



**Fachhochschule  
Koblenz**

FB Maschinenbau - Wärmekraftwirtschaft  
Professor Dr.-Ing. Willi Nieratschker

# **Wärmekraftwirtschaft**

<b>1</b>	<b>Geschichtlicher Rückblick .....</b>	<b>4</b>
1.1	Charakteristische Daten der Erde .....	4
1.2	Die Kulturellen Revolutionen der Menschheit .....	4
1.3	Entwicklung der Energiewirtschaft in Deutschland .....	6
<b>2</b>	<b>Energieformen und Energieträger .....</b>	<b>8</b>
2.1	<b>Energieformen .....</b>	<b>8</b>
2.1.1	Klassifizierung von Energie nach Verarbeitungsstufen .....	9
2.1.2	Technische Einheiten der Energiewirtschaft.....	9
2.1.3	Wirkungsgrade von Energiewandlungsanlagen .....	9
2.2	<b>Energieträger .....</b>	<b>10</b>
2.2.1	Vermögensenergie .....	10
2.2.1.1	<i>Fossile Brennstoffe.....</i>	<i>10</i>
2.2.1.2	<i>Kernbrennstoffe.....</i>	<i>12</i>
2.2.2	Einkommensenergie (regenerative Energie) .....	19
2.2.2.1	<i>Sonnenenergie.....</i>	<i>19</i>
2.2.2.2	<i>Wasserkraft .....</i>	<i>24</i>
2.2.2.3	<i>Wind.....</i>	<i>25</i>
2.2.2.4	<i>Biomasse .....</i>	<i>31</i>
2.2.2.5	<i>Geothermische Energie.....</i>	<i>33</i>
2.2.2.6	<i>Gravitationsenergie .....</i>	<i>35</i>
2.3	<b>Ressourcen, Reserven und Reichweiten von Vermögensenergien .....</b>	<b>36</b>
<b>3</b>	<b>Energiebedarf .....</b>	<b>39</b>
3.1	<b>Geschichtliche Entwicklung des Energiebedarfs.....</b>	<b>39</b>
3.2	<b>Bedarfsprognosen.....</b>	<b>39</b>
3.2.1	Bevölkerungsentwicklung .....	40
3.2.2	Ressourcenverbrauch.....	40
3.3	<b>Energieeffizienz und Umweltauswirkungen.....</b>	<b>41</b>
3.4	<b>Energiebedarfsstrukturen.....</b>	<b>42</b>
3.4.1	Qualitative Bedarfsstrukturen und Energiemärkte .....	42
3.4.2	Zeitliche Dargebots- und Bedarfsstrukturen .....	43
3.4.3	Einfluss zeitlicher Bedarfsstrukturen auf die Anlagenkonfiguration .....	52
3.4.3.1	<i>Annuität der Ausgaben (Kosten) und spezifische Kosten.....</i>	<i>53</i>
<b>4</b>	<b>Der Energietransport .....</b>	<b>60</b>
4.1	<b>Kohle- und Mineralöltransport .....</b>	<b>60</b>
4.1.1	Kohletransport .....	60
4.1.2	Mineralöltransport.....	62
4.2	<b>Gastransport .....</b>	<b>66</b>
4.2.1	Physikalische Grundlagen des Erdgastransports in Rohrleitungen.....	67
4.2.2	Gasrohrleitungen .....	68
4.3	<b>Elektroenergietransport.....</b>	<b>69</b>
4.3.1	Geschichte.....	69
4.3.2	Definition nach VDE.....	69
4.3.3	Freileitungen .....	70
4.3.3.1	<i>Verluste in Kabeln und Freileitungen.....</i>	<i>71</i>
4.4	<b>Wärmetransport.....</b>	<b>73</b>

---

4.4.1	Historie und Entwicklungstendenzen.....	73
4.4.2	Physikalische und technische Grundlagen des leitungsgebundenen Wärmetransports .....	74
4.4.2.1	<i>Überhitzter Dampf</i> .....	74
4.4.2.2	<i>Gesättigter Dampf</i> .....	75
4.4.2.3	<i>Heißwassersysteme</i> .....	75
4.4.3	Rohre und Verlegeverfahren .....	77
4.4.4	Wirtschaftlichkeit des Wärmetransports .....	77
<b>5</b>	<b>Speicherprozesse</b> .....	<b>78</b>
5.1	<b>Wärmespeicher</b> .....	<b>79</b>
5.2	<b>Speicherung im fluiden Einphasengebiet</b> .....	<b>80</b>
<b>6</b>	<b>Thermische Energieanlagen</b> .....	<b>83</b>
6.1	<b>Feuerungen und Kessel</b> .....	<b>83</b>
6.1.1	Warmwasser-, Heißwasser- und Dampferzeuger.....	85
6.1.2	Heizkessel .....	86
6.1.2.1	<i>Dampferzeuger</i> .....	86
6.1.2.2	<i>AbhitzeKessel</i> .....	87
6.2	<b>Kernreaktoren</b> .....	<b>87</b>
6.2.1	Reaktortypen und Kraftwerkskonzepte.....	87
6.2.2	Kernkraftwerke im Wettbewerb.....	88
6.3	<b>Konventionelle Dampfkraftwerke</b> .....	<b>89</b>
6.3.1	Wirkungsgraddefinitionen (siehe Blatt 51).....	89
6.3.2	Gasturbinenkraftwerke.....	89
6.4	<b>Blockheizkraftwerke (Kraft – Wärme – Kopplung)</b> .....	<b>89</b>
6.4.1	Prinzipaufbau.....	89
6.4.2	Energetische und ökologische Effektivität der Kraft – Wärme – Kopplung.....	90
6.5	<b>Wärmeübertragung und Wärmetransformation</b> .....	<b>91</b>
6.5.1	Wärmeübertrager zur Wärmerückgewinnung.....	91

# 1 Geschichtlicher Rückblick

Kulturgeschichte der Menschheit ca. 10.000 Jahre  
Erforschung des Kosmos bis zu Tiefen von  $12 \cdot 10^9$  Lichtjahre

## 1.1 Charakteristische Daten der Erde

Einzig bekannter Himmelskörper mit lebensfreundlicher Biosphäre:

- Mitteltemperatur ca.  $+15^\circ\text{C}$
- Schützendes Magnetfeld vor hochenergetischer kosmischer Strahlung

Erdkruste = Lithosphäre

- Durchschnittsdicke: 30 km
- Schützt durch geringe Wärmeleitfähigkeit vor darunter liegender flüssiger Asthenosphäre

Energieversorgung unseres Planeten:

$$\dot{q}_{Solar} = 1353 \pm 210 \left[ \frac{W}{m^2} \right] = \text{Solarkonstante}$$

$$\dot{q}_{Geo} = 62,5 \left[ \frac{mW}{m^2} \right]$$

Geographisch, saisonal sowie tageszeitlich große Temperaturschwankungen in der Atmosphäre von ca.  $-60^\circ\text{C}$  bis  $+80^\circ\text{C}$ .

Anpassung des Lebens an die Umwelt durch

- Erscheinungsform (Laub, Nadel)
- Körperbau (Verhältnis V/O)
- Wärmeschutz (Federn, Pelz, Höhlen)

## 1.2 Die Kulturellen Revolutionen der Menschheit

1. Weltrevolution vor ca. 2 Mio. Jahren:

Mensch manipuliert Umwelt durch Intelligenz, Sprache und Werkzeuge

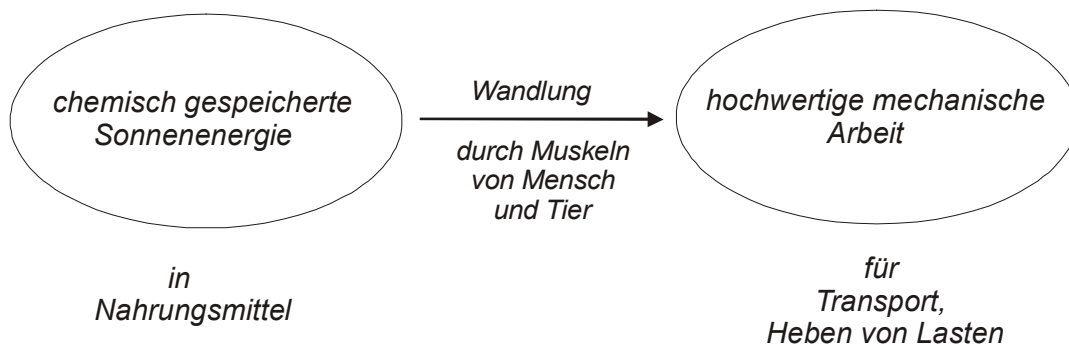
Nutzung des Feuers vor 1,7 Mio. Jahren

- Wärmung an kalten Tagen und Nächten
- Schutz vor wilden Tieren
- Nahrungszubereitung
- Brennen von Keramik (Nutzgefäße, Plastiken)

## 2. Kulturelle Revolution (20000-10000 v. Chr.) = neolithische Revolution

Sesshaftwerden des Menschen

Energiewirtschaftliche Zielsetzung seither :



= Ursache vieler Kriege: Erbeutung menschlicher Muskel- und Geisteskraft, Versklavung

Der Bedarf wuchs und wächst bis heute.

Dauerleistung Mensch: Akkordarbeit 98 W  
Tagelohnarbeit 59 W

4000 v. Chr.	Nutzung der Windenergie durch Segelschiffe
3000 v. Chr.	Erfindung der Wind- und Wasserräder zum Wasserschöpfen, Mahlen, Sägen und Hämmern
2000 v. Chr.	Beginn der Bronzezeit (hohe Temperaturen)
1769	3. kulturelle Revolution (Industrielle Revolution) Dampfturbine von James Watt
1824	Sadi Carnot begründet die Thermodynamik
1825-26	Erste Gasanstalten in Hannover, Dresden und Berlin
1830	Verwendung des Abdampfes der Dampfmaschinen in Zuckerfabriken zur ein- und mehrstufigen Eindampfung von Zuckerlösungen
1866	Entdeckung des dynamo-elektrischen Prinzips: Ersatz der Riemenantriebe und Transmissionswelle durch Generatoren, Kabel, Transformatoren und elektrische Motoren
1882	erste Elektrizitätswerke in Stuttgart und Berlin
1884	erste Dampfturbine in England
1910	erste Gasturbine

### 1.3 Entwicklung der Energiewirtschaft in Deutschland

Um 1900	Gründung von AG's: Gaswerke, Gasnetze, vorwiegend Wasserkraft – E – Werke, E – Netze Verlegung von Leitungen für E – Transport in öffentlichen Verkehrsraum (unter Straßen, Plätzen) → Verträge mit Stadtverwaltungen über Wegerechte Gegenleistung: Ertragsanteile
Präzedenzfall 1886:	Konzessionsvertrag zwischen „Berliner Elektrizitätswerke AG“ und dem Magistrat der Stadt Berlin Ausbau der Ortsnetze zur Vergleichmäßigung der Leistungsinanspruchnahme
1882	Gleichstromübertragung über 57 km Distanz $U = 1,5 - 2 \text{ kV}$ ; $P = 1,1 \text{ kW}$ $\eta_{\text{Leistung}} = 0,22$ (von Miesbach nach München)
1891	Drehstromübertragung über 178 km Distanz $U = 15 \text{ kV}$ ; $P = 220 \text{ kW}$ (Lauffen nach Frankfurt)

Zuerst Gleichstrom – Ortsnetze

Verfechter: Edison, Werner von Siemens

Vorteilhaft bei Einsatz großer elektrischer Akkumulatoren

3 – Phasen – Wechselstromnetze (Drehstromnetze) setzen sich durch.

Verfechter: George Westinghouse, Nikola Tesla

Vorteile:

- bessere Transformierbarkeit
- verlustärmere Übertragung des höher gespannten Stromes

Gleichzeitig ab 1900 rasante Entwicklung von Dampfkraftwerken  
Erste Fernwärmenetze in Hamburg und Dresden

- Ersatz der Kolbendampfmaschine durch Dampfturbine
- Ersatz des Großwasserraumkessels durch Wasserrohrkessel
- Höhere Drücke und Temperaturen

1915 erstes Großkraftwerk Zschornowitz beim Tagebau Golpe  
 $P_{\text{el}} = 128 \text{ MW}$ ; 64 Dampfkessel; 8 Dampfturbinen, Fernleitungen u.a. 110 kV nach Berlin  
ebenso: Großkraftwerke der RWE im Kölner Braunkohlerevier

1930 erstes Pumpspeicher – Kraftwerk in Niederwartha zur Spitzenlastherzeugung (bis heute in Betrieb)  
8 km Kabelverbindung für Dresden

Seit Entstehung großer Erzeugungsleistungen schuf man für die Energieversorgung eine eigene gesetzliche Grundlage:

1935      Energiewirtschaftsgesetz

Ziel: Volkswirtschaftliche Sicherung der Energieversorgung

- Zusammenwirken von Wirtschaft und öffentlichen Gebietskörperschaften
- Sicherung des öffentlichen Einflusses auf die Energieversorgung
- Verhinderung der schädlichen Auswirkungen des Wettbewerbs

bis heute: gemischt – wirtschaftliche Unternehmen sowie private, staatl. bzw. kommunale Eigentumsformen, zunehmend privatisiert seit 1998

### **Marktstruktur Elektrizitätserzeugung (BRD 1994):**

1000 EVU's (Energie – Versorgungs – Unternehmen)

+ 500 E – Kraftwerke zur Eigenversorgung von Industriebetrieben

+ Werke der Deutschen Bahn AG

Verbrauch / Einwohner: ca. 6390 kWh

$P_{\text{ges}} = 441 \text{ TWh}$ , davon 86% von öffentlichen EVU's, 14% von industriellen Kraftwerken einschließlich DB

### **Marktsituation Gaswirtschaft (BRD 1994):**

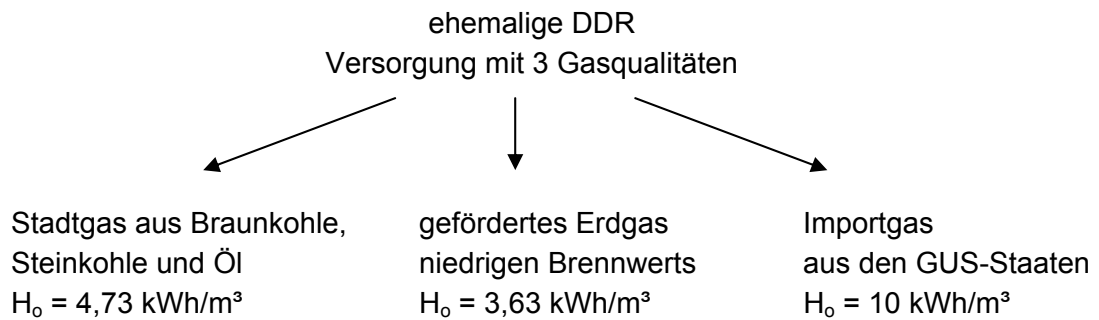
800 Unternehmen, überregional, regional und lokal sowie Import- und Fördergesellschaften

Umsatz 1990:  $70 \cdot 10^9 \frac{\text{m}^3}{\text{a}}$  stetig steigend

### **Marktstruktur ehemalige DDR**

$P_{\text{el } 1989} = 119 \text{ TWh}$

Verbrauch / Einwohner: 7348 kWh



Besonderheit bis 1989: 24% des Wohnungsbestandes durch Fernheizung versorgt (1,66 Mio. Wohnungen); Vergleich BRD: 8%

von 1991 – 1996 umfangreiches Fernwärme – Sanierungsprogramm der neuen Bundesländer

heute: modernste 3. Heizwerkgeneration mit Gas- und Dampfturbinenanlagen

Braunkohle reduziert auf wenige Kraftwerke, fast ausschließlich nur noch zur Grundlaststromerzeugung in Großkraftwerken

## 2 Energieformen und Energieträger

### 2.1 Energieformen

Mechanische Energie (potentielle und kinetische) und elektrische Energie bestehen zu 100% aus Exergie.

Thermische Energie (Wärme, innere Energie, Enthalpie) lässt sich maximal mit dem Carnotfaktor  $\eta_C = 1 - \frac{T_u}{T}$  in mechanische Arbeit wandeln.

weitere Energieformen:

elektromagnetische Energie

Strahlungsenergie

Chemische Energie

Kernenergie

Thermische Energie bei Umgebungstemperatur tritt bei energetischen Vorgängen immer als letzte Umwandlungsstufe auf.



### 2.1.1 Klassifizierung von Energie nach Verarbeitungsstufen

1. Primärenergie = Rohenergie  
z.B. Rohöl  
wird zur nutzbaren Umwandlung gewonnen
2. Sekundärenergie = veredelte Energie = Gebrauchsenergie  
z.B. Heizöl (Zwischenprodukt)  
wird auch nicht direkt genutzt
3. Tertiärenergie = Nutzenergie  
z.B. Wärme (Heizung)

d.h.  $\exists$  i.d.R. mindestens 2 Umwandlungsstufen, je mit Verlusten und Emissionen verbunden

### 2.1.2 Technische Einheiten der Energiewirtschaft

$$1 \text{ EJ} = 10^{18} \text{ J} = 1 \text{ Exa-Joule}$$

$$1 \text{ fJ} = 10^{-15} \text{ J} = 1 \text{ Femto-Joule}$$

gebräuchliche kalorische Konstanten :

$$1 \text{ kg SKE} = 29308 \text{ kJ/kg} \hat{=} 7000 \text{ kcal/kg}$$

$$1 \text{ kg RÖE} = 41868 \text{ kJ/kg} \hat{=} 10000 \text{ kcal/kg}$$

$$1 \text{ b} = 1 \text{ barrel} = 159 \text{ Liter}$$

$$1 \text{ t Rohöl} = 7,3 \text{ b (barrel)}$$

$$1 \text{ Btu} = 1 \text{ Britisch thermal unit} = 1,055 \text{ kJ}$$

$$1 \text{ Btu/h} = 0,2931 \text{ W}$$

### 2.1.3 Wirkungsgrade von Energiewandlungsanlagen

$$\begin{array}{ll} \text{Primärenergieverbrauch BRD 1994:} & 14 \text{ EJ} \\ \text{Endenergieverbrauch BRD 1994:} & 9 \text{ EJ} \\ \rightarrow \eta_{\text{mittel}} = & 64\% \end{array}$$

Achtung bei Statistiken: Welche Verarbeitungsstufe wird dargestellt!?

Zusätzlich kann noch die Arbeitsfähigkeit (Exergie) nach Umwandlung bewertet werden.

