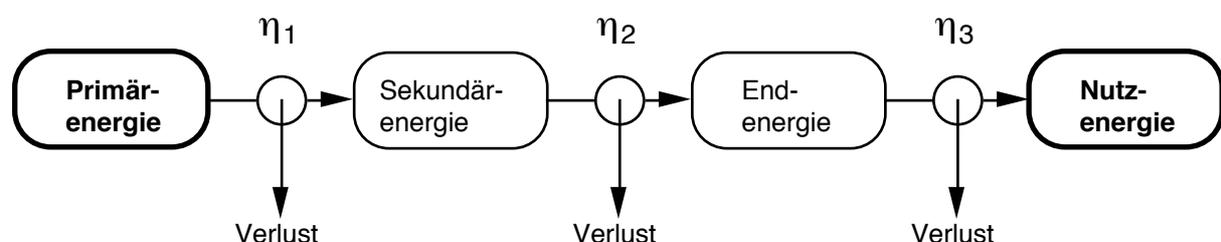
- Wärme
- Bewegungsenergie
- Ruheenergie
- elektromagnetische Energie und Licht
- chemische Energie sowie
- Kernenergie.

Obwohl wir die Wirkungen der Energie durch physikalische Gesetze beinahe vollständig beschreiben können, ist deren Ursprung letztlich doch ungeklärt. Seit Einstein kennen wir das Grundgesetz der Äquivalenz von Energie und Materie. Daraus lässt sich unter anderem ableiten, dass sämtliche Materie möglicherweise als Kondensat von Energie entstanden ist, indem vor zehn bis zwanzig Milliarden Jahren ein Feuerball von elektromagnetischer Strahlung im Zustand extrem hoher Dichte und Temperatur explodierte, sich im Laufe der Zeit ausdehnte und abkühlte (Urknall).

Im täglichen Leben spielen solche Überlegungen kaum eine Rolle, obwohl fast alle unsere Aktivitäten mit einem Energieverbrauch verbunden sind (korrekterweise ist mit Energieverbrauch die Umwandlung von einer Energieform in eine andere gemeint). Im Alltag sind dagegen Phänomene der klassischen Physik gegenwärtig, auf welche sich die vorliegende Vorlesung im weiteren beschränkt. Alle Energieumwandlungen unterliegen zwei fundamentalen Naturgesetzen (bzw. Axiomen), die als 1. und 2. Hauptsatz der Thermodynamik bezeichnet werden und die im folgenden zur Anwendung kommen.

1.2 Versorgungsketten, Primär-, End- und Nutzenergie

Energie wird in Prozessketten verwendet, welche von der Primärenergie (Ressource, Rohenergie) über verschiedene Zwischenformen (Sekundärenergie) zu der dem Endverbraucher gelieferten und gehandelten Endenergie und schliesslich zur Nutzenergie führt. Bei jeder Umwandlung treten Verluste auf.



Die Primärenergie wird auch als Ressource bezeichnet. Die Endenergie bezeichnet in der Regel das handelbare Gut für Konsumentinnen und Konsumenten (Strom, Heizöl usw.). Sekundärenergie und Endenergie sind oftmals identisch, die Abgrenzung ist hier oft nicht eindeutig. So sind z.B. Strom und

Wasserstoff Sekundärenergieträger. Wo sie handelbares Gut in Erscheinung treten, sind sie jedoch als Endenergie zu bezeichnen. Zwischen der Produktion von Strom, Fernwärme, Wasserstoff usw. sowie dem Verkauf als Endenergie treten allerdings Transportverluste und allenfalls Speicherverluste in Erscheinung, weshalb die Endenergie geringer ist als die produzierte Sekundärenergie.

Das Verhältnis von Nutzenergie zu Primärenergie kann durch einen *Gesamtnutzungsgrad* gekennzeichnet werden:

$$\eta_{\text{ges}} = \prod_i \eta_i$$

Bei vielen Prozessketten ist der Gesamtnutzungsgrad äusserst gering. So gilt z.B. für die Bereitstellung von Licht aus einem mit Kohle betriebenen Kraftwerk in etwa folgender Energiefluss:

Kohle → Kohlestaub → Strom → Stromtransport → Glühbirne → Licht

Aus 100% Kohle wird im Kraftwerk Strom mit einem elektrischen Wirkungsgrad von $\eta_1 = 0.37$ erzeugt. Bei Transport und Verteilung der Elektrizität gehen rund 10% verloren, d.h. es gilt $\eta_2 = 0.9$. In der Glühbirne wird rund 10% in Licht umgewandelt, der Rest wird als Wärme abgestrahlt. Für η_{ges} resultiert damit ein Wert von 0.033 oder 3.3%.

Der Weltenergieverbrauch wird in der Regel als Primärenergieverbrauch beschrieben, während nationale Verbrauchszahlen als Endenergie angegeben werden. Eine eindeutige Abgrenzung zwischen den einzelnen Prozessstufen ist jedoch nicht immer möglich. So gelten zum Beispiel Diesel oder Erdgas beim Abnehmer als Endenergie. Erdgas und Diesel können aber grundsätzlich auch zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Dieser handelbare Strom wiederum tritt im Energiesystem erneut als Endenergie in Erscheinung, da er als handelbares Gut an Konsumenten verkauft wird. Um eine Doppelzählung des so eingesetzten Erdgases zu vermeiden ist somit eine entsprechende Korrektur notwendig, was aber nie abschliessend möglich sein wird. Danebe ist zu beachten, dass Primärenergie, die direkt an Ort und Stelle umgewandelt und genutzt wird, nie als gehandelte Endenergie in Erscheinung tritt und so von der Energiebilanz unter Umständen nicht erfasst wird. Dies ist z.B. der Fall für Teile von Sonne, Wind, Erdwärme, Holz und Klärgas. Beispiele:

Begriff	Beispiel 1	Beispiel 2
Primärenergie	Rohöl	Kohle
↓	↓	↓
Sekundärenergie	(Benzin)	Kohlestaub (oder auch direkt Elektrizität)
↓	↓ Raffinerie	↓ Kraftwerk
Endenergie	Benzin	Elektrizität
↓	↓ Motor	↓ Wärmepumpe
Nutzenergie	Mech. Antrieb	Heizwärme
↓	↓	↓
Dienstleistung	Transport	Warmes Gebäude

Wichtigste Primär- und Endenergieträger:

Primärenergieträger	Endenergieträger
– Rohöl	– Fernwärme
– Steinkohle	– Elektrizität
– Braunkohle	– Benzin, Diesel, Kerosin
– Torf	– Heizöl EL, M, S
– Erdgas	– Erdgas
– Holz und andere Biomasse	– Koks, Brikett
– Wasserkraft	– Holzschnitzel, Stückholz, Pellets
– Sonne	
– Wind	
– Erdwärme	
– Uran	
– Gezeiten	

Wichtig sind die Umwandlungswirkungsgrade. Typische Werte für einige Umwandlungsschritte sind:

Thermische Kraftwerke	0.3 – 0.5 (konventionell 0.3, Kombikraftwerk 0.5 mit Gas bis 0.6)
Raffinerie	0.8 – 0.9
Verbrennungsmotor	0.2 – 0.5
Feuerung	0.8 – 0.95
Brennstoffzelle	0.5 – 0.7
Elektrisches Netz	0.9 – 0.95
Gasverteilsystem	0.85 – 0.97 (1–10% Leckage, Rest für Kompressoren)
Fernwärmenetz	0.85 – 0.95
Sonne, Wind, Wasserkraft	Unterschiedlich, Vorlesung 'Erneuerbare Energien'

Der Mensch hat an sich keinen Bedarf an Energie, sondern an verschiedenen Dienstleistungen, welche ihrerseits Energie benötigen. Die wichtigsten sind:

- Nahrungsmittel
- Nahrungszubereitung
- Heizung
- Lüftung
- Beleuchtung
- Kühlung
- Prozesswärme
- Kommunikation
- Mobilität
- weitere, die einen Bedarf bei den oben erwähnten auslöst (Kultur, Bildung, Ruhe, Erholung u.v.a.)

Ein riesiges Potenzial zur Einsparung von Ressourcen besteht darin, dass heute in vielen Lebensbereichen eine gewünschte Dienstleistung nur unpräzise erfüllt wird oder mit zur Verfügung stehenden Dienstleistungen abgedeckt werden, die über das geforderte Maß hinaus gehen. Beispiel: Zeit- und ortsabhängige Erfüllung der Bedürfnisse von Beleuchtung, Beheizung, Kühlung, intelligentere Erfüllung von Transportdienstleistungen durch kombinierten Verkehr oder gemeinsame Fahrzeugbenutzung usw. Dieses Potenzial kann teilweise durch vermehrten Einsatz von Logistik und Intelligenz

ausgeschöpft werden. Es setzt allerdings voraus, dass die Bedürfnisse an Dienstleistungen bekannt sind, zum Teil präziser als dies heute der Fall ist unter Einbezug von orts- und zeitabhängigen Faktoren. Obwohl hier ein grosses Potenzial vorhanden ist, werden im weiteren vor allem einzelne Umwandlungsverfahren behandelt.

1.3 Energiebedarf

Die für die Dienstleistungen pro Person und Jahr eingesetzte Energie variiert je nach Entwicklungsstand der Volkswirtschaft enorm. Der heutige Energiebedarf in den industrialisierten Ländern ist eine Folge der gesteigerten Bedürfnisse, die weit über das lebensnotwendige Mass hinausgehen:

	Entwicklungsland* ¹	Schweiz		
Quelle	1	1, 2	3	4
Energieverbrauch pro Person und Jahr	kWh / a P	Endenergie o. graue Energie kWh / a P	Endenergie inkl. graue Energie kWh / a P	Endenergie inkl. graue Energie kWh / a P
Nahrungsmittel	1 000	1 000 ¹	Nahrung total	
Nahrungszubereitung	300 – 800	1 600 ¹	6 000	
Heizung, Lüftung, Licht	0 – 1 200	11 200 ¹	15 000	
Mobilität	100 – 200	8 200 ¹	11 000	
Antriebe und Prozesswärme	200 – 2 000	8 000 ¹	–	
Zus. privater Konsum	–	–	18 000	
Öff. Konsum	–	–	9 000	
Total Energiev. kWh / a P	2 000 – 5 000	30 000 ¹ / 35 000 ²	60 000	56 000
Total Leistung kW	0,23 – 0,57	3,4 ¹ / 4,0 ²	6,8	6,4

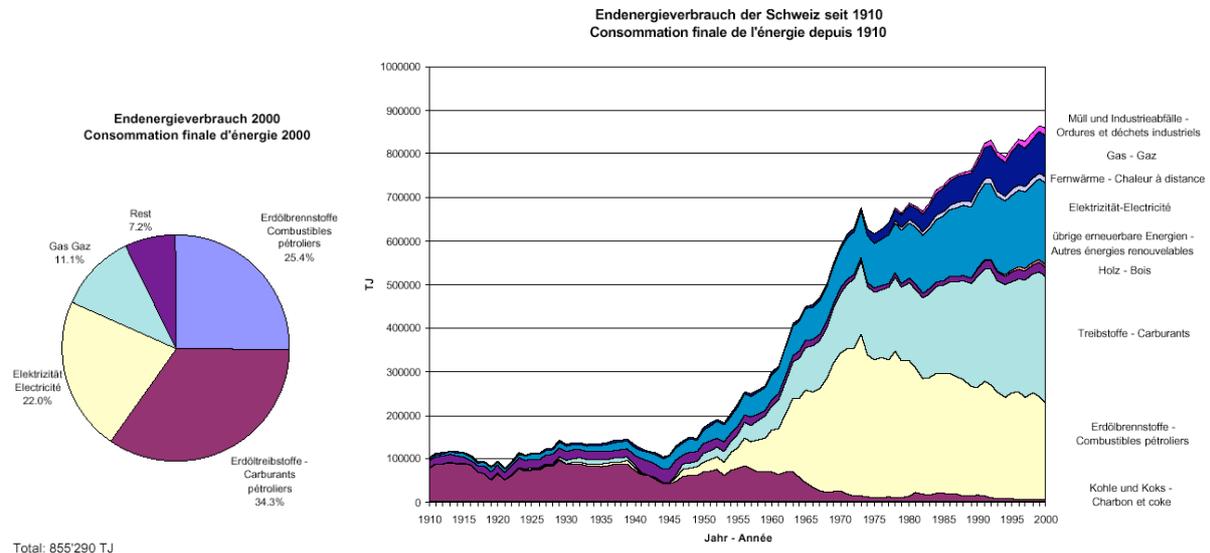
* Entwicklungs- und Schwellenländer ohne Hunger

¹ [Suter 1991], ² [BFE 2000, Gesamtenergiestatistik: ca. 880 000 TJ/a / 7 Mio Personen]

³ [Hofstetter 1993], ⁴ Tages Anzeiger, Dossier Treibhauseffekt, April 1995, aus WMO 1995 u.a.

Die chemische Energie der Nahrung wird im Körper durch Oxidationsprozesse frei. Die für den Körper erforderliche Leistung in Form von Nahrung beträgt im Mittel ca. **100 W** (ca. 8'000 bis 10'000 kJ/d = 90 bis 120 kW). Der momentane Bedarf reicht von liegen: 100 W, sitzen: 120 W, Marsch: 300 W, Dauerlauf: 700 W bis zum Spurt: 1000 W. Der minimale Energiebedarf pro Person beträgt somit rund 2,4 – 2,9 kWh/d oder rund 1'000 kWh/a.

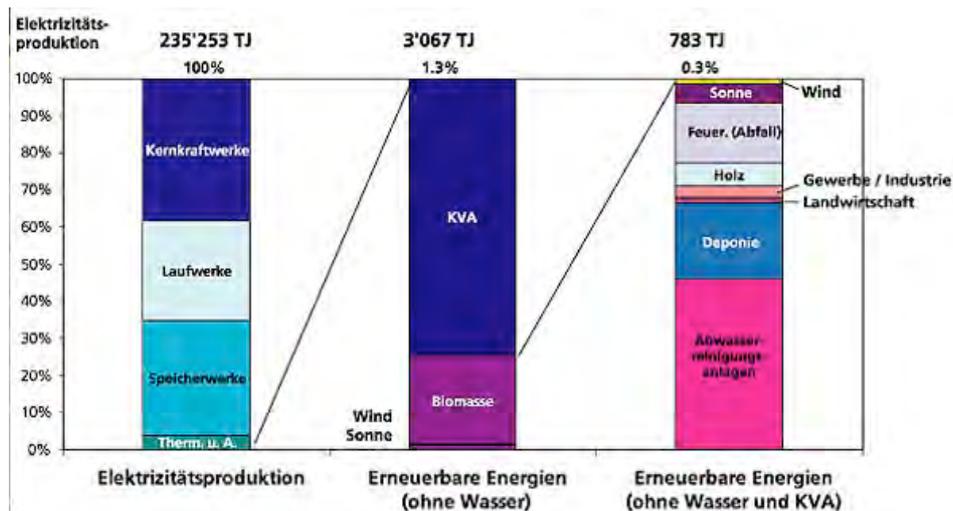
Endenergieverbrauch Schweiz. Der Endenergieverbrauch der Schweiz ist in den Jahren nach dem letzten Weltkrieg sprunghaft angestiegen. Erdöl nimmt mit einem Anteil von rund 65% die dominierende Rolle ein in der Energieversorgung:



Endenergieverbrauch der Schweiz seit 1910. Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2000. Quelle: Bundesamt für Energie, <http://www.energie-schweiz.ch/bfe/de/statistik/gesamtenergie/> (s.a. detaillierte Zahlenangaben)

Erdölbrennstoffe und -treibstoffe müssen vor allem wegen fiskalisch unterschiedlicher Behandlung sowie wegen unterschiedlicher Emissionsgrenzwerte unterschieden werden.

Die Stromversorgung basiert zu rund 60% auf Wasserkraft und etwas über 35% auf Kernenergie, knapp 5% werden durch thermische Anlagen abgedeckt (Kehrichtverbrennung und Wärmekraftkopplung).



Elektrizitätsproduktion in der Schweiz. Daten nach Bundesamt für Energie, 2002.

Primärenergieverbrauch Welt. Der Weltenergieverbrauch hat sich zwischen 1950 und 1980 jeweils innerhalb von etwa 15 Jahren verdoppelt, was einer jährlichen Zuwachsrate von rund 5% entspricht. Geringfügige Einbrüche des Energieverbrauchs waren festzustellen als Folge der Weltkriege, der Weltwirtschaftskrise und der Ölpreiskrise.

Aktuelle Zahlen zeigen ungefähr folgendes Bild:

Weltenergieverbrauch 1990 [Kugeler und Phlippen]: $12 \cdot 10^9 \text{ t SKE/a} = 3,53 \cdot 10^{20} \text{ J/a}$

Umrechnungen: (SKE = Steinkohleäquivalente)

1 J = 1 Ws

1 kWh = 3,6 MJ

1 t SKE = 29 400 MJ = $29,4 \cdot 10^9 \text{ J} = 8 167 \text{ kWh} = 7 000 \text{ Mcal}$

1 kg Heizöl = 42,6 MJ (1 t Heizöl = 1,45 t SKE)

1 m³ Erdgas = 1,1 t SKE

1 t Rohbraunkohle = 0,27 t SKE

Häufig werden Energieverbräuche auch in den Potenzen Tera, Peta oder Exa angegeben.

1 Terajoule = 1 TJ = 10^{12} J

1 Petajoule = 1 PJ = 10^{15} J

1 Exajoule = 1 EJ = 10^{18} J

Weltenergieverbrauch 1998 [Kaltschmitt und Hartmann 2001]: $3,95 \cdot 10^{20} \text{ J/a}$

Unter der Annahme, dass Weltenergieverbrauch und Bevölkerung um jährlich je rund 2 % wachsen und die Weltbevölkerung im Jahr 2000 rund 6,8 Mia betrug ergibt dies ungefähr folgenden aktuellen Verbrauch:

Jahr	Weltenergieverbrauch		Bevölkerung	Verbrauch		Quelle
	10^{18} J/a	GW	–	kW per capita		
1900	24	746				[Kugeler & Phlippen 1990]
1920	35	1'119				[Kugeler & Phlippen 1990]
1940	59	1'865				[Kugeler & Phlippen 1990]
1960	118	3'729				[Kugeler & Phlippen 1990]
1980	250	7'924				[Kugeler & Phlippen 1990]
1990	353	11'187				[Kugeler & Phlippen 1990]
1995	375	11'891				WMO 1995
1998	395	12'525				[Kaltschmitt & Hartmann 2001]
1999	411	13'031				Hochrechnung mit x 1.044 p.a.
2000	428	13'558	6.8		1.99	Hochrechnung
2004	501	15'885	7.36		2.16	Hochrechnung
2005	521	16'527	7.51		2.20	Hochrechnung
2010	635	20'146	8.29		2.43	Hochrechnung

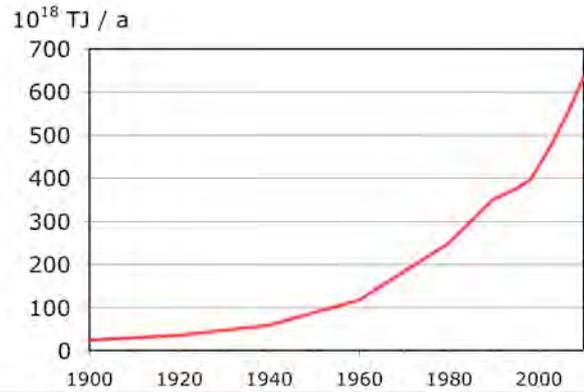
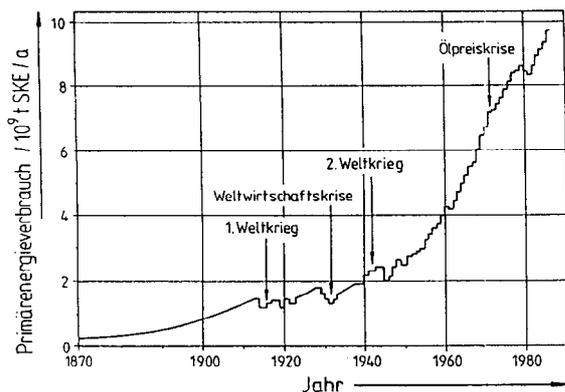


Bild 1.1 Entwicklung des globalen Primärenergieverbrauchs. Links nach [Kugeler und Phlippen 1990]. Der Trend ist seit 1990 ungebrochen. Rechts: mit Quellen gemäss Tabelle (ab 2000 hochgerechnet mit Bevölkerungszunahme von 2%/a und Zunahme des pro-Kopf-Verbrauchs von 2%/a).

Weltenergieverbrauch 2005:	ca. $5,0 \cdot 10^{20}$ J/a (ca. $1,60 \cdot 10^{13}$ W)
Durchschnittsverbrauch pro Person	ca. 2,2 kW (Weltbevölkerung ca. 7,36 Mia)

Der Durchschnittsverbrauch ist somit rund 22 mal grösser als der Nahrungsmittelbedarf.
Für eine in der Schweiz lebende Person ist es durchschnittlich 65 mal der Nahrungsmittelbedarf.

In den Industrienationen variiert der spezifische Energieverbrauch zwischen ca. 3.5 kW (Japan) und ca. 6.5 kW (Schweiz, Deutschland) bis ca. 10 kW (Norwegen, Kanada, USA). Die Forderung nach einer 2000 Watt-Gesellschaft für die Schweiz verlangt somit knapp einen „Faktor Vier“ (3 bis 3.5), wie er z.B. von Weizsäcker gefordert wird. In Deutschland betrug der Energieverbrauch pro Person im Jahr 1400 1.2 kW, 1900 3.6 kW und 1990 6.5 kW. Die 2000-Watt-Marke wurde also bereits vor mehr als 150 Jahren überschritten.

Die Weltenergieversorgung der vorindustriellen Gesellschaften basierte weitgehend auf erneuerbaren Energieträgern. Die wichtigsten Primärenergieträger waren Holz, Dung, Wasserkraft und Windenergie. Ab der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts deckte die Kohle den grössten Anteil am Energieverbrauch, seit 1950 haben Erdöl und Gas den grössten Anteil. Die Nutzung der fossilen Energieträger hatte einen annähernd exponentiellen Anstieg des Energieverbrauchs zur Folge.

Die heutige Rangfolge der Primärenergieträger lautet damit:

1. Erdöl, 2. Kohle und 3. Erdgas, welche zusammen rund 77% abdecken.

An vierter Stelle steht die Biomasse, welche global rund 11% zur Weltenergieversorgung beiträgt, gefolgt von Wasserkraft mit 6% Anteil. Andere erneuerbare Energieträger sind zwar regional von Bedeutung (zum Beispiel die Windenergie in Dänemark), sie tragen aber erst im Prozentbereich zur Weltenergieversorgung bei. Auch die Kernenergie ist in einigen Ländern von zentraler Bedeutung (z.B. in Frankreich), ihr Anteil am Weltenergieverbrauch beträgt aber dennoch lediglich 5%.

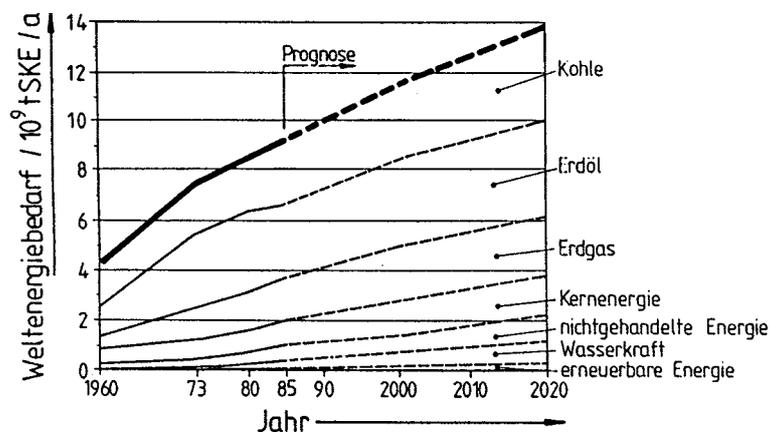
Tabelle 1.1 Energieverbrauch Industrieländer, Welt und Schweiz aufgeteilt nach Energieträgern (nach World Energy Council und Schweizerische Gesamtenergiestatistik 1998). Fossile + Biomasse = 88% werden bis heute fast ausschliesslich durch Verbrennungsprozesse genutzt. *Holz 2,5%, Abfälle 1.7%.

	Industrieländer	Welt	Schweiz
Nichtererneuerbare Energieträger:	95%	83%	83%
Kernenergie:	5%	6%	9%
Fossil:	90%	77%	74%
Erdöl:	40%	32%	62%
Kohle:	30%	25%	1%
Erdgas:	20%	20%	11%
Erneuerbare Energieträger:	5%	17%	17%
Holz und andere Biomasse:	< 1%	11%	4%*
Wasserkraft:	5%	6%	12%
Sonne direkt und Wind:	< 1%	< 1%	< 1%

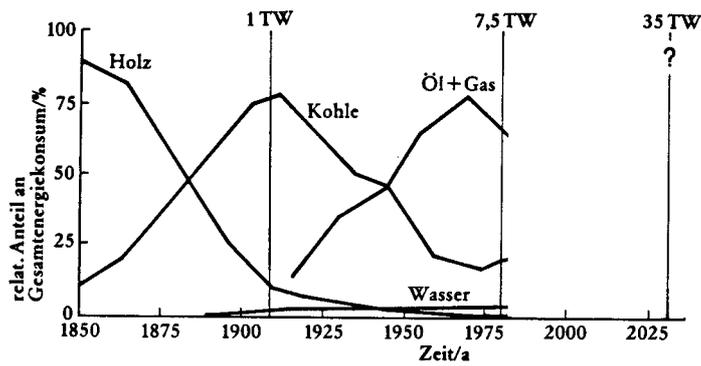
In den kommenden Jahrzehnten muss vor allem aus folgenden Gründen mit einer weiteren drastischen Zunahme des Weltenergiebedarfs gerechnet werden:

- Bevölkerungszunahme von derzeit rund 7 Mia auf ca. 8.5 Mia Menschen im Jahr 2020
- Nachholbedarf der Entwicklungs- und Schwellenländer
- Qualität der Ressourcen nimmt ab (z.B. Kohle), so dass bei gleichem Endenergiebedarf der Primärenergiebedarf zunimmt. Als eigentliches Horrorszenario bezüglich Treibhauseffekt besteht die Gefahr, dass heutige Flüssigtreibstoffe durch Synthese aus Kohle gewonnen werden können, was technisch machbar ist, jedoch zu einer rund doppelt so hohen CO₂-Belastung pro Liter Benzin (oder Äquivalent) führen würde.
- weitere (z.B. Folgen spürbarer Klimaveränderung: bedarfssenkend oder -mindernd ?)

Selbst unter Annahme eines mässigen Wirtschaftswachstums wird deshalb mit einem Weltenergiebedarf von $2,5 \cdot 10^{10}$ t SKE bis im Jahre 2020 gerechnet (Kugeler und Phlippen):



Bei der Weltenergieversorgung hat im 19. Jahrhundert eine Verschiebung von Holz zur Kohle stattgefunden, im 20. Jahrhundert von der Kohle zu Erdöl und Erdgas. Obwohl die Kernenergie in einigen Ländern von zentraler Bedeutung ist (z.B. in Frankreich), ist ihr Anteil am Weltenergieverbrauch lediglich im Prozentbereich (Fricke):



Relativer Anteil verschiedener Primärenergieträger am Weltenergiekonsum. Die Kernenergie liegt heute im Prozentbereich. Als Marken angegeben sind die Weltenergieleistung in Terawatt (1 TW = 10^{12} Watt) um 1908 und 1978 sowie die geschätzte Leistung im Jahre 2030. Die Leistung von 35 TW ergibt sich etwa aus einer Pro-Kopf-Leistung von 4...5 kW bei einer Weltbevölkerung von 8 Milliarden Menschen. Die Bundesrepublik ist derzeit (1980) bei einer Leistung von knapp 0.4 TW angelangt.

Interessant ist die Korrelation zwischen dem Bruttosozialprodukt und dem durchschnittlichen Energieverbrauch pro Person. Die Entwicklungsländer unterscheiden sich drastisch von den Schwellenländern und diese wiederum von den Industrienationen. Deutliche Abweichungen zu einem höheren Energieverbrauch zeigten früher vor allem die sozialistischen Länder, was in erster Linie eine Folge ineffizienter und rückständiger Energietechniken sowie einer drastischen Subventionierung von Energie und Verkehr war. Im weiteren treten gewisse Unterschiede durch wirtschaftliche und geografische Besonderheiten auf (Kanada nach oben, Schweiz nach unten). Bei der Abweichung der Schweiz nach unten ist allerdings zu beachten, dass hier die Korrektur durch graue Energie nicht oder ungenügend ausgeführt ist; die oben erwähnten Vergleiche mit Japan und anderen europäischen Ländern sind aktueller und gelten eher als korrekt.

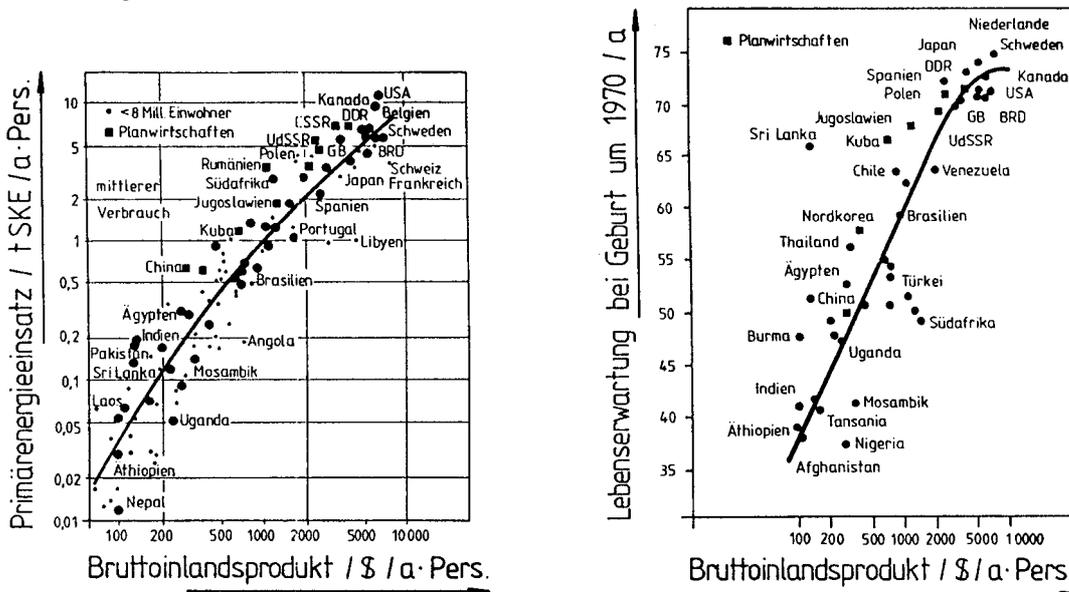


Bild 1.2 Vergleich von BSP, Energieverbrauch und Lebenserwartung verschiedener Staaten. [Kugeler und Phlippen 1990].

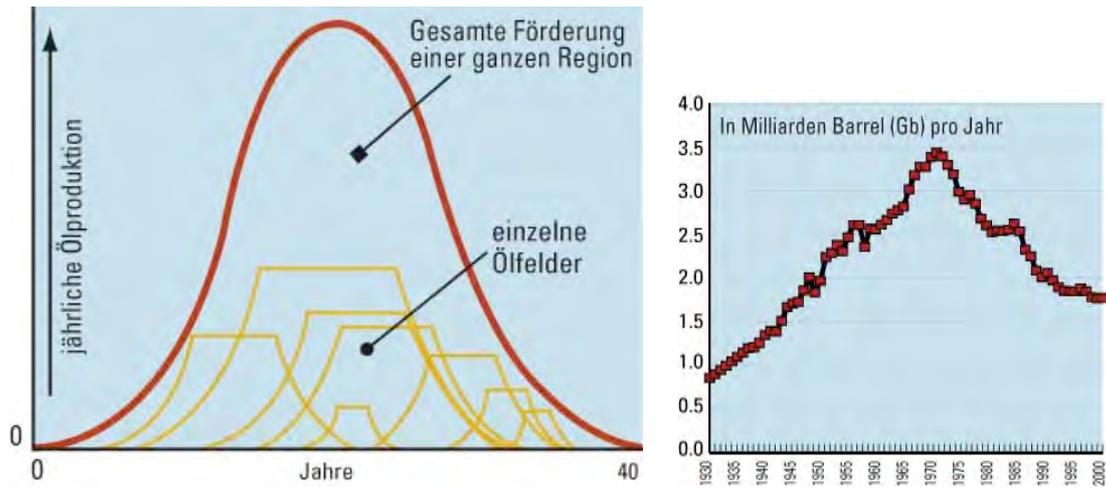


Bild 1.3 Links: Oil peak auf Grund der Erschöpfung einzelner Ölfelder und als Summe für eine ganze Region in Form einer Glockenkurve nach Collin Campbell: The End of Cheap Oil, Scientific American March 1998, 78–83. Rechts: Beispiel der Ölförderung der USA (ohne Alaska und Hawaii).



Bild 1.4 Entwicklung des Rohölpreises in USD pro Barrel (Fass à 159 Liter) von April 2003 bis April 2006 [www.cash.ch].

1.4 Kumulierter Energieaufwand und Erntefaktor

Kumulierter Energieaufwand. Zur Beurteilung von Energieversorgungssystemen oder Energieumwandlungstechniken werden verschiedene Begriffe verwendet. Am anschaulichsten ist die Bestimmung des kumulierten Energieaufwands (KEA) über die Lebensdauer einer Energieumwandlungsanlage bzw. eines Energieumwandlungsapparats. So interessiert zum Beispiel der Energieaufwand während der Betriebsdauer einer Glühlampe im Vergleich zu einer Energiesparlampe.

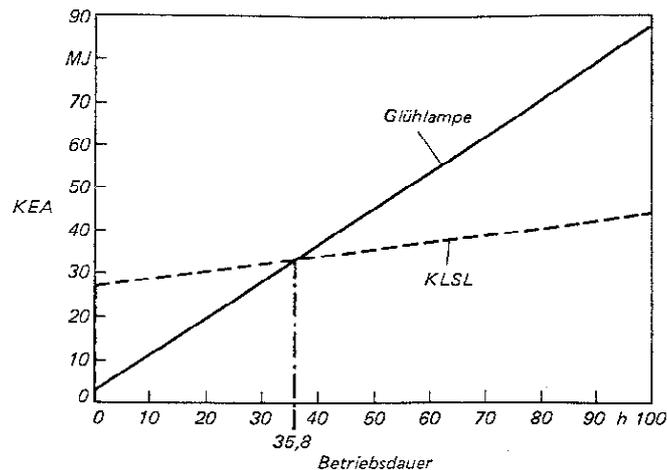


Bild 1.5 Kumulierter Energieaufwand KEA von Glühlampe und Kompaktleuchtstofflampe (KLSL). [Ebersberger und Mauch 1992].

Der kumulierte Energieaufwand wird als Primärenergieäquivalent angegeben und umfasst den Aufwand für Herstellung (H), Nutzung (N) und Entsorgung (E) einer Anlage oder eines Produktes:

$$KEA = E_H + E_N + E_E$$

Die zeitliche Abhängigkeit kann wie folgt beschrieben werden:

$$KEA = E_0 + \int_0^t \dot{E}(t) dt$$

$$E_0 = E_H + E_E$$

Im Beispiel der Glühlampe wird der Umwandelungsschritt von Endenergie zu Nutzenergie beurteilt. Die graue Energie, welche die energetischen Vorleistungen sowie den Energieaufwand zur Entsorgung umfasst, ist dabei als Energieaufwand bei Lebensdauer 0 zu berücksichtigen.

Der Vergleich von Glühlampe und Leuchtstofflampe zeigt, dass die aufwendigere Leuchtstofflampe für Herstellung und Entsorgung einen mehrfachen Energieaufwand verursacht als die Glühlampe. Da jedoch der Energieverbrauch für die gleiche Nutzenergie während des Betriebs (es muss die gleiche Lichtausbeute verglichen werden) geringer ist, ist der Gesamtenergieaufwand bereits bei einer Betriebsdauer ab rund 36 Betriebsstunden geringer als bei einer Glühlampe. Damit die Leuchtstofflampe aus energetischer Sicht vorteilhaft ist, muss die (erwartete mittlere) Lebensdauer signifikant länger sein, als diese Dauer zur Erreichen der Gleichwertigkeit. Im gezeigten Beispiel trifft dies sicher zu.

Für einen abschliessenden Vergleich muss also die Lebensdauer beider zu vergleichenden Systeme bekannt sein. Ein Vergleich kann dann so erfolgen, dass die Grafik bzw. die Berechnung bis zur Lebensdauer des Apparats mit der längsten Lebensdauer ausgedehnt wird. Beim Ersatz ist jeweils der Anfangsenergieaufwand erneut zu berücksichtigen. Da die Leuchtstofflampe eine längere Lebenserwartung aufweist als die Glühlampe, verbessert sich der Vergleich in diesem Beispiel noch zu Gunsten der Energiesparlampe.

Für einen ökologischen Vergleich kann analog zum KEA die Umweltbelastung über die Betriebsdauer bestimmt und aufsummiert werden.

Zum Vergleich von Energieumwandlungstechniken werden die Begriffe der energetischen Rückzahldauer (ERZ) und des Erntefaktors verwendet. Analog zur energetischen Rückzahldauer kann auch eine ökologische Rückzahldauer (ORZ) bestimmt werden. Die Bestimmung dieser Grössen setzt eine Lebenszyklusanalyse voraus. Die Kenngrössen werden dann wie folgt bestimmt:

Energetischer Erntefaktor (EF) = Quotient aus der Nettoerzeugung während der erwarteten Lebensdauer zum kumulierten Energieeinsatz für die Herstellung der Anlage und der Betriebsmittel über die Lebensdauer (dies erfordert die Annahme einer erwarteten Lebensdauer):

$$EF = \frac{\text{produzierte Energie (als Sekundär- bzw. Endenergie) während der Lebensdauer}}{\text{Energieaufwand Herstellung + Betrieb (i.d.R. als Primärenergie)}} [-]$$

Bei heute üblichen Definitionen wird der Energieinhalt des Betriebsenergieträgers (z.B. Kohle im Kohlekraftwerk, Solarstrahlung bei der Fotovoltaik) nicht berücksichtigt. Damit werden heute typische Erntefaktoren für Kraftwerke zwischen 4 und 10 erreicht und Werte für Wasserkraftwerke, Kernkraftwerke, fossil betriebene Kraftwerke sowie Windkraft- und Fotovoltaikanlagen gemäss nachfolgender Tabelle erreicht.

Energetische Rückzahldauer (ERZ, auch energetische Amortisationszeit) = Quotient aus dem Energieeinsatz für die Herstellung und den Betrieb der Anlage zur Jahresnettoerzeugung. Sofern die Betriebsenergie nicht gerechnet wird, kann die Rückzahldauer sofort wie folgt bestimmt werden:

$$ERZ = \frac{\text{Energieaufwand Herstellung + Betrieb (i.d.R. als Primärenergie)}}{\text{Energieerzeugung pro Jahr (i.d.R. als Sekundärenergie bzw. Endenergie)}} [a]$$

Diese Formel findet sich oft in der Literatur. Sie ist aber nicht allgemein gültig, sondern nur unter der genannten Einschränkung.

Tabelle 1.2 Energetische Rückzahldauer und Erntefaktoren für verschiedene Energieumwandlungsanlagen. Werte in Klammern werden als nicht realistisch bzw. nicht vergleichbar eingestuft. Quellen (genaue Angaben siehe Literatur): 1: [Kugeler und Phlippen] nach Siemens AG, Argumentarium Kraftwerke, 2: [Diekmann und Heinloth], 3: [Wokaun], 4: [Hofstetter 1993 und Frischknecht et al. 1994]

Typ	Bemerkung, Betrieb (h/a)	Energie- Rückzahldauer Jahre	Energie- Erntefaktor [-]	Quelle
Kernkraftwerk	LWR 1300 MWe, 7000 h/a	(0,18)	(108)	1
	LWR		6 – 9	2
	LWR	6	7	3
Steinkohlekraftwerk	700 MWe, 5000 h/a	(0,28)	(71)	1
	fossil, Dampf oder GuD		8	2
	keine Angabe	8	4	3
Windkraftanlage	500 kWe, 3000 h/a	(0,67)	(30)	1
	keine Angabe	0,5 – 2		4
	keine Angabe	2 – 2,5	8	3
Sonnenkollektor	keine Angabe	5	4	3
	keine Angabe	1,5 – 2,2		4
Wasserkraft	keine Angabe	3 – 6	10 – 20	3
	Laufwasser-KW.	0,4 – 1		4
Photovoltaik	keine Angabe	5	4 – 6	3
	monokristallin	5 – 10		4
	multikristallin	4 – 10		4
	amorph	2,5 – 7		4
	monokristallin, 1000 h/a	7,2	2,8	1
	multikristallin, 1000 h/a	7,0	2,9	1
	amorph, 1000 h/a	4,8	4,3	1

Tabelle 1.3 Kumulierter Energieaufwand KEA ohne Brennstoff und Energetische Amortisationsdauer EAZ verschiedener Techniken zur Elektrizitätserzeugung nach [Voss 2002].

	KEA (ohne Brennstoff) [kWh _{Prim} / kWh _{el}]	EAZ [Monate]
Steinkohle D	0,28 - 0,30	3,2 - 3,6
Braunkohle	0,16 - 0,17	2,7 - 3,3
Erdgas GuD	0,17	0,8
Nuklear	0,07 - 0,08	2,9 - 3,4
Photovoltaik	0,62 - 1,24	71 - 141
Wind	0,05 - 0,15	4,6 - 13,7
Wasser	0,03 - 0,05	8,2 - 13,7

Im Gegensatz zu fossilen Anlagen weisen Wind- und Solaranlagen eine ausgeprägte Abhängigkeit vom Standort auf. Entsprechende Unterschiede sind hier nicht berücksichtigt.

Die Literaturangaben zu Erntefaktoren und Rückzahldauern weisen zum Teil Unterschiede auf, die in der Grössenordnung nicht nachvollziehbar sind. So weist [Voss 2002] für ein Steinkohlekraftwerk eine kea von 0,28 bis 0,3 entsprechend einem Erntefaktor von 3,5 aus mit einer Rückzahldauer von 3,2 bis 3,6 Monaten. [Wokaun 1999] weist mit 4 einen ähnlichen Erntefaktor auf, dies jedoch bei einer Rückzahldauer von 8 Jahren, was rund das 28-fache des Wertes von Voss bedeutet. Während nach Wokaun ein Kohlekraftwerk und eine Fotovoltaikanlage ähnliche Rückzahldauern haben, sind die Rückzahldauern nach Angaben von Voss für die Fotovoltaikanlage rund 20 bis 40 mal länger als für das Kohlekraftwerk.

Bei dieser Gegenüberstellung ist zu beachten, dass gemäss der Brennstoff im Betriebsaufwand nicht berücksichtigt ist und somit auch für nichterneuerbare Energien Erntefaktoren > 1 resultieren können. Der so definierte Erntefaktor ist ungeeignet für einen Vergleich von erneuerbaren und nichterneuerbaren Energieträgern, da der grundlegende Unterschied zwischen erneuerbaren und nichterneuerbaren Energien durch die Definition nicht erfasst wird: Wird die auf die Erde fallende Sonnenstrahlung oder die nachwachsende Biomasse dagegen mit 0 eingesetzt, während die Kohle zu 100% gerechnet wird, so ist für das Sonnenkraftwerk oder die Holzfeuerung ein Erntefaktor > 1 möglich, für das Kohlekraftwerk dagegen nicht.

Um zum Beispiel Kohlestrom mit Solarstrom oder eine Ölheizung mit einer Holzheizung zu vergleichen, können die Definition von ERZ und EF so ergänzt werden, dass die nichterneuerbaren Betriebsmittel berücksichtigt werden, die erneuerbaren Betriebsmittel dagegen nicht. Dies erlaubt bei Bedarf auch eine Bestimmung der Lebensdauer, ab welcher sich die Substitution einer nichterneuerbaren Energietechnik durch eine erneuerbare Energieumwandlungstechnik lohnt.

Für einen aussagekräftigeren Vergleich werden auch andere Definitionen verwendet, bei denen von einem zu substituierenden System ausgegangen wird [Frischknecht et al. 1994] und anstelle der ERZ die Abwärmerückzahldauer (ARZ) wie folgt angewendet wird (hier am Beispiel Fotovoltaik):

$$ARZ = \frac{\text{Erzeugte Abwärme durch Photovoltaik-Systembereitstellung}}{\text{Vermiedene Abwärme durch Substitution / Jahr}} \quad [a]$$

Die Abwärme ist ein Mass für die in einem Prozess umgesetzte Energie, so dass sich zwischen ERZ und ARZ Parallelitäten ergeben. Als zu substituierendes System kann zum Beispiel der Strom-Mix gemäss UCPTTE eingesetzt werden:

$$ARZ = \frac{\text{Erzeugte Abwärme durch Bereitstellung von 1 TJ Solarstrom}}{\text{Substituierte Abwärme des UCPTTE-Systems}} \times \text{PV-Anlagenlebensdauer} [a]$$

Obwohl dieses Vorgehen aussagekräftiger ist als das vorgenannte ist zu beachten, dass auch bei der ARZ die Wahl der Bilanzgrenze entscheidend ist für die Aussage über ein Energiesystem. So ist z.B. im Strom-Mix nach UCPTTE die Kohleförderung nicht enthalten. Bei der Kernenergie ist zu beachten, ob und wie der beschränkte Wirkungsgrad der Spaltung erfasst wird.

1.5 Erweiterte Bewertung von Energiesystemen mit KEA und EF

Grundsätzlich besteht für den Erntefaktor auch die Möglichkeit, nur den Aufwand an nichterneuerbarer Energie zu bewerten und die erneuerbare nicht zu berücksichtigen:

Energetischer Erntefaktor (EF):

$$EF = \frac{\text{produzierte Energie (als Sekundär- bzw. Endenergie) während der Lebensdauer}}{\text{Aufwand nichterneuerbare Energie für Herstellung + Betrieb}} [-]$$

Tabelle 1.4 Vergleich von Erntefaktoren verschiedener Systeme zur Wärmeerzeugung, wobei nur nichterneuerbare Energie bewertet ist, nach [Sterkele 2001], sortiert nach Erntefaktor. Bemerkungen: E = Erneuerbar, NE = Nichterneuerbar. Diese Energieträger können mit dem Erntefaktor unter sich verglichen werden. Bemerkungen: 1: Mix von E und NE, jedoch fast 100% NE, somit ist eine Bewertung noch beschränkt aussagekräftig. 2: Mix aus NE (40% Atomstrom) und E (60% Wasserkraft), weshalb eine Bewertung des Mix fragwürdig ist. Der Erntefaktor der Wasserkraft müsste > 10 betragen, damit wäre auch für den Mix ein Wert >> 1 zu erwarten. Die Angaben zu den Mix-Szenarien sind deshalb mit Vorbehalt zu betrachten.

	Erntefaktor	
	[-]	Bemerkung
Holzheizung	7,1	E
Sonnenkollektoren	4,0	E
Heizöl	0,66	NE
Erdgas	0,73	NE
Wärmepumpe mit JAZ 3,0 mit Schweizer Strom	0,77	2
Wärmepumpe mit JAZ 3,0 mit Europa-Strom	0,55	1
Strom mit Schweizer Mix	0,26	2
Strom aus Europa-Verbundnetz	0,18	1

Nachfolgend wird ein eigener neuer Vorschlag vorgestellt zur vergleichenden Bewertung von Energiesystemen. Dabei ist zu beachten, dass die nach dieser Methode erhobenen Zahlenwerte mit solchen, die nach konventioneller Definition bestimmt wurden, nicht vergleichbar sind.

Bild 1.6 zeigt neuere Resultate eines Vergleichs verschiedener Heizsysteme anhand einer Lebenszyklusanalyse [Hartmann and Kaltschmitt 2002]. In der Bestimmung des KEA ist dabei nur die nicht-erneuerbare Betriebsenergie gezählt, was nachfolgend mit KEA_{NR} bezeichnet wird.

Das Bild zeigt eine ausgeprägte Korrelation zwischen KEA_{NR} und Treibhausgasemissionen in [t CO₂ Äquivalent/ TJ_{Nutzectible}]. Dies zeigt, dass die Bestimmung von KEA und KEA_{NR} gut geeignet ist als Basis zur vergleichenden Bewertung verschiedener Energiesysteme. Selbstverständlich sind die Folgen der Umweltbelastung durch weitere Emissionen darin nicht berücksichtigt. Diese können jedoch in einem zweiten Schritt separat beurteilt werden. Im Gegensatz zu einer aufaggregierte Ökobilanz wie im

Beispiel in Bild 1.7 ist dann eine unabhängige Beurteilung der Energieeffizienz und der Emissionen möglich. Im Hinblick auf eine nachhaltige Energieversorgung hat die Energieeffizienz hohe Priorität. Zur Verminderung der Auswirkungen der Emissionen sind bei Techniken mit relevanten Emissionen mittelfristig Verbesserungsmöglichkeiten der Technik zu prüfen. So weisen zum Beispiel Dieselmotoren einen höheren Wirkungsgrad auf als Ottomotoren, sie führen aber zu ungleich höheren Emissionen an Stickoxiden (NO_x) und Feinstäuben. Eine Umstellung auf Dieselfahrzeuge ist daher grundsätzlich anzustreben, aber nur unter der Prämisse, dass die Emissionen durch entsprechende Massnahmen auf ein zu Ottomotoren vergleichbares Niveau abgesenkt werden. Bei diesem Beispiel ist allerdings auch darauf hinzuweisen, dass Verbrennungsmotoren und deren Einsatz im Verkehr im heutigen Ausmass langfristig grundsätzlich fraglich ist.

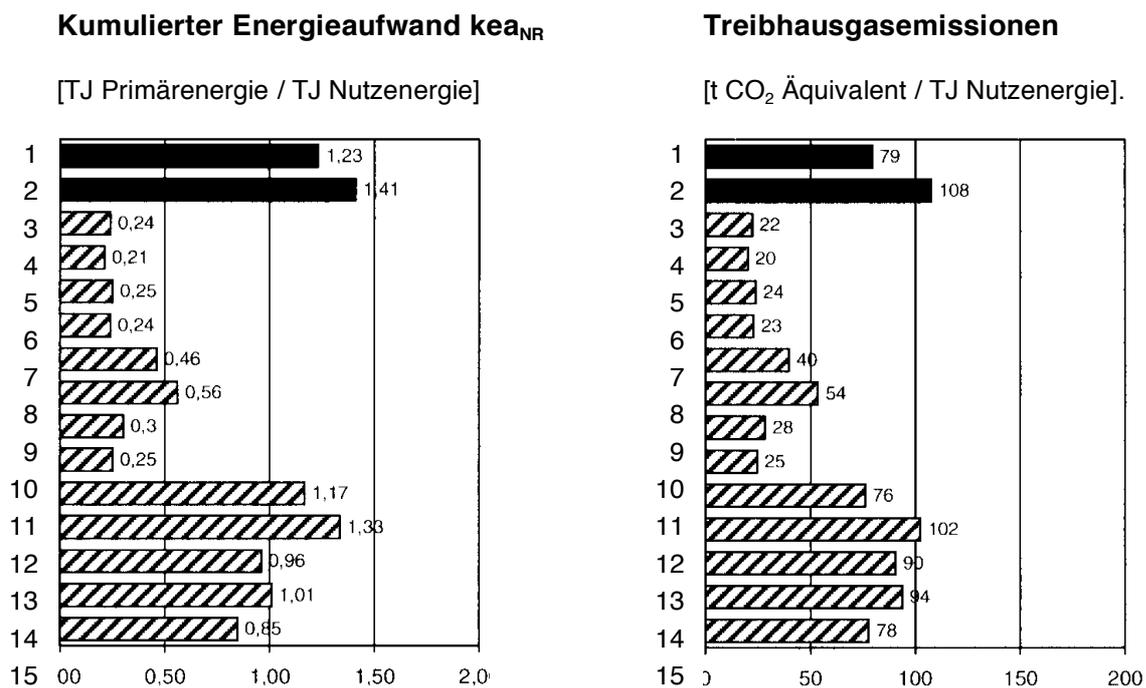


Bild 1.6 Vergleich verschiedener Heizsysteme anhand des kumulierten Energieaufwands [Hartmann and Kaltschmitt 2002]. Left: kea_{NR}. Rechts: Spezifische Treibhausgasemissionen.

- 1 Erdgasheizung mit Abgaskondensation
- 2 Heizölheizung
- 3 Stückholzkessel
- 4 Holzsnitzelheizung
- 5 Kleines Fernwärmenetz mit Holzsnitzel
- 6 Grosses Fernwärmenetz mit Holzsnitzel
- 7 wie 6 aber mit Heizöl für Spitzenlast
- 8 wie 7 aber mit Stroh statt Holz
- 9 Pelletkessel mit zusätzlichem Sonnekollektor
- 10 Holz-Fernwärme mit zusätzlichem Sonnekollektor
- 11 Gasheizung mit zusätzlichem Sonnekollektor
- 12 Ölheizung mit zusätzlichem Sonnekollektor
- 13 Wärmepumpe mit Erdkollektor
- 14 Wärmepumpe mit Erdsonde
- 15 Geothermie and Erdgas in grossem Fernwärmenetz

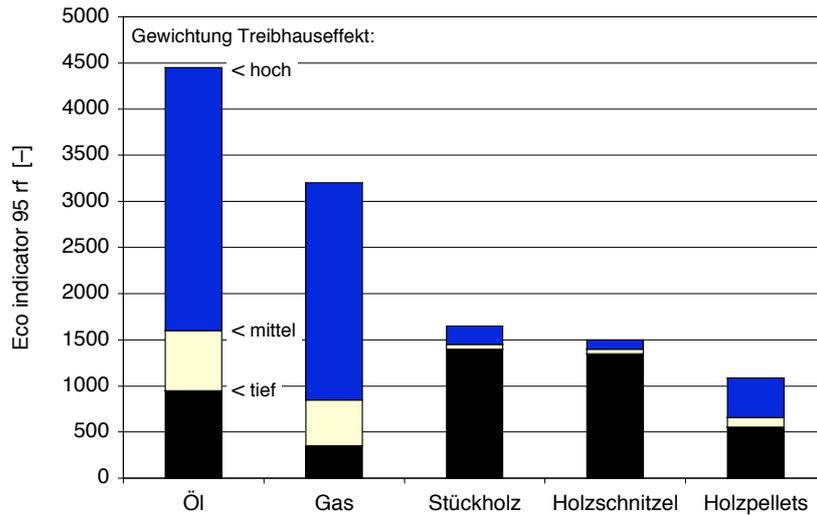


Bild 1.7 Umweltbelastungspunkte nach Eco Indicator-Methode von Heizungen mit Heizöl, Erdgas und Holz bei verschiedener Gewichtung des Treibhauseffekts (Daten von [Kessler et al 2000] ausser Holzpellets nach [Nussbaumer 2002]).

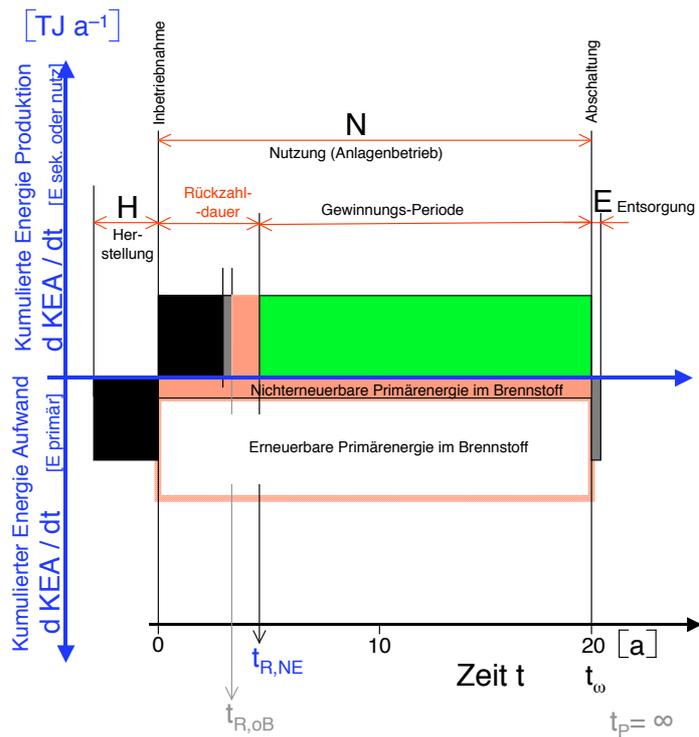
Zur Bestimmung des kumulierten Energie-Aufwands während des ganzen Lebenszyklus einer Anlage ist die Einführung verschiedener zeitabhängiger Grössen erforderlich [Bansal et al. 1998, Wagner et al. 1999].

t = Zeit in [a]

t_w = Lebensdauer der Anlage in [a]

t_w = 20 a wird angenommen. Gebäude weisen eine längere Lebenserwartung auf, wobei meist mit 60 a gerechnet werden kann. Zur Vereinfachung erfolgt die Darstellung dennoch für eine Lebensdauer von 20 Jahren, auch wenn die exakten Berechnungen mit verschiedenen Lebensdauern durchgeführt werden.

Der Primärenergie-Aufwand von Brennstoffen wird mit dem Heizwert berechnet (z.B. nach [VDI 4600]).



Kumulierter Energie Aufwand

$$KEA = E_H + E_N + E_E$$

$$E_N = E_A + B \quad (!)$$

E_A = Auxiliary E. ohne Brennstoff
 B = Energie im Brennstoff (i.d.R. n.b.)

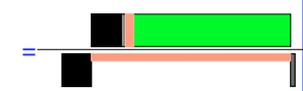
$$B = B_{NE} + B_E$$

NE = Nichterneuerbare Brennst.
 E = Erneuerbare Brennstoffe

Energie Erntefaktor

$$EF = \frac{KEP}{KEA} \quad [-]$$

$$EF_{NE} = \frac{KEP}{KEA_{NE}} \quad [-]$$



Energie Rückzahl.

$$t_{R,NE} = \frac{t_{\omega}}{EF_{NE}} \quad [a]$$

$$= \text{[Diagram]} \quad [a]$$

Bild 1.8 Definitionen: Kumulierter Energieaufwands (KEA), Energie-Erntefaktor (EF) und Energie-Rückzahl-dauer(t_R).