$\rightarrow$  Exergetischer Wirkungsgrad  $\eta_{\text{ex}}$

z.B. großer Elektromotor:  $0,9 \leq \eta = \eta_{\text{ex}} \leq 0,96$

jedoch BHKW:  $\eta = 0,8 - 0,95$   
 $\eta_{\text{ex}} = 0,32 - 0,6$

Exergie der Wärme  $\ll 1$

## 2.2 Energieträger

Einteilung nach der Erschöpfbarkeit

Vermögensenergie

= gespeicherte Energie,  
die nur einmal verbraucht  
werden kann (und dann  
erschöpft ist)

Einkommensenergie

= Energie, die sich in den  
für Menschen relevanten  
Zeiträumen nicht erschöpft

### 2.2.1 Vermögensenergie

#### 2.2.1.1 Fossile Brennstoffe

Feste	flüssige	gasförmige
Torf Braunkohle Steinkohle	Erdöl	Erdgas

Ausgangsstoff fester Brennstoffe: vorwiegend Holz mit Hauptbestandteil Zellulose ( $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ )

Mit wachsendem Alter nimmt der Kohlenstoff c zu, der Wasserstoffanteil h nimmt ab

vergl. Vorlesung THD III  $c + h + o + s + n + w + a = 1$   
 Näherungsgleichung für  $H_u$  siehe THD III

Brennwert = oberer Heizwert  $H_o = H_u + \mu_w \cdot r_o$

Masseanteil des Wassers im Abgas

Kondensationsenthalpie des Wasserdampfs

$$r_o = 2441,5 \frac{kJ}{kg} \text{ bei } t = 25^\circ C$$

Heizwert = unterer Heizwert  $H_u$

Für feste Brennstoffe gilt näherungsweise nach Boie:

$$H_u = 34,8 c + 93,9 h + 10,5 s + 6,3 n - 10,8 o - 2,4 w$$

Für gasförmige Brennstoffe:

$$H_o = 12,62 \cdot CO + 12,75 \cdot H_2 + 39,81 \cdot CH_4 + 63,43 \cdot C_m H_n + 25,46 \cdot H_2 S$$

$$H_u = 12,62 \cdot CO + 10,78 \cdot H_2 + 35,87 \cdot CH_4 + 59,50 \cdot C_m H_n + 23,37 \cdot H_2 S$$

Vorräte = Reserven

Reserven stiegen in den letzten 30 Jahren an wegen

- fortschreitender Erkundung
- Verbesserung der Fördertechnologie, insbesondere der Unterwasserförderung von Erdgas und Erdöl (Offshore-Technik)

Entdeckungen von ökonomisch förderbaren Erdgas- und Erdölreserven größer als der Verbrauch

Vorräte einschließlich noch nicht ökonomisch förderbarer bekannter Vorkommen + Schätzungen  $\approx 12$  Pkg SKE =  $12 \cdot 10^5$  kg SKE = 12.000 Mrd t SKE

### **Aufgabe:**

Wie groß ist die Summe sicherer fossiler Weltenergiesreserven R im Jahre 1994 angegeben in EJ und Mrd. SKE?

Welche Anteile haben jeweils Kohle, Erdöl und Erdgas?

**Lösung:**  $R_{welt} = 566.000 \cdot 10^6 t SKE + 135.940 \cdot 10^6 t RÖE + 146.000 \cdot 10^9 m^3 Erdgas$

$$R_{welt} = 566 \cdot 10^9 \cdot 10^3 \cdot 29308 \left[ \frac{kJ \cdot kg}{kg} \right] + 135940 \cdot 10^9 \cdot 41868 \left[ \frac{kJ \cdot kg}{kg} \right]$$

$$+ 146000 \cdot 10^9 \cdot 31736 \left[ \frac{kJ \cdot m^3}{m^3} \right]$$

$$R_{welt} = 1,6588 \cdot 10^{19} + 5,6915 \cdot 10^{18} + 4,6335 \cdot 10^{18} [kJ]$$

$$R_{welt} = 2,6913 \cdot 10^{19} kJ \approx 2,7 \cdot 10^{22} J$$

$$R_{\text{Welt}} = 27000 \text{ EJ}$$

$$1 \text{ kJ} = \frac{1}{29308} \text{ kg SKE}$$

$$R_{\text{Welt}} = \frac{2,6913 \cdot 10^{19}}{29308} \text{ kg SKE} = 9,1828 \cdot 10^{14} \text{ kg SKE}$$

$$R_{\text{Welt}} = 9,2 \cdot 10^{11} \text{ t SKE}$$

$$R_{\text{Welt}} = 920 \text{ Mrd t SKE}$$

$$\frac{R_{\text{Kohle}}}{R_{\text{Welt}}} = \frac{1,6588 \cdot 10^{19}}{2,6913 \cdot 10^{19}} = 61,64\%$$

$$\frac{R_{\text{Erdgas}}}{R_{\text{Welt}}} = \frac{4,6335 \cdot 10^{18}}{2,6913 \cdot 10^{19}} = 17,22\%$$

$$\frac{R_{\text{Öl}}}{R_{\text{Welt}}} = \frac{5,6915 \cdot 10^{18}}{2,6913 \cdot 10^{19}} = 21,14\%$$

$$\frac{\text{sichere fossile Vorräte Welt}}{\text{geschätzte Vorräte Welt}} = \frac{920 \text{ Mrd t SKE}}{12000 \text{ Mrd t SKE}} \approx 7,7\%$$

oder  $\Sigma$  aller Vorräte ist 13 · größer als die sicheren abbauwürdigen Vorräte.

### 2.2.1.2 Kernbrennstoffe

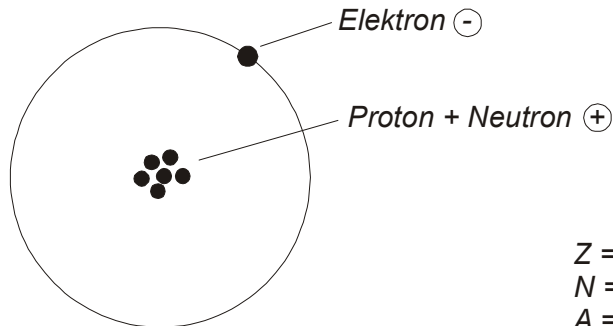
Deren Nutzung erfolgt in Kernkraftwerken wie bei fossilen Brennstoffen über einen Dampfkraftprozess.

Primärenergie  $\xrightarrow{\text{Wandlung}}$  Sekundärenergie

Fossile Brennstoffe  $\xrightarrow{\text{chem. Reaktion}}$  Wärmeenergie  
 Veränderung der Elektronenhülle

Kernbrennstoffe  $\xrightarrow{\text{Kernreaktion}}$  Wärmeenergie  
 Veränderung der Atomkerne

## Kernphysikalische Grundlage:



$Z = \text{Zahl der Protonen}$   
 $N = \text{Zahl der Neutronen}$   
 $A = N+Z = \text{Massenzahl}$

Einstein'sche Beziehung:  $E = mc^2$  (1)

Aufgrund der besonderen Struktur der Atomkerne ist ein geringer Bruchteil der Masse bei Spaltung in Energie wandelbar:

Kernspaltung:  $E \approx \frac{m}{1000} \cdot c^2$

Die Bindung zwischen den Nukleonen (Protonen, Neutronen) erfolgt über Kernkräfte.

$m_{\text{Prot}} \approx m_{\text{Neutron}} \approx 1,67 \cdot 10^{-24} \text{ g}$  (2)

(2) in (1):  $E_{\text{neutron}} \approx 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ J}$

(3)  $1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$   
 $\rightarrow E_{\text{Nukleon}} = 931,5 \text{ MeV}$

Merkposten:  $E_{\text{Nukleon}} \approx 1000 \text{ MeV}$

(4)  $1 \text{ MeV} = \frac{E_{\text{Nukleon}}}{1000}$

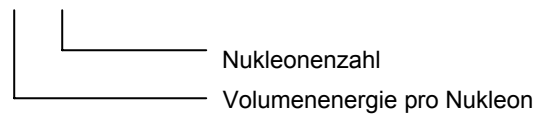
Tröpfchenmodell von Karl Friedrich von Weizsäcker:

Vergleich der Kernbindungskräfte mit den van-der-Waals-Kräften

durch Kernbindungsenergie  $E_B$ :  $E_B = E_V - E_O - E_C - E_A + E_P$  (5)

$E_V$  = Volumenenergie

(6)  $E_V = a_V \cdot A$  ( $\hat{=}$  van-der-Waalschen Bindungsenergie)



$E_O$  = Oberflächenenergie

(7)  $E_O = a_O \cdot A^{\frac{2}{3}}$

$E_C$  = elektrostatische Coulombenergie

(8)  $E_C = a_C \cdot \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}}$

$E_A$  = Asymmetrieenergie

(9)  $E_A = a_A \cdot \frac{(N-Z)^2}{A}$

$E_P$  = Paarenergie

(paarweises Aufheben des Spins = besonders gute Bindung)

(10a)  $E_P = a_P \cdot A^{\frac{3}{4}}$  für Z und N gerade (besonders feste Bindung)

(10b)  $E_P = 0$  für A ungerade

(10c)  $E_P = -a_P \cdot A^{\frac{3}{4}}$  für Z und N ungerade

$a_V = 15,75 \text{ MeV}$

$a_O = 17,80 \text{ MeV}$

$a_C = 0,710 \text{ MeV}$

$a_A = 23,69 \text{ MeV}$

$a_P = 33,5 \text{ MeV}$

(10) (9) (8) (7) (6) in (5)

(11)  $E_B = a_V A - a_O A^{\frac{2}{3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} - a_A \frac{(N-Z)^2}{A} + E_P$

Die Auswertung ergibt:

- Stabile Kerne haben mit zunehmenden Atomgewicht mehr Neutronen eingebaut
- Die Coulombenergie reduziert die Bindungsenergie ( $\sim Z^2$ )  
 → Schwere Kerne (hohe Protonenzahl) sind stabiler wenn  $N > Z$

vollständige formale Schreibweise eines Isotops:

$${}^A_Z X_N \quad (A = \text{Massezahl}, Z = \text{Kernladungszahl}, N = A - Z)$$

Beispiel: Helium  ${}^4_2\text{He}_2$

Häufig verkürzt:  ${}^{235}\text{U}$  oder U235

Ab einer Kernladungszahl von  $Z = 90 - 100$  wird die Coulombenergie  $E_C$  so groß, dass die Kerne zerplatzen, sie spalten sich.

Ist die Kernladungszahl  $Z$  oder die Atommassezahl  $A$  zu hoch, erfolgt spontane Kernspaltung z.B. bei künstlichen Elementen (Transurane).

Bei kleineren Massezahlen  $A$  kann Spaltung durch Hinzugabe von Energie erreicht werden, z.B. durch Neutronenbeschuss.

Durch Neutron: +8 MeV  
+ kinetische Energie des Neutrons

$E_B$  steigt bis  $A = 60$

$E_B$  fällt ab  $A = 80$  (wegen Abstoßungsenergie positiv geladener Protonen)

Beispiele:

Isotop	${}^2_1\text{H}$	${}^4_2\text{He}$	${}^{201}_{80}\text{Hg}$	${}^{235}_{92}\text{U}$
$E_B$ in MeV	1,12	7,10	7,9	7,6

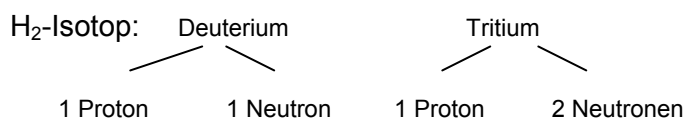
Fusion  
(Kernverschmelzung)

$\frac{\Delta E_B}{\text{Nukleon}} \approx 10 \frac{\Delta E_B}{\text{Nukleon}}$

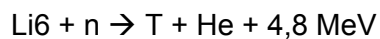
Fission  
(Spaltung)

Fusion:  ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He}$       Massendefekt  $\Delta m = \frac{E_B}{c^2}$

Technische Fusion:  $\text{D} + \text{T} = \text{He} + \text{n} + 17,6 \text{ MeV}$



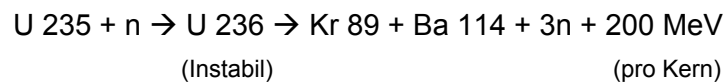
parallel: Brutprozess zur Erzeugung von Tritium



Die unkontrollierte Fusion wird beherrscht seit 1950. Die kontrollierte Fusion wird noch lange nicht beherrscht.

**Technische Kernspaltung:** wichtigstes spaltbares Isotop: U 235

$$\text{Hierbei: } \Delta E_B = 0,8 \frac{\text{MeV}}{\text{Nukleon}}$$



Massezahlen der Spaltprodukte meist zwischen 80 und 160

Problematisch: radioaktive Isotope z.B. Strontium 90 mit Halbwertszeit von 28 Jahren

Verwertbare Spaltungsenergie von U 235:  $\Delta E_B = 192 \text{ MeV}$

Verwertbare Spaltungsenergie von Pu 239:  $\Delta E_B = 198,5 \text{ MeV}$

### Aufgabe 1:

Wie viel Energie kann bei vollständiger Spaltung von 1 g Uran frei werden? Angaben in J und in MWd, wobei  $\Delta E_B = 200 \text{ MeV}$  angenommen werden soll.

### Lösung:

$$M_{\text{Uran}} = 235 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$1\text{g}_{\text{Uran}} = \frac{6,022 \cdot 10^{23}}{235} \frac{\text{mol}}{\text{mol}} \cdot \text{Moleküle (Kerne)}$$

$$1\text{g}_{\text{Uran}} = 25,6 \cdot 10^{20} \text{ Moleküle (Kerne)}$$

$$E_B \text{ 1g Uran} = 25,6 \cdot 10^{20} \cdot 200 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Ws}$$

$$\begin{aligned} E_B \text{ 1g Uran} &= 81,92 \cdot 10^9 \text{ J} = 8,192 \cdot 10^{10} \text{ Ws} \\ &= 2,276 \cdot 10^7 \text{ Wh} \\ &= 9,482 \cdot 10^5 \text{ Wd} \\ &= 0,95 \text{ MWd} \end{aligned}$$



$$\text{Ergebnis: } E_B \approx 1 \frac{MWd}{g_{Uran}}$$

**Aufgabe 2:**

a) Wie groß ist der Masseverlust bei den Reaktionsprodukten eines mit U 235 arbeitenden Reaktors in einem Jahr bei einer thermischen Kraftwerksleistung von 1000 MW? Angabe auch in kWh!

**Lösung:**

$$\begin{aligned} W &= P \cdot t = 1000 \text{ MW} \cdot a = 1000 \text{ MW} \cdot 365 \text{ d} \\ &= 3,65 \cdot 10^5 \text{ MWd} \\ &= 365 \text{ kg Uran} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Umrechnung in kWh: } 1000 \text{ MW} \cdot a &= 10^6 \text{ kW} \cdot 365 \text{ d} \cdot 24 \text{ h} \\ W &= 8,76 \text{ Mrd kWh} \end{aligned}$$

b) Wie viel Tonnen Steinkohle muss man verbrennen, um die gleiche thermische Leistung 1 Jahr lang bereitzustellen?

**Lösung:**

$$\begin{aligned} H_{U \text{ Steinkohle}} &= 29,3 \frac{MJ}{kg} \\ m &= \frac{W}{H_U} = \frac{8,76 \cdot 10^{12} \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} \cdot kg}{29,3 \cdot 10^6 \text{ J}} \end{aligned}$$

$$m = 1,08 \cdot 10^9 \text{ kg}$$

$$m \approx 1,1 \text{ Mio t Steinkohle}$$

c) Welcher Faktor ergibt sich als Verhältnis der Energiedichte von U 235 und Steinkohle?

**Lösung:**

$$\frac{m_{\text{Steinkohle}}}{m_{\text{Uran}}} = \frac{1,1 \cdot 10^9 \text{ kg}}{365 \text{ kg}} = 2,95 \cdot 10^6$$

$$\text{spezifische Energiedichte } \Delta e = \frac{\Delta E}{m}$$

$$\frac{\Delta e_{Uran}}{\Delta e_{Steinkohle}} = \frac{m_{Steinkohle}}{m_{Uran}} = 2,95 \cdot 10^6$$

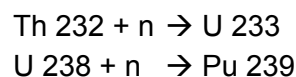
Wichtig: Zahl der emittierten Neutronen kann variiert werden (geregelter Kettenreaktion zwischen 2-3)

#### 1) Kernspaltung

Starke Spaltstoffe U 233, U 235, Pu 239 werden durch das hinzukommende Neutron so stark aufgeheizt, dass sie sich spalten.

#### 2) Neutroneneinfang

Schwache Spaltstoffe Th 232, U 238 gehen durch Neutroneneinfang in starke Spaltstoffe über (Brütertechnologie)



#### 3) Elastische Streuung

Ein Neutron verliert durch elastische Stöße mit Kernen kinetische Energie und wird abgebremst.

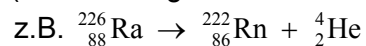
= Moderatoren wie H<sub>2</sub>O, D<sub>2</sub>O, Graphit

#### 4) Inelastische Streuung

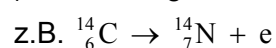
$\gamma$ - Reaktion: Die übertragene Anregungsenergie wird in Form von  $\gamma$ -Quanten (Photonen) abgestrahlt, falls die Energie des Neutrons nicht zur Spaltung ausreicht. Übergang in stabile Kerne durch  $\beta$ -Emission.

Radioaktive Zerfälle = Aktivität der Spaltprodukte

$\alpha$ -Zerfall (Aussendung eines Heliumkerns):



$\beta$ -Zerfall (Aussendung eines Elektrons):



$\gamma$ -Zerfall (Aussendung eines  $\gamma$ -Quants):

meist Folge von  $\alpha$  oder  $\beta$ -Zerfällen

Einzig spaltbares Naturvorkommen: U 235

Natürliche Vorkommen:	U 235	0,7%
	U 238	99,3%

Für Leichtwasserreaktoren ist die Anreicherung auf 3% U 235 notwendig.  
Gewinnbare Reserven Natururan ca.  $4,5 \cdot 10^6$  t zu Abbaukosten von 130 \$/kg.  
→ statische Reichweite von ca. 70 Jahren

spekulative Ressourcen:  $9 \cdot 10^6$  t

Deutschland: von 1946 - 1980 Abbau von 230.000 t im Erzgebirge.  
Reserven mit Förderkosten < 130 \$/kg nur 3000 t

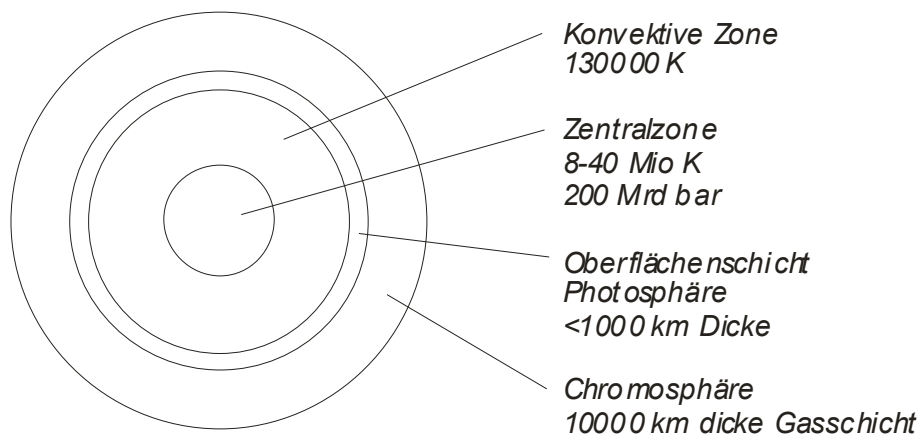
Ab 250 \$/kg soll Uran aus Meerwasser gewonnen werden können ( $U_3O_8$ ). Reserve:  
 $4,2 \cdot 10^9$  t Uran

## 2.2.2 Einkommensenergie (regenerative Energie)

### 2.2.2.1 Sonnenenergie

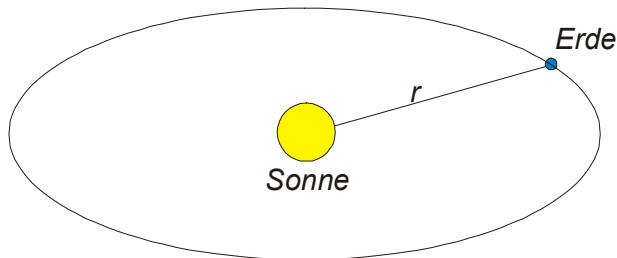
Sonne: griechisch: helios; lateinisch: sol

- $D = 1,3$  Mio km
- $M = 2 \cdot 10^{30}$  kg
- $V_{\text{Sonne}} = 333.000 \cdot V_{\text{Erde}}$
- Zusammensetzung: 75%  $H_2$  + 23% He + 2% schwerere Elemente
- Strahlt seit 4,5 Mrd. Jahren und voraussichtlich weitere 4 Mrd. Jahre



Die Gesamtenergieabstrahlung entspricht in etwa einem schwarzen Körper mit einer Temperatur von  $T = 5777 \text{ K}$ .

Die Strahlung beträgt  $P_{\text{Sonne}} = 4 \cdot 10^{26} \text{ W}$



$r_{\text{mittel}} = 149,5 \text{ Mio. km} \pm 1,7\%$

Die flächenspezifische Energieabstrahlung der Sonnenoberfläche beträgt  $63 \text{ MW/m}^2$ .

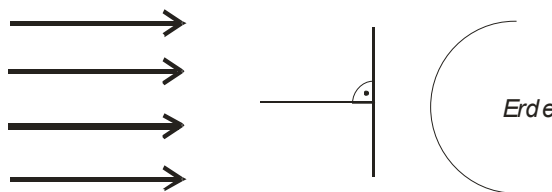
Aufteilung der  
Abstrahlleistung  
in Spektralbereiche

{ 50% Infrarotspektralbereich  
41% sichtbares Licht  
9% UV-Strahlung

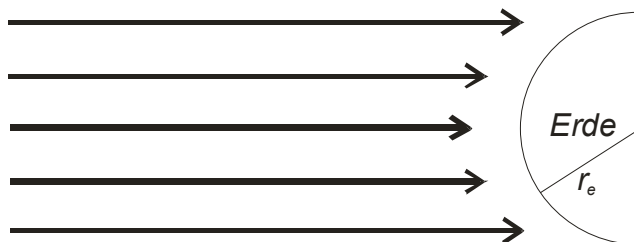
extraterrestrische Solarkonstante:  $\dot{g}_S = 1,353 \pm 0,021 \text{ kW/m}^2 \pm 3,4\%$  (1)

Strahlungsschwankungen

Ellipseneinfluss



+ 3,4% am 3. Januar  
- 3,4% am 4. Juli



Projektionsfläche  $r_E^2 \cdot \pi$

mittlere Strahlungsenergie: (2)  $\dot{Q}_S = \dot{g}_S \cdot \pi \cdot r_E^2 = 1,73 \cdot 10^8 \text{ GW}$

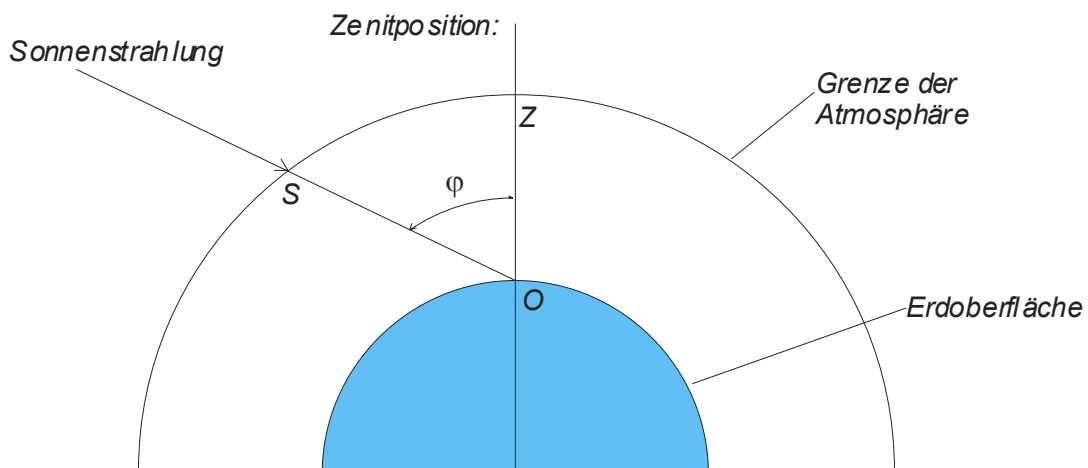
eingestrahelte Energie pro Jahr: (3)  $W_S = 1,52 \cdot 10^{12} \frac{\text{GWh}}{\text{a}}$

Die Einstrahlung auf die Erdoberfläche wird stark beeinflusst durch

- die Jahreszeit
- die Witterungsbedingungen
- die Tageszeit
- die geographische Breite

Der Strahlungsenergiestrom teilt sich wie folgt auf:

- 31,0% Reflektion ins Weltall
- 17,4% Absorption durch die Luft
- 32,7% Zufuhr als thermische Energie im Meer
- 14,3% Zufuhr als thermische Energie auf Festland
- 4,6% Biomasse



Abschwächung durch Atmosphäre:  
relative Luftmasse  $m$  (Air Mass AM)

$$(4) m = \frac{\overline{OS}}{\overline{OZ}} = \frac{\text{Weg der Strahlung durch die Atmosphäre}}{\text{Kürzester Weg der Strahlung durch die Atmosphäre (Zenitposition)}}$$

Definitionen: AM0 (air mass zero,  $\varphi=0$ ) - erdnahe Weltraum  
 AM1 ( $m=1$ );  $\varphi = 0^\circ$  - Äquator Meereshöhe  
 AM1,5 ( $m=1,5$ );  $\varphi = 41,5^\circ$   
 AM2 ( $m=2$ );  $\varphi = 60^\circ$   
 AM3 ( $m=3$ );  $\varphi = 70^\circ$

Die Globalstrahlung  $\dot{G}_0$  ist die Summe der auf eine horizontale Fläche der Erde auftreffenden Strahlung.

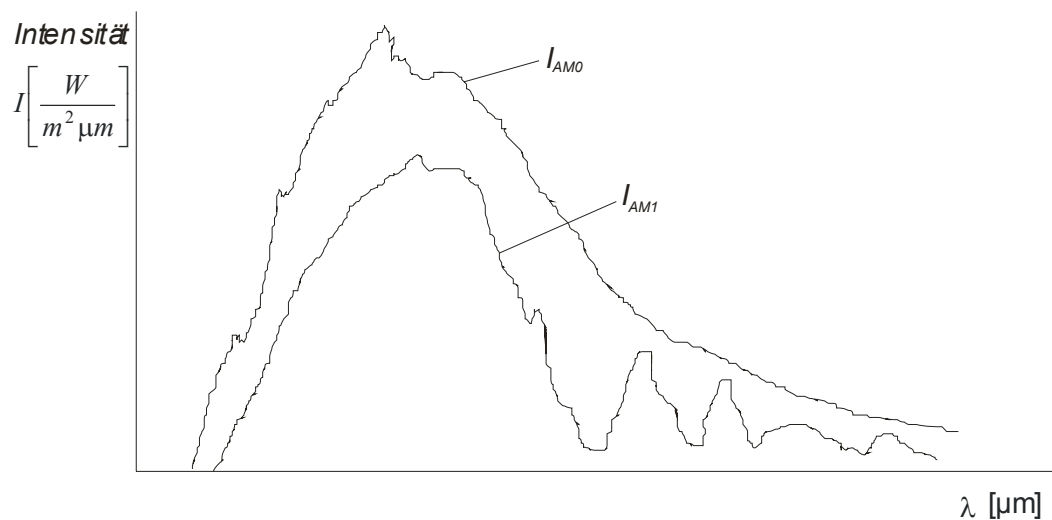
$$(5) \dot{G}_O = \dot{S}_O + \dot{H}_O$$

direkte Strahlung  $\dot{S}_O$  = ohne Richtungsänderung einfallende Strahlung

diffuse Strahlung  $\dot{H}_O$  = aus allen Richtungen infolge Streuung und Reflexion einfallende Strahlung

Sonnenspektrum:

Die Intensität der Strahlung wird durch die Atmosphäre stark geschwächt.



Qualitative Darstellung der Strahlungsintensität in Abhängigkeit der Wellenlänge  $\lambda$

$$\dot{g}_S = \int_0^{\infty} I_{AMO}(\lambda) d\lambda = 1,353 \frac{kW}{m^2} \quad \text{Solarkonstante (erdnaher Weltraum)}$$

$$\dot{g}_S = \int_0^{\infty} I_{AM1}(\lambda) d\lambda = 1,0 \frac{kW}{m^2} \quad \text{Äquator, klares Wetter, Sonne im Zenit}$$

Die direkte Strahlung ist in Deutschland witterungsbedingt stark abgeschwächt.

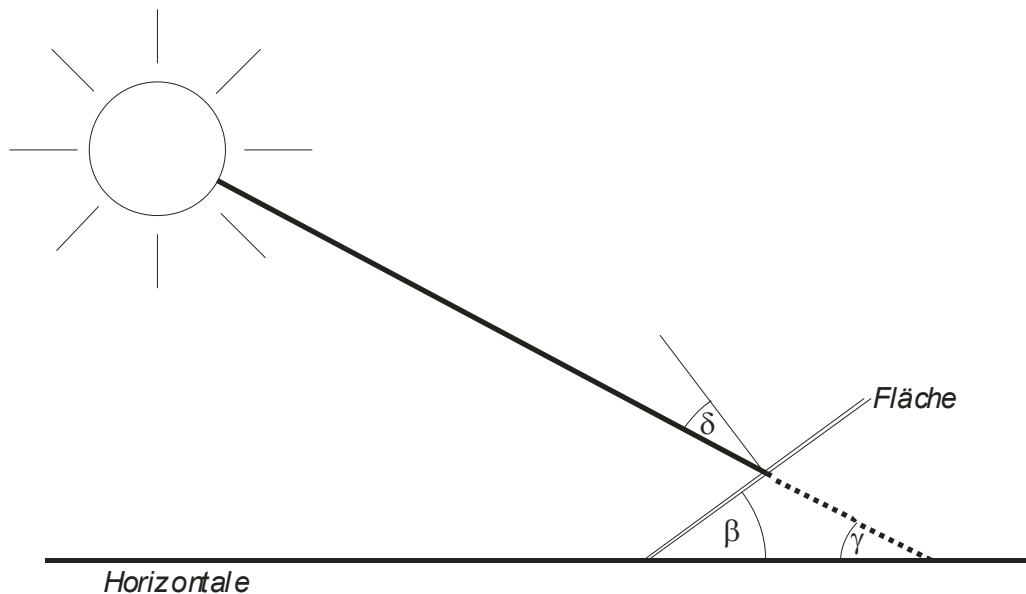
Eckwerte für Deutschland auf einer horizontalen Fläche:  $\dot{G}_O = 900 - 1200 \frac{kWh}{m^2 a}$

Sonnenscheindauer:  $1300 - 1900 \frac{h}{a}$

Jahresgang der Globalstrahlung am Beispiel Berlin (siehe Blatt 15)

- diffuser Strahlungsanteil > direkter Strahlungsanteil
- Jan. – März; Okt. – Dez. kritisch für Solarenergienutzung
- Die Zeitspanne April – Sept. liefert ca. 75% des Jahresenergieaufkommens.

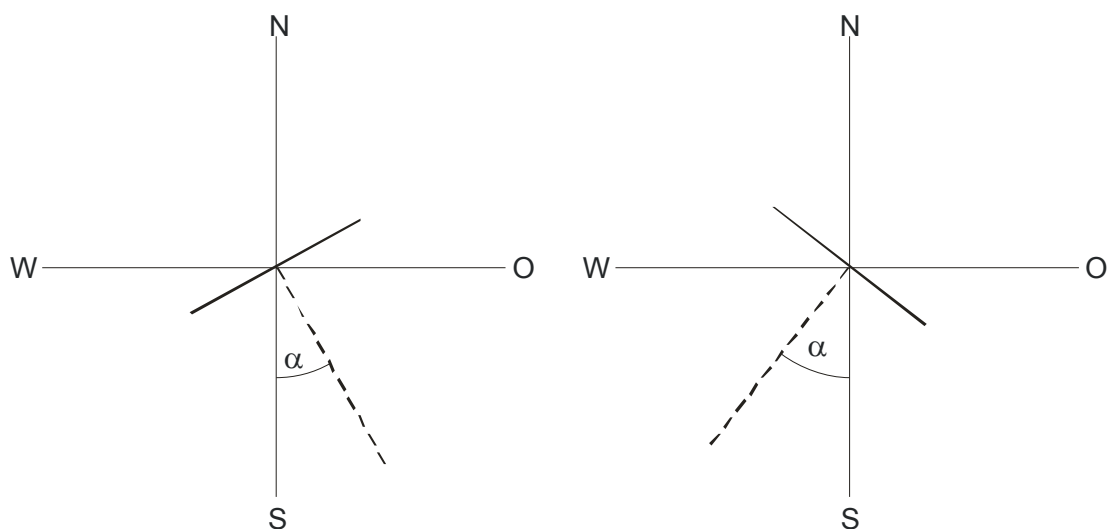
Bezugsgrößen für die Nutzung der Einstrahlung:



$\beta$  = Neigungswinkel der Fläche zur Horizontalen

$\gamma$  = Einfallswinkel der Sonne zur Horizontalen

$\delta$  = Einfallswinkel der Sonne zur Flächennormalen



$\alpha$  = Azimutwinkel = Abweichung der Flächennormalen von der Südrichtung

gute Bereiche mit geringer Einbuße vom Optimalwert am Beispiel Berlins:

Sommer:  $\beta = 50^\circ$ ;  $\alpha = \pm 90^\circ$

Winter:  $\beta = 30^\circ$

Bei Festmontage von Kollektorflächen ohne Nachführung hat man mit einem Neigungswinkel  $\beta = 30^\circ$  kaum Einbußen der Einstrahlung gegenüber Optimalwerten.

### 2.2.2.2 Wasserkraft

- Seit Jahrtausenden genutzt (Wasserräder)
- Liefert weltweit 6,3%, in Deutschland 4,7% des Primärenergieverbrauchs (1995)
- Hohe Wertigkeit (ca. 2fach von Rohkohle, Gas und Rohöl)
- Anteil an Welt-Elektroenergieerzeugung: 19,38% (1993) = 2376 TWh/a

Charakteristisch: Volllaststundenzahl  $t_v = 3474$  h/a = typischer Mittellastcharakter

Nachteil: relativ geringe Auslastung wegen schwankendem Wasserangebot (abhängig von Umgebungstemperatur und Niederschlägen)

Vorteil: meist nutzbares Speicherverhalten durch Ausnutzung eines Stauraums

Verfügbares Weltpotential = 9800 TWh/a, davon werden zur Zeit 24% genutzt.

Bestes Bsp.: Norwegen nutzt sein Wasserkraftpotential zu 83% und erzeugt 99,8% seiner Elektroenergieerzeugung mit Wasserkraft.

Reserven: Die größten Wasserkraftreserven befinden sich in Asien, Afrika und Südamerika

Prognose: In 2020 werden ca. 70% des Potentials genutzt.

Risiken: Flusskraftwerke verändern die vorhandenen Ökosysteme. Es entstehen Stauseen von einigen Tausend km<sup>2</sup>.  
Es gibt nahezu jährlich Staudammbrüche mit mehreren hundert Toten.

Physikalische Grundlagen:

$$(1) P_{id} = \dot{m} \cdot g \cdot H = \dot{V} \cdot \rho \cdot g \cdot H$$

$P_{TA}$  = abgebbare Leistung der Turbinenanlagen

$H$  = Fallhöhe



$$(2) \eta_{TA} = \text{Wirkungsgrad der Turbinenanlage} = \frac{P_{TA}}{P_{id}}$$

hydraulische Verluste:

- Reibungs- und Verwirbelungsverluste in Rohrleitungen  $h_{VR}$
- Austrittsgeschwindigkeit  $v_A$  im Auslauf der Turbinenanlagen

Fallhöhe  $H$  wird auf die Nutzfalhhöhe  $H_n$  reduziert:

$$(3) H_n = H - h_{VR} - \frac{v_a^2}{2g}$$

Turbinenverluste:

- Reibung und Verwirbelung zwischen Turbineneintrittsstutzen und Saugrohr (führt zu Verminderung der Fallhöhe)
- Mengenerluste durch Spalte zwischen Laufrad und Gehäuse
- Radseitenreibung durch Viskosität des Wassers zwischen Laufrad und Gehäuse
- Mechanische Verluste in Lagern
- Verluste in Nebenanlagen
- Verluste in Generatoren und Transformatoren so dass  $\eta_{TA} \leq 0,91$

Eine Pumpanlage erhält man bei Umkehr der Fließrichtung.

$$\text{Pumpenantriebsleistung } P_{PA} = \frac{\dot{V} \cdot \rho \cdot g \cdot H}{\eta_{PA}}$$


typische Pumpenwirkungsgrade:  $\eta_p$  ca. 0,85 – 0,92

typische erreichbare Pumpenanlagenwirkungsgrade:  $\eta_{PA} \leq 0,77$

### 2.2.2.3 Wind

= Relativbewegung der Luft gegenüber Erdoberfläche

Ursache: örtliche Luftdruckunterschiede + *Corioliskraft*  
d.h. für Luftmasse mit Geschwindigkeitskomponenten



vom Äquator zu den Polen    von den Polen zum Äquator  
Ablenkung nach Osten    Ablenkung nach Westen

$\sum$  Welt:  $3 \cdot 10^{15}$  kWh/a  $\hat{=}$  0,2% der Sonnenenergie

Anfänge der Nutzung: seit ca. 3000 Jahren

Europa: > 100.000 Windmühlen

USA: im 19. Jahrhundert wurden 6 Mio. vielblättrige Windturbinen gebaut  
 Meilensteine: 1942-1945 Smith-Putman-Anlage 1250 kW  
 1959-1968 Prof. U. Hütter 100 kW GFK-Glasfaser Konstruktion

Stand 2002: installierte Leistung weltweit: 20.000 MW  
 davon 70% in Europa  
 Europa: Deutschland 11000 Anlagen,  $\sum$  11.000 MW  
 (3,5% vom Stromverbrauch)

Für die Energieertragserwartung ist die lokale Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit maßgebend.

Typische statistische Mittelwerte:

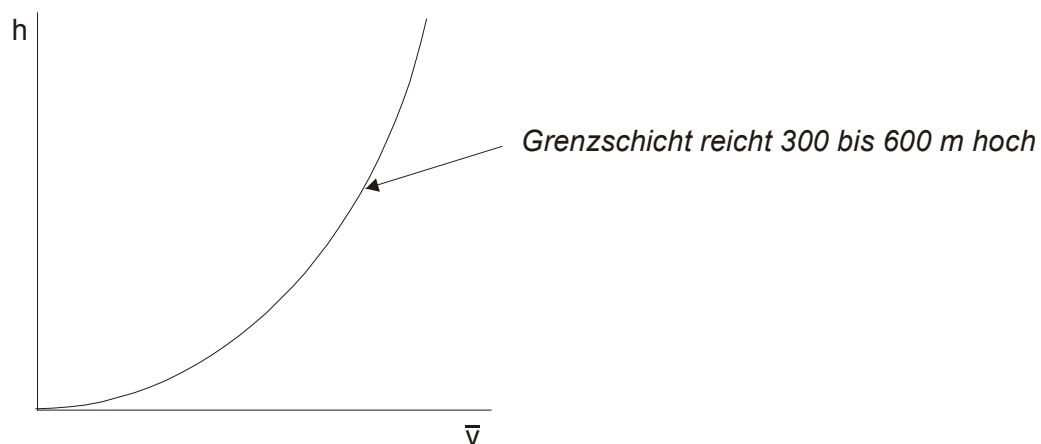
An der Meeresküste:  $5 < \bar{v} < 8 \frac{m}{s}$  in 10 m Höhe  $0 < v < 60 \frac{m}{s}$

mit  $\bar{v}$  = mittlere Windgeschwindigkeit  
 $v$  = momentane Windgeschwindigkeit

In Küstennähe und Gebirge:  $\bar{v} = 5 \frac{m}{s}$   $0 < v < 40 \frac{m}{s}$

In den Innenregionen großer Kontinente:  $\bar{v} \approx 3,6 \frac{m}{s}$

Mit steigendem Bodenabstand nimmt  $v$  zu.