Wie in Bild 1.8 gezeigt, wird der **Kumulierte Energieaufwand** wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} KEA &= \text{Kumulierter Energieaufwand in } [TJ_{prim}] \\ &= E_H + E_N + E_E \end{aligned}$$

E_H = Primärenergieaufwand zur Herstellung der Anlage in $[TJ_{prim}]$

E_N = Primärenergieaufwand zur Nutzung der Anlage in $[TJ_{prim}]$

E_E = Primärenergieaufwand zur Entsorgung der Anlage in $[TJ_{prim}]$

E_H und E_E können als zeitunabhängig angenommen und zusammengefasst werden:

$$E_0 = E_H + E_E$$

E_N ist dagegen eine zeitabhängige Funktion:

$$E_N(t) = \int_0^t \dot{E}_N(t) dt \quad [TJ_{prim}]$$

Für die ganze Lebensdauer ergibt sich damit:

$$E_N = \int_0^{t_{\omega}} \dot{E}_N(t) dt \quad [TJ_{prim}]$$

Der **Kumulierte Energieaufwand** ist somit ebenfalls eine **Funktion der Zeit**:

$$KEA(t) = E_0 + \int_0^t \dot{E}_N(t) dt \quad [TJ_{\text{prim}}]$$

Der **integrierte Kumulierte Energieaufwand** über die ganze Lebensdauer ist:

$$KEA = E_0 + \int_0^{t_0} \dot{E}_N(t) dt \quad [TJ_{\text{prim}}]$$

Der Primär Energie Verbrauch während des Anlagenbetriebs teilt sich wie folgt auf:

$$E_N = E_A + B$$

E_A = Primär Energieaufwand für Auxiliaries (Hilfsenergie) in $[TJ_{\text{prim}}]$

B = Primär Energieaufwand in Form des zugeführten Brennstoffs in $[TJ_{\text{prim}}]$

Der Primär Energieaufwand des Brennstoffs teilt sich wiederum wie folgt auf:

$$B = B_H + B_B + B_T$$

B_H = Heizwert des Brennstoffs in $[TJ_{\text{prim}}]$

B_B = Primär Energieaufwand für Brennstoff-Bereitstellung (hacken, trocknen) in $[TJ_{\text{prim}}]$

B_T = Primär Energieaufwand für Brennstoff Transport $[TJ_{\text{prim}}]$

Der Brennstoff (bzw. die Betriebsenergie) setzt sich aus **nichtererneuerbaren (NE) und/oder erneuerbaren (E)** Energieträgern zusammen:

$$B = B_{NE} + B_E$$

E_0, E_A, B_T werden als 100% nichterneuerbar angenommen ($E_{0,E} = E_{A,E} = B_{T,E} = 0$)

B_H wird für Biomasse als 100% erneuerbar angenommen

B_B wird als 100% nichterneuerbar angenommen für Holzpellets, die mit Heizöl getrocknet werden. Wenn die Herstellung dagegen mit erneuerbarer Trocknungsenergie erfolgt, wird dieser Anteil als erneuerbar ausgewiesen und die Pellets als Ökopellets bezeichnet.

Damit können **drei Definitionen von KEA** unterschieden werden:

$$1) \quad KEA_{OB} = E_0 + E_A$$

$$2) \quad KEA = E_0 + E_A + B$$

$$3) \quad KEA_{NE} = E_0 + E_A + B_{NE}$$

Definition 1 ist gebräuchlich in der Literatur, wobei der Index „OB“ nicht angegeben wird. Da diese Definition den hauptsächlichen Energieverbrauch durch den Brennstoff gerade nicht berücksichtigt, wird er als ungeeignet für eine aussagekräftige Bewertung betrachtet. Dagegen wird vorgeschlagen, verschiedene Energiesysteme anhand der Definitionen 2 und 3 zu vergleichen. Wenn System A nach beiden Bewertungen besser ist als System B, kann es ohne subjektive Bewertung als zweifelsfrei

besser beurteilt werden. Wenn dagegen Definition 2 und 3 zu einer anderen Reihenfolge der Bewertung führen, ist für einen abschliessenden Systemvergleich eine subjektive Bewertung notwendig, da die Wertigkeit von erneuerbaren und nichterneuerbaren Energieträgern verglichen werden müssen. Dennoch sind auch in diesem Fall verschiedene objektive Schlussfolgerungen möglich. So kann zum Beispiel nach beiden Methoden die je optimale Transportdistanz für das Einzugsgebiet eines Biomassekraftwerks bestimmt werden (wobei angenommen ist, dass ein grösseres Kraftwerk einen höheren Wirkungsgrad hat, jedoch längere Transportwege induziert). Die optimale Distanz in Bezug auf Energieeffizienz ist mit Sicherheit zwischen den beiden bestimmten Werten. Diese Aussage ist wiederum ohne subjektive Gewichtung möglich. Die Methode unterscheidet sich deshalb von der Verwendung des Begriffs KEA nach lediglich einer Definition, die immer eine subjektive Wertung notwendig macht, welche aber oft nicht explizit ausgewiesen wird.

Die **Kumulierte Energieproduktion** ist wie folgt definiert:

KEP	= Kumulierte Energieproduktion in [TJ _{sek}] or [TJ _{Nutz}]
\dot{E}_{sek}	= Jährliche Energieproduktion als Anlagen-Output in [TJ _{sek} /a]
\dot{E}_{Nutz}	= Jährliche Energieproduktion als Konsumenten-Input in [TJ _{Nutz} /a] (wobei $\dot{E}_{\text{Nutz}} \neq \dot{E}_{\text{N}}$!)

Die Kumulierte Energieproduktion während der Lebensdauer ist eine Funktion der Zeit:

$$\text{KEP}(t) = \int_0^t \dot{E}_{\text{sek}}(t) dt \quad [\text{TJ}_{\text{sek}}]$$

$$\text{KEP}(t) = \int_0^t \dot{E}_{\text{Nutz}}(t) dt \quad [\text{TJ}_{\text{Nutz}}]$$

Wenn die Nutzenergie betrachtet wird, folgt für die **integrierte Kumulierte Energieproduktion** während der Lebensdauer:

$$\text{KEP}(t) = \int_0^t \dot{E}_{\text{Nutz}}(t) dt \quad [\text{TJ}_{\text{Nutz}}]$$

Die **integrierte Kumulierte Energieproduktion** während der ganzen Lebensdauer ist:

$$\text{KEP} = E_0 + \int_0^{t_0} \dot{E}_{\text{Nutz}}(t) dt \quad [\text{TJ}_{\text{prim}}]$$

Der KEA wird meist normiert mit Bezug auf den Nutzen des betrachteten Prozesses. In einem Produktionsprozess wird meist das Produkt als Bezugsgrösse verwendet und KEA z.B. in [TJ pro kg Produkt] angegeben. Für Energiesysteme ist das Produkt Sekundär- oder Nutzenergie. Der **spezifische KEA** ist dann definiert als dimensionsloser Faktor und wird hier als kea angegeben:

$$\text{kea} = \frac{\text{KEA}}{\text{KEP}} \frac{[\text{TJ}_{\text{prim}}]}{[\text{TJ}_{\text{Nutz}}]} = [-]$$

KEA und KEP sind dimensionsbehaftete Energien in [TJ]. Um einen Vergleich verschiedener Energiesysteme zu ermöglichen, können KEA und KEP durch Hilfsgrößen als Zeitäquivalente angegeben werden:

$$E^* = \frac{E}{\dot{E}_{\text{Nutzl}}} \quad [\text{a}]$$

$$\text{KEA}^* = \frac{\text{KEA}}{\dot{E}_{\text{Nutz}}} \quad [\text{a}]$$

$$\text{KEP}^* = \frac{\text{KEP}}{\dot{E}_{\text{Nutz}}} \quad [\text{a}]$$

Die Darstellung von KEA*(t) und KEP*(t) in einem Diagramm E* als Funktion der Zeit erlaubt eine rasche und verständliche Bestimmung der verschiedenen Kennzahlen.

Der spezifische Kumulierte Energie Aufwand kann wie folgt bestimmt werden:

$$\text{kea} = \frac{\text{KEA}^*}{\text{KEP}^*} \quad \frac{[\text{a}]}{[\text{a}]} = [-]$$

Der **Energie Erntefaktor** ist definiert als Verhältnis zwischen der Kumulierten Energieproduktion und dem Kumulierten Energieaufwand. Er entspricht somit dem Kehrwert von kea:

$$\text{EF} = \frac{\text{KEP}}{\text{KEA}} = \text{kea}^{-1} \quad \text{in} \quad \frac{[\text{TJ}_{\text{sek}}]}{[\text{TJ}_{\text{prim}}]} \quad \text{oder} \quad \frac{[\text{TJ}_{\text{Nutz}}]}{[\text{TJ}_{\text{prim}}]} \quad = [-]$$

$$\text{EF}_{\text{NE}} = \frac{\text{KEP}}{\text{KEA}_{\text{NE}}} = \text{kea}_{\text{NE}}^{-1} \quad [-]$$

Zur Bestimmung von EF können die Zeitäquivalente verwendet werden:

$$\text{EF} = \frac{\text{KEP}^*}{\text{KEA}^*} \quad \text{in} \quad \frac{[\text{a}]}{[\text{a}]} = [-]$$

$$\text{EF}_{\text{NE}} = \frac{\text{KEP}^*}{\text{KEA}_{\text{NE}}^*} = \text{kea}_{\text{NE}}^{-1} \quad [-]$$

Dabei gelten folgende Bedingungen bei Verwendung der Definitionen 2 und 3:

EF < 1

EF_{NE} < 1 für nichterneuerbare Energieträger

EF_{NE} > 1 ist möglich (aber nicht garantiert) für erneuerbare Energieträger.

Die **Energie Rückzahldauer** t_p beschreibt die Zeit ab Anlagenstart, bis $KEP(t)=KEA(t)$ erfüllt ist und kann numerisch oder im Diagramm $E^*(t)$ bestimmt werden:

t_p = **Energie Rückzahldauer**, wobei $KEP(t) = KEA(t)$

$t_{p,NE}$ = (Nichterneuerbare) **Energie Rückzahldauer**, wobei $KEP(t) = KEA_{NE}(t)$

Folgende Bedingungen sind gültig:

$t_p = \infty$

$t_{p,NE} = \infty$ für nichterneuerbare Energieträger

$t_{p,NE} < \infty$ ist möglich (aber nicht garantiert) für erneuerbare Energieträger.

Bild 1.9 zeigt E, KEA und KEP als Funktion der Zeit, ebenso Bild 1.11, wobei die Daten auf der y-Axe normiert sind und in [a] angegeben werden. Da die Absolutwerte von E, KEA, und KEP nicht von Bedeutung sind, ist die zweite Darstellung vorteilhaft.

Weitere Definitionen

Heizanlagen

η_a = Jahresnutzungsgrad in [%] = $[TJ_{end}/TJ_{Nutz}]$

$\eta_a = 80\%$ wird als Referenzfall angenommen

Stromerzeugung und Wärmepumpen

ε_{ex} = Exergetische Wertigkeit von Strom in $[TJ_{prim}/TJ_{sek}]$

$\varepsilon = COP$ = Coefficient Of Performance einer Wärmepumpe, hier auch gleichgesetzt mit

Jahresarbeitszahl JAZ [-]

= $[TJ_{Nutz}/TJ_{end}]$

Referenzfall $\varepsilon_{ex} = COP = 2.5$

Transport

35 l Diesel per 100 km. Primär Energieaufwand Diesel:

$kea_{Diesel} = 1.25 [TJ_{prim}/TJ_{sek}]$ [Kasser et al. 2001]

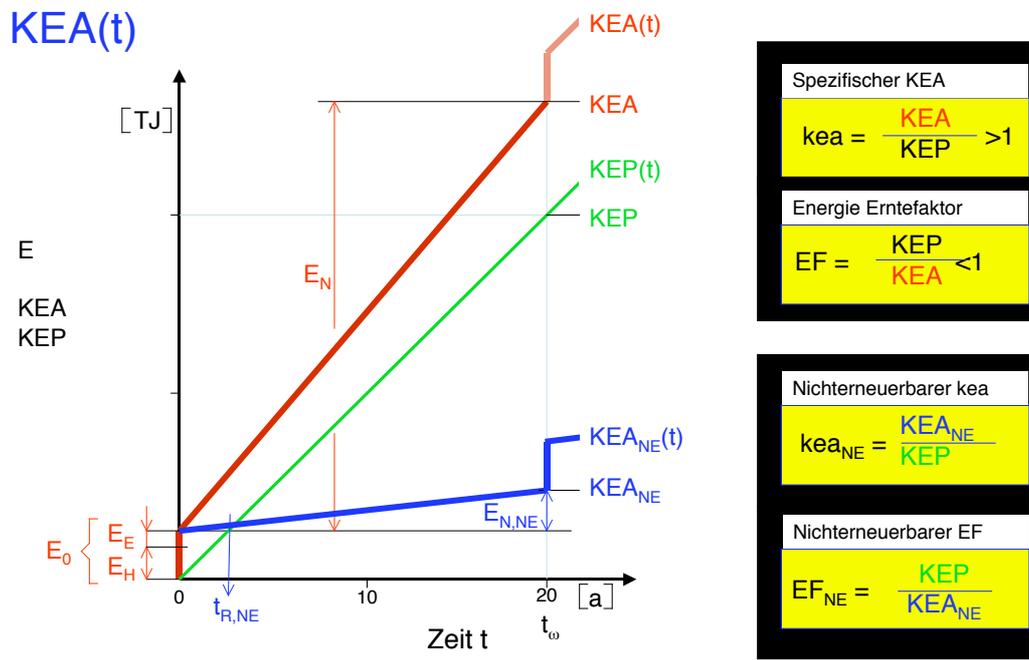


Bild 1.9 KEA(t) und KEP(t) in [TJ] als Funktion der Zeit.

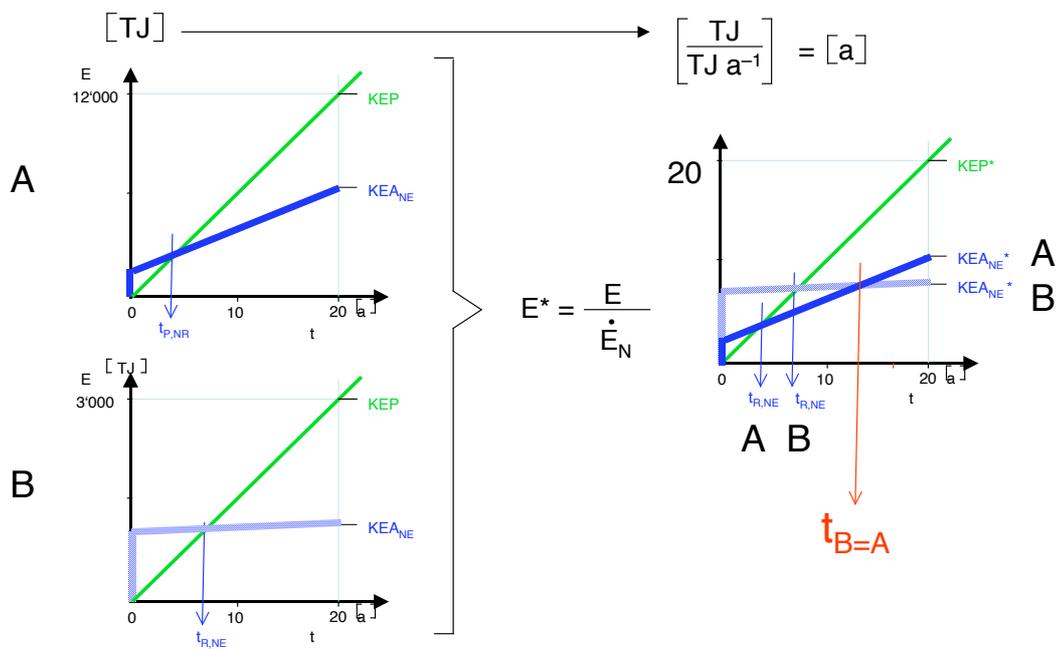


Bild 1.10 Transformation von KEA zu KEA*. Zwei unterschiedliche Energiesysteme A und B können so in einer Grafik verglichen werden.

KEA*(t) als Zeitäquivalent

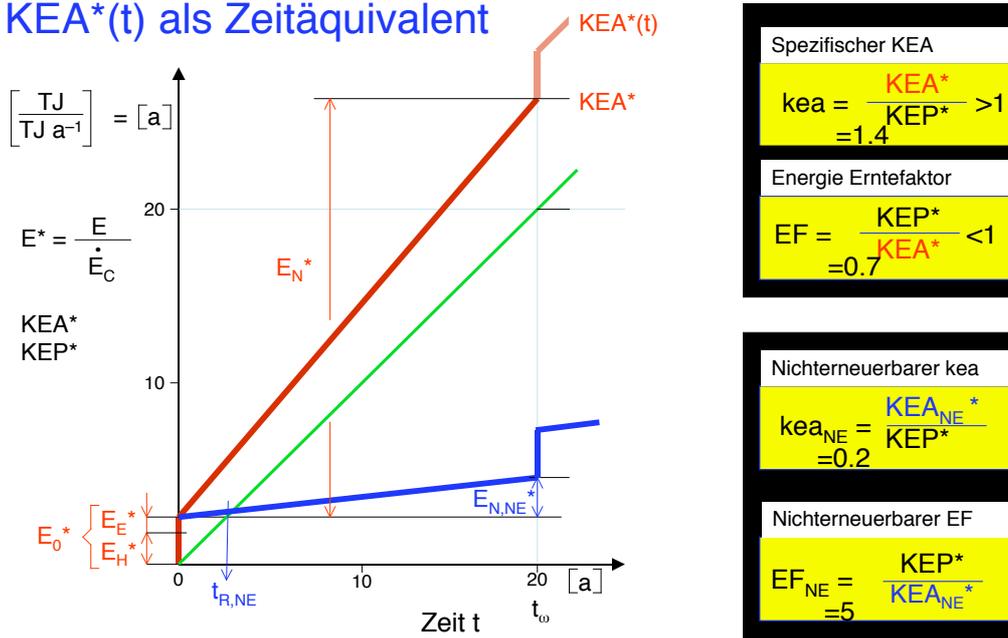


Bild 1.11 KEA(t) und KEP(t) als Zeitäquivalente in Funktion der Zeit.

1.6 Erntefaktoren mit und ohne Bewertung erneuerbarer Energie

Tabelle 1.5 (Nächste Seite) Erntefaktoren EF (mit Bewertung aller Betriebsenergeträger) und EF_{NE} (ohne Bewertung der erneuerbaren Brennstoffe im Betrieb) für verschiedene Energieketten zur Wärmeerzeugung aus Holz nach [Nussbaumer und Oser 2004] sowie Literaturdaten. Erläuterungen umseitig. Erläuterungen:

a) Daten nach [Nussbaumer und Oser 2004]: Für Holzfeuerungen ist ein Jahresnutzungsgrad von $\eta_a = 80\%$ angenommen. Stromverbrauch ist mit $\epsilon_{ex} = 2.5$ (hier = COP = JAZ) gewichtet, Diesel ist mit $kea_{Diesel} = 1.25$ bewertet. Referenz-Szenarien: 4, 6, 8, 10, 11, 13, und 16 sind fett eingetragen. TD = Transport Distanz. Fahrdistanz = 2 TD, da eine leere Rückfahrt angenommen ist. Zusätzlich sind die Transportdistanzen ausgewiesen, die einem $EF_{NE} = 1$ entsprechen, d.h. ab dieser Transportdistanz wird das Energiesystem unsinnig.

b) Literaturquellen: A: [Kessler et al. 2000], B: [Hartmann and Kaltschmitt 2002], C: [Sterkele 2001], D: [Studer & Wolfensberger 1991], E: [Wörgetter et al. 1999]. Der Vergleich verschiedener Quellen ist nur bedingt zulässig, da die Annahmen von Lebensdauer, Wirkungsgrad, Transportdistanz u.a. unterschiedlich sein können.

			TD	EF	EF _{NE}
	Nr	Szenario	[km]	= kea ⁻¹ [-]	= kea _{NE} ⁻¹ [-]
Wärmeerzeugung	1	Holzpellets mit Fernwärme mit 1.5 MWh a ⁻¹ m ⁻¹	50	0.580	2.81
	2	Holzpellets (dezentral ohne Fernwärme)	5000	0.419	0.88
	3	Holzpellets	500	0.613	2.63
	4	Hozelletts	50	0.643	3.27
	5	Holzpellets	15	0.645	3.34
	6	Öko-Holzpellets (Holz für Trocknung)	50	0.647	8.30
	7	Holzschnitzel mit Fernwärme mit 0.6 MWh a ⁻¹ m ⁻¹	15	0.583	7.89
	8	Holzschnitzel mit Fernwärme mit 1.5 MWh a⁻¹m⁻¹	15	0.658	8.96
	9	Holzschnitzel mit Fernwärme mit 3 MWh a ⁻¹ m ⁻¹	15	0.687	9.37
	10	Holzschnitzel ohne Fernwärme	15	0.732	13.0
	11	Stückholzkessel mit Wärmespeicher	5	0.756	13.8
	12	Stückholzkessel ohne Wärmespeicher	5	0.757	14.0
Strom	13	Holzkraftwerk mit 25%el und WP mit JAZ = 2.5	50	0.545	10.1
	14	Holzkraftwerk mit 50%el und WP mit JAZ = 2.5	50	1.076	16.0
	15	Holzkraftwerk mit 25%el und WP mit JAZ = 5	50	1.085	18.4
	16	Holzkraftwerk mit 50%el und WP mit JAZ = 5	50	2.129	27.7

TD für EF _{NE} =1	4"	Holzpellets	4186	0.444	1
	10"	Holzschnitzel ohne Fernwärme	2093	0.437	1
	8"	Holzschnitzel mit Fernwärme mit 1.5 MWh a ⁻¹ m ⁻¹	1845	0.415	1
	13"	Holzkraftwerk mit 25%el und WP mit JAZ = 2.5	1555	0.366	1
	14"	Holzkraftwerk mit 25%el und WP mit JAZ = 5	3183	0.536	1

Literaturdaten	A,B,C	Ölheizung (oberer Wert mit Abgaskondensation)		0.66 – 0.72
	A,B,C	Gasheizung (oberer Wert mit Abgaskondensation)		0.73 – 0.81
	A	Stückholzkessel ($\eta_a=65\%$, *E _{prim} = Baum, **E _{prim} = nutzbb. Holz)	0.46*	10.1* / 12.1**
	A	Holzschnitzelkessel ($\eta_a=65\%$, *E _{prim} = Baum, **E _{prim} = nutzbb. Holz)	0.51*	11.0* / 12.1**
	C	Holzheizung		7.1
	B	Stückholzkessel / Holzschnitzelkessel		4.2 / 4.8
	C	Solarheizung (Sonnenkollektor-Heizwärme)		4.0
	D, E	Biodiesel (Raps-Methyl-Ester RME, tiefer Wert CH ohne Koppelprodukte)		1.5 – 3
	B	Biodiesel (Raps-Methyl-Ester RME und Koppelprodukte)		2.4
	B	Ethanol (aus Anbau von Zuckerrüben in Deutschland)		2.1
	B	Wärmepumpe mit Erdkollektor (Strom-Mix D 2002, $\eta_{e, \text{rimär}} < 30\%$)		1.04
	B	Wärmepumpe mit Erdsonde (Strom-Mix D 2002, $\eta_{e, \text{rimär}} < 30\%$)		0.99
B	Geothermie und Erdgas mit grossem Fernwärmenetz (dito)		1.18	

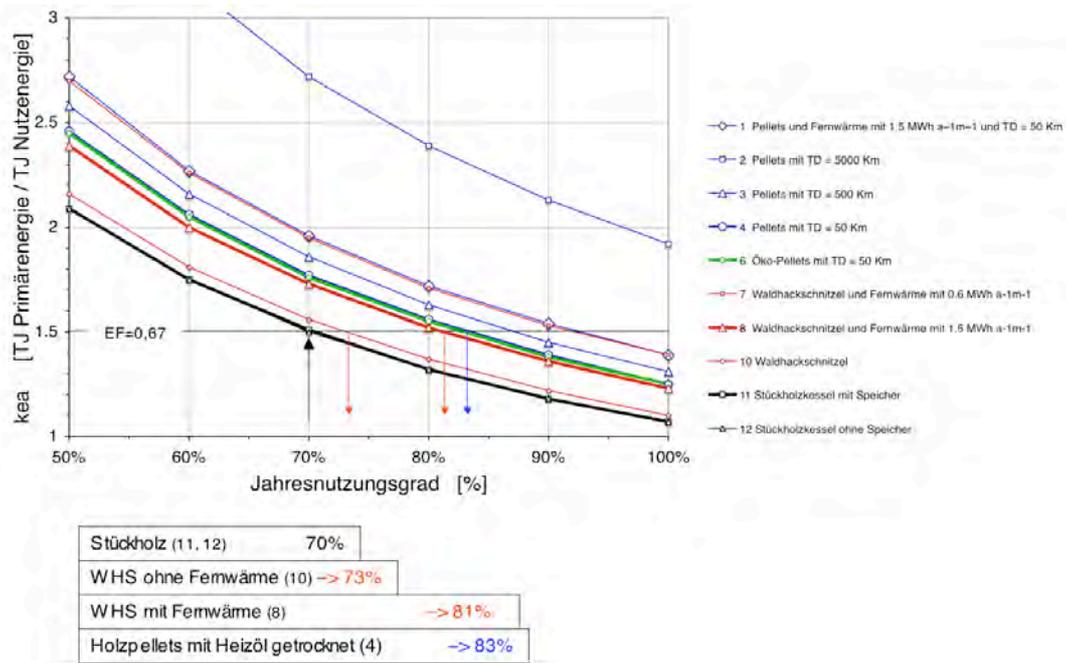


Bild 1.12 Spezifischer Kumulierter Energieaufwand ke_a [-] für Holzheizanlagen in Funktion des Jahresnutzungsgrades η_a . Elektrizität ist bewertet mit $\eta_{ex} = 2.5$. [Nussbaumer und Oser 2004].

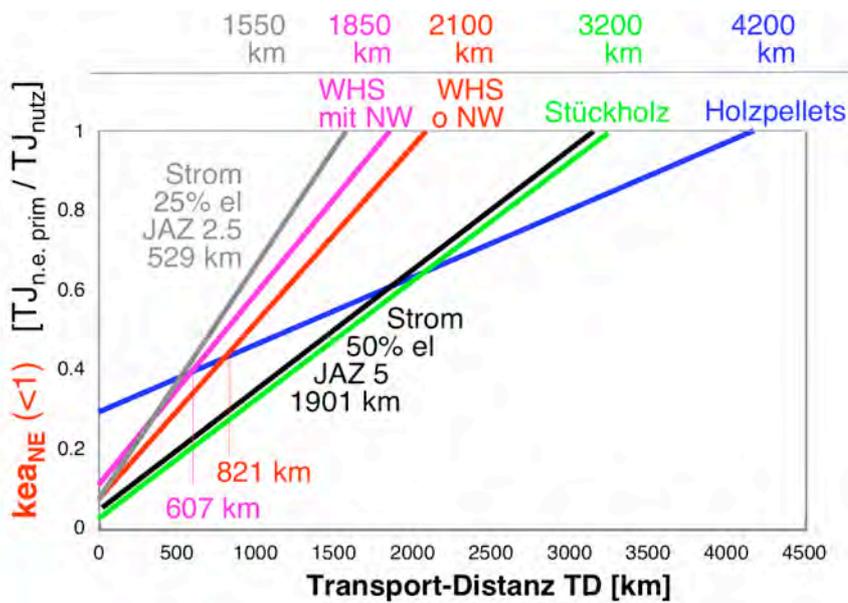


Bild 1.13 Nichterneuerbarer spezifischer Kumulierter Energieaufwand $ke_{a,NE}$ [-] als Funktion der Transportdistanz für den Brennstoff. Fahrdistanz = 2 TD (leere Rückfahrt). Elektrizität ist bewertet mit $\eta_{ex} = 2.5$. [Nussbaumer und Oser 2004].

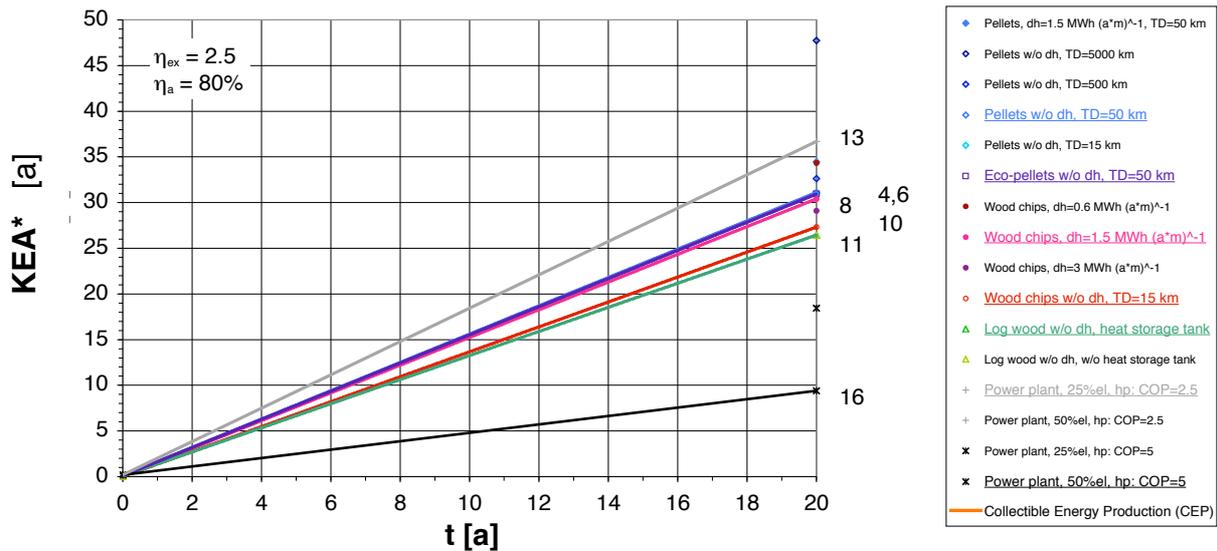


Bild 1.14 KEA- Zeitäquivalent (KEA*) in [a] als Funktion der Zeit.

Die graue Energie ist im Zeitmassstab von 20 Jahren in der Grafik nicht zu erkennen.

Eine Anlage mit Jahresnutzungsgrad = 1 und ohne graue Energie würde der Geraden mit der Bedingung (KEA* = t) entsprechen. Alle Anlagen zur Wärmeerzeugung liegen folglich oberhalb dieser Geraden. Mit der exergetischen Gewichtung der Elektrizität von 2.5 kann die Stromerzeugung dagegen auch auch tiefere Werte erzielen.

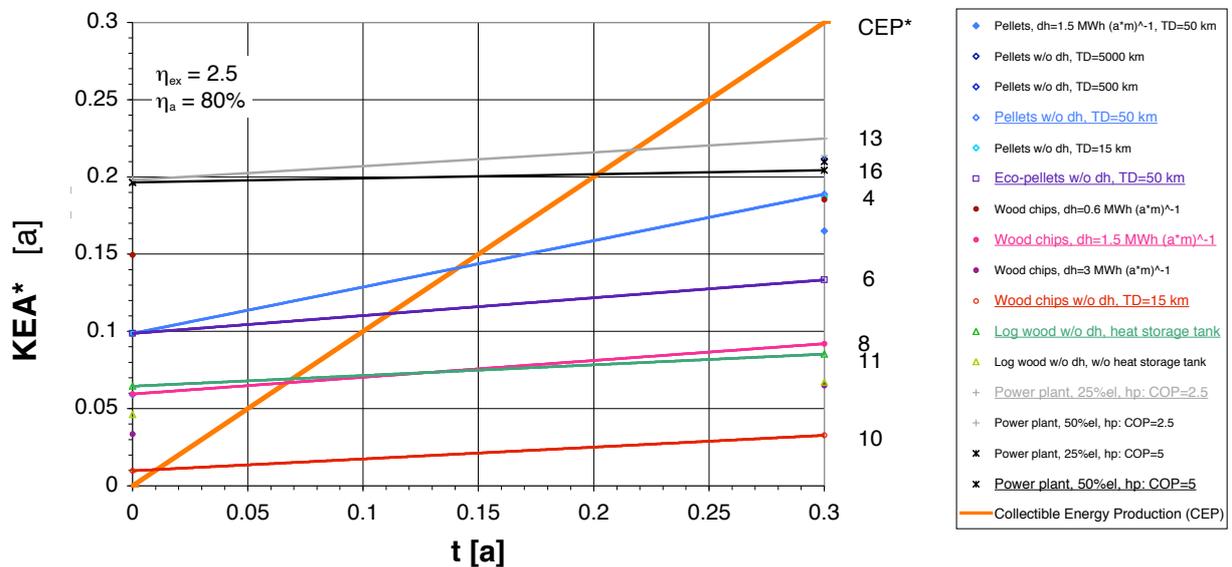


Bild 1.15 Nichterneuerbares KEA- Zeitäquivalent (KEA_{NR}*) in [a] als Funktion der Zeit.

Ausschnitt bis zu 0,3 Jahren zur Bestimmung der Rückzahldauer mit der Bedingung KEA_{NE}* = KEP* (hier Diagonale, als CEP* bezeichnet).

1.7 Ressourcen

Die Energieressourcen können aufgeteilt werden in

Nicht erneuerbare

- Kohle
- Erdöl
- Erdgas
- Fissionsbrennstoff (Uran; Plutonium nur für kriegerische Anwendungen)

Praktisch unerschöpfliche

- Umweltenergie bei Umgebungstemperatur
- Tiefe Geothermie (ab 400 m, Erdwärme durch radioaktiven Zerfall im Erdinnern)
- Fusionsbrennstoff (schweres Wasser)

Erneuerbare (Sonnenergie und Gravitation)

- Sonnenergie im engeren Sinn (auf die Erde einfallende Strahlungsenergie)
- Indirekte Sonnenergie
 - Biomasse (Holz, pflanzliche Biomasse wie Rapsöl, Chinaschilf, Gras usw., Exkremente, Dung)
 - Hydraulische Energie
 - Untiefe Geothermie (bis 400 m, Hauptteil durch Sonneneinstrahlung)
- Wind
- Meereswellen
- Gezeiten.

Die Bezeichnung 'alternative Energien' ist sinnlos ohne Angabe eines Bezugs und sollte deshalb nicht verwendet werden (je nachdem ist z.B. Holz eine Alternative zu Öl oder Öl eine Alternative zu Holz).

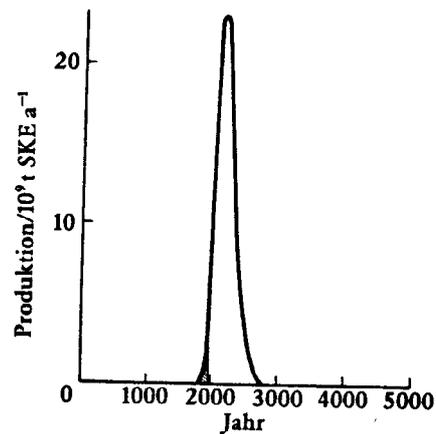
Bei der hier vorgeschlagenen Unterscheidung ist zu berücksichtigen, dass Umweltenergie bei Umgebungstemperatur zwar praktisch unbegrenzt zur Verfügung steht, aber nichts wert ist, weil sich die menschlichen Bedürfnisse gerade aus der Differenz zu ihr ergeben (dies gilt für heizen und kühlen sowie indirekt für die Krafterzeugung aus Wärme mittels einer Wärmekraftmaschine). Für eine Nutzung muss die Umweltenergie deshalb mittels einer Wärmepumpe aufgewertet werden, wozu aus einer anderen Ressource stammende Energie benötigt wird.

Der Weltenergiebedarf wird heute zu rund 80% durch nichterneuerbare Energieträger gedeckt. Von den erneuerbaren Energieträgern ist die Biomasse mit einem Anteil von 11% am wichtigsten, gefolgt von Wasserkraft mit 6%. Solarenergie in direkter Nutzung, Windenergie und andere erneuerbare Energieträger haben nach wie vor nur einen verschwindend kleinen Anteil und auch die Kernenergie weist nur einen bescheidenen Anteil auf.

Der Verbrauch von nichterneuerbaren Ressourcen führt zu zwei grundsätzlichen Problemen:

- Klimaveränderung und Einflüsse auf die Umwelt (z.B. durch Kohleabbau) und
- Erschöpfung der Vorräte in endlicher Zeit (was ethisch fraglich ist).

Das Zeitalter der fossilen Brennstoffe – eine δ -Funktion in der Menschheitsgeschichte. Der bisher verbrauchte Teil der fossilen Brennstoffe ist durch den dunklen Teil am Anfang der Kurve gekennzeichnet. Der Abbildung liegt ein weltweiter fossiler Energievorrat von ungefähr $8 \cdot 10^{12}$ t SKE zugrunde. Der größte Teil dieser Energie ($\approx 90\%$) steckt in Kohle, der Rest in Mineralöl und Erdgas. Die Halbwertsbreite der Produktionskurve beträgt nur wenige hundert Jahre ($1 \text{ t SKE} \approx 8.1 \cdot 10^3 \text{ kWh}$).



Erschöpfung der fossilen Brennstoffe. Quelle: Fricke

Fossile Brennstoffe bestehen aus von der Natur in Jahrmillionen umgewandelter Biomasse. In sehr begrenztem Mass können streng genommen auch fossile Brennstoffe nachhaltig genutzt werden, ihr Beitrag zum heutigen Energieverbrauch wäre dabei allerdings vernachlässigbar. Daneben gibt es auch Anstrengungen, die Bildung von Erdöl zu beschleunigen und somit selbst Erdöl erneuerbar zu gewinnen:



Light Oil Synthesizing Bacteria Nippon Steel Corp., Kirin Brewery Co. and 21 other firms have discovered photosynthetic bacteria that synthesize light oil in a hot spring in Japan. The new microbes are the first organism ever discovered that synthesizes light oil. The creatures grow quickly, proliferating at more than twice the pace of those that synthesize heavy oil. Recovering the oil is simply a matter of collecting and mashing up the bacteria. The Karnaishi group will try to develop ways to produce light oil by using the organisms in a commercial plant. When grown in a neutral culture fluid and exposed to light, the bacteria combine water and carbon dioxide to make light oil molecules. (Energy-Technology News from Japan, 7 2005)

1.8 Erschöpfung der Vorräte

Die Erschöpfung der Vorräte hängt von mehreren Faktoren ab:

- Weltvorrat bzw.
- nutzbarer Vorrat bei begrenztem Preis und Erntefaktor > 1
- Weltenergieverbrauch.

Energieträger	heute wirtschaftlich/ technisch gewinnbar	geologische Vorräte	Bemerkung
Erdöl	156	1900	
Erdgas	122	400	
Kohle	780	11 000	
Uran	260 (15 000)	$> 10\,000$ ($6 \cdot 10^5$)	Klammerwerte gelten für Brutreaktoren

Vorräte an Energieträgern in 10^9 t SKE. Quelle: Kugeler

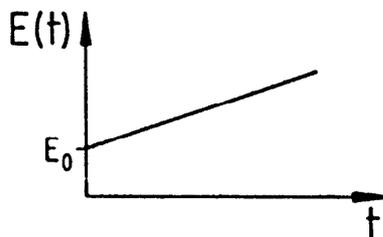
Bei einem Vorrat E_V kann die Vorratsdauer beim heutigen Verbrauch \dot{E} wie folgt berechnet werden:

$$t = \frac{E_V}{\dot{E}}$$

Für die nichterneuerbaren Energieträger gelten etwa folgende Werte (Suter 1991):

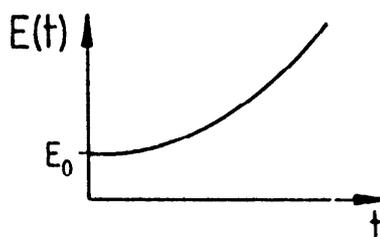
Energieträger	Heutiger Anteil	Vorrat in Jahren bei heutigem Anteil	Vorrat in Jahren, wenn der gesamte Bedarf durch einen Energieträger gedeckt wird	
	%	bis zum doppelten Preis	bis zum doppelten Preis	bis zum zehnfachen Preis
Kohle	26	460	120	730
Erdöl	35	40	13	70
Erdgas	18	60	11	38
Kernbrennstoff	5			
ohne Brüter		100	5	10
mit Brüter		6 000	300	600

In Wirklichkeit ist in den nächsten Jahrzehnten mit einer weiteren Zunahme des Energieverbrauchs zu rechnen. Die bekanntesten Prognosemodelle zur Behandlung des Zuwachses beim Energieverbrauch sind das konstante Wachstum, das exponentielle Wachstum und das Wachstum mit Sättigung:



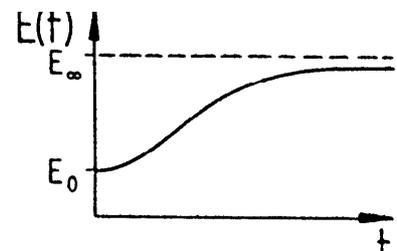
konstanter Zuwachs

$$\frac{dE}{dt} = a ; E(t) = E_0 + at$$



exponentieller Zuwachs

$$\frac{dE}{dt} = bE ; E(t) = E_0 e^{bt}$$



Wachstum mit Sättigung

$$\frac{dE}{dt} = cE \left(1 - \frac{E}{E_\infty}\right) ;$$

$$E(t) = \frac{E_\infty}{1 - \frac{E_0 - E_\infty}{E_0} e^{-ct}}$$

Prognosemodelle zur Behandlung des Zuwachses des Energieverbrauchs. Quelle: Kugeler

Energieversorgung der Zukunft

Totgesagte leben länger

Die oft gehörte, irrige Mär vom baldigen Ende des Ölzeitalters wird durch Rudolf Rechsteiners Wiederholung im Artikel «Die Zeit nach den Fossilien» nicht wahrer. Die Welt hat heute mehr Ölreserven als je zuvor: über 40 Jahre Verbrauch in konventionellen Öllagerstätten. Dazu kommen Ölsand- und Ölschieferreserven, von denen beim heutigen Preisniveau 550 Mrd. Fass kommerziell abgebaut werden können und die bei Preisen von 40 \$/Fass den heutigen Energiekonsum für die nächsten 250 Jahre decken werden.

Auch Rechsteiners Horror-Ölpreisszenario ist falsch: In realem Geldwert hat sich der Ölpreis seit Beginn des letzten Jahrhunderts (mit Ausnahme der siebziger Jahre) in der Bandbreite von 15 bis 30 \$/Fass bewegt. Der starke Anstieg von 1973 bis 1980 war die Folge einer künstlichen, politisch motivierten Verknappung der Opec. Als diese unhaltbar wurde, kam es zu einem umso massiveren Preiszusammenbruch. Ähnliches wird sich mit den gegenwärtigen Opec-Produktionseinschränkungen wiederholen. Die IEA erwartet

denn auch, dass sich der Ölpreis bis 2020 wieder der 20 \$/Fass-Marke annähern wird. IEA und World Energy Council gehen in ihren Perspektiven bis 2030 bzw. 2050 davon aus, dass fossile Energien die wichtigsten Energiequellen bleiben und 2030 noch immer 85 Prozent des Welt-Energieverbrauchs ausmachen werden. Der graduelle Umstieg zu den regenerativen Energien wird über die Verbesserung bekannter Technologien sowie Erdgas und hybride Antriebe als Brücke erfolgen: Der Weg zu den Zukunftstechnologien führt über die Fossilien.

Ronald Ganz
Präsident Erdöl-Vereinigung (Zürich)

Zahlen zu den Erdölvorräten der Erdöl-Vereinigung zusammen mit einer Falschaussage über die Erdölvorräte, die sich entgegen der Aussage im Text in den letzten 40 Jahren sicher nicht vermehrt haben. Quelle: Erdöl-Vereinigung in der NZZ. Im September 2005 betrug der Erdölpreis 65 USD pro Fass.

1.9 Klimaveränderung

Erkenntnisse über die Vorgänge der Klimaveränderungen aus den letzten Jahren und Jahrzehnten lassen erwarten, dass bei gleichbleibendem oder gar zunehmendem Verbrauch an fossilen Energieträgern globale Klimaveränderungen lange vor der Erschöpfung der Ressourcen eintreten.

Klimaveränderungen können als Folge von verschiedenen Ursachen eintreten:

1. Erwärmung der Erdatmosphäre als Folge des Abbaus nichterneuerbarer Energieträger (fossile Brennstoffe und auch Kernbrennstoffe (!) sowie tiefe Geothermie), da der gesamte Verbrauch von nichterneuerbaren Energieträgern irreversibel in **Niedertemperaturwärme** umgewandelt wird.
2. Veränderung des Strahlungshaushalts durch den Treibhauseffekt infolge der Anreicherung von **Spurengasen** in der Atmosphäre durch den Verbrauch fossiler Brennstoffe (CO₂ führt zu verminderter Wärmeabstrahlung und somit Temperaturanstieg, N₂O, CH₄) sowie durch die Freisetzung langlebiger Spurengase aus anderen Bereichen (FKW's, N₂O aus der Landwirtschaft, CO₂ aus der Rodung von Regenwäldern, CH₄ aus dem Reisanbau und aus der Viehhaltung sowie aus der Erdgasgewinnung und aus Leckageverlusten durch Transport und Verteilung).

Veränderung des Strahlungshaushalts durch weitere Ursachen und **indirekte Wirkungen**. So führt zum Beispiel ein erhöhter Staubgehalt an „black smoke“ (dunkle Aerosole, v.a. Russ) zu einer abgeschwächten Sonneneinstrahlung, gleichzeitig aber auch zu einer verminderten Abstrahlung. Es gibt Hinweise, dass die Einstrahlung heute durch globale Verdunkelung („global dimming“ um bis rund 10% vermindert ist und da der ohne globale Verdunkelung zu erwartende Temperaturanstieg wegen Nichtbeachtung dieses Effekts in bisherigen Klimamodellen drastisch

unterschätzt wird (evtl. 10°C statt +3°C). Ebenso beeinflussen stratosphärische Phänomene sowie die Wirkungen über den Kreislauf von Wasser und Wasserdampf das Klima in entscheidendem Ausmass, wobei die Wirkungen zum Teil noch nicht eindeutig vorhersehbar und sogar im Vorzeichen unsicher sind. Der Strahlungshaushalt der Erdatmosphäre wird durch die **Albedo** beschrieben. Die Albedo ist ein Mass für das **Reflexionsvermögen** eines Körpers und definiert als das Verhältnis zwischen reflektierter und einfallender Strahlung. Die Reflexion umfasst die direkte und die diffuse Reflexion. Die Albedo ist keine konstante Grösse, sondern hängt zum Beispiel vom Sonnenstand ab. Bei flachem Sonnenstand erreicht sie ihre Maximalwerte. Die Erdalbedo beträgt im Mittel rund **30%** und kann zum Beispiel von Satelliten erfasst werden. Typische Albedowerte, die für nicht zu tiefen Sonnenstand sowie für die kurzwellige (Sonnen-)strahlung bei diffuser Reflexion gelten, sind nach [www.top-wetter.de/lexikon]:

- * geschlossene Neuschneedecke: 75–95%
- * geschlossene Altschneedecke: 40–70%
- * bedeckter Himmel: 50–80%
- * Sandflächen: 15–40%
- * Ackerland: 7–17%
- * Waldgebiete: 5–20%
- * Wasserflächen: 3–10%

Eine hohe Albedo ergibt sich über Wasserflächen bei flachem Sonnenstand (siehe Bild):



Bild 1.16 Unterschiedliche Reflexion.

Erderwärmung durch Abwärme. Zur Beurteilung der Erderwärmung infolge der Freisetzung von Abwärme ist das Verhältnis zwischen dem globalen Energieverbrauch und der auf die Erde eintreffenden Solarleistung von Bedeutung. Letztere beträgt ca. $1,7 \cdot 10^{17}$ W. Bei einem Weltenergieverbrauch von ca. $1,6 \cdot 10^{13}$ W beträgt die Solarstrahlung somit rund das 10'000-fache des Verbrauchs an Primärenergie. Für die Möglichkeiten einer solaren Weltenergieversorgung ist dabei zu beachten, dass die Umwandlung von Primärenergie zu Nutzenergie bei solaren Systemen sehr viel geringer ist als bei

fossilen, dass die Sonne zeitlich unregelmässig zur Verfügung steht und dass nur ein Bruchteil der Erde für eine Solarnutzung in Frage kommt.

Der heutige Weltenergieverbrauch macht somit „erst“ ca. 0.01% der Solarleistung oberhalb der Atmosphäre aus. Bereits heute wird in grossen Städten jedoch lokal mehr Abwärme freigesetzt, als durch die Sonneneinstrahlung auftrifft (Manhattan: 1000%, NL: 1%). Es stellt sich die Frage, welches Niveau global noch unbedenklich ist. Fachleute glauben, dass die kritische Schwelle bei etwa 0.1% liegt. Dieser Wert wird in kurzer Zeit erreicht sein, wenn der Energieverbrauch weiterhin zunimmt. Bei einem Zuwachs des Energieverbrauchs von 2% pro Jahr wird die 0,1%-Grenze in 200 Jahren, die 100%-Grenze in 500 Jahren erreicht (Fricke):

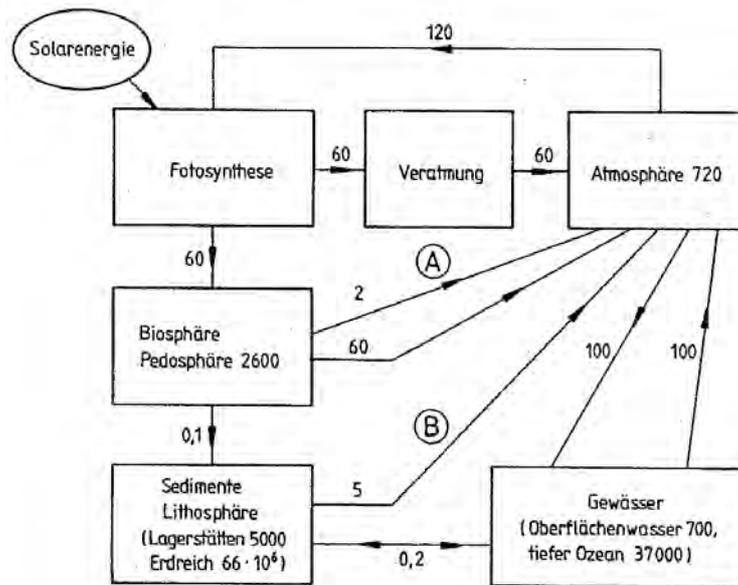


Bild 1.17 Globaler Kohlenstoffkreislauf. Reservoirs in $[10^9 \text{ t C}]$ und Stoffströme in $[10^9 \text{ t C / a}]$. A = aus Wald und Bodenzerstörung, B = aus Verbrennungsprozessen. [Kugeler und Phlippen 1990].

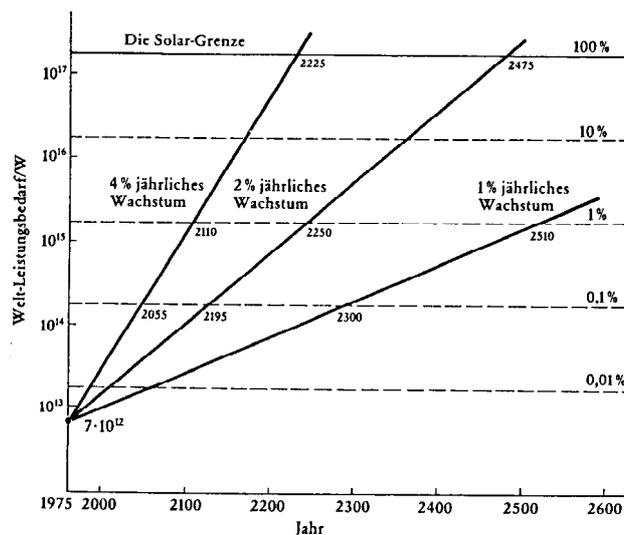
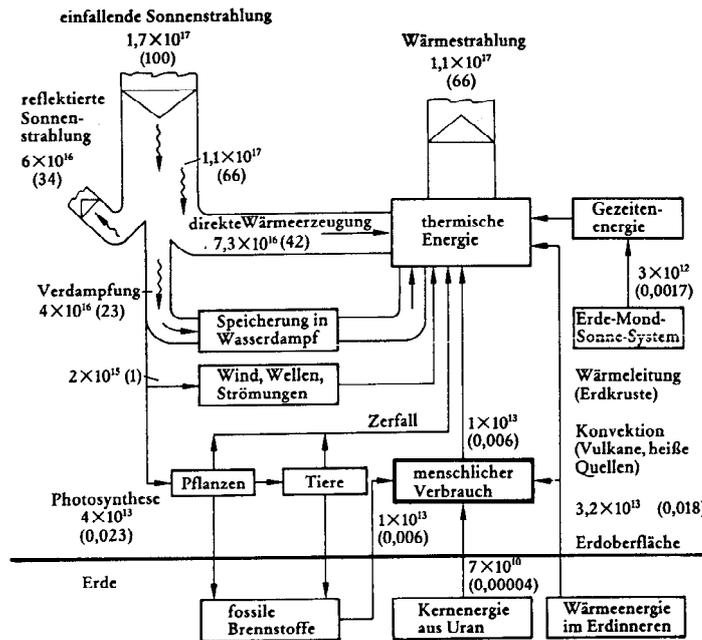


Bild 1.18 Die globale thermische Umweltbelastung und Annäherung an die Solargrenze. Die eingezeichnete Solargrenze bezieht sich auf die Sonneneinstrahlung oberhalb der Atmosphäre. Quelle: Fricke.



Energieflußbild der Erde. Die Leistungen sind in Watt und (in Klammern) als Prozentsätze der auf die Atmosphäre auftreffenden Sonnenleistung angeführt. Die Nutzung der fossilen Brennstoffe spielt bei der Wärmebilanz der Erde noch keine Rolle (nach Romer).

Treibhauseffekt durch Spurengase. Am Treibhauseffekt sind verschiedene langlebige Spurengase beteiligt, vor allem CO_2 , O_3 , FCKW, N_2O , CH_4 , NH_3 . Der Energiesektor ist für alle beteiligten Stoffe eine wesentliche Quelle:

Quellen und Effekte von Treibhausgasen					
Spurengas	chem. Symbol	derzeitige Konzentration	atmosphär. Verweilzeit	Zunahme	wichtigste Quellen
Kohlendioxid	CO_2	347 ppm	5 – 10 J.	0,4%/J.	fossile Brennstoffe, Waldrodungen, Bodenerosion
Ozon (nur bodennahe)	O_3	30 ppb	30 – 90 T.	1%/J.	indirekt aus Stickoxiden, Kohlenmonoxid, Methan u.a. (Kraftverkehr, fossile Brennstoffe, Industrie)
Chlorfluormethane	“CFMs”	0,4 ppb	50 – 100 J.	4%/J.	Treibmittel in Sprühdosen, Kühlmittel, Kunststoffverschäumung
Distickstoffoxid	N_2O	0,3 ppm	20 – 100 J.	0,25%/J.	Kunstdüngung, fossile Brennstoffe, Verbrennung von Biomasse
Methan	CH_4	1,65 ppm	4 – 7 J.	1,5%/J.	Reisanbau, Grossviehhaltung, Verbrennung von Biomasse, fossile Brennstoffe, Erdgaslecks
Ammoniak	NH_3	< 1 ppb	7 – 14 T.		Grossviehhaltung, fossile Brennstoffe, Kläranlagen
Tetrachlor-Kohlenstoff	CCl_4	0,14 ppb			Reinigungsmittel, Industrie

Quellen und Effekte von Treibhausgasen. Quelle: Haltiner.

Kein Leben ohne Treibhauseffekt

Der Treibhauseffekt ist eine Tatsache, an der es nichts zu rütteln gibt, weil es sich ohne diesen Effekt auf der Erde schon lange nicht mehr leben liesse! Man bezeichnet ihn als natürlichen Treibhauseffekt. Hinter dem Wort «Treibhauseffekt» verbirgt sich ein Phänomen, das grundsätzlich etwas für das Leben höchst Positives beinhaltet. Die von der Sonne eingestrahelte Energie wird von der Oberfläche der Erde nicht wieder komplett, in Form von Wärmestrahlung, in den Welt- raum hinaus reflektiert. Die Spurengase in der Atmosphäre halten einen Anteil dieser Wärmestrahlung zurück. Als Spurengase sind u.a. Wasserdampf, CO₂, Ozon, Methan (z.B. Erdgas), Fluorchlor- Kohlenwasserstoffe (FCKW) zu bezeichnen.

Beim Treibhauseffekt erwärmt sich die Erdoberfläche und mit ihr die untere Atmosphärenschicht.

Besäße die Erde keine Spurengase in der Atmosphäre, würde an der Erdoberfläche eine Temperatur von -18 °C gemessen werden. Tatsächlich wird aber eine durchschnittliche bodennahe Lufttemperatur von +15 °C gemessen. Diesen Unterschied von 33 °C verdanken wir den Spurengasen in der Atmosphäre. Den grössten Beitrag zu dem bestehenden Treibhauseffekt der Atmosphäre leistet der Wasserdampf.

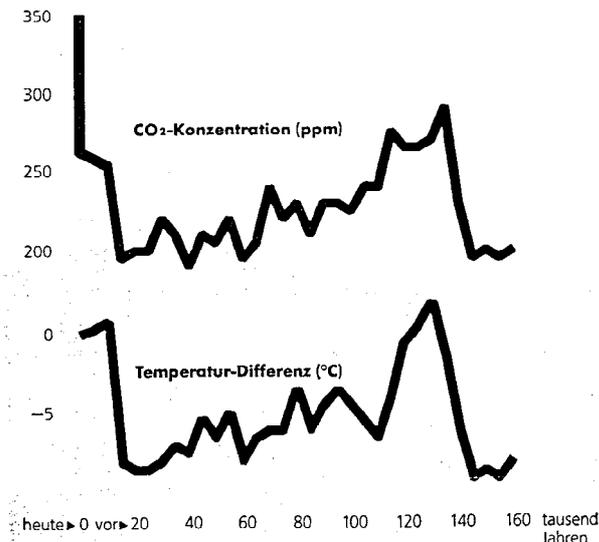
Nach «Schönwiese 9/1987» verteilt sich der Beitrag am bestehenden, natürlichen und erwünschten Treibhauseffekt wie folgt:

Wasserdampf	H ₂ O	20,6 °C
Kohlendioxid	CO ₂	7,2 °C
bodennahe Ozon	O ₃	2,4 °C
Distickstoffoxid (Lachgas)	N ₂ O	1,4 °C
Methan	CH ₄	0,8 °C
Sonstige		etwa 0,6 °C

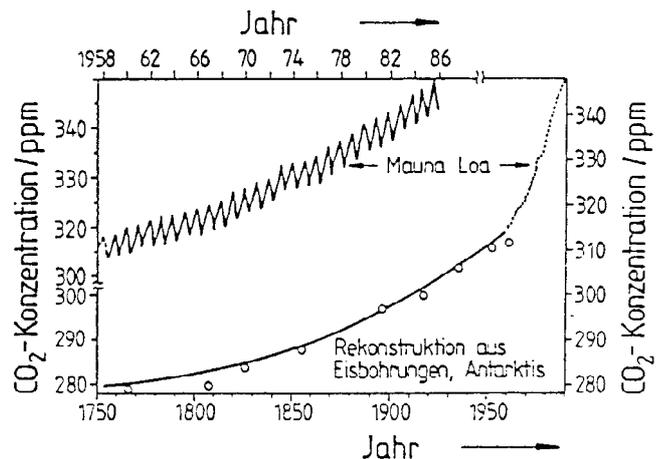
Bedeutung des Treibhauseffekts durch die natürliche Konzentration an Spurengasen. Quelle: Haltiner.

Die Erkenntnis, dass zwischen dem CO₂-Gehalt der Atmosphäre und der mittleren Erdtemperatur eine Abhängigkeit besteht, wird als weitgehend gesichert angenommen, wenn auch z.B. bei der Bestimmung der mittleren Erdtemperatur noch Unsicherheiten bestehen. Ein markanter Anstieg des CO₂-Gehalts kann vor allem seit den 50er Jahren beobachtet werden:

[Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Summary for Policymakers 2001, D.L. Albritton, L.G. Meira Filho et al.