Umrechnung von  $\bar{v}$  auf andere Höhen:

$$\bar{v}(h_2) = \bar{v}(h_1) \cdot \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^a$$

$\bar{v}(h_2)$  = mittlere Geschwindigkeit in Schätzhöhe

$\bar{v}(h_1)$  = mittlere Geschwindigkeit in Messhöhe

$a$  = Rauigkeitsexponent

$a = 0,14$  an der Küste

$a = 0,30$  im Wald und auf Hügeln

ab  $\bar{v} \geq 5 \frac{m}{s}$  gilt die Elektroenergieerzeugung aus Windkonvertern als lohnenswert.

Beispielstandorte:

Berlin:  $\bar{v} = 4,1 \frac{m}{s}$

Helgoland:  $\bar{v} = 7,2 \frac{m}{s}$

München:  $\bar{v} = 3,3 \frac{m}{s}$

Annäherung der Verteilungsdichte der Windgeschwindigkeiten nach RAYLEIGH – Gleichung:

$$h_R(c) = \frac{\pi}{2} \frac{v}{\bar{v}^2} e^{-\frac{\pi}{2} \left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2}$$

Problematisch sind Böen. Böen sind unregelmäßig relativ kurzzeitig auftretende Erhöhungen mit Geschwindigkeitssteigerung  $\Delta v \geq 8 \frac{m}{s}$  in 10 m Messhöhe innerhalb 2 – 3 s. Deren Abklingen geschieht langsamer nach 8 – 10 s. In 25 - 30 Jahren treten einige wenige Spitzenböen mit  $\Delta v = 45 - 50 \frac{m}{s}$  auf.

Während einer Lebensdauer einer Anlage muss mit einigen wenigen Spitzenböen von  $\Delta v = 45 - 50 \frac{m}{s}$  gerechnet werden.

Prognose: in 20 Jahren 10 - 15% der Elektroenergieerzeugung durch Wind möglich.

### Physikalische Grundlagen der Windenergiekonversion:

Annahme: eindimensionale reibungsfreie Strömung (drallfrei)

(1)  $E = \frac{m}{2} \cdot v^2$

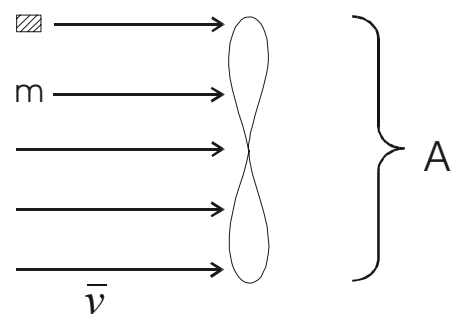
(2)  $m = \rho \cdot V$

(2) in (1): (3)  $E = \frac{1}{2} V \cdot \rho \cdot v^2$

(4) Leistung  $P_{Wind} = P_W = \dot{E} = \frac{1}{2} \dot{V} \cdot \rho \cdot v^2$

(5)  $\dot{V} = A \cdot v$

(5) in (4): (6)  $P_W = A \cdot \rho \cdot \frac{v^3}{2}$



wegen  $v \leq 0,1 \cdot c \rightarrow \rho_{Luft} = \text{const.}$

→ Kontinuitätsgleichung inkompressibler Strömung

$$(7) \dot{m} = \dot{V} \cdot \rho = A_1 \cdot v_1 \cdot \rho = A_2 \cdot v_2 \cdot \rho = \text{const.}$$

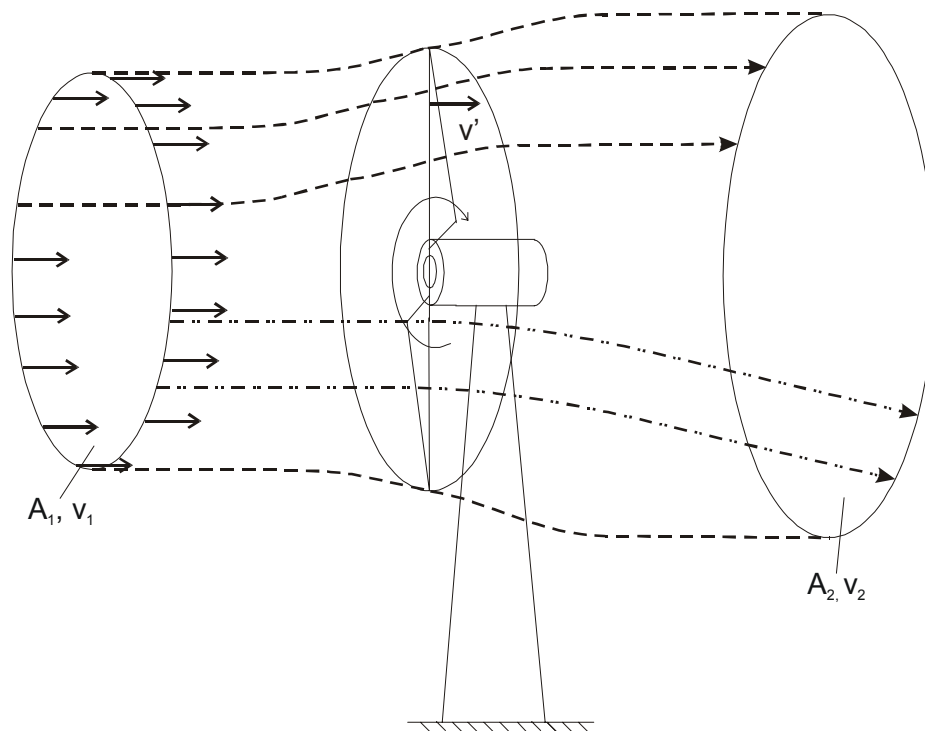
$c$  = Schallgeschwindigkeit

$A_1$  = Fläche der Stromröhre vor der Windkraftanlage

$A_2$  = Fläche der Stromröhre nach der Windkraftanlage

$v_1$  = Luftgeschwindigkeit vor der Windkraftanlage

$v_2$  = Luftgeschwindigkeit nach der Windkraftanlage



$$(8) P_{\text{theor.}} = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \rho \cdot A_1 \cdot v_1 \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$

Schubkraft  $F$  auf das Windrad: (Impulssatz)

$$(9) \quad F = \dot{m} \cdot (v_1 - v_2)$$

mit  $v'$  = Geschwindigkeit in der Strömungsbahn des Rotors

$$(10) \quad P_{\text{theor.}} = F \cdot v'$$

$$(9) \text{ in } (10): (11) \quad P = \dot{m} \cdot (v_1 - v_2) \cdot v'$$

$$(8) = (10): (12) \quad \frac{1}{2} \dot{m} \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \dot{m} \cdot (v_1 - v_2) \cdot v'$$

$$\frac{1}{2} (v_1 + v_2)(v_1 - v_2) = (v_1 - v_2) \cdot v'$$

$$v' = \frac{1}{2} (v_1 + v_2)$$

mit  $A$  = Rotorfläche gilt analog zu (8)

$$(13) \quad P_{theor.} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v' (v_1^2 - v_2^2)$$

$$(12) \text{ in } (13): (14) \quad P_{theor.} = \frac{1}{4} (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2) \cdot \rho \cdot A$$

Def. Leistungsbeiwert  $C_P = \frac{\text{dem Wind entzogene Leistung}}{\text{im Wind enthaltene Leistung}}$

$$(15) \quad C_P = \frac{P_{theor.}}{P_W} = \frac{\frac{1}{4} (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot A \cdot \rho}{\frac{1}{2} v_1^3 \cdot A \cdot \rho}$$

$$C_P = \frac{1}{2} \frac{(v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{v_1^3}$$

$$C_P = \frac{1}{2} \frac{v_1 + v_2}{v_1} \frac{v_1^2 - v_2^2}{v_1^2}$$

$$(15a) \quad C_P = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \cdot \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2}\right)$$

= BETZ'sches Gesetz einer frei umströmten Windturbine

= unabhängig vom technischen Umwandlungsprinzip

### Aufgabe:

Gibt es einen maximalen Leistungsbeiwert  $C_P$ ? Wie groß ist dieser?

### Lösung:

$$C_P = f\left(\frac{v_2}{v_1}\right); \text{ Substitution: } y = C_P; \quad x = \frac{v_2}{v_1}$$

$$y = \frac{1}{2} (1+x)(1-x^2)$$

$$y = \frac{1}{2} (1-x^2+x-x^3)$$

$$y' = -x + \frac{1}{2} - \frac{3}{2}x^2$$

$$\begin{aligned} \text{lokales Extremum: } & -\frac{3}{2}x^2 - x + \frac{1}{2} = 0 \\ & x^2 + \frac{2}{3}x + \frac{1}{9} = \frac{1}{3} + \frac{1}{9} \\ & \left(x + \frac{1}{3}\right)^2 = \frac{3}{9} + \frac{1}{9} \\ & x = -\frac{1}{3} \pm \sqrt{\frac{4}{9}} \\ & x_1 = \frac{1}{3} \\ & x_2 < 0; \text{ physikalisch unsinnig!} \end{aligned}$$

$y''(x) = -1-3 = -4 < 0$  d.h. es liegt ein lokales Maximum vor.

Lösung: für  $v_2/v_1$  hat  $C_p$  ein Maximum. Durch Einsetzen in Gl. (15a) ergibt sich:

$$\begin{aligned} c_p\left(\frac{1}{3}\right) &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{3}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{9}\right) = \frac{16}{27} \\ c_p\left(\frac{1}{3}\right) &\approx 0,593 \end{aligned}$$

Ergebnis: Der maximal erreichbare Leistungsbeiwert ist unabhängig von der Konverterbauart und beträgt  $C_{p_{\max}} \approx 0,593$

Der wirkliche Leistungsbeiwert wird beeinflusst durch

- die Profilleitzahl  $E^* = \frac{c_a}{c_w} = \frac{\text{Auftriebsbeiwert}}{\text{Widerstandsbeiwert}}$
- die Zahl der Rotorblätter und
- die Schnelllaufzahl  $\lambda = \frac{\text{Umfangsgeschwindigkeit der Flügelspitze}}{\text{Windgeschwindigkeit } v' \text{ in Rotorebene}}$

$$\text{Wirkungsgrad } \eta = \frac{\text{Nutzleistung } P_N}{\text{max. erzielbare Leistung } P_{\text{theor.}}}$$

$$(16) \quad \eta = \frac{P_N}{\frac{\rho}{2} \cdot C_{p,\max} \cdot v_1^3 \cdot A}$$

$$(17) \quad P_{el} = C_p \cdot \eta_m \cdot \eta_G \cdot \frac{\rho \cdot c^3 \cdot A}{2}$$

$\eta_m$  = mechanischer Wirkungsgrad

$\eta_G$  = Generatorwirkungsgrad

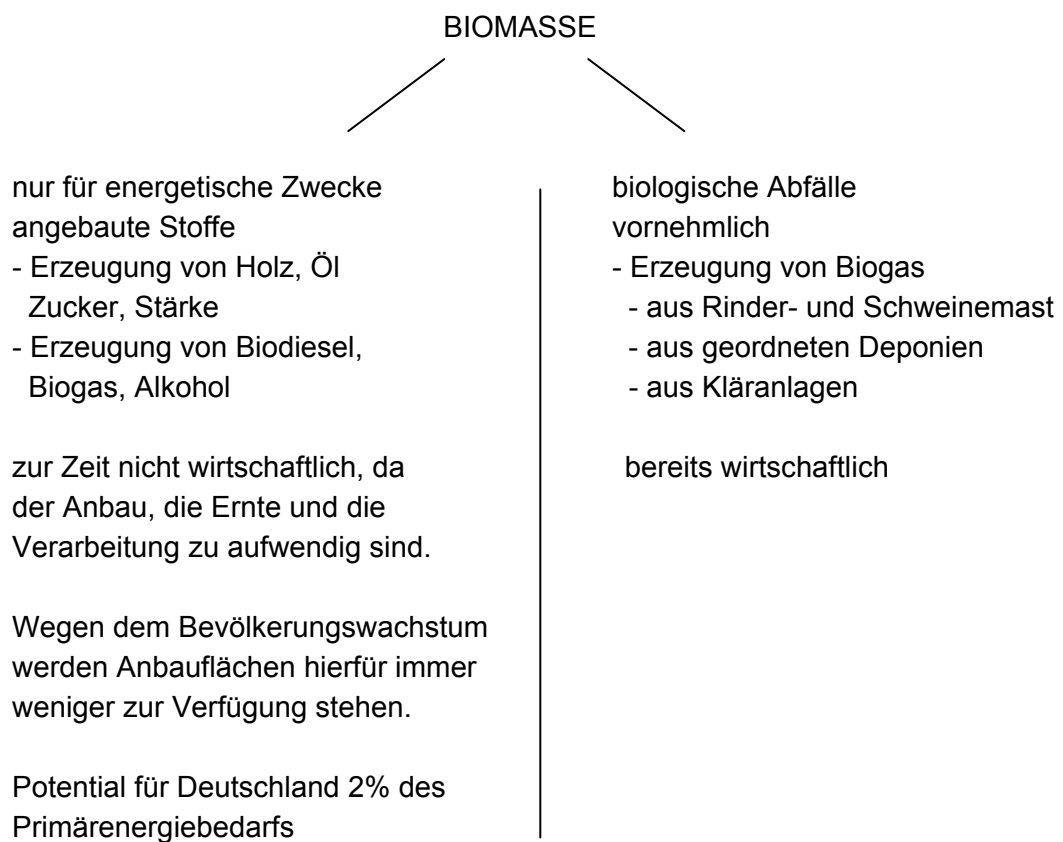
### 2.2.2.4 Biomasse

wird in der Biosphäre durch Photosynthese von Pflanzen erzeugt.  
Biosphäre = alle Zonen, in denen Lebewesen vorkommen.

$$\text{Jahresnutzungsgrad } \eta_{\text{Phys}} = \frac{\text{jährlich produzierter Heizwert der Biomasse}}{\text{jährliche Globalstrahlung}}$$

$$0,001 \leq \eta_{\text{Phys}} \leq 0,01$$

ältester Brennstoff: Holz



### Biogas

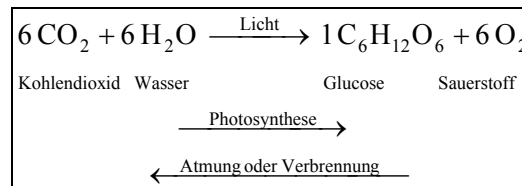
#### Physikalische Grundlagen:

Der sichtbare Spektralbereich der Sonne ist für die Photosynthese am wichtigsten. Sie ist Ausgangsbasis für alle übrigen Lebensäußerungen in der Biosphäre.

Grüne Pflanzen u.a. photosynthetische Organismen	→	absorbieren Licht selektiv und fixieren die Lichtenergie in Form chemischer Bindungen
---	---	---

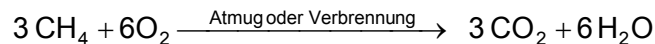
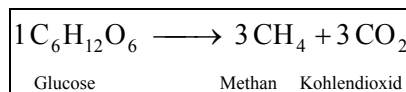
Chlorophyll absorbiert vorwiegend im blauen und roten Bereich (Blatt 22). Pflanzliche Pigmente und Pigmente photosynthetisch tätiger Mikroorganismen nützen auch grüne und gelbe Spektralfarben.

Die Fixierung von Strahlungsenergie in chemischer Energie, sowie die Überführung von  $\text{CO}_2$  in Pflanzenmaterial ist sowohl quantitativ als auch qualitativ der wichtigste biochemische Vorgang:



Atmung = biologische "isotherme Verbrennung"  
 Erdvegetation bindet  $100 \cdot 10^9$  Tonnen Kohlenstoff  
 = ca. der 100fachen Weltkohleförderung

Biogas entsteht in Abwesenheit von  $\text{O}_2$  bei vollständigem biologischem Abbau:



#### Natürliche Entstehung von Biogas:

- in Sümpfen (Irrlichter durch spontan brennendes Sumpfgas)
- im Grundschlamm von Seen
- im Innern infizierter Bäume
- im Vormagen von Wiederkäuern
- im Blind- und Dickdarm von Pflanzenfressern
- weniger im Darmtrakt von Mensch und Tier

Die Methanogenese ist ausschließlich möglich durch eine kleine Gruppe hochspezialisierter Bakterien = letzte Glieder einer Abbaukette (Pilz, Protozoen, Bakterien, zwischen  $4^\circ\text{C}$  und  $75^\circ\text{C}$  möglich)

#### Nutzung der natürlichen Entstehung durch Biogasanlage:

= Vergärung von Biomasse mit hohem  $\text{H}_2\text{O}$ -Anteil ohne  $\text{O}_2$  bei  $15 - 55^\circ\text{C}$   
 Verweilzeit: einige Tage bis einige Monate

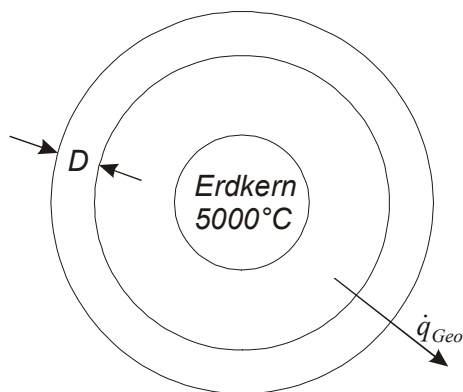


Ausgangsstoffe: - Mist aus Intensivhaltung  
 - Organisches Material kommunaler Abwässer  
 - pflanzliche Abfälle

Vorteil: - Rückführung der Elemente in die natürliche Kreisläufe  
 (Abfallbeseitigung)  
 - bei kommunalen Kläranlagen beträchtlicher Ersatz fossiler  
 Energieträger möglich

### 2.2.2.5 Geothermische Energie

Lithosphäre  
 $20 \leq D \leq 50 \text{ km}$



Mittlerer Erdwärmestrom

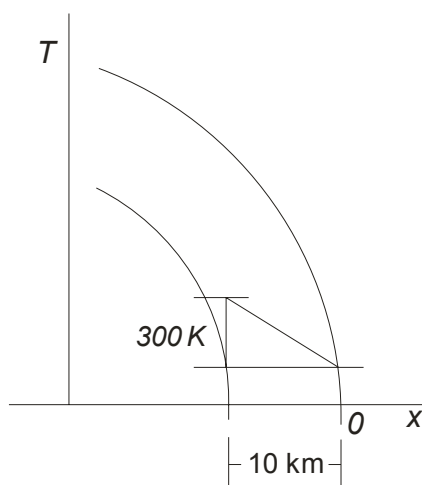
$$(1) \dot{q}_{Geo} = 62,5 \frac{mW}{m^2}$$

$$(2) \dot{q}_{Geo} = \dot{q}_\alpha + \dot{q}_L$$

$$(3) \dot{q}_\alpha = 25 \frac{mW}{m^2} \text{ resultiert aus dem}$$

Zerfall von U 238 und Th 232 zu Blei

$$(4) \dot{q}_L = \text{Wärmeleitstrom heißer Gesteinschichten nach außen}$$



Mittlerer Temperaturgradient der Erdkruste:

$$\frac{dT}{dx} = 30 \frac{K}{km} \text{ bis in } 10.000 \text{ m Tiefe}$$

$$\text{Wärmeleitfähigkeit } \lambda_{\text{mittel}} = 2,1 \frac{W}{mK}$$

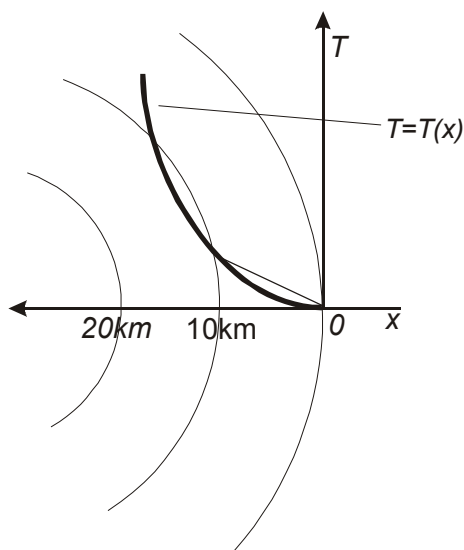
$$0,2 \frac{W}{mK} \leq \lambda \leq 7,3 \frac{W}{mK}$$

trockener Sand

einige Quarze

Viele Anomalien in der Erdkruste → große Temperaturgradienten, z.B. Spalte, Vulkane

$$\lambda_{\text{Tiefe}} < \lambda_{\text{Oberfläche}}$$



$$\text{z.B. } \lambda_{500^{\circ}\text{C}} = \frac{1}{2} \lambda_{20^{\circ}\text{C}}$$

Der Erdwärmestrom erleidet auf dem Weg zur Oberfläche wegen der erforderlichen Temperaturgefälle durch Wärmeleitung eine Entwertung:

- $E_x$  nimmt ab
- $S$  nimmt zu

Nicht der durch die Wärmeleitung aus dem Inneren der Erde verfügbare Energiestrom, sondern die bereits gespeicherte Wärmeenergie in der Erdkruste ist nutzbar.