CO₂-Gehalt der Atmosphäre und Temperaturdifferenz zur heutigen Erdtemperatur (von rechts nach links lesen!). Quelle: Infel



CO₂-Gehalt der Atmosphäre seit 1750.

Quelle: Kugeler

Nachfolgend aktuelle Angaben über die Erwartungen zu Klimaveränderungen nach [Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Summary for Policymakers 2001, D.L. Albritton, L.G. Meira Filho et al.]:

The global climate of the 21st century

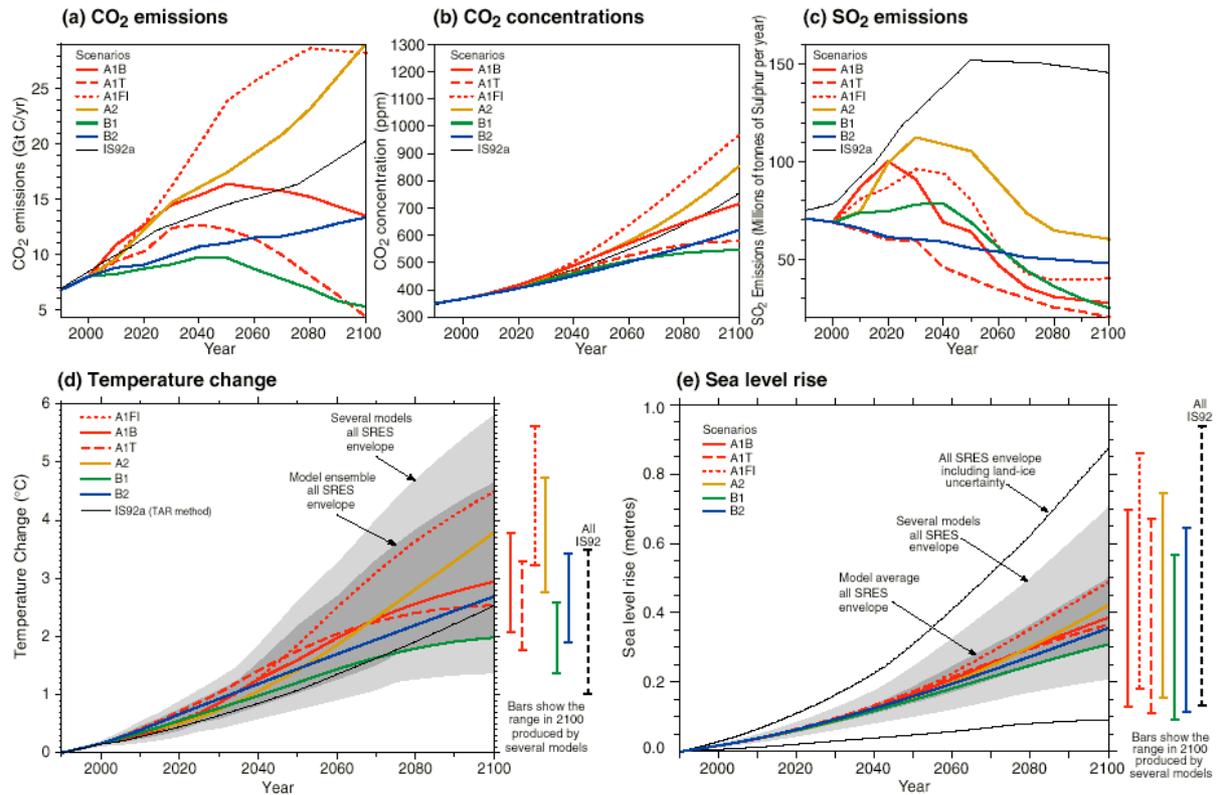


Bild 1.19 The global climate of the 21st century will depend on natural changes and the response of the climate system to human activities. Climate models project the response of many climate variables – such as increases in global surface temperature and sea level – to various scenarios of greenhouse gas and other human-related emissions. (a) shows the CO₂ emissions of the six illustrative SRES scenarios, which are summarised in the box on page 18, along with IS92a for comparison purposes with the SAR. (b) shows projected CO₂ concentrations. (c) shows anthropogenic SO₂ emissions. Emissions of other gases and other aerosols were included in the model but are not shown in the figure. (d) and (e) show the projected temperature and sea level responses, respectively. The "several models all SRES envelope" in (d) and (e) shows the temperature and sea level rise, respectively, for the simple model when tuned to a number of complex models with a range of climate sensitivities. All SRES envelopes refer to the full range of 35 SRES scenarios. The "model average all SRES envelope" shows the average from these models for the range of scenarios. Note that the warming and sea level rise from these emissions would continue well beyond 2100. Also note that this range does not allow for uncertainty relating to ice dynamical changes in the West Antarctic ice sheet, nor does it account for uncertainties in projecting non-sulphate aerosols and greenhouse gas concentrations. [Based upon (a) Chapter 3, Figure 3.12, (b) Chapter 3, Figure 3.12, (c) Chapter 5, Figure 5.13, (d) Chapter 9, Figure 9.14, (e) Chapter 11, Figure 11.12, Appendix II].

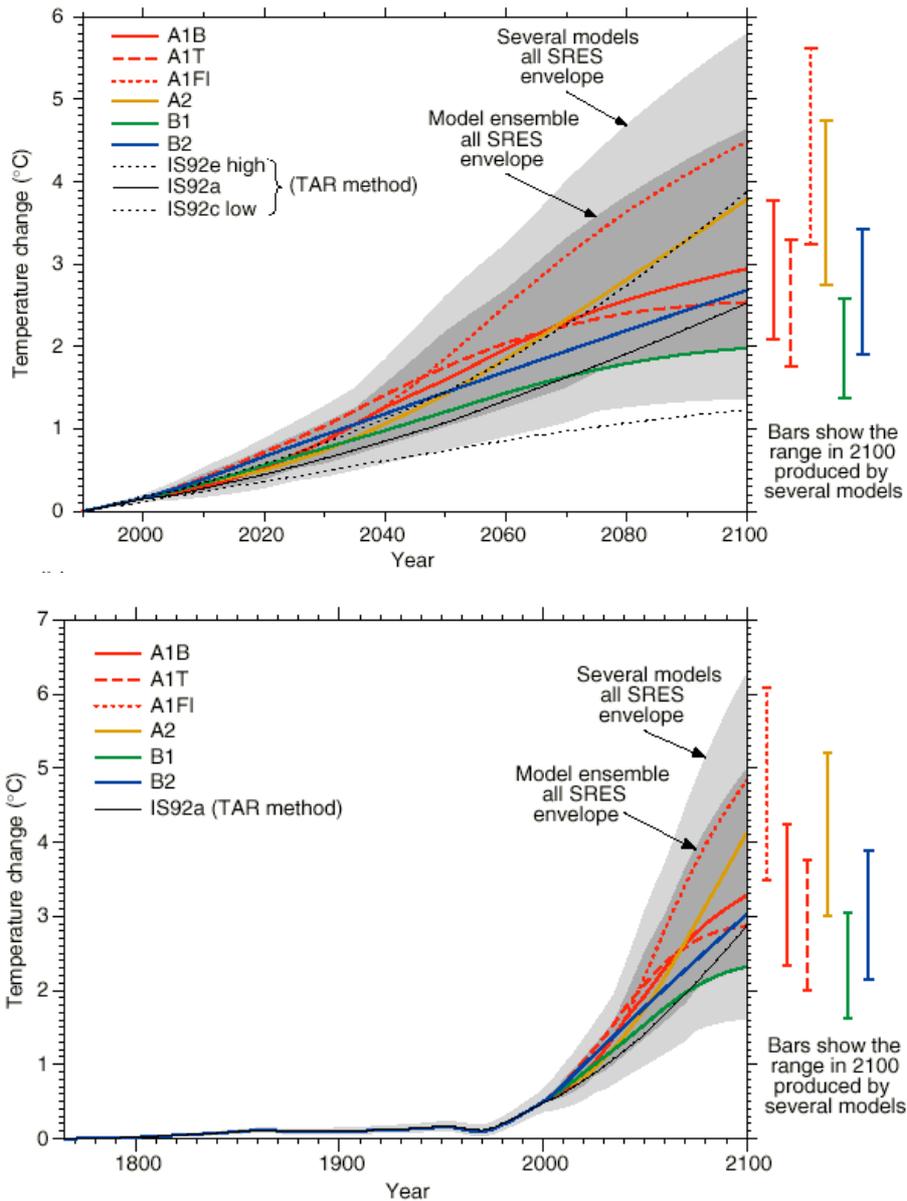


Bild 1.20 Simple model results: (a) global mean temperature projections for the six illustrative SRES scenarios using a simple climate model tuned to a number of complex models with a range of climate sensitivities. Also for comparison, following the same method, results are shown for IS92a. The darker shading represents the envelope of the full set of thirty-five SRES scenarios using the average of the model results (**mean climate sensitivity is 2.8°C**). The lighter shading is the envelope based on all seven model projections (with climate sensitivity in the **range 1.7 to 4.2°C**). The bars show, for each of the six illustrative SRES scenarios, the range of simple model results in 2100 for the seven AOGCM model tunings. (b) Same as (a) but results using estimated historical anthropogenic forcing are also used.

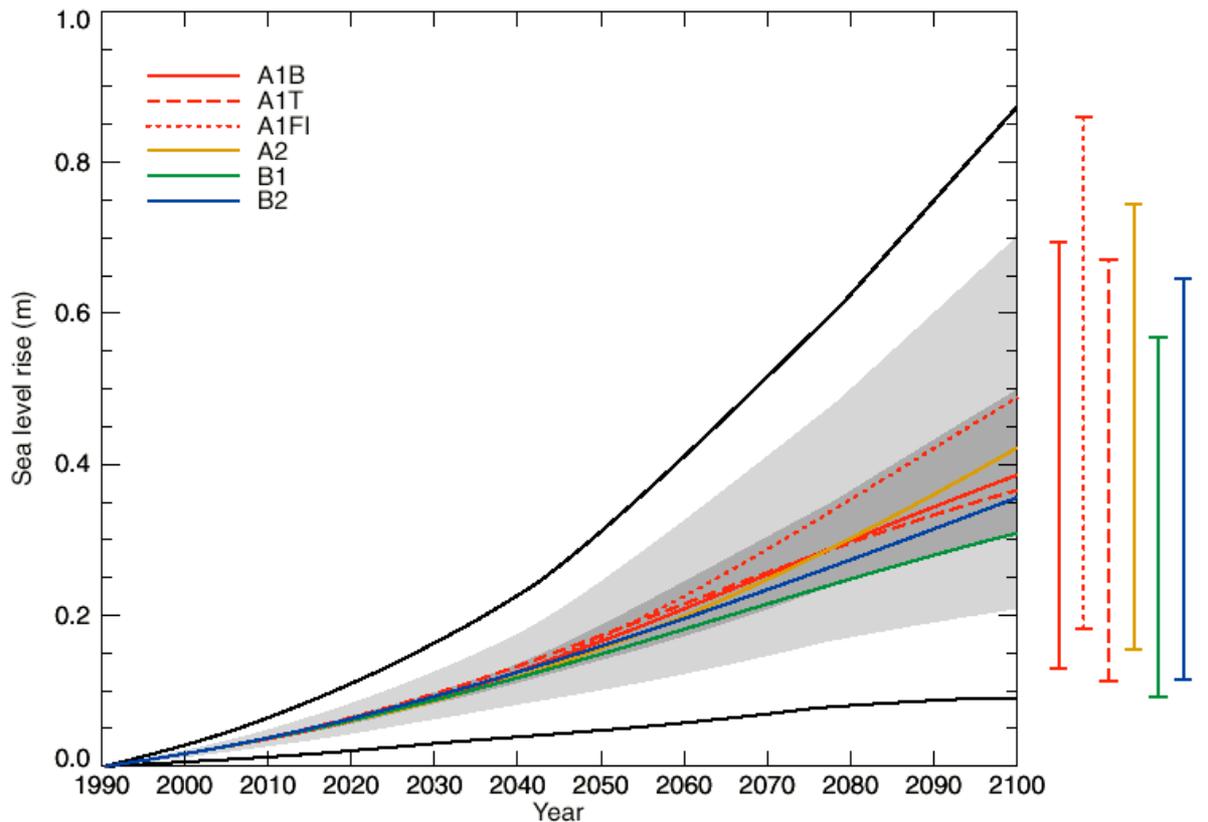


Bild 1.21 Prognosen zum Anstieg des Meeresspiegels nach verschiedenen Modellrechnungen. Quelle: IPCC 2001. Global average sea level rise 1990 to 2100 for the SRES scenarios. **Thermal expansion and land ice changes** were calculated using a simple climate model calibrated separately for each of seven AOGCMs, and contributions from changes in **permafrost**, the effect of sediment deposition and the long-term adjustment of the ice sheets to past climate change were added. Each of the six lines appearing in the key is the average of AOGCMs for one of the six illustrative scenarios. The region in dark shading shows the range of the average of AOGCMs for all thirty five SRES scenarios. The region in light shading shows the range of all AOGCMs for all thirty five scenarios. The region delimited by the outermost lines shows the range of all AOGCMs and scenarios including uncertainty in land-ice changes, permafrost changes and sediment deposition. Note that this range does not allow for uncertainty relating to ice-dynamic changes in the West Antarctic ice sheet.

F.9 Projections of Future Changes in Sea Level

Projections of global average sea level rise from 1990 to 2100, using a range of AOGCMs following the IS92a scenario (including the direct effect of sulphate aerosol emissions), lie in the range 0.11 to 0.77 m. This range reflects the systematic uncertainty of modelling. The main contributions to this sea level rise are:

- a **thermal expansion of 0.11 to 0.43 m**, accelerating through the 21st century;
- a glacier contribution of 0.01 to 0.23 m;
- a Greenland contribution of -0.02 to 0.09 m; and
- an Antarctic contribution of -0.17 to +0.02 m.

1.10 Grenzen des Wachstums

Hintergrund:

Bericht zu Händen des Club of Rome, 1972 sowie zweiter Bericht 1992, d.h. 20 Jahre später

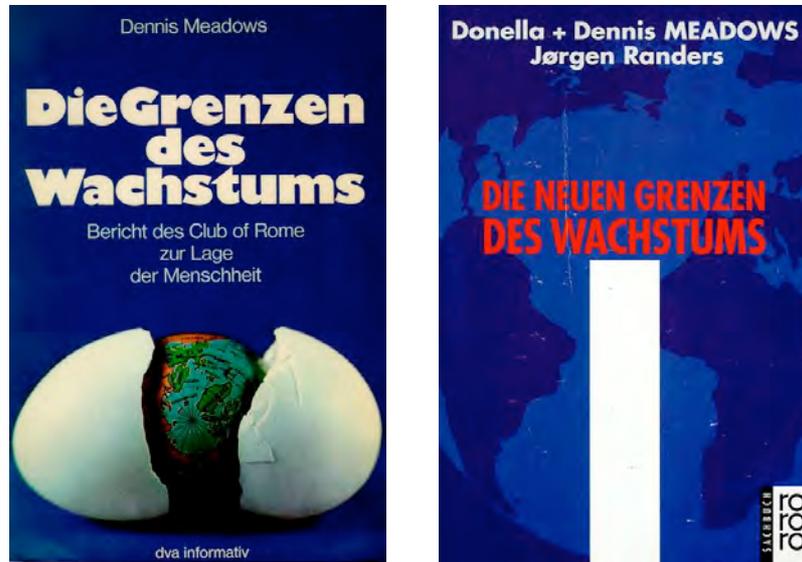


Bild 1.22 [Meadows et al. 1972, 1992].

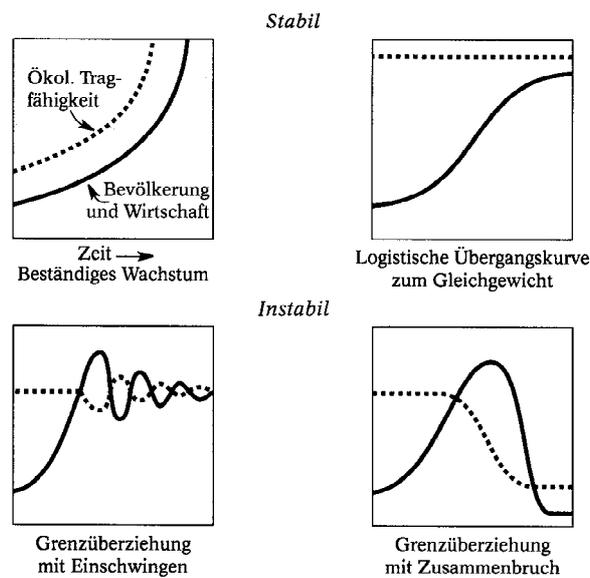


Bild 1.23 Wachstumsmodelle [Meadows et al. 1992].

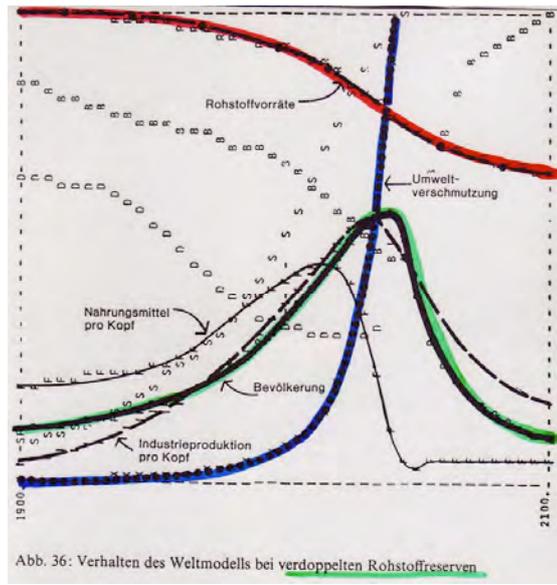
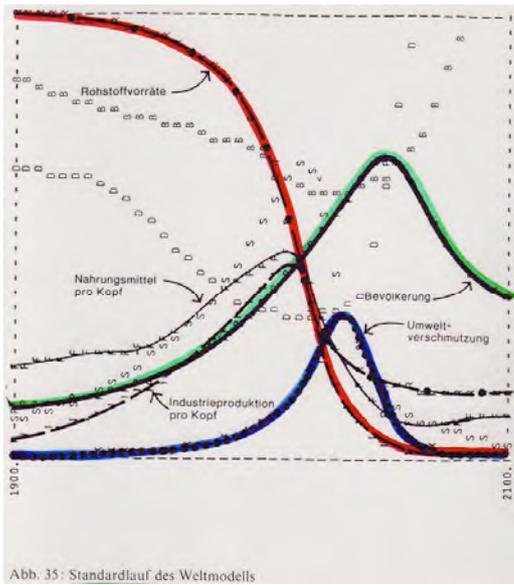
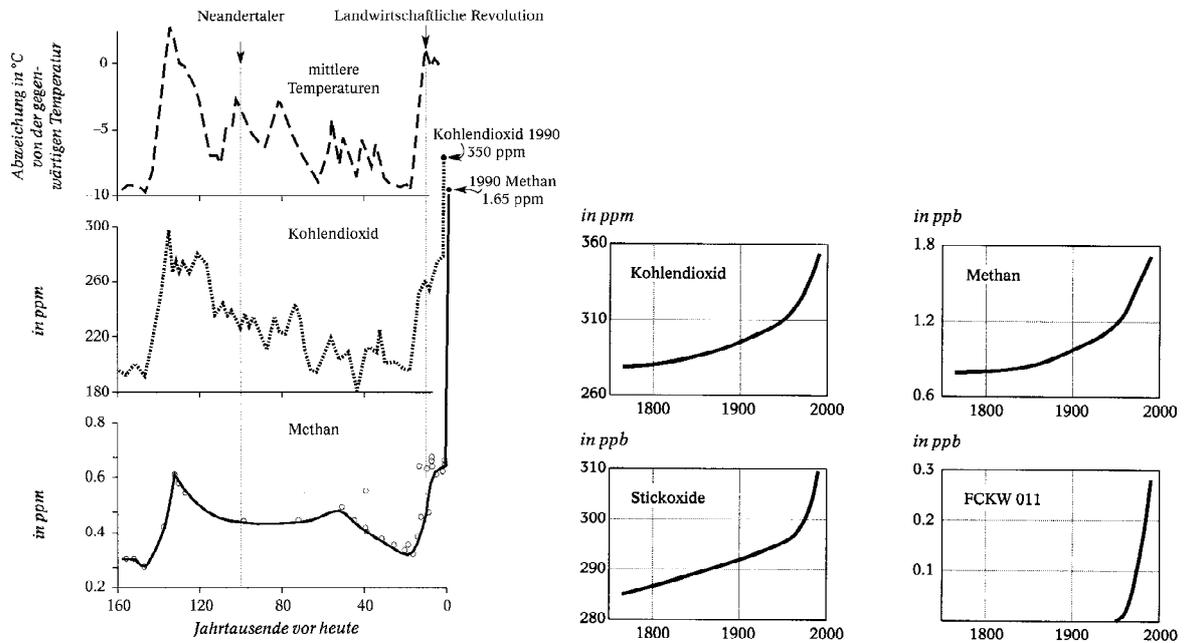


Bild 1.24 Resultate Standardlauf und verdoppelte Ressourcen [Meadows et al. 1992].

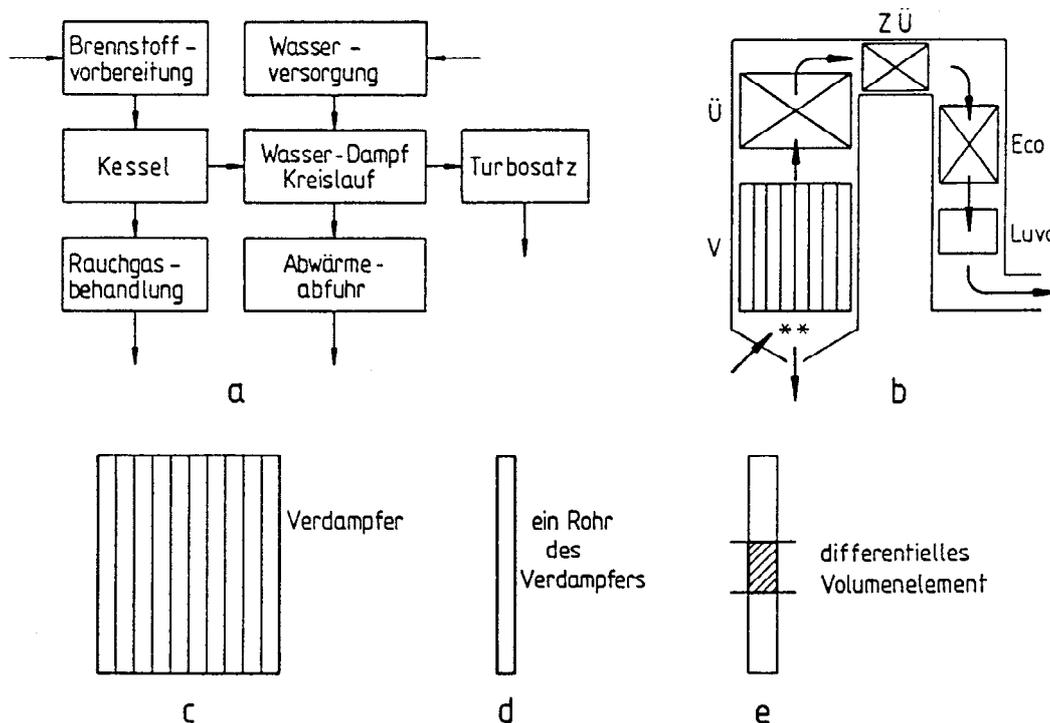


2 Physikalische Grundlagen und Prozesse

2.1 Bilanzierung

Die Energiebilanz ist ein wichtiges Hilfsmittel zur Beurteilung von Anlagen, Gebäuden und Energieumwandlungsprozessen. Energetische Berechnungen im Zusammenhang mit komplexen Anlagen erfordern ein systematisches Vorgehen beim Aufstellen der Bilanzen. Ein korrektes Bilanzdenken ist aber auch unerlässlich zur Beurteilung z.B. der Gesamtenergiestatistik eines Landes oder ähnlicher Betrachtungen im Zusammenhang mit Gütern, Geldmengen usw..

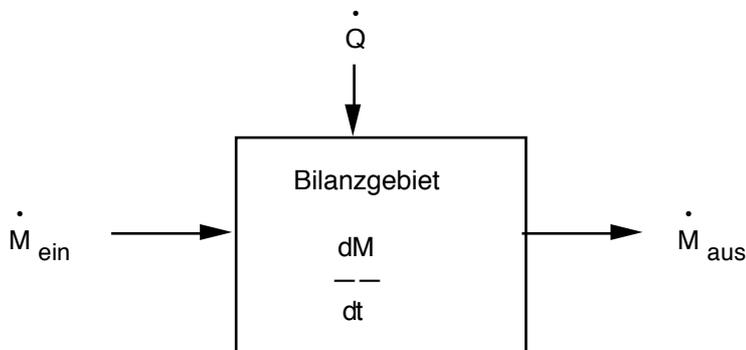
Im technischen Bereich ist die Bilanz die mathematische Formulierung der Erhaltungssätze für Materie und Energie in Form von Gleichungen. Die vollständige Bilanzierung umfasst die Stoff- und die Energiebilanz. Da an Materie immer auch Energie gebunden ist, bildet die *Stoffbilanz* die Grundlage der Bilanzierung, die Energiebilanz wird dann aus der Stoffbilanz abgeleitet. Im allgemeinen Fall müssen bei der Energiebilanz nebst der Wärme die kinetische, potentielle, chemische und elektromagnetische Energie sowie allenfalls die Kernenergie berücksichtigt werden.



Wahl des geeigneten Bilanzgebiets je nach Aufgabenstellung. Beispiel Thermisches Kraftwerk: a: gesamtes Kraftwerk, b: Kessel, c: Verdampfer, d: Verdampferrohr, e: Volumenelement eines Verdampferrohrs.

Vorgehen zur Bilanzierung

1. **Stoff- und Energieströme**, die zum Objekt kommen oder das Objekt verlassen, einzeichnen und beschriften.
2. **Bilanzgrenze** einzeichnen um das Objekt. Wahl der Bilanzgrenze so, dass möglichst nur bekannte und gesuchte Ströme geschnitten werden (keine unbekannt Ströme, die nicht von Interesse sind, schneiden, da das Gleichungssystem dadurch umfangreicher wird).
3. **Markierung** aller Ströme, die das Bilanzgebiet schneiden und Einzeichnen von **Mengen- und Energieänderungen** $\frac{dM}{dt}$ und $\frac{dQ}{dt}$ im Bilanzgebiet.
4. **Gleichungssystem** aufstellen.
5. **Gleichungssystem** lösen.



1. HS: $Q + W = \sum H_i + \sum E_{kin} + \sum E_{pot}$ (im allgemeinen Fall $+ \sum E_{el} + \sum E_{kern} \dots$)

Bei Vernachlässigung von potentieller, kinetischer, elektromagnetischer und Kernenergie (z.B. für die Betrachtung von Heizanlagen) gilt:

Massenbilanz: $\dot{M}_{ein} - \frac{dM}{dt} = \dot{M}_{aus}$

Energiebilanz: $\dot{M}_{ein} h_{ein} - \frac{dM}{dt} h_{ein} + \dot{Q} = \dot{M}_{aus} h_{aus}$

Adiabates System: $\dot{Q} = 0$

System wird beheizt: $\dot{Q} > 0$

System wird gekühlt: $\dot{Q} < 0$

Die ein- und austretenden Gesamtströme setzen sich meist aus mehreren Einzelströmen zusammen:

$$\dot{M}_{\text{ein}} = \sum_{i=0}^n \dot{m}_i \quad ; \quad \dot{M}_{\text{aus}} = \sum_{j=0}^m \dot{m}_j$$

Falls im System stoffliche Veränderungen auftreten (z.B. eine chemische Reaktion), so kann für jede unabhängige Komponente i eine Massen- bzw. Stoffbilanz formuliert werden:

Stoffbilanz für unabhängige Komponente i: $\dot{m}_{i; \text{ein}} - \frac{dm_i}{dt} = \dot{m}_{i; \text{aus}}$

Zur Lösung eines Systems mit n unabhängigen Komponenten benötigt man n unabhängige Stoffbilanzgleichungen. Dies können entweder n Komponentengleichungen sein oder n-1 Komponentengleichungen und eine Gesamtbilanzgleichung (Massenbilanz).

$\frac{dM}{dt}$ und $\frac{dQ}{dt}$ bedeuten Änderungen im System, z.B. die Massenzunahme beim Füllen eines Reservoirs. Im stationären Fall sind beide Terme gleich Null:

Stationärer Prozess oder Zustand: $\frac{d}{dt} = 0$; hier $\frac{dM}{dt} = 0$; $\frac{dQ}{dt} = 0$

Instationärer Prozess oder Zustand: $\frac{d}{dt} \neq 0$

Die einfachste *Formulierung der Stoffbilanz* hängt von der Reaktion im System ab. Beispiele:

Reaktion	Formulierung der Stoffbilanz
Chemische Reaktion	Erhaltung der Atome
Physikalischer Prozess ohne chemische Reaktion (z.B. Luftzerlegung)	Erhaltung der Moleküle
Physikalischer Prozess ohne Stoffveränderung (z.B. Erwärmung von Luft)	Erhaltung der Stoffgemische (z.B. Luft)

Die notwendige Anzahl Gleichungen zur Lösung einer Bilanz kann durch die Anzahl unabhängiger Komponenten beschrieben werden:

Unabhängige Komponente = Komponente, deren Zusammensetzung sich im betrachteten Prozess nicht ändert

Beispiel: Feuchte Luft (O₂, N₂ und H₂O ; Spurengase werden vernachlässigt)

Prozess	Reaktion	Anzahl unabhängige Komponenten
Trocknung	(feuchte Luft) → Luft + H ₂ O	2
Luftzerlegung	(feuchte Luft) → O ₂ + N ₂ + H ₂ O (O ₂ : - 183 °C, N ₂ : - 196 °C)	3

Damit der Aufwand zum Aufstellen und Lösen des Gleichungssystems minimal ist, sollten deshalb die unabhängigen Komponenten identifiziert werden (es ist nicht falsch, wenn die Trocknung von Luft mit 3 Gleichungen beschrieben wird, aber unnötig aufwendig; bei grossen Gleichungssystemen kann dies von Bedeutung sein). Bei der Lösung des Gleichungssystems von n unabhängigen Gleichungen mit x Unbekannten sind drei Fälle möglich:

- $n > x$ Das System ist mathematisch überbestimmt. Es gibt keine Lösung.
- $n = x$ Das Problem ist mathematisch bestimmt. Es gibt genau eine Lösung.
- $n < x$ Das Problem ist mathematisch unbestimmt. Es gibt unendlich viele Lösungen. Für eine sinnvolle Lösung müssen noch $(x-n)$ weitere Gleichungen gefunden werden. Je nach Anwendung können ein Modell eingeführt (z.B. Zustandsgleichung für ein ideales Gas) oder Erfahrungswerte (Messwerte) eingesetzt werden.

Vereinfachte Energiebilanz am Beispiel von Heizanlagen. Für Betrachtungen von Energiebilanzen im Zusammenhang mit Heizanlagen genügt es oftmals, wenn lediglich die Enthalpie der Stoffe sowie bei Reaktionen freiwerdende Energien betrachtet werden und andere Energieformen (kinetische, potentielle und elektrische) vernachlässigt werden.

Die spezifische *Enthalpie* h eines Stoffes hat die Einheit [kJ/kg] und setzt sich im dampfförmigen Aggregatzustand wie folgt zusammen:

$$h = h_f + c_{P,s} \Delta T_s + \Delta h_m + c_{P,l} \Delta T_l + \Delta h_v + c_{P,v} \Delta T_v \quad [\text{kJ/kg}]$$

h_f = chemische Bildungsenergie (Enthalpie des Stoffes bei 0 K)

$c_{P,s} \Delta T_s$ = Energie zum Aufheizen des Feststoffes (fühlbare Wärme)

Δh_m = Schmelzwärme (latente Wärme der Phasenänderung)

$c_{P,l} \Delta T_l$ = Energie zum Aufheizen der Flüssigkeit (fühlbare Wärme)

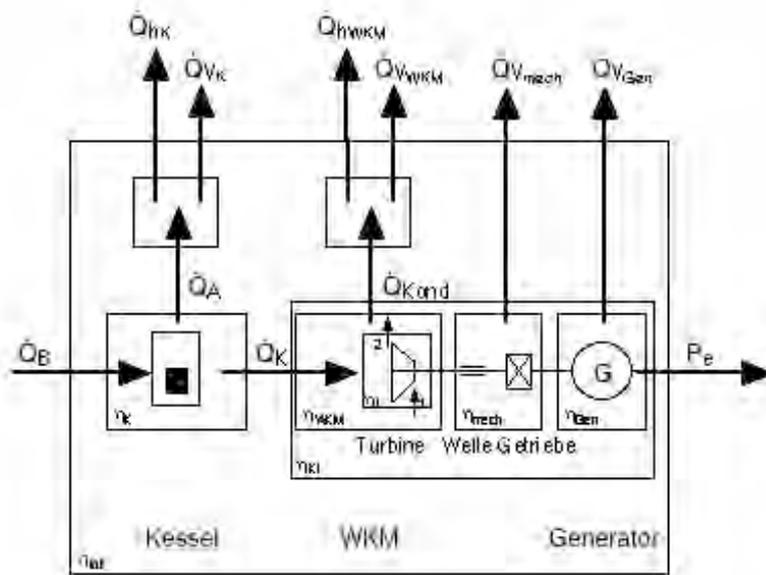
Δh_v = Verdampfungswärme (latente Wärme der Phasenänderung)

$c_{P,v} \Delta T_v$ = Energie zum Aufheizen des Gases (fühlbare Wärme)

$c_{P,s}, c_{P,l}, c_{P,v}$ = spezifische Wärmekapazität von Feststoff, Flüssigkeit, Gas in [kJ / kg K]

Der Energiesatz (= 1. Hauptsatz der Thermodynamik) kann mit dem Begriff der Enthalpie auch in der Form des Satzes von Hess formuliert werden: Die Enthalpie ist eine Zustandsgrösse, d.h. sie ist unabhängig vom Reaktionsweg.

Bezeichnungen und Bilanzgrenzen in einem Kraftwerk mit Wärmekraftkopplung



WKM

Wärmekraftmaschine z.B. Dampfmotor, Dampfturbine, ORC-Generator, Stirlingmotor, geschlossene Gasturbine
zugeführte Brennstoffleistung

$$\dot{Q}_B = \dot{m}_B H_u$$

$$\dot{Q}_K$$

Kesselleistung

$$\dot{Q}_A$$

Leistung im Abgas

$$\dot{Q}_h$$

nutzbare Heizleistung

$$\dot{Q}_{h,K}$$

nutzbare Heizleistung Kessel

$$\dot{Q}_{V,K}$$

Verlustleistung Kessel

$$\dot{Q}_{K,cond}$$

abgegebene Kondensatorleistung (Abwärme)

$$\dot{Q}_{h,WKM}$$

nutzbare Heizleistung WKM

$$\dot{Q}_{V,WKM}$$

Verlustleistung WKM (ungenutzte Abwärmeleistung)

$$\dot{Q}_{V,mech}$$

Verlustleistung von Welle und Getriebe

$$\dot{Q}_{V,Gen}$$

Verlustleistung Generator

$$P_e$$

abgegebene elektrische Leistung

$$\eta_{tot} = \eta_e + \eta_h = \frac{P_e + \dot{Q}_h}{\dot{Q}_B}$$

Gesamtwirkungsgrad

$$\eta_e = \frac{P_e}{\dot{Q}_B} = \eta_K \eta_{WKM} \eta_{mech} \eta_{Gen}$$

elektrischer Wirkungsgrad

$$\eta_h = \frac{\dot{Q}_h}{\dot{Q}_B} = \frac{\dot{Q}_{h,K} + \dot{Q}_{h,WKM}}{\dot{Q}_B}$$

Wirkungsgrad der Heizwärmenutzung

$$\eta_K = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{Q}_B}$$

Kesselwirkungsgrad

$$\eta_{WKM}$$

Wirkungsgrad der Wärmekraftmaschine

$$\eta_{mech}$$

mechanischer Wirkungsgrad (Turbine oder Motor, Welle, Getriebe)

$$\eta_{Gen}$$

Generatorwirkungsgrad

$$\eta_{Kl} = \frac{P_e}{\dot{Q}_K}$$

Klemmenwirkungsgrad

η_{th}

für Clausius-Rankine Prozess gilt je nach Wahl der Bilanzgrenze:

a) Nutzleistung = Turbinenleistung, Pumpenleistung = zugeführte Leistung:

$$\eta_{th} = \frac{h_5 - h_6}{h_5 - h_1} \approx \frac{h_5 - h_6}{h_5 - h_2}$$

b) Nutzleistung = (Turbinenleistung – Pumpenleistung):

$$\eta_{th} = \frac{(h_5 - h_6)}{h_5 - h_1} \approx \frac{h_5 - h_6}{h_5 - h_2}$$

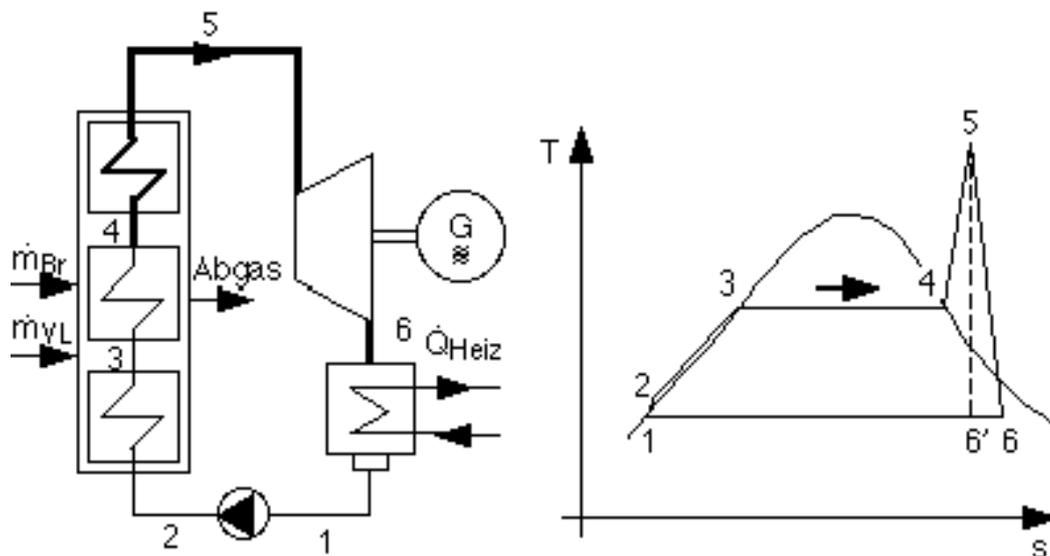
Die Näherung gilt für beide Fälle unter Vernachlässigung der Pumpenleistung, die klein ist im Verhältnis zur Turbinenleistung (1 bis einige %)

η_i

innerer Wirkungsgrad, für Turbine gilt: $\eta_i = \frac{h_5 - h_6}{h_5 - h_6}$

η_{th}

thermischer (thermodynamischer) Wirkungsgrad des Kreisprozesses



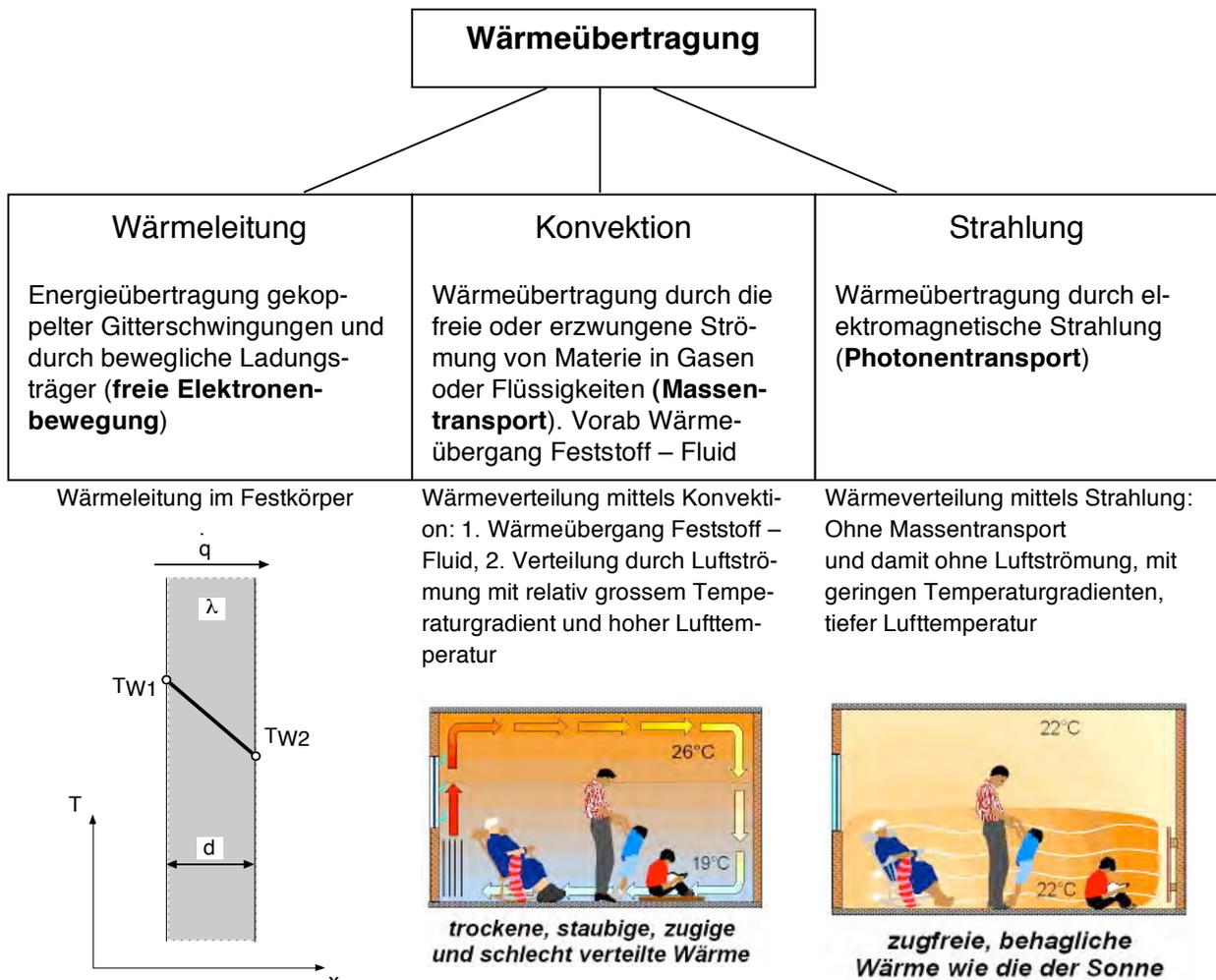
Dampfkraftprozess (einfacher Clausius-Rankine-Prozess) mit den Hauptkomponenten Speisewasserpumpe, Kessel, Turbine und Kondensator.

- 1 – 2 Druckerhöhung durch die Speisewasserpumpe auf das Niveau am Turbineneintritt zuzüglich der Druckverluste
- 2 – 3 Erwärmung des Wassers im Economizer und Kessel auf Verdampfungstemperatur
- 3 – 4 Verdampfung des Wassers im Dampfkessel
- 4 – 5 Überhitzen des Dampfes (Temperaturerhöhung bei gleichbleibendem Druckniveau) im Überhitzer
- 5 – 6 Expansion des Dampfes unter Umwandlung eines Teils der Energie in mechanische Arbeit
- 6 – 1 Kondensation des Dampfes im Kondensator. Nutzung der dabei anfallenden Abwärme zu Heizzwecken oder Abwärme.

2.2 Wärmeübertragung

Wärmeübertragung spielt bei Energieanlagen in vielen Bereichen eine zentrale Rolle. Beispiele sind: Radiator oder Fussboden als Wärmeübertrager im Gebäude, Wärmeübertrager in Heizung, Dampfkessel in Kraftwerk, Kondensator im Kraftwerk (Luftkondensator oder Kühlturm), Verdampfer und Kondensator in der Wärmepumpe, dito in Klimaanlage und Kälteerzeugern, Erdwärmesonden, Zylinderwandkühlung im Motor, Kühler im Auto usw.. Im nachfolgenden werden die Grundzüge von Wärmeübertragung und Wärmeübertragern (früher Wärmetauscher) behandelt.

Zwischen zwei verbundenen Systemen unterschiedlicher Temperatur findet eine Wärmeübertragung statt vom System höherer zum System tieferer Temperatur. Diese lässt sich in die drei Übertragungsmechanismen *Wärmeleitung*, *Konvektion* und *Wärmestrahlung* einteilen. Die Bedeutung der drei Mechanismen ist abhängig von der Temperatur und den Eigenschaften der beteiligten Stoffe.



2.2.1 Wärmestrahlung

Die Wärmestrahlung ist an keinerlei materiellen Leiter oder Träger gebunden, sondern beruht auf den Gesetzen des elektromagnetischen Feldes. Sie unterscheidet sich damit grundlegend von der Wärmeleitung und Konvektion. Die Strahlung hängt von der Temperatur und von der Grösse und der Struktur der Oberfläche ab. Wichtig ist, dass die Strahlung mit der **vierten Potenz der Temperatur** bzw. der Temperaturdifferenz zunimmt. Strahlung spielt in der Praxis dann eine Rolle, wenn die Temperaturunterschiede zweier Flächen gross sind und sich diese in geeigneter Form gegenüber stehen. Dies ist einer Brennkammer der Fall sein, wo eine 'kühle' Brennkammerinnenwand der Flamme Wärme entzieht und dadurch Auswirkungen auf die Emissionen hat. Es trifft aber auch auf ein Fenster im Winter zu, welches durch Wärmeentzug durch Strahlung ein unangenehmes Raumklima verursachen kann. Bei grossen Temperaturunterschieden ist auch über grosse Distanzen eine spürbare Wärmeübertragung möglich. Aus diesem Grund sinkt die Aussentemperatur in einer klaren Nacht viel stärker ab als wenn die eine vergleichsweise warme Wolkendecke als Strahlungspartner wirkt. Nachfolgend werden der Vollständigkeit halber die wichtigsten Definitionen und Grundgesetze zur Strahlung ausgeführt, auf die jedoch nicht weiter eingegangen wird.

Die höchste Strahlungsdichte emittiert ein schwarzer Körper. Ein schwarzer Körper absorbiert andererseits auch die gesamte auffallende Strahlungsenergie und wandelt sie in Wärme um. Der Absorptionsgrad α und der Emissionsgrad ε sind dabei gleich 1.

Bei nicht schwarzen Körpern sind das Abstrahlungsvermögen (Emissionsgrad) und der Absorptionsgrad kleiner 1. Es gilt aber immer noch

$$\alpha = \varepsilon \quad (\text{Kirchhoffsches Strahlungsgesetz})$$

Wäre dies nicht der Fall, dann könnte durch eine geeignete Führung des Strahlungsaustauschs erreicht werden, dass der Körper von der Umgebung mehr Strahlung absorbiert, als er emittiert. Er würde sich dadurch unter Abkühlung der Umgebung immer mehr erwärmen. Dies widerspricht jedoch dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik.

Der Anteil der Strahlungsleistung, der nicht absorbiert wird, wird reflektiert und bei transparenten Körpern hindurch gelassen. Mit dem Transmissionsgrad τ und dem Reflexionsgrad ρ ist

$$\alpha + \tau + \rho = 1$$

Für einen nicht transparenten Stoff mit dem Transmissionsgrad $\tau=0$, wie es die meisten technischen Stoffe im Infrarotbereich der elektromagnetischen Strahlung sind, gilt

$$\rho = 1 - \alpha \quad \rho = 1 - \varepsilon$$

Die spezifische Ausstrahlung M_e eines Temperaturstrahlers ist nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz

$$M_e(T) = \varepsilon \sigma T^4 \quad [\text{W/m}^2]$$

$\sigma = 5.670 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$ ist die Stefan-Boltzmann-Konstante.

Die Strahlung nimmt also mit der vierten Potenz der Oberflächentemperatur eines Körpers zu.

Die Strahlungsleistung Φ_{12} einer Fläche A_1 auf eine Fläche A_2 ist abhängig von Grösse der Flächen und deren Ausrichtung gegeneinander, also der Geometrien der Flächen. Diese sind in der dimensionslosen Einstrahlzahl φ_{12} enthalten.

$$\varphi_{12} = \frac{1}{\pi A_1} \iint_{A_1 A_2} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{r^2} dA_1 dA_2$$

Hierbei ist r der Abstand der Flächen A_1 und A_2 . β_1 und β_2 sind die Winkel zwischen der Strahlungsrichtung und den jeweiligen Flächennormalen.

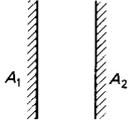
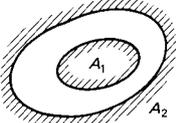
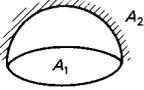
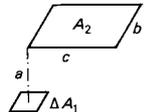
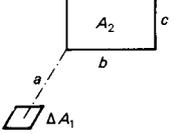
Ein Temperaturstrahler der Temperatur T_1 , der Fläche A_1 und dem Emissionsgrad ε_1 strahlt also an eine Fläche A_2 die Strahlungsleistung Φ_{12} ab.

$$\Phi_{12} = A_1 \varepsilon_1 \varphi_{12} \sigma T_1^4 \quad [\text{W}]$$

Dieser Temperaturstrahler mit den Strahlungskennwerten A_1 , ε_1 und T_1 strahlt aber nicht nur die Strahlungsleistung Φ_{12} ab, sondern empfängt auch die Strahlungsleistung Φ_{21} von der Fläche A_2 . Der von der Fläche A_1 mit der höheren absoluten Temperatur T_1 an die Fläche A_2 mit der niedrigeren absoluten Temperatur T_2 durch Wärmestrahlung transportierte Wärmestrom \dot{Q}_{12} beträgt somit

$$\dot{Q}_{12} = C_{12} A_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

C_{12} [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$] ist der Strahlungsaustauschkoeffizient. In der folgenden Tabelle sind für einige Geometrien die Strahlungsaustauschkoeffizienten dargestellt.

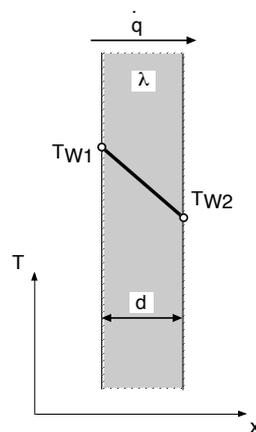
Geometrie	Strahlungsaustauschkoeffizient
 <p>parallele Flächen</p>	$C_{12} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$
 <p>konvexe Fläche A_1 von konkaver Fläche A_2 umschlossen</p>	$C_{12} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$
 <p>Halbraum A_2 über ebener Fläche A_1</p>	$C_{12} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \sigma}{1 - \frac{1}{2}(1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)}$
 <p>Rechteckfläche parallel zum Flächenelement ΔA_1</p>	$C_{12} = \sigma \varepsilon_1 \varepsilon_2 \frac{1}{2\pi} \left(\frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \arctan \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2}} + \frac{c}{\sqrt{a^2 + c^2}} \arctan \frac{b}{\sqrt{a^2 + c^2}} \right)$
 <p>Rechteckfläche senkrecht zum Flächenelement ΔA_1</p>	$C_{12} = \sigma \varepsilon_1 \varepsilon_2 \frac{1}{2\pi} \left(\arctan \frac{b}{a} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + c^2}} \arctan \frac{b}{\sqrt{a^2 + c^2}} \right)$

2.2.2 Wärmeleitung

Die Wärme pflanzt sich im Innern eines Körpers fort, indem sie von den energiereicheren (wärmeren) Molekülen an die energieärmeren (kälteren) durch freie Elektronenbewegung weitergegeben wird. In Festkörpern findet dabei kein Materietransport statt, während in Fluiden die Brown'sche Bewegung zu Materieverschiebungen im mikroskopischen Bereich führen kann. In Festkörpern ist die Wärmeleitung vorherrschend. Sie wird durch die Fourier-Gleichung beschrieben, die im eindimensionalen Fall folgende Form hat:

$$\dot{q} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad [\text{W/m}^2]$$

Definitionen: Die Wärmestromdichte \dot{q} in $[\text{W/m}^2]$ ist die pro Zeiteinheit durch die Flächeneinheit durchtretende Wärme. Sie ist proportional zum räumlichen Temperaturgradienten in Richtung x . Das negative Vorzeichen drückt aus, dass der Wärmefluss in Richtung abnehmender Temperatur erfolgt. Der Proportionalitätsfaktor λ heisst Wärmeleitfähigkeit und hat die Dimension $[\text{W/mK}]$.



Wärmeleitung: Das Temperaturprofil im Fall der planparallelen Platte ist linear.

Die Wärmeleitfähigkeit der Stoffe ist sehr unterschiedlich. Metalle weisen die höchste Wärmeleitfähigkeit auf, während poröse Werkstoffe schlechte Wärmeleiter oder gute Isolatoren sind. Geschäumte oder faserartige Stoffe mit $\lambda < 0.1 \text{ W/mK}$ werden als Wärmedämmstoffe eingesetzt.

Die Wärmeleitfähigkeit ist schwach temperaturabhängig, was im folgenden vernachlässigt wird. Im weiteren ist sie bei porösen Stoffen stark abhängig von der Materialfeuchtigkeit. Zur Beurteilung des Wärmeschutzes muss deshalb zum Wert der trockenen Wärmeleitfähigkeit ein der Baufeuchtigkeit entsprechender Zuschlag berücksichtigt werden. Typische Werte der Wärmeleitfähigkeit:

Material	λ in $[\text{W/mK}]$ bei 20°C
Kupfer (reinst)	396
Aluminium	230
Gusseisen (C-Gehalt 3%)	50
Beton	0.815 – 1.4
Spiegelglas	0.75
Wasser	0.6
Ziegelstein	0.385 – 0.525
Eiche (radial)	0.175 – 0.21
Luft	0.0256

2.2.3 Konvektion

Während die Wärme durch Leitung sozusagen durch die Materie hindurchfließt, wird sie bei der Konvektion von der Materie (in einer Strömung) mitgetragen. Die Materieverschiebungen sind hier makroskopisch und deshalb nur bei Gasen und Flüssigkeiten möglich. Dabei wird unterschieden zwischen freier (natürlicher) und erzwungener Konvektion. Die freie Konvektion entsteht bei Dichteunterschieden (z.B. als Folge von Temperaturgradienten) zweier Fluidpakete. Aus diesem Grund steigt zum Beispiel die Luft am warmen Heizkörper entlang nach oben. Erzwungene Konvektion liegt vor, wenn äussere Kräfte auf die Strömung einwirken, zum Beispiel durch Pumpen oder Ventilatoren, welche eine Strömung induzieren.

2.2.4 Wärmeübergang

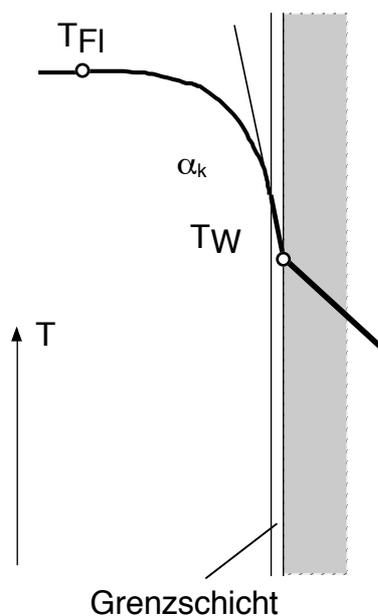
Der Wärmeaustausch zwischen einem Fluid und einem Festkörper heisst Wärmeübergang.

Grundgesetz des Wärmeübergangs:

Die Wärmestromdichte vom Medium gegen die Wand hin ist proportional zur Differenz zwischen der Fluidtemperatur (weit weg von der Wand) und der Wandtemperatur.

Definition:

Die Proportionalitätskonstante zwischen der auf die wärmeübertragende Wandfläche bezogenen Wärmestromdichte \dot{q} und dem Temperaturgefälle zwischen der Wand und dem Fluid wird als Wärmeübergangskoeffizient α_k in $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ bezeichnet. Als Kenngrösse zur Charakterisierung des Wärmeübergangs wird auch die dimensionslose Nusseltzahl Nu verwendet.



$$\dot{q} = \alpha_k (T_{Fl} - T_W)$$

wobei

$$[\alpha_k] = [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$$

$$[\dot{q}] = [\text{W}/\text{m}^2]$$

Wärmeübergang an der Wand

Adhäsionskräfte zwischen Fluid- und Wandatomen verursachen nahe der Wand eine Grenzschicht, in der die Strömungsgeschwindigkeit gleich null ist. In der Grenzschicht findet keine Konvektion statt. Die

Wärmeleitung mit der Wärmeleitfähigkeit λ_{fl} des Fluids ist hier (nebst der Strahlung) der einzige Wärmetransportmechanismus.

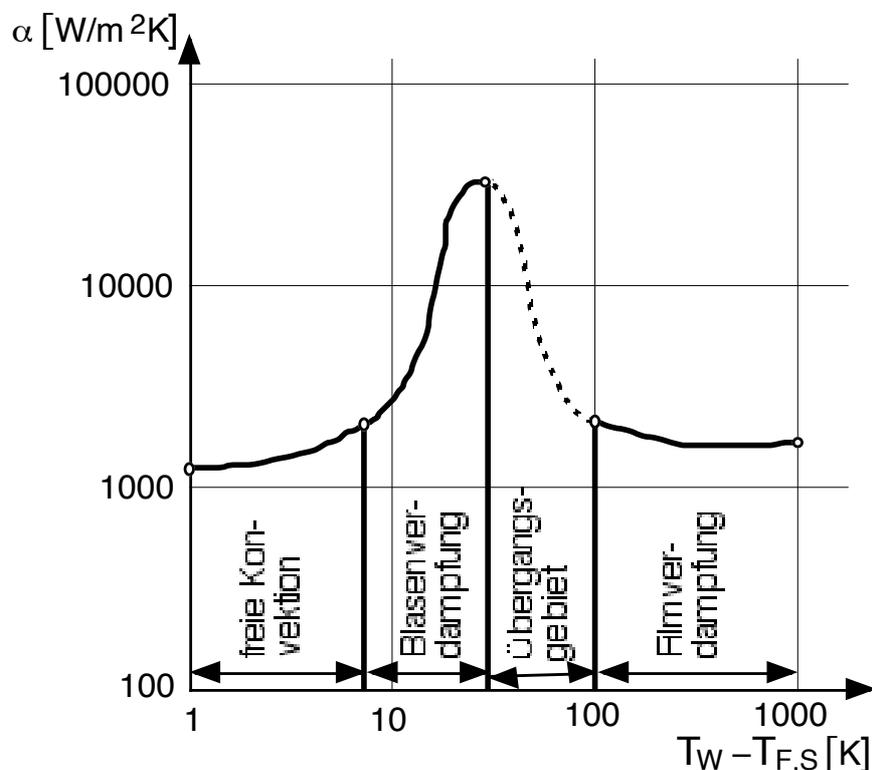
Der Wärmeübergangskoeffizient α_k hängt von einer Vielzahl von Grössen ab, namentlich den Fluideigenschaften, den Strömungsverhältnissen (laminar/turbulent), der charakteristischen Geometrie der Wand und den Temperaturen T_{Fl} und T_W .

$$\alpha_k = \alpha_k(\rho, c_p, \lambda, \eta, \beta, v, g, L_c, T_{Fl} \text{ und } T_W)$$

Einige Richtwerte von α_k :

Ruhende Luft (freie Konvektion):	0 – 10 W/m ² K
Strömende Luft:	10 – 100 W/m ² K
Strömendes Wasser:	500 – 5 000 W/m ² K
Siedendes Wasser:	500 – 6 000 W/m ² K
Kondensierender Wasserdampf:	5 000 – 15 000 W/m ² K

Bei Flüssigkeiten kann die Phasenänderung zur Erhöhung der Wärmestromdichte ausgenutzt werden. Der Wärmeübergangskoeffizient α_k steigt rasch an, sobald sich an der Wand infolge Verdampfung Blasen bilden. In diesem technisch wichtigen Bereich der Blasenverdampfung werden praktisch alle Verdampfer betrieben. Bei verhältnismässig kleinen Temperaturdifferenzen von 10 bis 30°C werden hohe Wärmestromdichten (1000 bis 10 000 kW/m²) erreicht. Steigt die Temperaturdiffenz weiter an, bildet sich ein Dampffilm zwischen Flüssigkeit und Wand, der eine isolierende Wirkung hat; α nimmt wieder ab.