Das durch Bohrungen bis 10 km Tiefe erreichbare thermische Energiepotential beträgt:

$$U_{10\text{km}} = 1,5 \cdot 10^{26} \text{ J}$$

Die Nutzung bleibt auf Anomalien beschränkt, da

- tiefe Bohrungen sehr teuer sind und
- $\lambda_{\text{mittel}}$  zu klein ist, um im technischen Maßstab ausreichend Wärme zu fördern (große Kontaktfläche erforderlich)

nutzbar sind:

- mit Wasser gefüllte Sedimentgesteine (Aquiferen)
- wasserdurchlässige Gesteinsschichten (Wasser wird durchgedrückt – Kontaktflächen sind groß)
- heiße Quellen (heißes Oberflächenwasser oder Wasserdampf) werden meist durch Bohrungen erschlossen

Nachteil: Thermalwasser angereichert mit Salzen, Silikaten, Säuren

- Keine weitere Nutzung möglich
- Einpressung in der Erde

Nutzung von Thermalwässern:

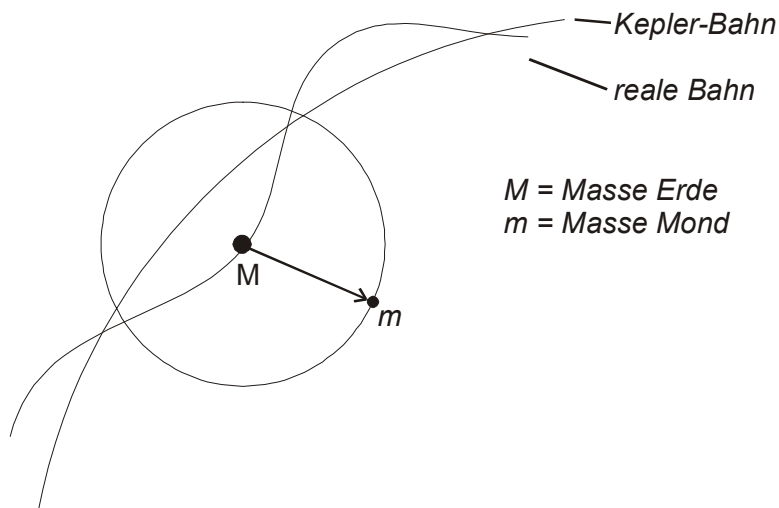
- $t < 100^\circ\text{C}$ : -Heizung (oft in Kombination mit Wärmepumpen)
- Prozesswärme
- $t > 100^\circ\text{C}$ : -Elektroenergieerzeugung

Geothermische Kraftwerke:

- 1913        erstes geothermisches Kraftwerk in Larderello (Oberitalien)
- $P_{\text{el}} = 250 \text{ kW}$ , Ausbau bis 127 MW in 1944
- 1996        installierte Leistung Welt:      $P_{\text{el}} = 7 \text{ GW}_{\text{el}}$
- $P_{\text{th}} = 10 \text{ GW}$

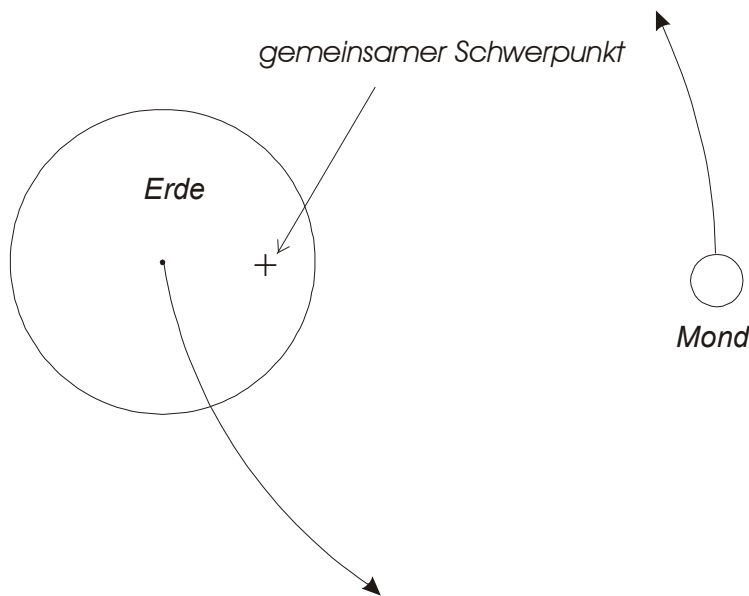
### 2.2.2.6 Gravitationsenergie

Durch die Wechselwirkung der Anziehungskräfte zwischen Sonne, Mond und Erde erfolgt eine ständige Veränderung der Wasserstände



Mondanziehungseinfluss =  $2,18 \cdot$  Sonnenanziehungseinfluss

Bei Addition der Kräfte von Sonne und Mond (Neumond, Vollmond) ist Springflut mit hohem Hochwasser möglich.



Relative Umlaufzeit des Mondes um die Erde: 24h 50min

Gleiche Extremwerte treten (Niedrigwasser (NW) und Hochwasser (HW)) alle 12 h 25 min auf, d.h. eine tägliche Verspätung von NW und HW um ca. 50 min. HW und NW treten aufgrund der Trägheit des Wassers, der Strömungswiderstände, der Wellen und unterschiedlicher Wassertiefen um mehrere Stunden verschoben auf.

Tidenhub = natürliche Differenz von Niedrigwasser zum Hochwasser 0 – 21 m.  
 ab > 5 m ist die Gezeitenenergie technisch nutzbar.  
 Binnenseen: einige cm

Größte Anlage: 240 MW<sub>el</sub> 1996 in Frankreich (Mündung der Rance)  
 17,8 MW<sub>el</sub> 1984 in Kanada

Untersuchungen liegen vor für Standorte mit der Gesamtleistung von 340 GW

Nachteile: hohe Investitionskosten; unregelmäßig auftretendes Energieangebot

## 2.3 Ressourcen, Reserven und Reichweiten von Vermögensenergien

Reserven: = sicher nachgewiesene, gegenwärtig ökonomisch gewinnbare Vorkommen

Ressourcen: =  $\Sigma$  aller Vorkommen  
 = Reserven + zur Zeit nicht ökonomisch nutzbare Vorkommen  
 + nicht sicher nachgewiesene Vorkommen

Reichweiten:

abhängig von

- der Entwicklung des Verbrauchs
- der Verbrauchsstruktur (Anteil versch. Brennstoffe an Gesamtverbrauch)
- den Energiereserven

Langzeitprognose schwer, da abhängig von

- der Bevölkerungsentwicklung
- der wirtschaftlichen Entwicklung
- der Akzeptanz der Kernenergie und
- der Entwicklung regenerativer Energiewandler

→ Beschränkung auf statische Reichweiten n!

$$\text{mit } n = \frac{\text{Reserven}}{\text{Verbrauch}} [\text{a}]$$

### **Beispielrechnung:**

Berechnen Sie die Reichweiten von Kohle, Erdöl und Erdgas unter Verwendung der Angaben zum gegenwärtigen Verbrauch sowie zu den Reserven und Ressourcen mit der Annahme, dass die prozentualen Anteile der Brennstoffe am Gesamtenergieverbrauch erhalten bleiben, für folgende Szenarien:

- Der Weltenergieverbrauch steigt jährlich um 1% bzw. 2% ohne Veränderung der angegebenen Reserven.
- Die Reserven erhöhen sich um 50% der über die angegebenen Reserven hinausgehenden Ressourcen, und der Weltenergieverbrauch steigt wieder jährlich um 1% bzw. um 2%.

### **Lösung:**

Definitionen:  $E_i$  := Weltenergieverbrauch eines Energieträgers im Jahr i  
 $E_{\text{res}}$  := Energiereserve eines Brennstoffs  
 $E_{\text{ress}}$  := Energieressource eines Brennstoffs  
 $\nu = \frac{E_i}{E_{i-1}}$  := Verbrauchssteigerungsfaktor

a)

$$(1) E_{\text{res}} = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n$$

$$(2) E_i = \nu \cdot E_{i-1} \quad \text{in (1)}$$

$$(3) E_n = \nu^{n-1} \cdot E_1$$

$$(4) E_{\text{res}} = E_1 + \nu \cdot E_1 + \nu^2 \cdot E_1 + \dots + \nu^{n-1} \cdot E_1$$

= geometrische Reihe (Bronstein S. 137)

$$E_{\text{Res}} = \frac{E_1 \cdot (\nu^n - 1)}{\nu - 1}$$

$$\nu^n = \frac{E_{\text{Res}}(\nu - 1)}{E_1} + 1$$

$$(5) \quad n = \frac{\ln\left(\frac{E_{\text{Res}}(\nu - 1)}{E_1} + 1\right)}{\ln \nu}$$

Zahlenwerte:

$E_{\text{res}}$	n [a] für $\nu_1 = 1,01$	n [a] für $\nu_2 = 1,02$
Kohle	≈ 102 a	76 a
Erdöl	≈ 39 a	≈ 34 a
Erdgas	≈ 47 a	39 a

$$\nu = 1,01 \quad E_{\text{Res Kohle}} = 566 \cdot 10^9 \text{ t SKE}$$

$$E_1 \text{ Kohle} = 3,23 \cdot 10^9 \text{ t SKE}$$

$$(5) \quad n = \frac{\ln\left(\frac{566 \cdot 10^9 \cdot 0,01}{3,23 \cdot 10^9} + 1\right)}{\ln 1,01} = 101,75 \text{ a}$$

$$\nu = 1,02 \quad n = \frac{\ln\left(\frac{566 \cdot 10^9 \cdot 0,02}{3,23 \cdot 10^9} + 1\right)}{\ln 1,02} = 76 \text{ a}$$

b) erhöhte Reserven:

$$(6) \quad E_{\text{Res(b)}} = E_{\text{Res}} + \frac{1}{2}(E_{\text{Res(s)}} - E_{\text{Res}})$$

damit ergibt sich für

Kohle:

$$E_{\text{Res(b)}} = 566 \cdot 10^9 \text{ t} + \frac{1}{2}(7600 - 566) \cdot 10^9 \text{ t SKE}$$

$$E_{\text{Res(b)}} = 4083 \cdot 10^9 \text{ t SKE}$$

in (5) eingesetzt →

$E_{\text{res b)}$	n [a] für $\nu_1 = 1,01$	n [a] für $\nu_2 = 1,02$
Kohle	263	165
Erdöl	47	40
Erdgas	92	70

### 3 Energiebedarf

#### 3.1 Geschichtliche Entwicklung des Energiebedarfs

	Energiebedarf / Person	Zweck
Eiszeit	100 W	Nahrung + Lagerfeuer
Mittelalter	1 kW	Nahrung + Kaminbeheizung
Entwicklungsländer bis heute	1 kW	Nahrung + alle Dienstleistungen einschl. Herstellung von Konsum- und Investitionsgütern
Deutschland heute	6 kW	
USA heute	11 kW	““

sehr grob gilt: Primärenergieverbrauch / Kopf ~ BSP / Kopf

*Zusammenhang zwischen BSP und Primär-E-Bedarf / Kopf siehe Blatt 35*

#### 3.2 Bedarfsprognosen

Prognosen weltweit abhängig von:

- der Bevölkerungsentwicklung
- dem Wirtschaftswachstum in den armen Ländern
- der Energieeffizienz der Wirtschaftsentwicklung in allen Ländern (besonders in den armen Ländern)

### 3.2.1 Bevölkerungsentwicklung

Eiszeit:	langsameres Wachstum, da die Menschen zur Wanderschaft gezwungen waren
Warmzeit:	10000 vor Chr. – 1700 nach Chr.: stabiles warmes Klima Verdopplung in 10000 Jahren
Industriezeitalter:	maschinelle Vervielfachung der menschlichen Arbeitskraft → Beschleunigung der menschlichen Produktivität → exponentielles Bevölkerungswachstum

#### Bevölkerungsentwicklung heute und nahe Zukunft:

heute:	Oktober 1999 Weltbevölkerung $6 \cdot 10^9$ Menschen Jährlicher Zuwachs ca. 88 Mio; konstant seit 1986 Jährliche Zuwachsrate sinkt stetig seit 1960
Momentaufnahme 1995:	+ 87 Mio. = weniger als 1991 – 94, da - hohe Sterberate in GUS-Staaten wegen instabiler Wirtschaft - AIDS in Afrika südlich der Sahara (z.B. Zimbabwe ca. 150000 Aids-Tote in 1995) - positiv Indien: Reduzierung der Geburtenrate
nahe Zukunft:	langsameres Wachstum, da - Wachstumsrate bereits sinkt (ca. 1,5% in 1996) - Rückgang der Geburtenrate pro Frau weltweit - Steigerung des zu erwarteten Lebensalters
Vorhersage:	noch 30 Jahre gleiches Plateau von ca. + 85-90 Mio. Menschen / a Rückgang der Geburtenrate pro Frau im Bereich 2 → Kulmination der Weltbevölkerung 2050 – 2100 auf ca. $10 \cdot 10^9$ Menschen, davon Afrika 60%, heutige Industrieländer 10%

### 3.2.2 Ressourcenverbrauch

Weltenergieverbrauch wächst schneller als die Bevölkerung, da

- zur Zeit niedriges Energieverbrauchsniveau von 80% der Weltbevölkerung
- Überwindung von Armut und Elend in der 3. Welt nur durch mehr Energieeinsatz möglich

Prognose bis 2010 BRD:	Kernenergie	= ;	Mineralöl	–
	Erdgas	+ ;	Steinkohle	–
	reg. Energien	+ ;	Braunkohle	–



- Prognose 2100 Welt: Öl + Gas Maximum um 2020  
Kohleförderung steigt bis 2050  
Teersande + Ölschiefer ab 2020 abbauwürdig  
Reg. Brennstoffe wachsen ab 2040
- Kohle: Seit 1989 gleicht die 3. Welt die Fördermengeneinbußen der GUS-Staaten aus.  
GUS heute: 50% der Förderung von 1987  
- enthält 80% mehr Kohlenstoff bei gleichem Energieinhalt als Erdgas  
Hauptproblem China: deren E-Versorgung zu 75% von Kohle abhängt
- Öl: Förderung 1995 = 3031 Mio. t  
OPEC Anteil 1973: 55%  
OPEC Anteil 1995: 43%  
Iran-Irak Krieg → Rohölpreissenkung  
Golfkrieg → Rohölpreissenkung
- Erdgas: 1995: 2114 Mio. t (Öläquivalent)  
größter Zuwachs weltweit
- Kernenergie 1995: 340 GW installierte elektrische Leistung
- Weltweit sind 84 Reaktoren stillgelegt (ca. 21 GW) mit durchschnittlicher Laufdauer von 17 Jahren
  - USA: bis 2003 weitere Stilllegung von 25 Reaktoren wegen beschleunigter Alterung und zu hohen Kosten
  - Westeuropa: Dänemark legt einzigen Reaktor bis 2003 still  
GB: keine Neubauprojekte

### 3.3 Energieeffizienz und Umweltauswirkungen

Effizienz des Energieeinsatzes ist naturgesetzlich beschränkt, jedoch bei weiten nicht ausgeschöpft.

Das Verhältnis von

Nutz-Energie zu End-Energie zu Primär-Energie  
In Deutschland als auch weltweit ist etwa  
1 : 2 : 3

techn. Verbesserungspotential für Deutschland: 30-40% Primärenergieeinsparung  
wirtschaftliches Potential Deutschland: 15-30% Primärenergieeinsparung

Das CO<sub>2</sub>-Problem:

80% des Weltenergiebedarfs werden aus fossilen Kohlenwasserstoffen gedeckt. Der in einigen 100 Mio. Jahren durch Pflanzenmasse chemisch gebundene Kohlenstoff wird extrem schnell durch Verbrennung in Form von CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre zurückgeführt.

Pro Jahr werden +  $3 \cdot 10^9$  t Kohlenstoff  
+  $11 \cdot 10^9$  t CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre emittiert

Bestand in Atmosphäre:  $750 \cdot 10^{12}$  t Kohlenstoff

→ CO<sub>2</sub> – Konzentration steigt stetig von

- 317 ppm 1960
- 361 ppm 1995
- 367 ppm 2000

Globale Temperaturerhöhung im letzten Jahrhundert:

$\Delta t = 0,3$  bis  $0,6^\circ\text{C}$

Daher: ökonomische + ökologische Zielsetzungen: Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen

Bedarfsentwicklung  $\hat{=}$  örtlich nicht den Vorkommen

→ weltweit erhebliche Handelsbewegungen

- Schifffahrt → Schiffsunglücke (Ölpest)
- Pipelines → Lecks (Verseuchung von Landstrichen und Küsten; Methanaustritt)

### 3.4 Energiebedarfsstrukturen

#### 3.4.1 Qualitative Bedarfsstrukturen und Energiemärkte

Die Bedarfsstrukturen und Energiemärkte sind abhängig von Umwandlungsstufen und Ländern

- Länder-Primärenergiestruktur
- z.B. Chinas Abhängigkeit von Kohle etc.