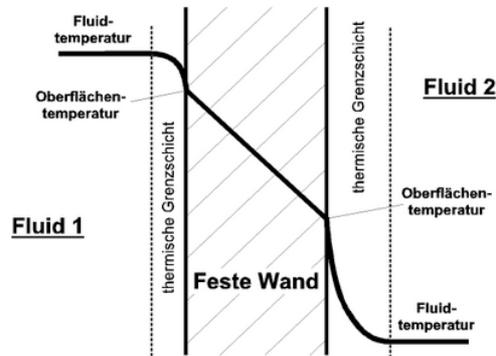


Wärmeübergangskoeffizient α als Funktion der Temperaturdifferenz $T_w - T_{F,S}$ beim Sieden von Wasser unter Atmosphärendruck.

2.2.5 Wärmedurchgang

Der Wärmedurchgang bezeichnet die Wärmeübertragung von einem Medium höherer Temperatur durch eine feste Wand hindurch an ein Medium tieferer Temperatur, also eine Hintereinanderschaltung von Wärmeübergang, Wärmeleitung und Wärmeübergang:

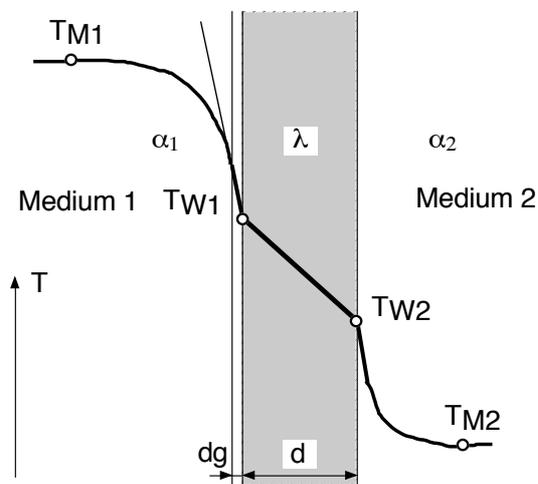
Wärmedurchgang = Wärmeübergang / Wärmeleitung / Wärmeübergang



Definition:

Der **Wärmedurchgangskoeffizient U in [W/m²K]** bezeichnet den Wärmetransport von Medium 1 mit der Temperatur T_{M1} auf Medium 2 mit der Temperatur T_{M2} durch die Fläche A einer festen Wand.

Der Wärmetransport setzt sich zusammen aus dem Wärmeübergang innen, der Wärmeleitung durch die Wand und dem Wärmeübergang aussen. Die Strahlung spielt in den hier betrachteten Fällen eine untergeordnete Rolle und ist nachfolgend nicht berücksichtigt.



Die Kontinuitätsgleichung für die Wärmestromdichte ergibt im stationären Fall:

$$\dot{q} = \alpha_1(T_{M1} - T_{W1}) = \frac{\lambda}{d}(T_{W1} - T_{W2}) = \alpha_2(T_{W2} - T_{M2})$$

Wärmeübergang – Wärmeleitung – Wärmedurchgang

$$\dot{q} \frac{1}{\alpha_1} = (T_{M1} - T_{W1})$$

umgeformt:

$$\dot{q} \frac{d}{\lambda} = (T_{W1} - T_{W2})$$

$$\dot{q} \frac{1}{\alpha_2} = (T_{W2} - T_{M2})$$

addiert:

$$\dot{q} \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) = (T_{M1} - T_{M2})$$

Mit dem **Wärmedurchgangskoeffizient** $U \equiv \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$ [W/m²K]

wird der Wärmedurchgang durch eine Gleichung in derselben Form wie für die Wärmeleitung und den Wärmeübergang beschrieben:

$$\dot{q} = U(T_{M1} - T_{M2})$$

Der reziproke Wert $\frac{1}{U}$ wird als Wärmedurchgangswiderstand bezeichnet. Analog zum Ohm'schen Gesetz setzt sich der Gesamtwiderstand aus der Summe der Einzelwiderstände zusammen:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

Besteht die Wand aus n Schichten, so wird er:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}$$

Im Gebäude beschreibt der **U-Wert** (früher k-Wert) beispielsweise den Wärmedurchgang von der Raumluft durch die Aussenwand an die Aussenluft. Der U-Wert kann verwendet werden zur Charakterisierung der Wärmedämmqualität der Gebäudehülle oder eines einzelnen Bauteils und wird als konstante Grösse unter definierten Bedingungen ausgewiesen. Dabei ist zu beachten, dass der reale U-Wert in der Praxis zum Beispiel durch höhere α -Werte infolge von Wind oder durch höhere λ -Werte infolge von Materialfeuchte vom theoretischen Wert stark abweichen kann.

Bauart	Austauschbedingungen	U [W/m ² K]
Rohrbündelwärmeübertrager	Gas/Gas (1bar)	5-30
	Hochdruckgas um die Rohre (200-300 bar)	150-400
	Hochdruckgas in den Rohren (200-300 bar)	150-400
	Flüssigkeit/Flüssigkeit	150-1000
Verdampfer	Heizdampf um die Rohre	
	a) bei natürlichem Umlauf b) bei Zwangsumlauf	300-1500 800-2500
Kondensator	Kühlwasser in den Rohren	
	Organ. Dämpfe und NH ₃ um die Rohre	300-1000
	Dampfturbinenkondensator reiner H ₂ O-Dampf, dünne Messingrohre	1500-3500

Wärmeübergangskoeffizient U bei Wärmeübertrager, Verdampfer und Kondensator.

Im Gegensatz zum Wärmeübertrager, wo ein möglichst hoher Wärmeübergang angestrebt wird, werden für die Gebäudehülle möglichst tiefe U-Werte gewünscht. Um für ein Haus den Minergie-Standard zu erreichen, dürfen die U-Werte für die Bauteile in der folgenden Tabelle nicht überschritten werden.

Bauteil	Bauteil gegen Aussenklima oder weniger als 2 m im Erdreich	Bauteil gegen unbeheizte Räume oder mehr als 2 m im Erdreich
Dach, Decke	0,2 W/m ² K	0,25 W/m ² K
Wand		0,28 W/m ² K
Boden		
Boden mit Bodenheizung		0,25 W/m ² K
Fenster *	1,3 W/m ² K	1,6 W/m ² K
Türen	1,6 W/m ² K	2,0 W/m ² K

Wärmedurchgang (U-Werte) für Minergie-Standard (Quelle: www.minergie.ch)

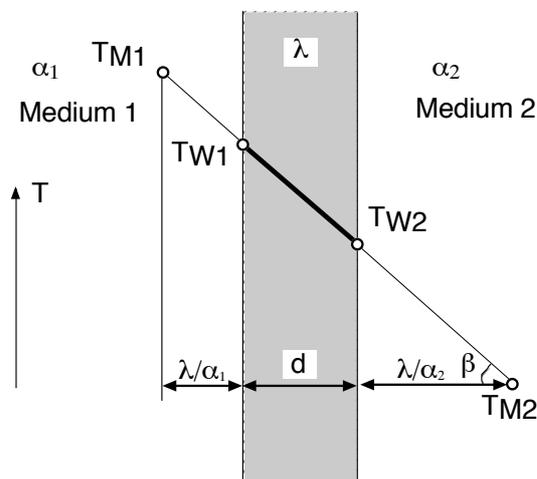
Bei technischen Anwendungen interessieren neben der Wärmestromdichte auch die Wandtemperaturen T_{W1} und T_{W2} . Wenn diese zulässige Werte überschreiten, ist die Wand gefährdet.

Grafische Methode zur Bestimmung der Wandtemperaturen T_{W1} und T_{W2}

Wie oben gezeigt, gilt: $\dot{q} = \alpha_1(T_{M1} - T_{W1}) = \frac{\lambda}{d}(T_{W1} - T_{W2}) = \alpha_2(T_{W2} - T_{M2})$

Durch leichte Umformung erhält man:

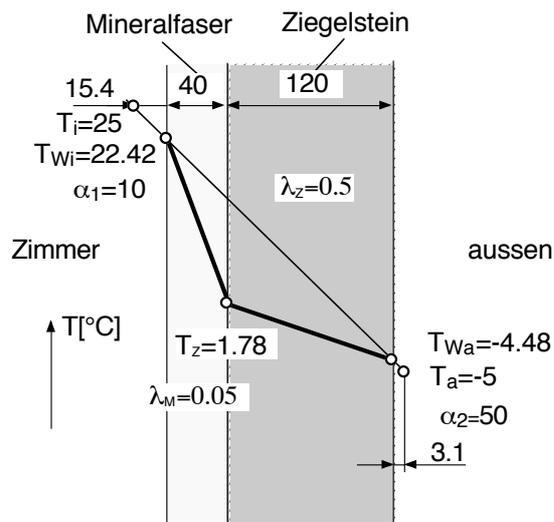
$$\frac{\dot{q}}{\lambda} = \frac{(T_{M1} - T_{W1})}{\frac{\lambda}{\alpha_1}} = \frac{(T_{W1} - T_{W2})}{d} = \alpha_2 \frac{(T_{W2} - T_{M2})}{\frac{\lambda}{\alpha_2}} = \text{konst.} = \tan \beta$$



Die Temperaturen T_{M1} und T_{M2} werden in der äquivalenten Distanz λ/α_1 und λ/α_2 von der Wand aufgetragen und miteinander verbunden. Die Schnittpunkte dieser Verbindungsgeraden mit der Wand sind dann gerade die gesuchten Temperaturen T_{W1} und T_{W2} .

Dies zeigt, dass die Wandtemperaturen immer näher bei der Temperatur desjenigen Mediums liegen, welches den grösseren Wärmeübergangskoeffizienten α hat. Dies wird in vielen Bereichen der Technik ausgenutzt, zum Beispiel bei der Zylinderkühlung von Verbrennungsmotoren, wo die Zylinderwandtemperatur nur wenig höher ist als die Kühlwassertemperatur.

Wärmedurchgang durch die geschichtete Wand



$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_M}{\lambda_M} + \frac{d_Z}{\lambda_Z} + \frac{1}{\alpha_2}$$

$$\frac{1}{U} = 0.1 + 0.8 + 0.24 + 0.02 = 1.16 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$\dot{q} = \frac{1}{1.16} 30 = 25.8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

ohne Mineralfaser zur Wärmedämmung:

$$\frac{1}{U} = 0.1 + 0.24 + 0.02 = 0.36 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$\dot{q} = \frac{1}{0.36} 30 = 83.4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

und damit um einen Faktor 3.23 grösser als mit Wärmedämmung!

Die Wandtemperaturen lassen sich grafisch bestimmen oder einfach berechnen.

$$T_{Wi} = T_i - \frac{\dot{q}}{\alpha_1} = 22.42^\circ\text{C}$$

$$T_{Wa} = T_a + \frac{\dot{q}}{\alpha_2} = -4.48^\circ\text{C}$$

$$T_Z = T_i - \frac{\dot{q}}{\alpha_1} - \dot{q} \frac{d_M}{\lambda_M} = 1.78^\circ\text{C}$$

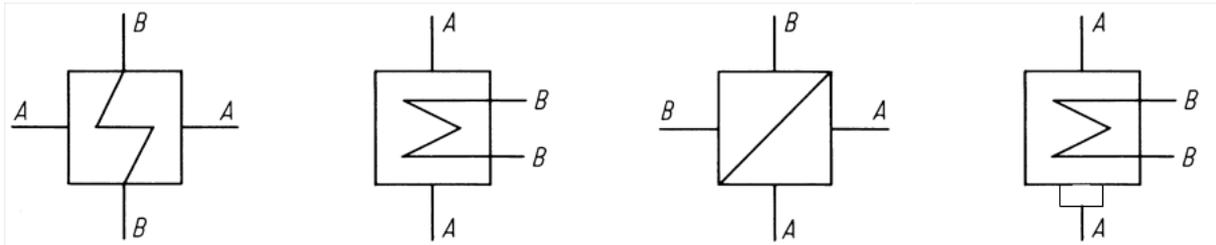
Der Zwischenraum zwischen der Wärmedämmung und der Mauerung ist wegen der sehr tiefen Temperatur T_Z anfällig auf Kondensation, was aus gesundheitlichen und Materialbeständigkeits-Gründen unerwünscht ist. Durch eine gute Hinterlüftung oder durch eine Konstruktion mit der Aussen-Wärmedämmung kann die Problematik entschärft werden.

2.2.6 Wärmeübertrager

Der Wärmeübertrager (früher Wärmetauscher) zählt zu den wichtigsten Bestandteilen in Energieanlagen, aber auch in chemischen oder verfahrenstechnischen Anlagen. Seine Aufgabe besteht darin, die Wärme von einem warmen Stoffstrom \dot{m}_1 an einen kälteren Stoffstrom \dot{m}_2 zu übertragen.

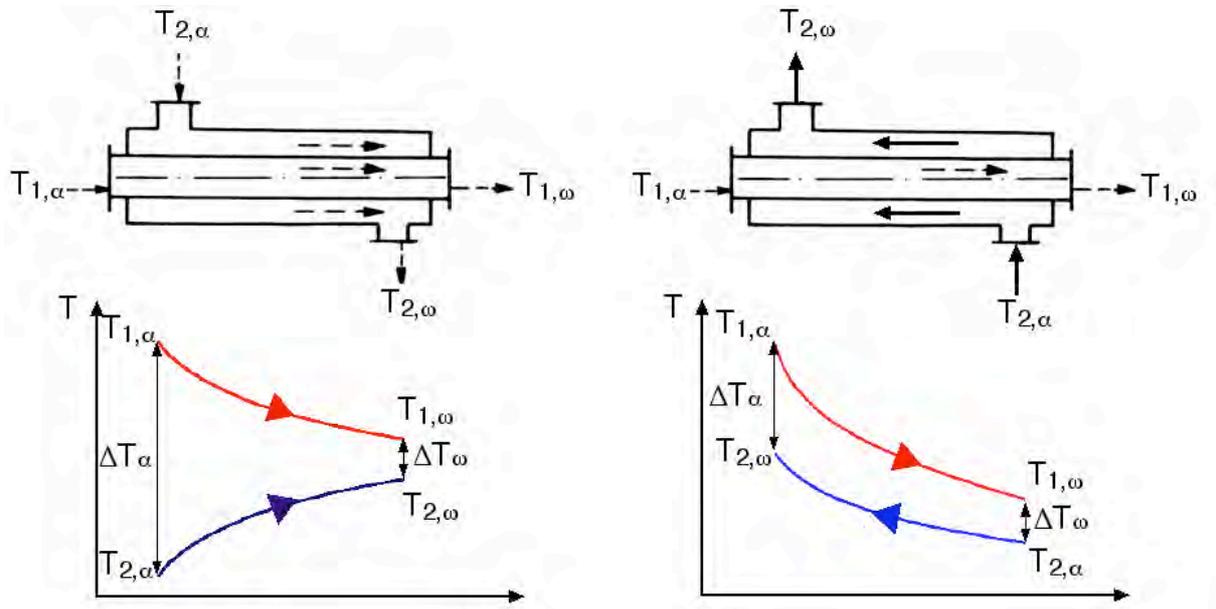
Die Einteilung von Wärmeübertragern geschieht nach deren Funktionsprinzip, nach der Führung der Stoffströme wie Gleich-, Gegen- oder Kreuzstrom und nach den verwendeten Medien, z.B. Gas/Gas-Wärmeübertrager, Gas/Wasser-Wärmeübertrager oder Wasser/Wasser-Wärmeübertrager.

Anwendungen von Wärmeübertrager gibt es in vielen Bereichen der Technik. Beispiele sind: Radiator oder Fussboden als Wärmeübertrager im Gebäude, Wärmeübertrager in Heizung, Dampfkessel in Kraftwerk, Kondensator im Kraftwerk (Luftkondensator oder Kühlturm), Verdampfer und Kondensator in der Wärmepumpe, dito in Klimaanlage und Kälteerzeugern, Erdwärmesonden, Zylinderwandkühlung im Motor, Kühler im Auto usw..



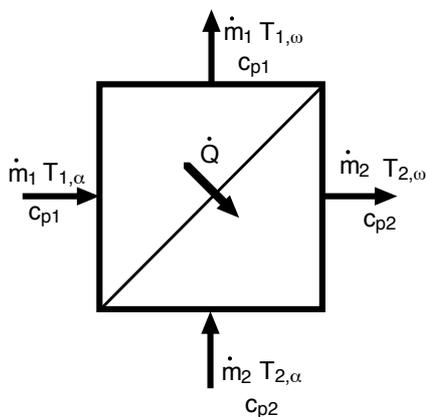
Symbole für Wärmeübertrager nach DIN 2481 in Schaltbildern wärmetechnischer Anlagen. Ganz rechts: Oberflächenkondensator

2.2.6.1 Funktionsprinzip Gleichstrom- und Gegenstromwärmeübertrager



Schematischer Temperaturverlauf über einen Gleichstrom- und einen Gegenstrom-Wärmeübertrager

Im adiabaten Fall kann eine Bilanzgleichung für die Wärmeströme bestimmt werden.



$$\dot{m}_1 \bar{c}_{p1} (T_{1,\alpha} - T_{1,\omega}) = \dot{m}_2 \bar{c}_{p2} (T_{2,\omega} - T_{2,\alpha})$$

Die Gleichung drückt aus, dass die vom Massenstrom \dot{m}_1 abgegebene Wärmemenge gleich der vom Massenstrom \dot{m}_2 aufgenommenen Wärmemenge ist. Die linke und die rechte Seite stellen beide den im Wärmeübertrager übertragene Wärmestrom dar.

Der Wärmestrom \dot{Q} ist abhängig von der Übertragungsfläche A des Wärmeübertragers, vom Wärmeübergangskoeffizienten U und von einer mittleren Temperaturdifferenz ΔT_m :

$$\dot{Q} = UA\Delta T_m \quad [W]$$

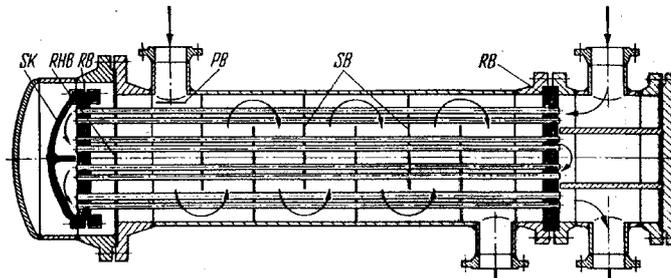
Für den Gleich- und Gegenstromwärmeübertrager berechnet sich ΔT_m zu

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_\alpha - \Delta T_\omega}{\ln \frac{\Delta T_\alpha}{\Delta T_\omega}}$$

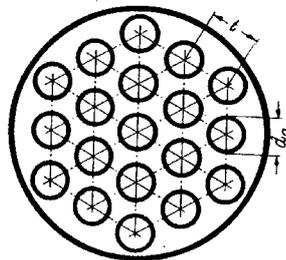
ΔT_α und ΔT_ω sind die in der Abbildung ersichtlichen Temperaturdifferenzen der Mengenströme an den beiden Enden des Wärmeübertragers. Dank der über den ganzen Wärmeübertrager verhältnismässig grossen örtlichen Temperaturdifferenzen $T_1 - T_2$ werden beim Gegenstromprinzip grössere Wärmestromdichten erreicht als bei Gleichstrom. Im weiteren ermöglicht der Gegenstromwärmeübertrager die Ausnutzung von Abwärme bis zu einem tieferen Temperaturniveau.

Der U-Wert steigt mit steigender Strömungsgeschwindigkeit, gleichzeitig steigt aber auch der Druckverlust (Pumpenleistung!). Verschmutzungen aller Art vermindern den U-Wert.

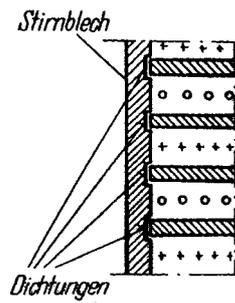
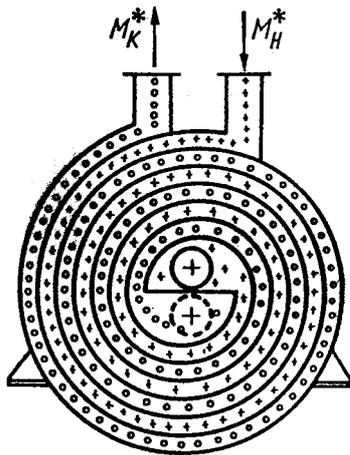
2.2.6.2 Beispiele



Vierweg-Wärmeaustauscher mit schwimmendem Kopf SK. PB: Prallblech, RB: Rohrboden, RHB: Rohrhalteblech, SB: segmentförmige Schikanebleche

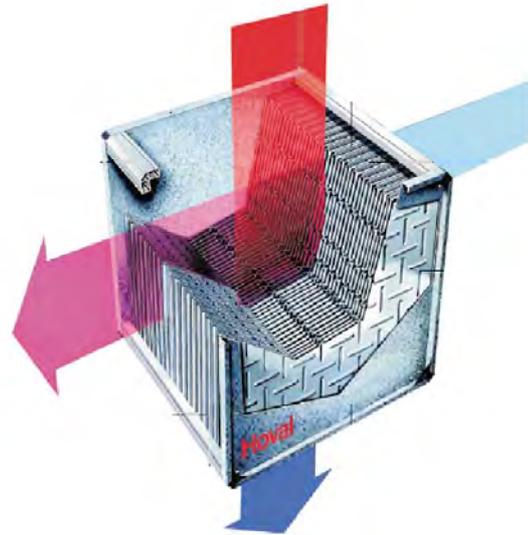


Rohrbündel-Wärmeübertrager nach [Grassmann und Widmer]



Demontierbarer Spiralwärmeaustauscher

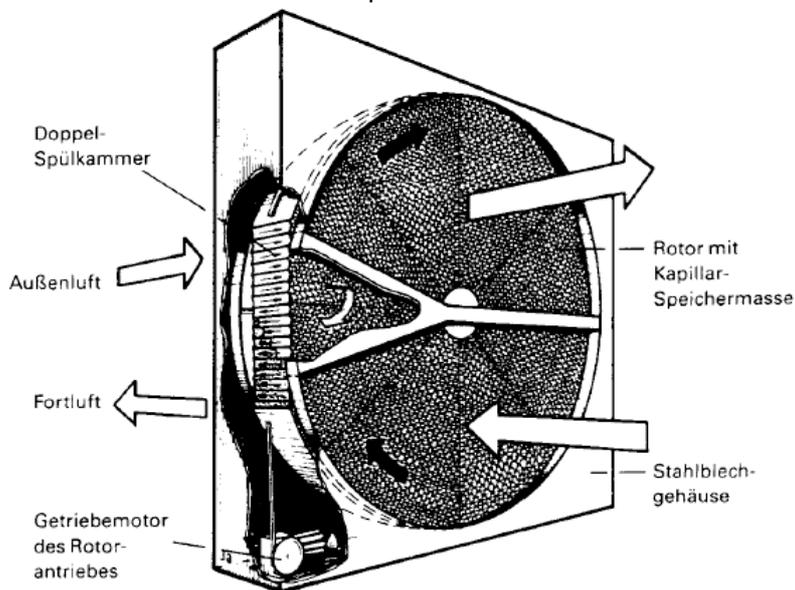
M_H^* , M_K^* : heißer und kalter Stoffstrom



Kreuzstrom-Plattenwärmeübertrager (Hoval)

2.2.6.3 Regenerator

Nach einem anderen Prinzip arbeiten Regeneratoren. Hier gibt das warme Medium seine Wärme an eine Speichermasse ab und diese gibt sie an das kalte Medium weiter. Dies kann realisiert werden mittels einer wärmespeichernden Schüttung, durch die abwechslungsweise der warme und der kalte Stoffstrom hindurchgeleitet wird, oder mittels einer rotierenden Kapillar-Speichermasse, welche die Wärme vom warmen zum kalten Stoffstrom transportiert.



Regenerator mit rotierender Kapillar-Speichermasse

2.2.6.4 Verdampfer

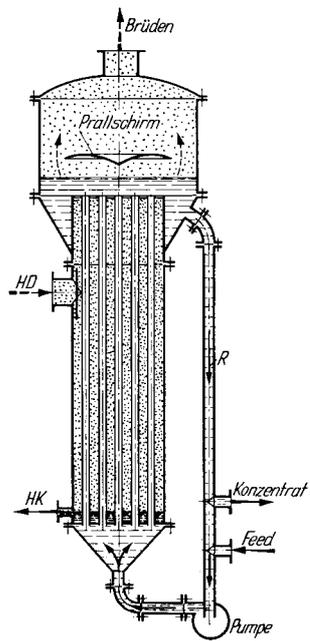


Abb. 3.2.3: Verdampfer mit außenliegendem Rücklaufrohr und Zwangsumlauf. Bezeichnungen wie in Abbildung 1

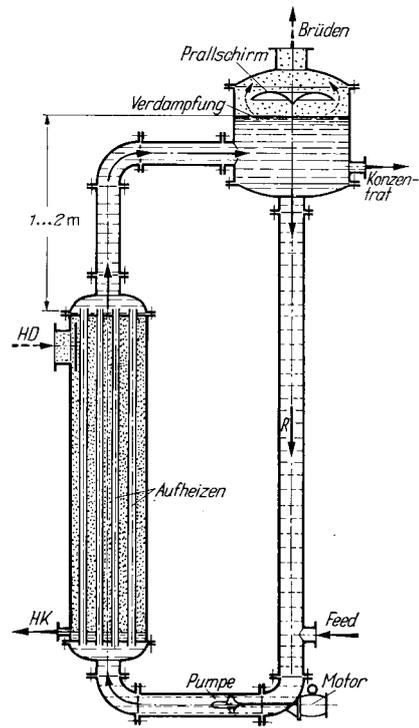
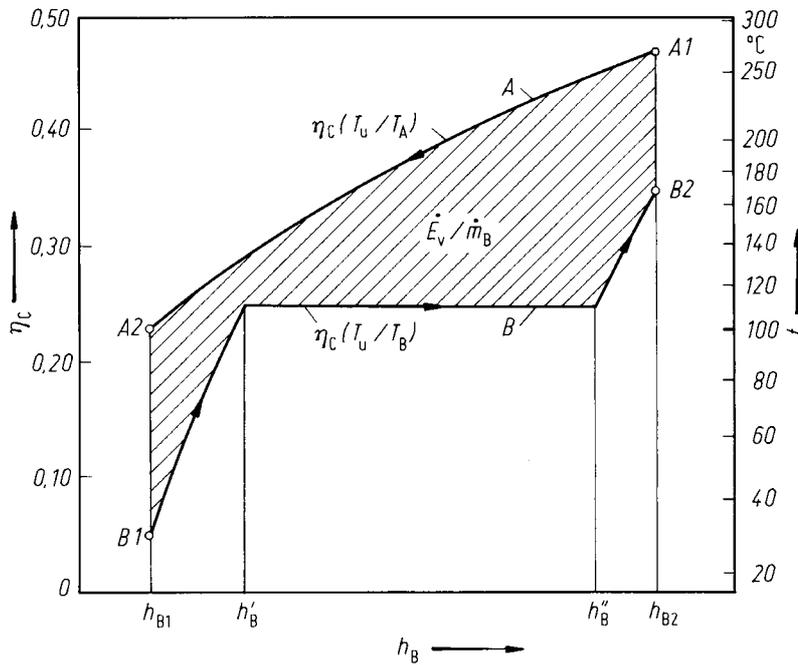


Abb. 3.2.4: Verdampfer mit außenliegendem Heizkörper und Zwangsumlauf. Bezeichnungen wie in Abbildung 1

2.2.6.5 Exergieverlust beim Verdampfer



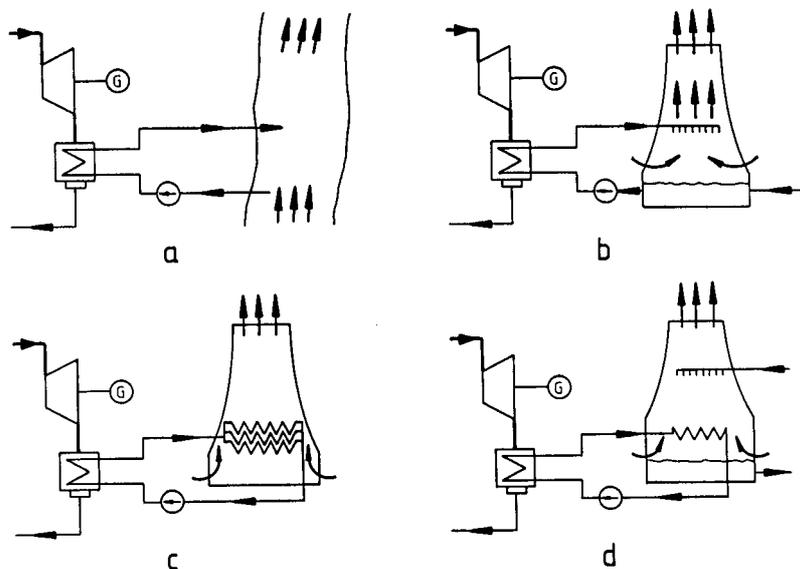
Carnot-Faktor, Enthalpie-Diagramm eines Dampferzeugers und Darstellung des Exergieverlusts als schraffierte Fläche

[Baehr]

2.2.6.6 Abwärmeabfuhr

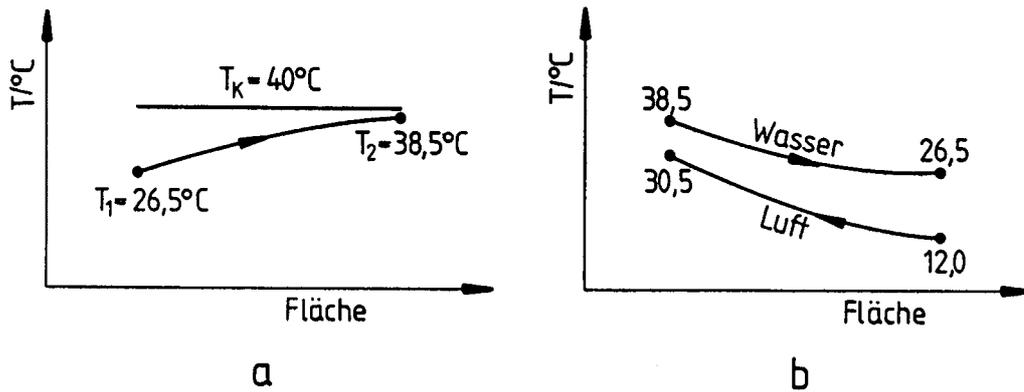
Bei Kreisprozessen fällt Abwärme an, die an die Umgebung abgegeben werden muss. Beim Dampfturbinenprozess findet eine Kondensation des Abdampfes hinter der Turbine statt. Für die Abgabe der Kondensationswärme kommen im wesentlichen die vier Prinzipien in Frage:

Frischwasserkühlung, Nasskühltürme, Trockenkühltürme, Hybridkühltürme.