Primärstruktur Deutschland 1994 siehe Blatt 48 unten

Neue Bundesländer:

- 1990 73% Braunkohleanteil am Primärenergiebedarf
- 1994 40% Braunkohleanteil am Primärenergiebedarf

Strukturwandel neue Bundesländer:

- Einstellung aller Kernkraftwerksblöcke sowjetischer Bauart
- Steigerung des Einsatzes von Mineralöl und Erdgas
- Zunahme Individualverkehr
- Rückgang der Industrie
- Umstellungen im Heizungssektor

Sekundärenergiestruktur BRD

- Trend zu höheren Veredelungsstufen
- geringer werdender Anteil fester Brennstoffe und schweren Heizöls als Endenergieträger
- Zuwachs von Gasen
- Zuwachs von Strom in Kombination mit Fernwärme

Tertiärenergiestruktur BRD

∃ drei wesentliche Formen mit folgenden Anteilen:

ABL: Raumwärme:	43,35%	} Dominanz der Wärmeanwendung
Prozesswärme:	31,45%	
Restl. Energien Beleuchtung:	23,20%	

→ Wärmewirtschaft ist nicht nur in Aufbereitung und Umwandlung sondern auch in den Verbrauchsstrukturen von größter Bedeutung!

Prognosen Sekundärenergieverbrauch 1992 – 2020

oben: nach Verwendungssektoren

unten: nach Energieträgern

→ Nach 2000 ist der Endenergieverbrauch von der Wirtschaft abgekoppelt.

### 3.4.2 Zeitliche Dargebots- und Bedarfsstrukturen

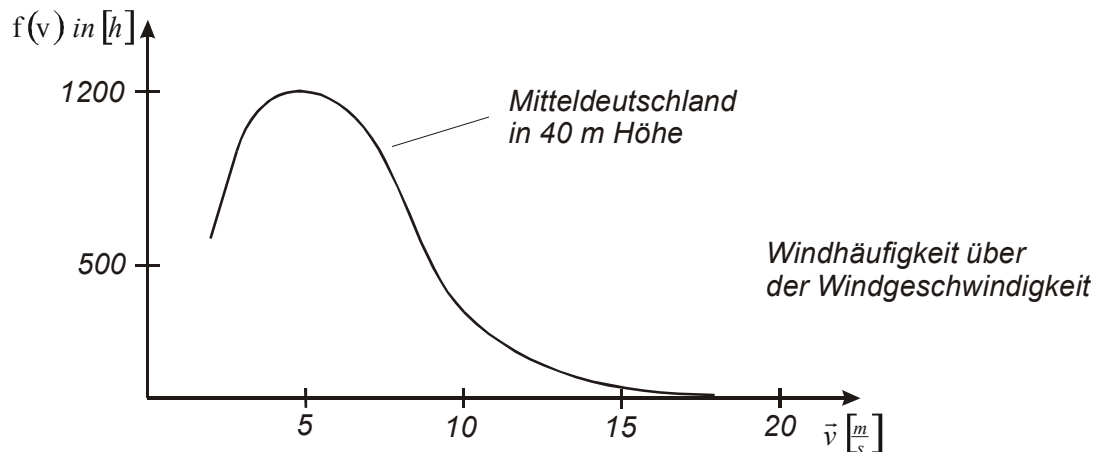
Kurz und mittelfristig existieren keine Dargebotsprobleme, da

- für einige Jahrzehnte Brennstoffvorräte erschlossen sind.
- Transportwege vorhanden sind.

Voraussetzung sind allerdings stabile politische- und wirtschaftliche Verhältnisse.

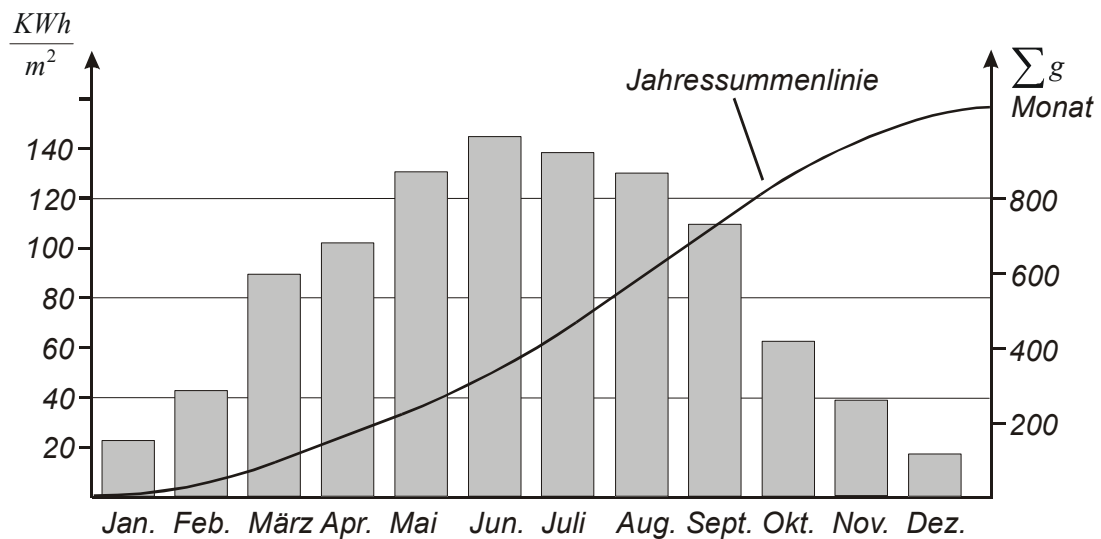
Energieart	Sonne	Wind	Wasserstoff
Starke zeitliche Dargebotsschwankungen	s, min, h	s, min, h	d, Wochen

z.B. typisch für Wind: Weibull-Verteilung



Ebenso: Auftragung des Dargebots über der Zeitachse

z.B.: Monatsmittelwerte der solaren Einstrahlung  $\dot{g} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$



$$\text{Jahresdargebot} = g_t = \int_0^t \dot{g} \cdot dt := \text{Jahressummenlinie}$$

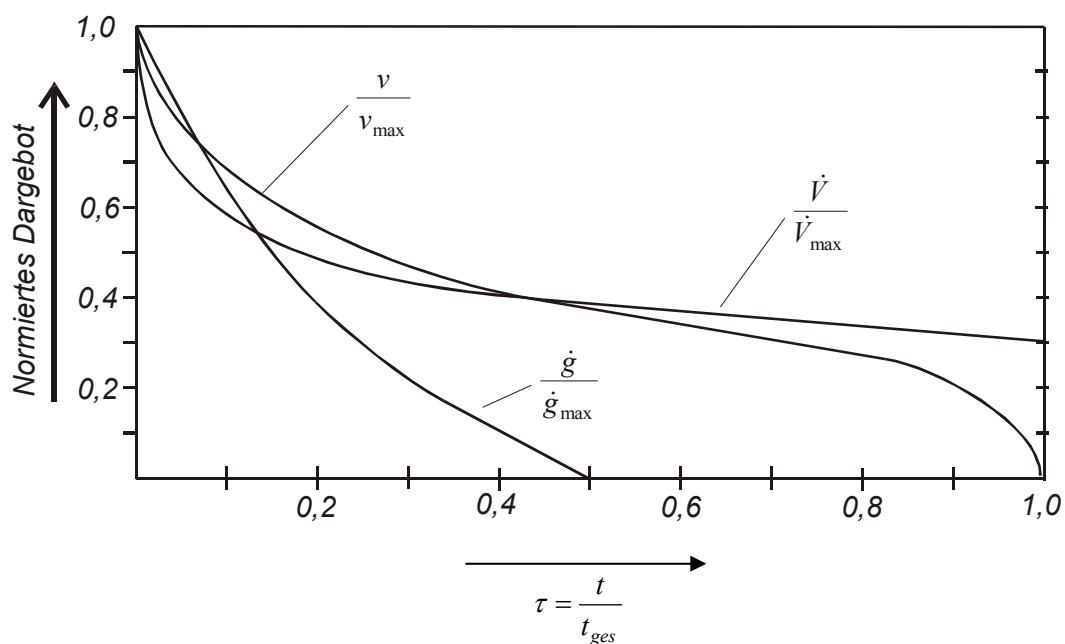
noch üblicher: Leistungsdiagramme!

Dargebot und/oder Bedarf werden nach Größe über der Zeitdauer geordnet dargestellt = Dauerlinien

z.B. normierte Dauerlinien von Windgeschwindigkeit  $\frac{\dot{v}}{\dot{v}_{\max}}$

Wasserstrom eines Flusses  $\frac{\dot{V}}{\dot{V}_{\max}}$

Solarstrahlung über ein Jahr  $\frac{\dot{g}}{\dot{g}_{\max}}$



Anwendung für: - Auslegung  
- Betriebsführung  
von Energiewandlungsanlagen

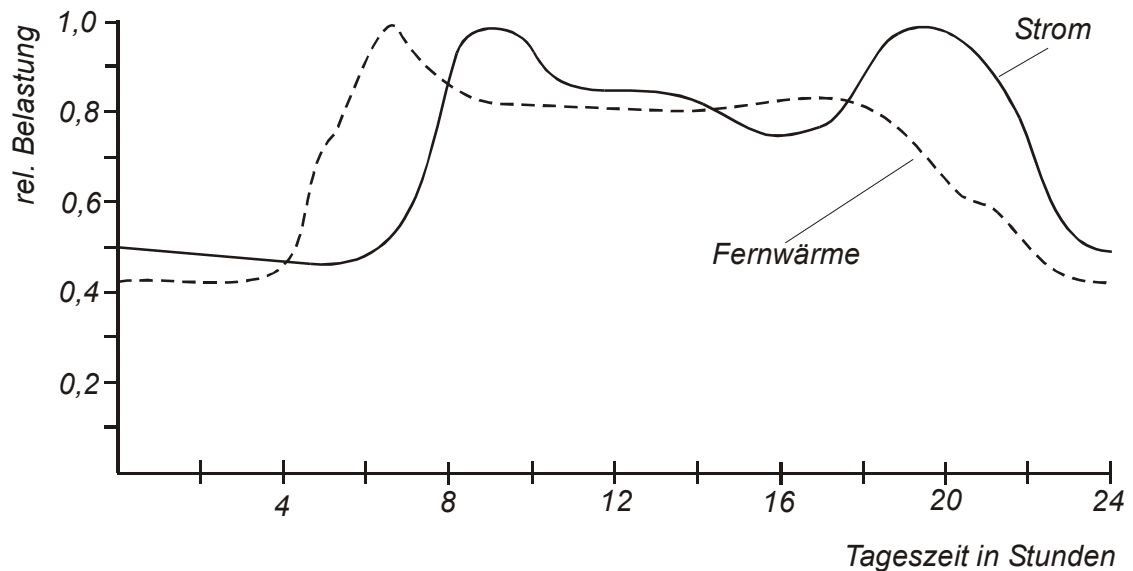
Bedarfsseite: Kunde von EVU's bestimmt wann er wieviel Energie abrufft, insbesondere bei leistungsgebundener Energieversorgung wie

- Strom
- Gas
- Fernwärme

EVU bestimmt max. mögliche Leistungsanspruchnahme durch:

- Dimensionierung des Kundenanschlusses
- Rohrquerschnitte
- Gaszählerkapazität
- Wahl der Hauptsicherung
- Fernwärmemengenangebot

Belastungskurve = Leistungslinie für h, d, Monate  
 Bsp.: Tagesganglinie einer Stadt für Strom und Fernwärme



Lastganglinie wichtig, da

- elektrische Netze kurze Speicherfähigkeit besitzen

Verlaufsglättung durch

- Verbundbetrieb vieler Kraftwerke in immer größeren Netzen  
 → heute kontinentale Verbundnetze

Auftragung aller Tagesganglinien über ein Jahr ergibt Belastungsgebirge.

Spitzenlast  $P_{\max}$  = entscheidend für Auslegung der Kraftwerke + Netze.

Daher wird die Spitzenlast bei Energiepreisbildung besonders berücksichtigt.

Mittlere Belastung  $P_m$

$$W = P_m (t_2 - t_1) \quad (1)$$

Arbeit

$$P_m = \frac{W}{t_2 - t_1} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{P(t) dt}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

ebenso interessant: minimale Belastung  $P_{\min}$

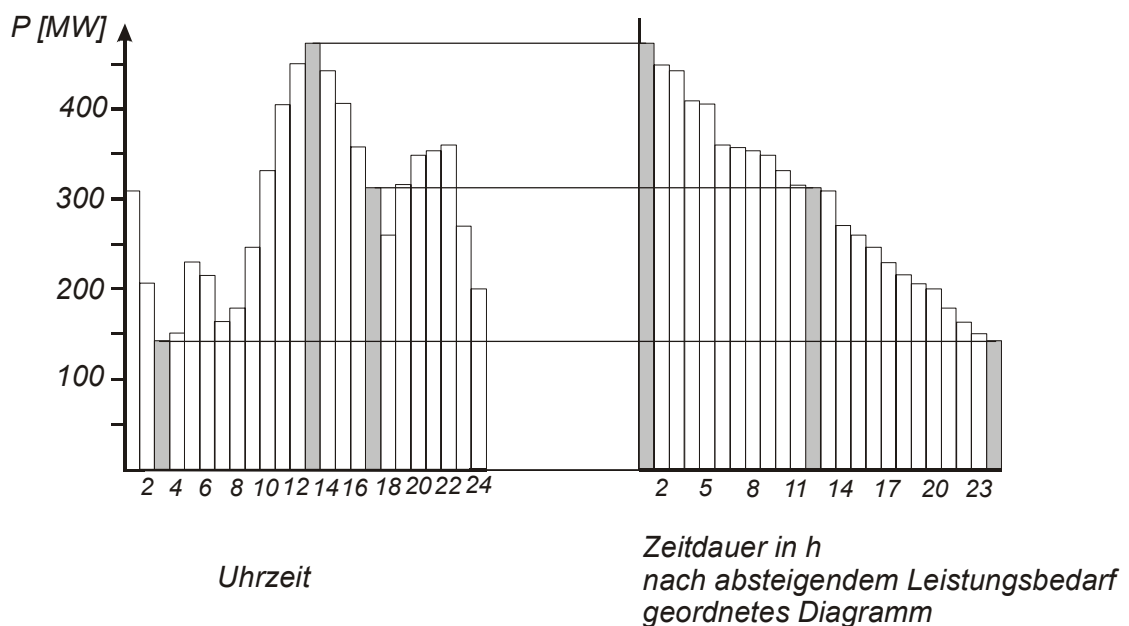
→ Schwachlastbetrieb von Kesseln und Turbinen, Abschalten einzelner Energieanlagen

Analog zur Dargebotsseite werden aus Belastungsganglinien Belastungsdauerlinien erstellt.

Da  $P=P(t)$  und  $\int_0^{24h} P(t)$  schwer zu approximieren ist, wählt man einzelne Leistungsintervalle.

$$dW=P(t) dt \quad (3)$$

$$\Delta W=P(t) \Delta t \quad (4)$$



	Ganglinien	Dauerlinien
Zweck	für die Einsatzplanung von Energieanlagen (Tagesgang-; Wochengang-linien)	für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen (Jahresdauerlinien)
jeweiliger Vorteil	man sieht zu welchem konkreten Zeitpunkt welche Belastung aufgetreten ist	sind überschaubarer und besser zu integrieren

Für die Optimierung der Betriebsprüfung ist die Vorhersage der konkreten Ganglinie erforderlich!

Parameter sind Werkzeuge, Sonn- und Feiertage, Jahreszeit, Wetter (Lichtverhältnisse, Außentemperatur, Wind, Regen)

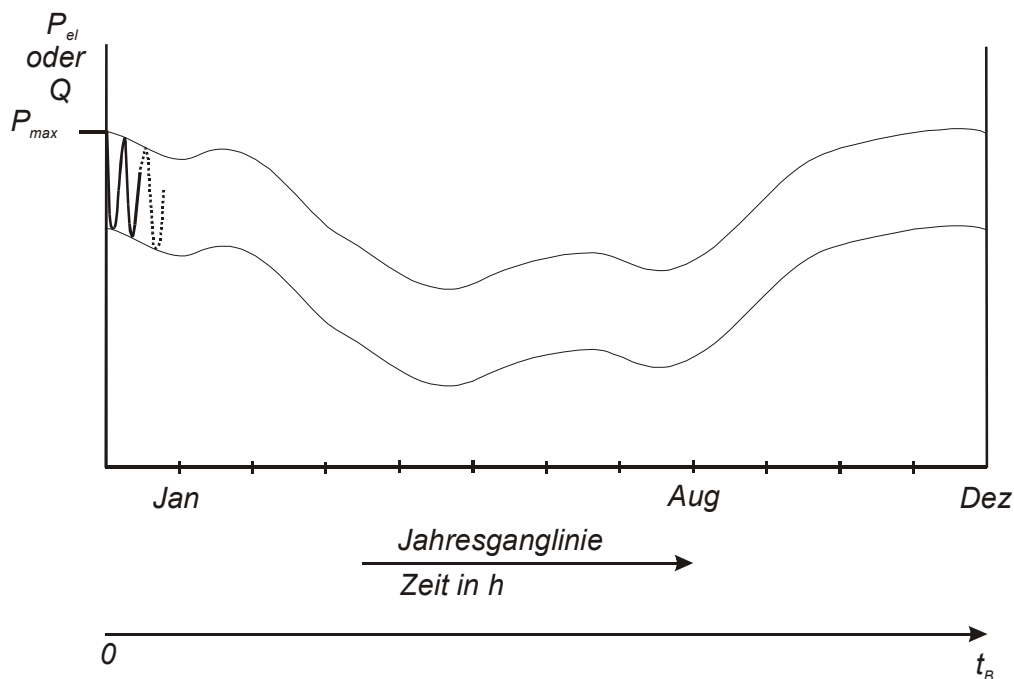
Die Vorhersagen werden mittels Regressions- und Zeitreihenanalysen vergangener Zeiträume erstellt. Prognose und Einsatzplanung wird unterteilt in:

Tag, einige Tage	kurzfristige Planung
Wochen, Monate	mittelfristige Planung
ein Jahr, wenige Jahre	langfristige Planung
Jahrzehnte (Lebensdauer der Energieerzeugeranlage)	strategische Langzeitplanung

Planung von Erzeugerwerken: (Kraftwerke, Heizwerke, Heizkraftwerke):  
Wichtigstes Kriterium: Auslastung / a

Annahme über die Bedarfsseite: reduzierte Zahl von typischen Tagen

Ermittlung der Auslastung:





- $t_B$  = jährliche Betriebsstunden  
 $P_{\max}$  = max. abgegebene Leistung  
 $P_m$  = mittlere Belastung (elektrischer Bedarf)  
 $\dot{Q}_m$  = mittlere Belastung (Wärmebedarf)

$$\text{Jahresbedarf } W_a = \int_0^{t_B} P \cdot dt = P_m \cdot t_B \quad (5)$$

Mit  $t_v$  = Volllaststunden ergibt sich

$$W_a = P_{\max} \cdot t_v \quad (6)$$

Bemerkung:  $t_v$  ist eine fiktive Teilmenge der jährlichen Betriebsstunden, die sagt, wie viele h die Erzeugeranlagen unter Volllast hätte laufen müssen, um den Jahresbedarf zu decken.