Kühlverfahren für Kraftwerke:

a) Frischwasserkühlung, b) Nasskühlturm, c) Trockenkühlturm, d) Hybridkühlturm



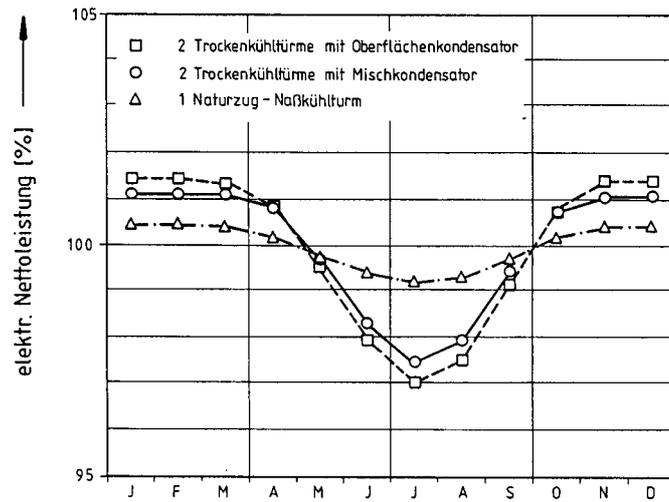
Temperaturverläufe bei einer Naßkühlturmanlage

a: im Kondensator, b: im Kühlturm

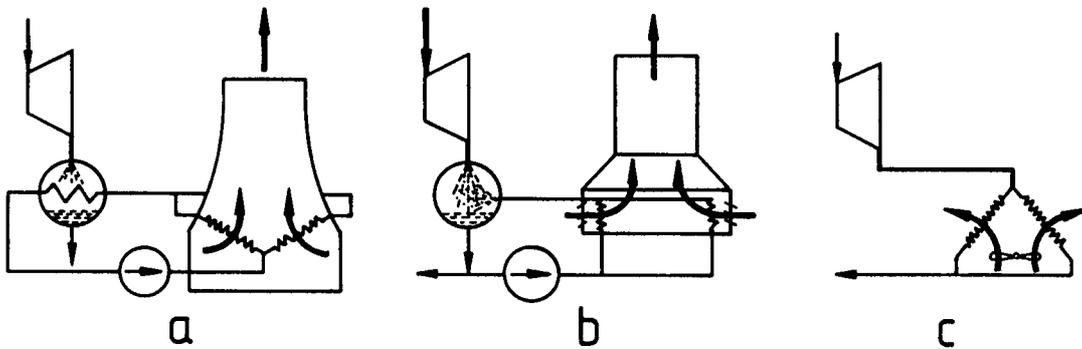
Die Kühlverfahren unterscheiden sich was bauliche Aufwendungen, Gesamtwirkungsgrad, Kühlwasserbedarf und die Auswirkungen auf die Umwelt betrifft. Unter gleichen anlagentechnischen Randbedingungen sind einige technische Merkmale und der Anlagenwirkungsgrad für verschiedene Kühlverfahren in nachfolgender Tabelle aufgeführt. Das bezüglich Wasserhaushalt ökologisch vorteilhafteste Verfahren, die Trockenkühlung, ist bezüglich Wirkungsgrad und Stromerzeugungskosten ungünstig. Die Grafik zeigt dazu den jahreszeitlichen Verlauf der elektrischen Nettoleistung. Die Trockenkühlung ist hingegen in dem Wintermonaten den Nasskühltürmen überlegen.

Tabelle Kühlverfahren eines 700MW-Steinkohlekraftwerks im Vergleich

Parameter	Frischwasserkühlung	Nasskühlturm	Trockenkühlturm
Nettoleistung [MW]	703	687	671
Nettowirkungsgrad [%]	39	38.2	37.2
Kondensationsabwärme [MW]	934	950	966
Kondensatordruck [10^5Pa]	0.0332	0.065	0.086
Kühlwasserbedarf [m^3/s]	35	1.1	0
Investitionskosten [%]	100	105	112
Stromerzeugungskosten [%]	100	108	115



Elektrische Nettoleistung abhängig von der Kühlungsart im Jahresverlauf



Prinzipien von Trockenkühltürmen

- a: mit Oberflächenkondensator
- b: mit Direkteinspritzung im Kondensator (System Heller)
- c: Luftkühler mit Ventilator

2.3 Energie im Gebäude

Ein Grossteil des Energieverbrauchs geht zurück auf die Befriedigung von Bedürfnissen zum Wohnen und Arbeiten: Heizen, Licht, kochen, elektrische Apparate sowie allenfalls Kühlung. Die wichtigsten Energieströme für ein Gebäude mit Heizbedarf werden nachfolgend beschrieben.

Energiebilanz Heizen (ohne Betrachtung von Warmwasser und Stromverbrauch)

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_T + \dot{Q}_V - \eta_G \dot{Q}_G$$

$\dot{Q}_H =$	Heizwärmebedarf
$\dot{Q}_T =$	Transmissionsverluste (Transmissions-Wärmeverluste, Wärmedurchgang)
$\dot{Q}_V =$	Lüftungsverluste
$\eta_G =$	Gewinnfaktor
$\dot{Q}_G = \dot{Q}_S + \dot{Q}_I =$	Wärmegewinne
	$\dot{Q}_S =$ Wärmeeintrag durch Sonneneinstrahlung
	$\dot{Q}_I =$ Innere Abwärme = Abwärme von Personen und von elektrischen Geräten

1. Transmissionsverluste

$$\dot{Q}_T = U A (T_i - T_e)$$

U = Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)

A = Aussenfläche

T_i = Raumlufthtemperatur

T_e = Aussenlufttemperatur

Für die Dimensionierung von Heizungsanlagen wird die massgebenden Aussenlufttemperatur so angenommen, dass im langjährigen Mittel einmal im Jahr eine Unterschreitung der Raumlufthtemperatur von einem bis zwei Tagen akzeptiert werden muss, wobei auch die Bauweise berücksichtigt wird.

- Massivbau: T_e kommt einmal im Jahr als 4-Tagesperiode vor. (Bsp Zürich-SMA: –8°C)
- Leichtbau: T_e kommt einmal im Jahr als 1-Tagesperiode vor. (Bsp Zürich-SMA: –11°C)

2. Lüftungsverluste

$$\dot{Q}_V = m^*_L (T_{\text{Luft ein}} - T_{\text{Luft aus}}) c_{pL}$$

$$m^*_L = V^*_L \rho$$

$$V^*_L = f V_{\text{Gebäude}}$$

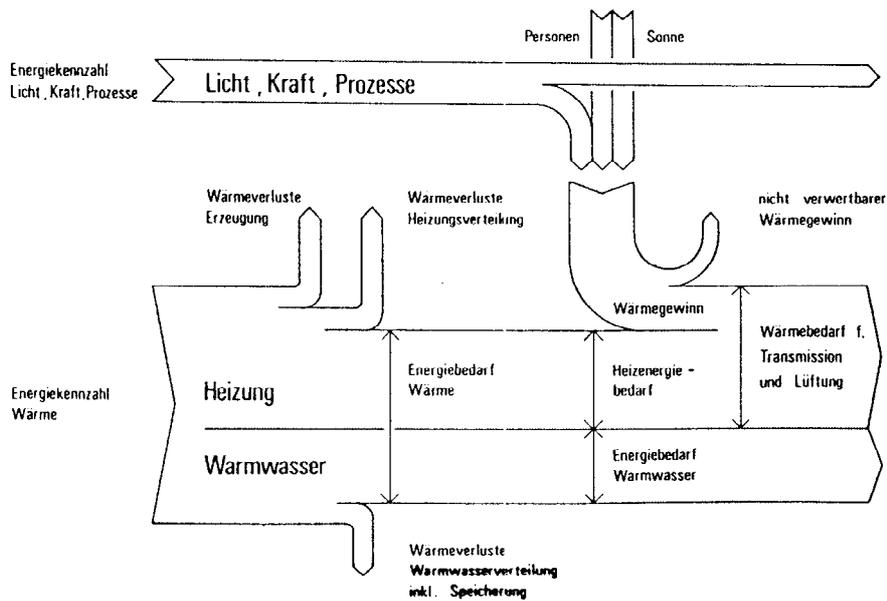
f = Luftwechselrate

Zielwert Wohnen: f = 0.3 h⁻¹

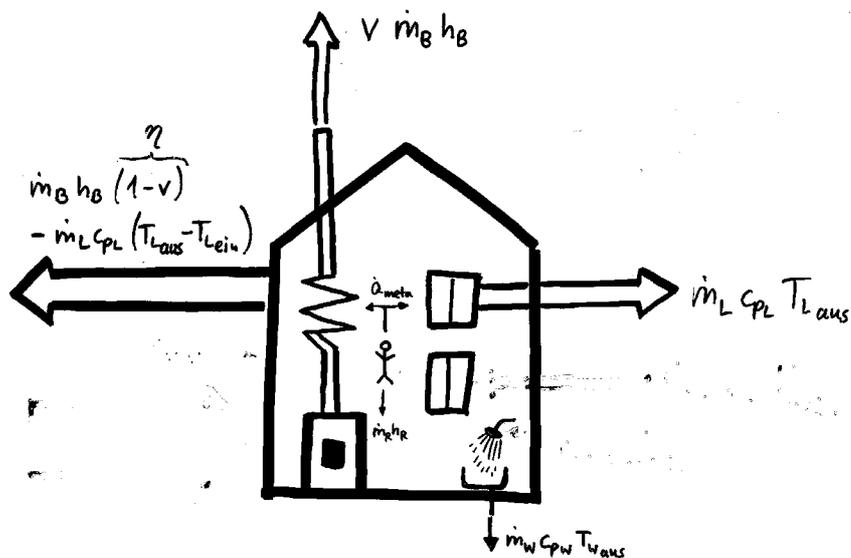
Werte für alte Häuser: f = 2 bis 3 h⁻¹

3. Wärmegewinne

Ausführungen zum Gewinnfaktor in nachfolgenden Folien.



Energiebilanz eines Gebäudes für die Energiekennzahl in [MJ pro m² Jahr] (alte SIA-Norm 380/1).



Energieströme von Brennstoff und Luft im Gebäude.

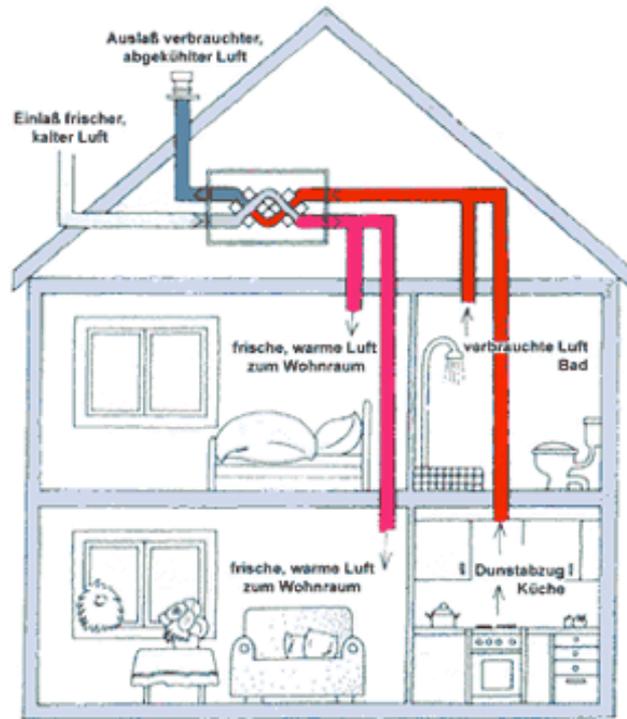
Bei Betrachtung der Energie im Gebäude ist die Unterscheidung wichtig zwischen Energieströmen, welche nicht an einen Stoffstrom gebunden sind (also Transmission und Wärmegewinne) sowie Energieströme, welche an einen Stoffstrom gebunden sind (Lüftungsverluste, Wasserverbrauch). Während erstere theoretisch gegen Null vermindert werden können, sind letztere zu einem gewissen Grad unausweichlich. Für die an Stoffströme gebundenen Energieströme kommt jedoch eine Wärmerückgewinnung (WRG) in Frage. Diese erfolgt in der Regel durch Rekuperation, möglich ist aber auch eine Regeneration.

Die Energieeffizienz eines Gebäudes kann durch folgende Faktoren beeinflusst werden:

Optimierung Energie im Gebäude		Umfeld	Architektur, Bautechnik	Technik (Haustechnik)	Benutzer
Verbrauch	Lage, Baugesetze	++			
	Gebäudeform, Ausrichtung,		++		
	Sonne, Fenster, Beschattung		++	+	
	Wärmespeicherung (Massivbau/Leichtbau)		++	+	
	Wärmedämmung		+	++	
	Dichtheit, Lüftung, Luft-WRG		+	++	+
	Warmwasser, Wasser-WRG			+	++
Bereitstellung	Heizungstechnik			++	
	Wärmespeicherung in Zusatzkomponenten			++	
	Wärmeverteilung	++		++	++
	Aktive Sonnenenergienutzung			++	
				

Für den Energiehaushalt in einem Gebäude spielt die Wärmeübertragung in verschiedenen Bereichen eine Rolle. Die wichtigsten Anwendungen sind:

	Wärmeleitung	Konvektion	Wärmestrahlung
Wärmerückgewinnung aus Abluft	im WÜ	im WÜ	
Wärmerückgewinnung aus Abwasser	im WÜ	im WÜ	
Wärmedämmung an der Gebäudeaussenhülle	in der Wand	an der Wand	Wand-Mensch
Fensteroptimierung (Glasart, Fenstergrösse und Anordnung zur optimierten Nutzung des Sonnenlichtes)	im Glas	am und im Fenster bei Mehrfachverglasung	Fenster-Mensch
Wärmepumpe	im WÜ	im WÜ	
Sonnenkollektor	in den Kollektorrohren	an den Kollektorrohren (innen und aussen)	
Fotovoltaik			vor allem sichtbarer Teil
Heizkörper	im Heizkörper	an der Heizkörperwand (innen und aussen)	Heizkörper-Mensch



Wärmerückgewinnung aus Abluft (Prinzip)

Jede Energietechnik reizt das Klima

Aber zwischen fossilen Feuerungen, erneuerbaren Energien, Kernkraft und Spartechnik bestehen grosse Unterschiede

Will man den globalen Klimawandel eindämmen, wird der Einfluss der verschiedenen Energietechniken auf den Treibhauseffekt zu einem wichtigen Entscheidungskriterium. Wieviel Treibhausgas die einzelnen Systeme ausstossen, zeigen Forschungsergebnisse der ETH Zürich.

■ VON BEAT GERBER

Auch wenn Energiesysteme wie Solarzellen und Kernkraftwerke während ihres Betriebs keine treibhauswirksamen Abgase produzieren, braucht es doch Energie zur Herstellung und Entsorgung der Anlagen, aber auch zur Aufbereitung des Uranbrennstoffs. Diese Prozesse verlaufen nicht ohne Ausstoss von Kohlendioxid (CO₂), Methan und Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) - Gase, die den Treibhauseffekt verstärken und zum globalen Klimawandel beitragen.

Kein Energiesystem ist klimaneutral, doch beeinflussen die verschiedenen Techniken den Treibhauseffekt mehr oder weniger stark. Diese und andere mit dem Betreiben eines Energiesystems verbundenen Auswirkungen hat eine Forschungsgruppe an der ETH Zürich untersucht. «Wir haben die Treibhauswirksamkeit aller Abgase der einzelnen Energiesysteme berücksichtigt und sie in CO₂-Äquivalente zusammenfasst», erklärt ETH-Mitarbeiter Rolf Frischknecht vom Laboratorium für Energiesysteme.

Für die Analyse haben die Forscher sämtliche Stoffflüsse einbezogen: Gewinnung, Aufbereitung, Transport und Lage-

rung der Energieträger, Materialherstellung und Anlagenbau, Energieverbrauch während des Betriebs sowie die Entsorgung. Für jede Technik lässt sich daraus ein totaler Treibhausgas-Ausstoss berechnen, der ins Verhältnis zur erzeugten oder gesparten Energie gesetzt wird.

Das Ergebnis ist in der untenstehenden Grafik zu sehen, wo für die wichtigsten Heizungsarten und Stromproduktionsanlagen die Kohlendioxid-Äquivalente dargestellt sind, ausgedrückt in Gramm CO₂ pro Kilowattstunde (kWh). Dabei springt die grosse Spannweite ins Auge:

● Beim Heizen stehen die Öl- und Gasfeuerungen weit an der Spitze, während die erneuerbaren Energiesysteme bloss etwa ein Zehntel der fossilen Werte erreichen. Am klimaneutralsten erweist sich die Wärmedämmung: Die durch eine zusätzliche 20 cm dicke Mineralwolle-Isolation eingesparte Energie kann kein Heizsystem mit weniger CO₂ produzieren.

● Bei der Stromerzeugung sind die grössten «Klimasünder» die fossilen Kraftwerke. Rund zehnmal weniger Treibhausgase pro kWh stossen Fotovoltaik-Anlagen aus (produziert mit Strom aus dem europäischen Verbundnetz), doch Kernkraft- und Wasserkraftwerke sind noch günstiger. Am besten schneidet jedoch die Sparlampe ab: Der hier eingesparte Strom lässt sich in keinem Kraftwerk klimaneutraler gewinnen.

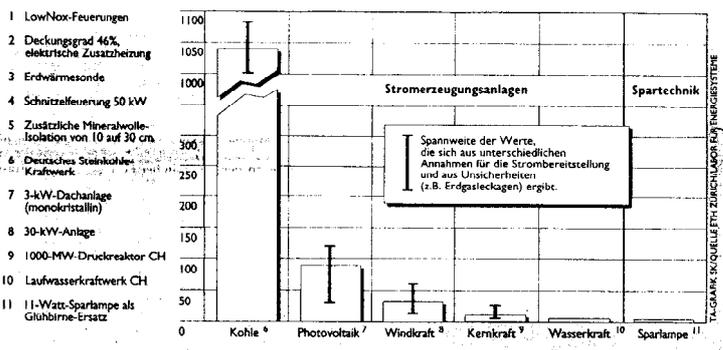
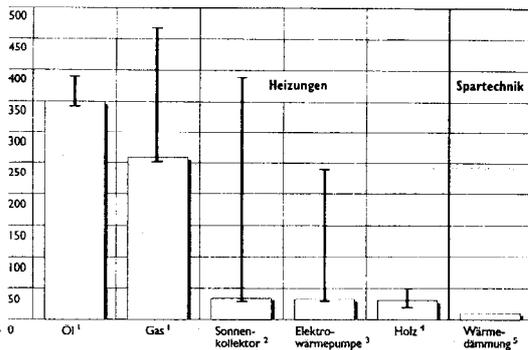
Energiesparen bei bestehenden Gebäuden: Am klimaneutralsten ist meist eine optimale Wärmedämmung.



BILD H. R. BRAMAZ

Kohlendioxid-Äquivalente für verschiedene Energiesysteme (in g CO₂ pro kWh)

Mass für die Wirkung auf den Treibhauseffekt: Je mehr CO₂-Äquivalente eine Technik erzeugt, desto stärker beeinflusst sie das Klima.



Energiespartechnik

Eine spürbare Verminderung des fossilen Energieverbrauchs und damit auch des Kohlendioxid-Ausstosses lässt sich nicht nur durch die Anwendung von klimaneutralen Energieträgern erzielen. Als oft wirkungsvoller und rentabler erweisen sich gegenwärtig der Einsatz verbesserter Techniken mit höheren Wirkungsgraden und die Anpassung der Energiedienstleistungen an den tatsächlichen Bedarf. Aber auch das Komfortniveau ist zu diskutieren – zum Beispiel, ob eine künstliche Klimatisierung eines Gebäudes überhaupt nötig ist.

Bereits bei der Planung können die Fachleute ein Haus so konzipieren, dass möglichst viel Sonnenenergie passiv genutzt wird. Elemente der Solararchitektur sind Ausrichtung und Grösse der Fenster.

Anordnung von Speichermaterialien und eine optimale Wärmedämmung. Bei Renovierungen sollte nicht nur die Isolation der Gebäudehülle verstärkt (vgl. oben stehende Grafik), sondern auch gleichzeitig die Heizung angepasst werden, weil sie nun weniger Leistung braucht.

Grössere Dienstleistungsgebäude sind mit einer komplexen Energieversorgung ausgerüstet. Dort ermöglicht die moderne Informationstechnik eine massgeschneiderte Energieanwendung. Dank einer computergestützten Steuerung und Regelung der Energiezufuhr für Heizung, Lüftung und Kühlung, Licht und EDV, die den effektiven Verbrauch optimal berücksichtigt, lassen sich beträchtliche Einsparungen erreichen. In diesem Bereich liegt noch ein grosses Sparpotential brach.

Wärmepumpen

Fast drei Viertel der 2,9 Millionen Schweizer Haushalte heizen heute mit Öl, jeder achte Haushalt mit Gas und nur jeder hundertste mit einer Wärmepumpe. In der Schweiz waren 1993 rund 31 000 Wärmepumpen installiert, die Umweltwärme in Form von Grund-, See- oder Flusswasser, Erdwärme, Luft oder Abwärme nutzen. Diese Aggregate «pumpen» die erneuerbare Umweltwärme mit einem Kompressor auf ein höheres Temperaturniveau, das zum Heizen nötig ist. Vorteil: Wärmepumpen geben ein Mehrfaches an Energie ab, als zum elektrischen oder gasbetriebenen Antrieb des Kompressors aufgewendet und bezahlt werden muss. Allerdings kosten die Anlagen auch mehr als Ölheizungen, doch sind sie eine umweltschonende Alternative.

Biomasse

Biomasse umfasst im energietechnischen Sinn alle pflanzlichen und tierischen Stoffe, aus denen sich Energie gewinnen lässt. Dazu gehören Brennstoffe wie Holz, Biogas, Klärschlamm und kohlenstoffhaltige Abfälle, die kohlendioxidneutral sind. Bei ihrer Entstehung wird CO₂ gebunden, das bei der Verbrennung oder Vergärung wieder frei wird. In der Schweiz produzieren Biomasse-Anlagen jährlich ca. 5 Mrd. kWh Energie (2,2% des Gesamtenergieverbrauchs), zwei Drittel davon aus Holz. Das Aktionsprogramm Energie 2000 fördert die energetische Verwertung von Biomasse, vor allem die Wald- und Restholznutzung, Altholzfeuerungen, Grossevergärungsanlagen und die rationelle Energienutzung in Abwasserreinigungsanlagen.

Sonnenkollektoren

Die direkte thermische Nutzung der Solarstrahlung erfolgt in der Schweiz noch auf bescheidenem Niveau. 1993 wurden 84 Mio. kWh Wärme mit Sonnenkollektoren erzeugt, was rechnerisch der Energie zur Warmwassererzeugung für 35 000 Haushalte entspricht. Fast ein Drittel dieser Wärmeenergie diente aber zur Heutrocknung in Landwirtschaftsbetrieben. Sonnenkollektoren sind vorzüglich geeignet, Warmwasser auf- oder vorzuheizen – mit einem guten Kosten/Nutzen-Verhältnis. Pro Quadratmeter Kollektorfläche lassen sich mit solarer Vorwärmung jährlich etwa 70 Liter Heizöl sparen. Kollektoren können auch in den saisonalen Übergangszeiten zum Heizen eingesetzt werden. Das Potential für die verschiedenen Anwendungen der Solarwärme ist riesig.

Photovoltaik

Solarzellen eignen sich gut als integrierte Fassaden- und Dachelemente, aber auch als netzunabhängige Inselanlagen. Die Zellen wandeln Sonnenlicht direkt in Elektrizität um, allerdings noch mit tiefem Wirkungsgrad. In der Schweiz lieferte die Photovoltaik 1993 rund 2 Mio. kWh Elektrizität, was dem Strombedarf von etwa 800 Haushalten entspricht. Haupthindernis für den breiten Einsatz sind die hohen Stromgestehungskosten (ab ca. 80 Rp. pro kWh), doch dürften die Preise von Solarzellen dank verbesserter Fertigungstechnik und höheren Stückzahlen künftig sinken und der Wirkungsgrad (heute 10 bis 15%) steigen. Damit liesse sich das auch in der Schweiz ausserordentliche Potential der dezentralen Photovoltaik vermehrt auszunutzen.

Windkraft

Windenergie hat in der Schweiz nur eine marginale Bedeutung. Derzeit sind drei Anlagen im 100-kWh-Bereich und einige kleinere Windrotoren (auch im Mittelland) in Betrieb, die Strom für etwa 50 Rp. pro kWh erzeugen. Zwar sind geeignete Standorte mit mittleren Windgeschwindigkeiten über der kritischen Limite von 5,5 m/s durchaus vorhanden, zum Beispiel auf den Juraböden und in den Alpen. Aber gegen die Realisierung von grösseren Anlagen stellen sich andere Hindernisse, wie etwa der Landschaftsschutz, hingegen sind dezentrale Kleinanlagen unbedenklich und sinnvoll. Weltweit weist die Windenergienutzung ein sehr grosses Potential auf, das sich in sogenannten Windfarmen zu günstigen Stromgestehungskosten nutzen lässt.

Wasserkraft

Rund 60% des Stroms werden in der Schweiz mit Wasserkraft, der weissen Kohle, erzeugt. Dabei decken die Laufwasserkraftwerke an Flüssen den Grundlastbedarf, während die Speicherkraftwerke Strom in Spitzenverbrauchszeiten – mittags und im Winter – produzieren. Das Wasserkraftpotential ist in unserem Lande praktisch ausgeschöpft, allerdings lässt sich mit dem Einbau effizienterer Turbinen in bestehenden Anlagen die Elektrizitätserzeugung noch steigern. Auf ökologischen Widerstand stossen dagegen geplante Pumpspeicherwerke in den Alpen, z. B. im Grimselgebiet. Einen sinnvollen, wenn auch bescheidenen Beitrag zu erneuerbarem Strom kann der Bau oder die Wiederinbetriebnahme von Kleinwasserkraftwerken liefern.

Kernkraft

In Kernkraftwerken (KKW) spalten sich Uranatomkerne und geben Wärmeenergie ab. Davon lässt sich knapp ein Drittel mit Turbinen und Generatoren in Elektrizität umwandeln. Die fünf Schweizer KKW haben eine Leistung von total 2985 Megawatt installiert und tragen fast 40% zur Landesstromproduktion bei. Aufgrund der 1990 angenommenen Moratoriums-Initiative dürfen in der Schweiz bis 2000 keine Bewilligungen für neue KKW erteilt werden. Deshalb sieht die Elektrizitätswirtschaft für die Zeit ab 2010, wenn die älteren KKW abgestellt werden, eine Stromversorgungslücke voraus. Die Zukunft der Kernenergie ist in der Schweiz ungewiss. Obwohl die Forschung sicherere Reaktortypen entwickelt, bleibt die Technik wegen ihrer Risiken unstritten.

Neue Techniken

Zahlreiche CO₂-arme Energietechniken sind noch in der Entwicklung und erst in einigen Jahren marktreif. Dazu zählt die Brennstoffzelle, die aus Wasserstoff effizient Elektrizität erzeugt. Derzeit testet die Forschung Anwendungen sowohl für dezentrale Kraftwerke als auch für den Fahrzeugmotorantrieb. Klimaneutral und mit wenig Risiken lässt sich der erforderliche Wasserstoff aus Solarstrom oder Wasserkraft gewinnen. Nicht absehbar ist der Erfolg bei der Kernfusion: Mit hohem technischem Aufwand sollen in einem Reaktor leichte Atomkerne zu schwereren verschmelzen, wobei Kernenergie frei wird – ein gigantisches Unterfangen, die Sonne nachzubauen.

Zusammenstellung: Beat Gerber.