$$(5) = (6): (7) \quad t_v = \frac{1}{P_{\max}} \int_0^{t_B} P \cdot dt$$

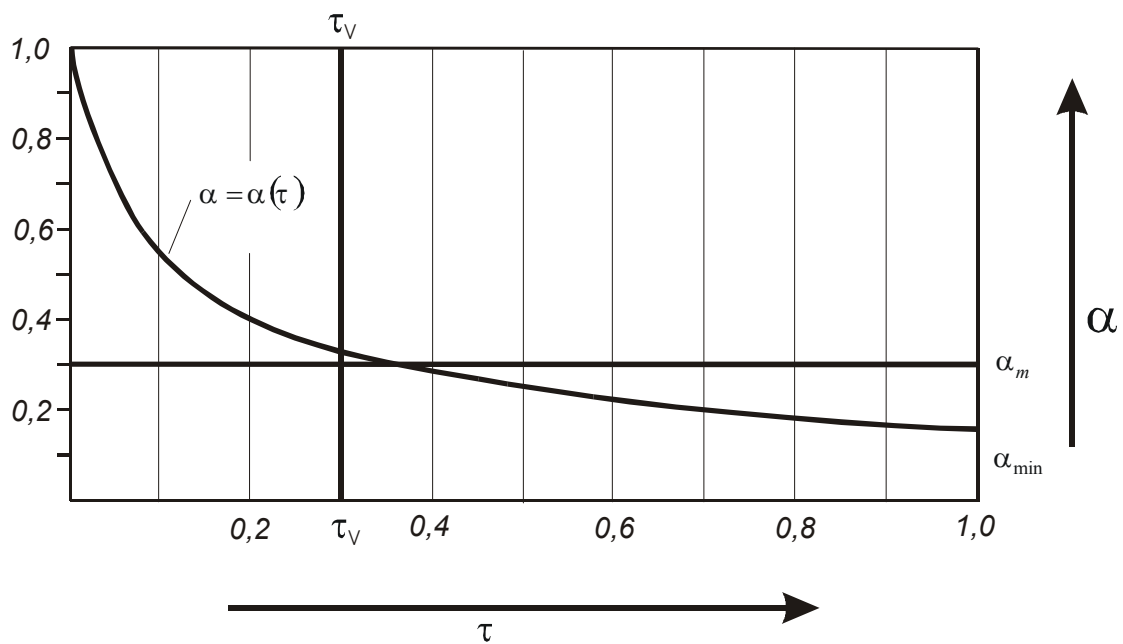
Da die Integration  $P(t)$  zu schwierig ist, nimmt man die Jahresdauerlinie und normiert alle Größen wie folgt:

$$\text{rel. Belastung} \quad \alpha = \frac{P}{P_{\max}} = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}} \quad (8)$$

$$\text{normierte Zeitachse} \quad \tau = \frac{t}{t_B} \quad (9)$$

Aus Erfahrungswerten wurde folgende gute mathematische Approximation ermittelt:

$$(10) \quad \alpha = 1 - (1 - \alpha_{\min}) \cdot \tau^b \quad b = \frac{\alpha_m - \alpha_{\min}}{1 - \alpha_m}$$



normierte Volllaststundenzahl  $\tau_V = \frac{t_V}{t_B}$  (11)

$$\text{Belastungsgrad } \alpha_m = \frac{P_m}{P_{\max}} = \frac{\dot{Q}_m}{\dot{Q}_{\max}} \quad (12)$$

$$\text{Lastverhältnis } \alpha_{\min} = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} = \frac{\dot{Q}_{\min}}{\dot{Q}_{\max}} \quad (13)$$

Es muss gelten: Fläche unterhalb der Kurve

$$\int_{\tau=0}^1 \alpha(\tau) d\tau = \tau_V \cdot 1 = \alpha_m \cdot 1 \quad (14)$$

Die normierte Volllaststundenzahl  $\tau_V$  und Belastungsgrad  $\alpha_m$  zeigen die Auslastung der Anlage.

Integration Gl. (10):

$$\begin{aligned} \int_{\tau=0}^1 \alpha(\tau) d\tau &= \int_{\tau=0}^1 [1 - (1 - \alpha_{\min}) \cdot \tau^b] d\tau \\ &= \int_{\tau=0}^1 d\tau - (1 - \alpha_{\min}) \int_{\tau=0}^1 \tau^b d\tau \\ &= [\tau]_0^1 - (1 - \alpha_{\min}) \left[ \frac{\tau^{b+1}}{b+1} \right]_0^1 \end{aligned}$$

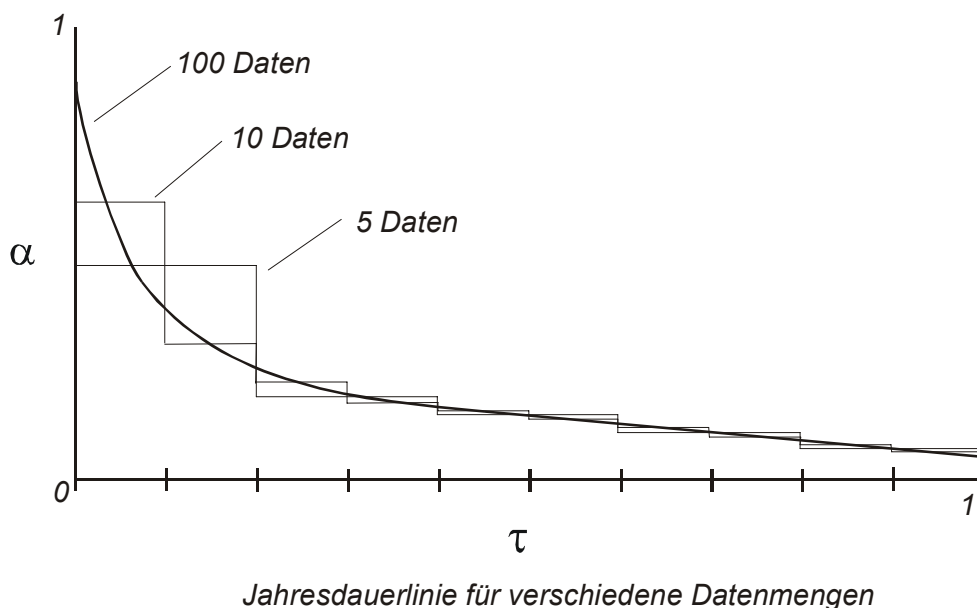
$$= 1 - (1 - \alpha_{\min}) \cdot \left( \frac{1}{b+1} - 0 \right)$$

$$\tau_V = \alpha_m = 1 - \frac{1 - \alpha_{\min}}{b+1} \quad (15)$$

Beispielhafte Jahresdauerlinienvariation durch Variation von  $\alpha_m$  und  $\alpha_{\min}$

Bei genaueren Untersuchungen: empirisch (gemessene) Dauerlinie

Steilheit ist abhängig von der Zahl der Messpunkte:



je mehr Messpunkte, desto steiler

je weniger Messpunkte, desto eher werden Extremwerte verschliffen (z.B. statt höchster Belastungsstunde kalter Januartag jetzt Monatsmittel Januar)

Der normierte Energiebedarf

$$\frac{W_a}{P_{\max} \cdot t_B} \quad \text{bzw.} \quad \frac{Q}{\dot{Q} \cdot t_B} = \int_0^1 \alpha(t) d\tau$$

ergibt sich meist aus (15)

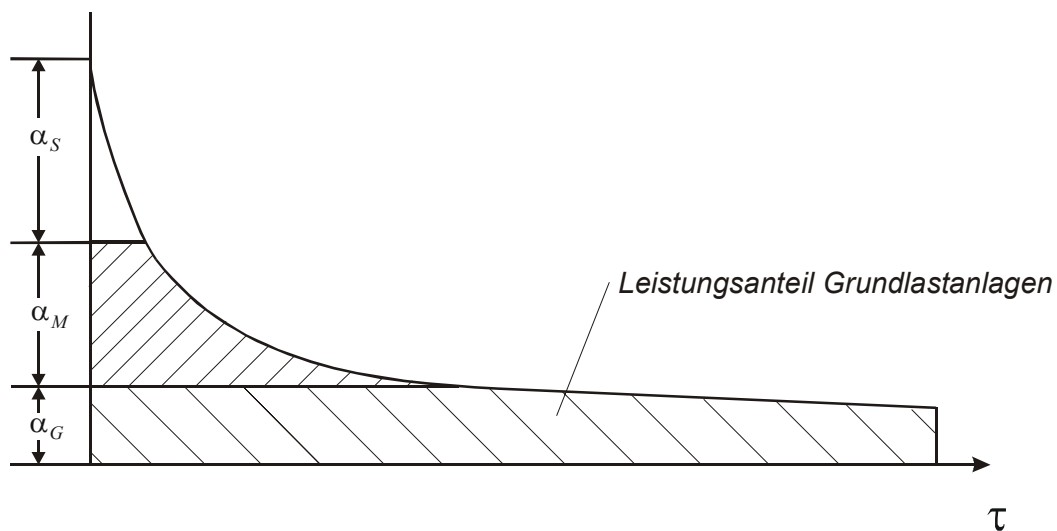
$$\frac{W_a}{P_{\max} \cdot t_B} = 1 - \left( \frac{1 - \alpha_{\min}}{b+1} \right) \quad (16)$$

### 3.4.3 Einfluss zeitlicher Bedarfsstrukturen auf die Anlagenkonfiguration

Belastungsgrad ist entscheidend für die Investitionsplanung

→ Kombination verschiedener Erzeugeranlagen unterschiedlicher Kostenstruktur:

	Grundlast-	Mittellast-	Spitzenlastanlagen
Leistungsanteile	$\alpha_G = \frac{P_G}{P_{\max}}$	$\alpha_M = \frac{P_M}{P_{\max}}$	$\alpha_S = \frac{P_S}{P_{\max}}$ (17)



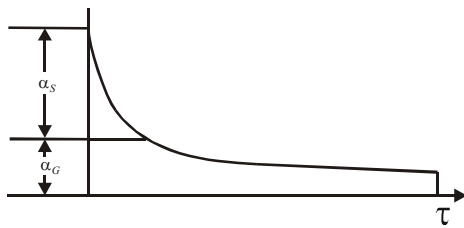
Jahresdauerlinie unterteilt in Leistungsanteilen von Grund-, Mittel- und Spitzenlastanlagen

$$\text{Es gilt: } \tau_{V_G} > \tau_{V_M} > \tau_{V_S} \quad (18)$$

$$\text{zulässiger Kapitalaufwand } K_G > K_M > K_S \quad (19)$$

Aufgabe: Festlegung von  $\alpha_G$ ,  $\alpha_M$  und  $\alpha_S$

- Vereinfachtes Problem: Dauerlinie soll nur in Grundlast und Spitzenlast unterteilt werden:



Ges.:  $\alpha_{G_{Opt}}$  !

Hierzu sind folgende betriebswirtschaftliche Grundlagen zum Verständnis notwendig:

### 3.4.3.1 Annuität der Ausgaben (Kosten) und spezifische Kosten

$$AN_A = \text{Jahreskosten} = \sum \text{Ausgaben}$$

$$AN_A = - ( A_K + A_V + A_B + A_E ) \quad (20)$$

Kapital-
verbrauchs-
betriebs-
externe, soziale  
gebundene Ausg.
gebundene Ausg.
gebundene Ausg.
Ausgaben

$$(21) A_K = I_0 (a + f_k)$$

Investitionen
jährliche Instandsetzungszahlungen / Investitionskosten

Annuitätsfaktor (Kapitalwiedergewinnungsfaktor)

$$(22) A_V = \sum_i (p_Q \cdot Q_a)_i + \sum_j (p_S \cdot S_a)_j$$

spez. Energie-  
spez. Brennstoffpreis
Betriebsstoffverbrauch / a  
Energie- od. Brennstoffverbrauch / a
spez. Betriebsstoffpreis

Für  $A_B \rightarrow 2$  verschiedene Definitionen:

$$(23a) A_B = I_0 \cdot f_B + \sum G$$

jährliche betriebsgeb. Ausgaben  
Investitionskosten
Einzelbeträge unabhängig von  $I_0$

$$(23b) \quad A_B = I_0 \cdot f_B + A_V \cdot f_V$$

$\underbrace{\hspace{10em}}$   
 verbrauchsgebundene Kosten  
 jährl. verbrauchsgeb. Kosten

$\underbrace{\hspace{10em}}$   
 Den verbrauchsgebundenen Kosten proportionaler Anteil  
 der betriebsgebundenen Ausgaben

$$(24) \quad A_E = A_V \cdot f_E$$

$\underbrace{\hspace{10em}}$   
 externe, soziale Kosten  
 jährlich, verbrauchsgebundene Ausgaben

(21)(23b)(24) in (20)

$$(25) \quad AN_A = -[I_0(a + f_k) + A_V + (I_0 \cdot f_B + A_V \cdot f_V) + A_V \cdot f_E]$$

$$(26) \quad AN_A = -I_0(a + f_K + f_B) - A_V(1 + f_V + f_E)$$

$\underbrace{\hspace{2em}}_{K_a}$       $\underbrace{\hspace{4em}}_{\text{fixe Kosten } K_f}$       $\underbrace{\hspace{4em}}_{\text{variable Kosten } K_v}$

$$(27) \quad K_a = K_f + K_v$$

$$(28) \quad K_f = I_0(a + f_k + f_B)$$

$$(29) \quad K_v = A_V(1 + f_V + f_E)$$

### spezifische Kosten:

(27) in (26)

$$(30) \quad \text{Jahreskosten } K_a := I_0(a + f_k + f_B) + A_V(1 + f_V + f_E)$$

bei  $A_V$  dominieren die Brennstoffkosten darstellbar zu

$$(31) \quad A_V = p_{BR} \cdot m_{Br, a} (1 + f_S)$$

$\swarrow$  Brennstoffpreis      $\downarrow$  Brennstoffmenge      $\searrow$  Berücksichtigung der Kosten der Betriebsstoffe

(31) in (30)

$$(32) \quad K_a = \underbrace{I_0 (a + f_K + f_B)}_{K_f} + \underbrace{p_{Br} \cdot m_{Br,a} (1 + f_S) (1 + f_V + f_E)}_{K_v}$$

Fixkosten                      variable Kosten

(28)

$$(33) \quad K_f = I_0 (a + f_K + f_B) = I_0 \cdot f_f$$

└─ Fixkostenfaktor

$$(34) \quad K_v = p_{Br} \cdot m_{Br,a} (1 + f_S)(1 + f_V + f_E) = P_{Br} \cdot m_{Br,a} \cdot f_v$$

(33) (34) in (32)

$$(35) \quad K_a = I_0 \cdot f_f + p_{Br} \cdot m_{Br,a} \cdot f_v$$

für feste und flüssige Brennstoffe:

$$\text{Reaktionsenthalpie (36)} \quad H_{Br} = Q_{Br} = m_{Br} \cdot H_u$$

für gasförmige Brennstoffe (37):  $H_{Br} = Q_{Br} = m_{Br} \cdot H_o$ 

$$(38) \quad P_{Q_{Br}} (\text{fest, flüssig}) = \frac{P_{Br}}{H_u} \quad \text{bzw.} \quad P_{Br} (\text{gasförmig}) = \frac{P_{Br}}{H_o}$$

(36)(37)(38) in (35)

$$(39) \quad K_a = I_0 \cdot f_f + P_{Q_{Br}} \cdot H_{Br,a} \cdot f_v$$

Die jährlich erzeugte Nutzenergie (z.B. Heizwärme  $Q_{h,a}$  oder Elektronenergie  $W_a$ ) ist dem Jahresnutzungsgrad  $\zeta$  (mittlerer Wirkungsgrad über 1 Jahr) entsprechend geringer:

$$(40) \quad \text{Heizwerk} \quad Q_{H,a} = Q_{Br,a} \cdot \zeta_{HW}$$

$$(41) \quad \text{Kraftwerk} \quad W_a = Q_{Br,a} \cdot \zeta_{KW}$$

→ spezifische Jahreskosten:

Heizwerk	Kraftwerk
<p>spez. Heizwärmekosten</p> <p>(42) <math>K_H = \frac{K_a}{Q_{H,a}} = \frac{\text{Jahreskosten}}{\text{jährl. erzeugte Heizwärme}}</math></p> <p>(42) in (39)</p> <p>(43) <math>K_H = \frac{I_0 \cdot f_f + P_{W_{Br}} \cdot H_{Br,a} \cdot f_V}{Q_{H,a}}</math></p> <p>(37)(40) in (43)</p> <p>(44) <math>K_H = \frac{I_0 \cdot f_f}{Q_{H,a}} + \frac{P_{Q_{Br}} \cdot f_V}{\zeta_{HW}}</math></p> <p>(48) <math>Q_{H,a} = \dot{Q}_{H,max} \cdot t_V</math></p> <p>(48) in (44)</p> <p>(50) <math>K_H = \frac{I_0 \cdot f_f}{\dot{Q}_{H,max} \cdot t_V} + \frac{P_{Q_{Br}} \cdot f_V}{\zeta_{HW}}</math></p>	<p>spez. Elektroenergie-Erzeugungskosten:</p> <p>(45) <math>K_W = \frac{K_a}{W_a} = \frac{\text{Jahreskosten}}{\text{jährl. erzeugte el. Energie}}</math></p> <p>(45) in (41) in (39)</p> <p>(46) <math>K_W = \frac{I_0 \cdot f_f + P_{Q_{Br}} \cdot H_{Br,a} \cdot f_V}{Q_{Br,a} \cdot \zeta_{KW}}</math></p> <p>(47) <math>K_W = \frac{I_0 \cdot f_f}{W_a} + \frac{P_{Q_{Br}} \cdot f_f}{\zeta_{KW}}</math></p> <p>(49) <math>W_a = P_{max} \cdot t_V</math></p> <p>(49) in (47)</p> <p>(51) <math>K_W = \frac{I_0 \cdot f_f}{P_{max} \cdot t_V} + \frac{P_{Q_{Br}} \cdot f_V}{\zeta_{KW}}</math></p>

führt man auch spezifische Investitionskosten ein: typ. Werte (Tabelle Blatt 52)

$$(52) i_{0,HW} = \frac{I_0}{\dot{Q}_{H,max}}$$

(52) in (50)

$$(54) K_H = \frac{i_{0,HW} \cdot f_f}{t_V} + \frac{P_{Q_{Br}} \cdot f_V}{\zeta_{HW}}$$

$$(53) i_{0,KW} = \frac{I_0}{P_{max}}$$

(53) in (51)

$$(55) K_W = \frac{i_{0,KW} \cdot f_f}{t_V} + \frac{P_{Q_{Br}} \cdot f_V}{\zeta_{KW}}$$

$$(56) K_E = K_f + K_V$$

$$(57) K_E = \frac{i_0 \cdot f_f}{t_V} + \frac{P_{Q_{Br}} \cdot f_V}{\zeta}$$

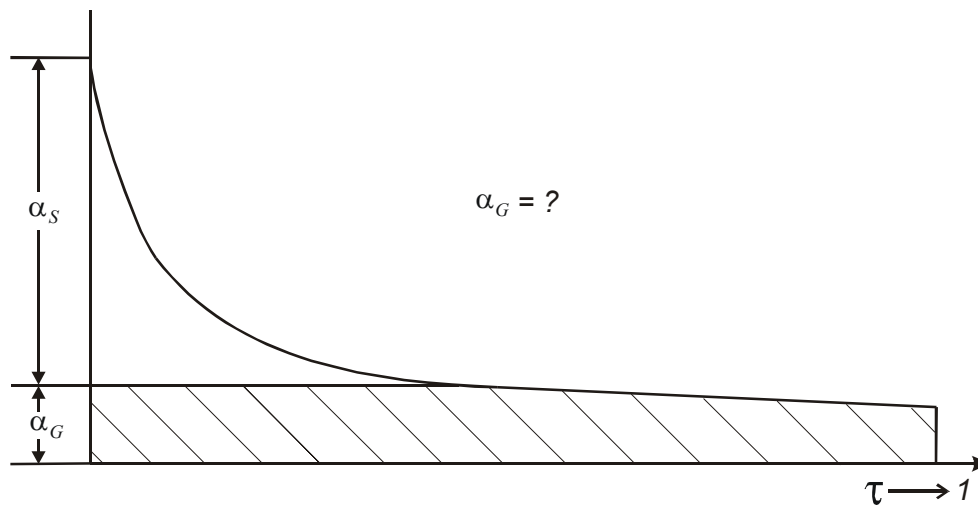
Entscheidend Einfluss haben:

- Volllaststundenzahl  $t_V$
- spezifischer Brennstoffpreis  $P_{Q_{Br}}$

mit (58)  $f_f = a + f_k + f_B$

(59)  $f_V = (1 + f_S) (1 + f_V + f_E)$



Optimierungsaufgabe:

## Vereinfachte Annahmen:

- (60)  $f_K = 0$ ; d.h. keine jährliche Instandsetzungszahlungen  
 (61)  $f_S, f_V, f_E = 0$ ; d.h. keine Berücksichtigung der Betriebsstoffe  
 keine Wartungs- und Instandhaltungskosten  
 externe und soziale Kosten

spezifische Kosten für Grundlastkraftwerke  $K_G$  (58) (59) (60) (61) in (57)

$$(62) K_G = \frac{i_0 \cdot (a + f_B)}{t_V} + \frac{P_{Q_{Br}}}{\zeta_{KW}}$$

$$(63) K_G = k_{f,G} + k_{V,G}$$

analog für Spitzenlastkraftwerke

$$(64) K_S = k_{f,S} + k_{V,S}$$

- Def.:  $\beta_G$  = Anteil Grundlastkraftwerk an Gesamtenergieerzeugung  
 $\beta_S$  = Anteil Spitzenlastkraftwerk an Gesamtenergieerzeugung  
 $\alpha_G$  = Leistungsanteil Grundlastkraftwerk  
 $\alpha_S$  = Leistungsanteil Spitzenlastkraftwerk

$$K_G = K_{f,G} \cdot \alpha_G + K_{V,G} \cdot \beta_G \quad (65)$$

$$K_S = K_{f,S} \cdot \alpha_S + K_{V,S} \cdot \beta_S \quad (66)$$

$$\beta_G + \beta_S = 1 \mid \beta_S = 1 - \beta_G \quad (67)$$

$$\alpha_G + \alpha_S = 1 \mid \alpha_S = 1 - \alpha_G \quad (68)$$

einsetzen von (67) (68) in (65 + 66)

$$(69) K_G + K_S = K_{f,G} \cdot \alpha_G + K_{f,S} (1 - \alpha_G) + K_{v,G} \cdot \beta_G + K_{v,S} (1 - \beta_G)$$

$$(70) K_G + K_S = (K_{f,G} - K_{f,S}) \alpha_G + K_{f,S} + (K_{v,G} - K_{v,S}) \beta_G + K_{v,S}$$

$$(71) \text{ wegen } \beta_G = \frac{W_G}{W_{Ges}} \text{ folgt}$$

$$(72) \beta_G = \frac{\alpha_{\min} + \int_{\alpha_{\min}}^{\alpha_G} \tau(\alpha) d\alpha}{\alpha_m}$$

Annahme:

$$(73) \alpha = 1 - (1 - \alpha_{\min}) \cdot \tau^b \quad \text{nach } \tau \text{ aufgelöst ergibt sich}$$

$$\tau^b = \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha_{\min}}$$

$$(74) \tau = \left( \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha_{\min}} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Die Gesamtkosten  $K = K_G + K_S$  sollen minimal werden.

$$\frac{dK}{d\alpha_G} = 0 \quad \text{Gl. (70) nach } \alpha_G \text{ ableiten!}$$

mit (70)

$$\frac{dK}{d\alpha_G} = (K_{f,G} - K_{f,S}) + (K_{v,G} - K_{v,S}) \frac{d\beta_G}{d\alpha_G} = 0$$

$$\frac{d\beta_G}{d\alpha_G} = \frac{K_{f,G} - K_{f,S}}{K_{v,G} - K_{v,S}} \quad (75)$$

andererseits wegen

$$\beta = \frac{\alpha_{\min} + \int_{\alpha_{\min}}^{\alpha_G} \tau(\alpha) d\alpha}{\alpha_{\min}} = \frac{\alpha_{\min}}{\alpha_m} + \frac{\int_{\alpha_{\min}}^{\alpha_G} \tau(\alpha) d\alpha}{\alpha_m} \quad (72)$$

und

$$\tau(\alpha) = \left( \frac{1-\alpha}{1-\alpha_{\min}} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (74)$$

folgt

$$\frac{d\beta}{d\alpha} = 0 + \left( \frac{1-\alpha}{1-\alpha_{\min}} \right)^{\frac{1}{b}} \cdot \frac{1}{\alpha_m} \quad (76)$$

$$(75) = (76)$$

$$\rightarrow \left( \frac{1-\alpha}{1-\alpha_{\min}} \right)^{\frac{1}{b}} \cdot \frac{1}{\alpha_m} = \frac{K_{f,G} - K_{f,S}}{K_{V,G} - K_{V,S}} \quad (77)$$

$$\alpha_{Opt} = 1 - (1 - \alpha_{\min}) \left( \alpha_m \cdot \frac{K_{f,G} - K_{f,S}}{K_{V,S} - K_{V,G}} \right)^b$$

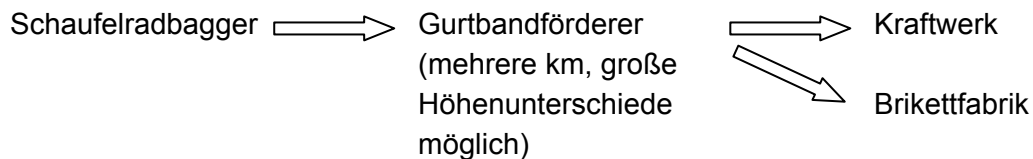
## 4 Der Energietransport

### 4.1 Kohle- und Mineralöltransport

#### 4.1.1 Kohletransport

	Braunkohle	Steinkohle
$H_u$	11-12 MJ/kg	28-32 MJ/kg
Transport über größere Entfernungen	unwirtschaftlich	wirtschaftlich

Typischer Braunkohletransport:



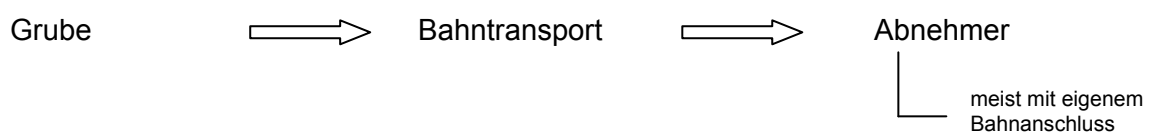
Gurtbandförderer:

$$\text{Gurtbreite} \leq 3\text{m}; v = 7,5 \text{ m/s} \rightarrow \dot{m}_{\max} = 36000 \frac{t}{h}$$

Wegen hohem Walkwiderstand von Gurt, Fördergurt und der Lagerreibung ist eine hohe Antriebsleistung erforderlich.

$$\text{Erforderliche Antriebsleistung } P_{\text{Transp.}} = 2 \text{ MW für } \dot{m} = 36000 \frac{t}{h \text{ km}}$$

Typischer Steinkohletransport:



Energiebedarf  $W = f$  (Geschwindigkeit  $c$ , Entfernung  $L$ , geodätischer Höhenunterschied  $H_2 - H_1$ )

$$(4.1) \quad W = W_F + i_B \cdot W_B + W_H$$

Arbeit gegen Fahrwiderstand

potentieller Energieaufwand

Beschleunigungsenergie aus Stillstand

Zahl der nicht planbaren Beschleunigungsvorgänge

$$(4.2) \quad W = F \cdot L + i_B \cdot \frac{mc^2}{2} + m \cdot g(H_2 - H_1)$$

$$(4.3) \quad F = F_R + F_L$$

Luftwiderstand

Summe aus Roll- und Lagerreibungswiderstand

$$(4.4) \quad F_R = m \cdot g \cdot c_R$$

Laufwiderstandsbeiwert Räder und Wälzlager  
 $= (1,2 - 2,5) \cdot 10^{-3}$

$$(4.5) \quad F_L = \frac{\rho_L}{2} c^2 \cdot \sum_{i=1}^n c_{W,i} \cdot A$$

Querschnittsfläche

Luftwiderstandsbeiwert der Lokomotive und der Wagen

(4.5) (4.4) in (4.3):

$$(4.6) \quad F = m \cdot g \cdot c_R + \frac{\rho_L}{2} c^2 \cdot \sum_{i=1}^n c_{W,i} \cdot A$$

n = Anzahl der Wagen einschließlich Lokomotive

$\rho_L$  = Luftdichte

## 4.1.2 Mineralöltransport

See- oder Pipelinetransport von Rohölquellen zur Verarbeitung

Seetransport: Umschlag weltweit > Kohle + Getreide + Eisenerz

Standardtanker: 140.000 t – 240.000 t Tragfähigkeit

Antrieb mit: Dieselmotoren ( $\eta \approx 40\%$ ) und Gasturbinen ( $\eta \approx 30\%$ )

Supertanker: 500.000 t Tragfähigkeit

Transportgeschw.: 17 kn  $\hat{=}$  31,5 km/h  $\hat{=}$  756 km/d

Spezifischer Brennstoffverbrauch bezogen auf die Tragfähigkeit: 0,065% pro Tag

Beispiel: Route Golf  $\rightarrow$  Europa mit Standardtanker  $m_{\text{Transport}} = 200.000 \text{ t}$

Transportzeit  $t = 21$  Tage

Energieverbrauch für Transport =  $0,065 \cdot 21 = 1,37\%$  des transportierten

Mineralöls  $\hat{=}$   $0,0137 \cdot 200.000 \text{ t} = 2740 \text{ t Mineralöl}$

$$EB = \text{Energiebilanz} = \frac{\text{Energieeinsatz für Bau und Betrieb}}{\text{transportierte Energiemenge}}$$

Literaturwerte:

für Entfernung  $L = 4600 \text{ km}$ :  $EB = 0,16 - 1,6\%$

für Entfernung  $L = 18500 \text{ km}$ :  $EB = 3,2 - 4,4\%$

Pipelinetransport:

Ölpipelinennetz weltweit: 1976:  $L = 510.000 \text{ km}$

1994:  $L = 700.000 \text{ km}$

größter Streckenanteil: Landesinnern  
 - Quellen  
 - Raffinerien }  $\Rightarrow$  Häfen

BRD 1980:  $\dot{V} = 138,6 \cdot 10^6 \frac{m^3}{a}$  Mineralöl über Pipelines

$V_{\text{Druckentlastungsstation}} \geq$  Inhalt eines ganzen Leitungsabschnitts zur Vorsorge bei Reparaturen und Havarien

Ausbaupotentiale in Mittel- und Westeuropa:

auf dem Land (onshore) weitgehend abgeschlossen  
 unter Wasser (offshore) seit 1975 in der Nordsee in stetigem Ausbau:  
 1975 L = 177 km; D = 0,81 m  
 1997 L = 2500 km in Betrieb oder im Bau

Energieaufwand und Investitionen für den Pipelinetransport:

$$\Delta p = \Delta p_R + \Delta p_{St}$$

Gesamtdruckdifferenz Förderpumpen = Reibungsdruckverlust Rohrleitungen + Hilfskomponenten + Höhenunterschiede

Kennzahlen:  $p_1; p_2; H_1; H_2$  Druck und Höhe am Anfang (1) und Ende (2) der Trasse  
 $A_i$  = innerer freier Rohrquerschnitt  
 $D_i$  = Rohrinne Durchmesser  
 $\lambda$  = Rohrreibungsbeiwert  
 $L$  = Rohrlänge  
 $\rho$  = Dichte

$$(4.7) \quad c = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A_i} = \text{Strömungsgeschwindigkeit}$$

$\alpha$  = Zuschlag auf die Rohrleitungslänge zur Berücksichtigung der Druckverlustbeiwerte  $c$  von Armaturen, Richtungsänderungen und Schweißnähten

Mitteleuropa: Transport von Anlandehäfen wie z.B. Wilhelmshafen, Rotterdam,

Marseille, Genua, Triest zu Raffinerien im Inland

Pipelineaufbau: Rohrdurchmesser  $D = 0,64 - 1 \text{ m}$

$$\text{Massendurchsatz } \dot{m} = 10 \cdot 10^6 - 25 \cdot 10^6 \frac{t}{a}$$

Ausnahme: Trans - Alaska - Pipeline (TAP):  $D = 1,2 \text{ m}$ ;  $L = 1280 \text{ km}$ ;  
 $\dot{m} = 100 \cdot 10^6 \frac{t}{a}$

Rohre: längs- und spiralnahtgeschweißte Rohre (StE 260.7 TM bzw. StE 480.7 TM)

Verlegung: unterirdisch in besiedelten Gebieten (Kennzeichnung durch Schilderpfähle), sonst überirdisch

vor Inbetriebnahme: Wasser - Druckprobe mit  $p = 1,5 \cdot p_{\max}$ ;  
 Schweißnähte müssen sichtbar sein!

Korrosionsschutz: Bitumen- oder Kunststoffumhüllung (passiv)  
 Kathodischer Schutz (eingepprägter Strom) gegen Streustromkorrosion (aktiver Schutz)

Korrosionsrate: 0...0,01 mm/a

Zusatzkomponente: Kopfstationen bzw. Ausgangstanklager mit

- Schwimmdachtanks ( $V = 40000 - 100.000 \text{ m}^3$ )
- Molchschleusen
- Pumpe zum Mischen und Umlagern
- EVU's
- Feuerlöschsysteme
- Zentrale Leiteinrichtung mit vielen Mess- und Überwachungsgeräten
- Druckentlastungsstationen

$$(4.8) \quad \Delta p = p_1 - p_2 = \Delta p_R + \Delta p_{St}$$

$$\Delta p = \frac{\rho \cdot c^2 \cdot \lambda \cdot L(1 + \alpha)}{2 \cdot D_i} + \rho \cdot g(H_2 - H_1)$$

(4.7) in (4.8) : (4.9)

$$\Delta p = \frac{\rho \cdot \dot{m}^2 \cdot \lambda \cdot L(1 + \alpha)}{\rho^2 \cdot A_i^2 \cdot 2 \cdot D_i} + \rho \cdot g(H_2 - H_1)$$

$$(4.9) \quad \Delta p = \frac{16 \lambda \cdot L(1 + \alpha) \cdot \dot{m}^2}{2 \rho \cdot \pi^2 \cdot D_i^4 \cdot D_i} + \rho \cdot g(H_2 - H_1)$$

$$(4.10) \quad \Delta p = \frac{8 \cdot \lambda \cdot L(1 + \alpha) \cdot \dot{m}^2}{\rho \cdot \pi^2 \cdot D_i^5} + \rho \cdot g(H_2 - H_1)$$

Annahme: optimaler Arbeitspunkt bei gleichmäßiger Auslastung der Trasse, d.h. näherungsweise konstanter Volumenstrom über die gesamte Betriebszeit  $t_B$ .

Jährlicher Stromverbrauch  
(elektrische Arbeit)

$$W_a = P_P \cdot t_B$$

Betriebszeit

Pumpenantriebsleistung

$$(4.11) \quad W_a = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p}{\eta_{P,M}} \cdot t_B = \frac{\dot{m} \cdot \Delta p}{\rho \cdot \eta_{P,M}} \cdot t_B$$

mittlerer Pumpen + E-Motorwirkungsgrad

Transportkostenberechnung:

$$\text{Spezifische Transportkosten } k = \frac{\text{jährliche Transportkosten}}{\text{jährl. transportierte Masse} \cdot \text{Entfernung}}$$



$$(4.12) \quad k = k_f + k_v$$

$$\frac{\text{Jahresfestkosten}}{\text{jährl. transportierte Masse und Rohrlänge}} + \frac{\text{variable Kosten}}{\text{jährl. transportierte Massen und Rohrlänge}}$$

jährliche transportierte Masse  $m_a = \dot{m} \cdot t_B$

Jahresfestkosten  $K_f = I_0 \cdot a$  (Investitionskosten · Annuitätsfaktor)

variable Kosten  $K_v = W_a \cdot p_E$  (Energieverbrauch · Strompreis)

$$\text{In (4.12): } k = \frac{I_0 \cdot a}{L \cdot m_a} + \frac{W_a \cdot p_E}{L \cdot m_a}$$

(4.11) in (4.12):

$$(4.13) \quad k = \frac{I_0 \cdot a}{L \cdot t_b \cdot \dot{m}} + \frac{\Delta p \cdot P_E}{\eta_{P,M} \cdot \rho \cdot L}$$

für  $\alpha = 0$  und  $H_1 = H_2$  und (4.10) folgt:

$$(4.14) \quad k = \frac{I_0 \cdot a}{L \cdot t_b} \cdot \frac{1}{\dot{m}} + \frac{8 \cdot \lambda \cdot p_E}{\rho^2 \cdot \pi^2 \cdot D_i^5 \cdot \eta_{P,M}} \cdot \dot{m}^2$$

$$(4.14a) \quad k = \frac{c_1}{\dot{m}} + c_2 \cdot \dot{m}^2 \quad c_1 \text{ und } c_2 = \text{const.}$$

Optimaler jährlicher Massendurchsatz:

$$\rightarrow (4.15) \quad \dot{m}_{opt} = \sqrt[3]{\frac{c_1}{2 \cdot c_2}} = \sqrt[3]{\frac{I_0 \cdot a \cdot \rho^2 \cdot \pi^2 \cdot D_i^5 \cdot \eta_{P,M}}{16 \cdot L \cdot t_b \cdot \lambda \cdot p_E}}$$

## 4.2 Gastransport

19. Jahrhundert: zentrale städtische Gaswerke für  
 - Beleuchtung; -Kochen; -Warmwassererzeugung

ab 1920: erste überregionale Netze in der BRD für Kokereigas

Technische Daten:

Art der Gasleitung	Einsatz seit	DN [mm]	$p_{max}$ [bar]	Entfernung
Ferngasleitung	1930	500	20	einige km
Ferngasnetze	~ 1950	900	66	> 10 km
Erstimport aus Groningen	1966	900	67,5	> 100 km
Interkontinentale Trassen	1980	1400	120	> 1000 km
	2000	1600	120	> 1000 km
Verflüssigung von Erdgas und Schiffstransport: Dabei 15 – 20% Verluste durch Verflüssigung, Transport und Wiederverdampfung				> 3000 km

Druckstufe	Druck $p_{\ddot{u}}$ [kPa]	Einsatzgebiet	Ausbau 1960 – 1989
Niederdruck	$\leq 10$	kommunale Netze	} 60000 km - 89000 km
Mitteldruck	$10 < p_{\ddot{u}} \leq 100$	kommunale Netze	
Hochdruck	$> 100$	regionale Netze + Ferntransporte	9000 km – 57800 km

## 4.2.1 Physikalische Grundlagen des Erdgastransports in Rohrleitungen

Erdgas - Stoffeigenschaften:

	Gruppe L (Low)	Gruppe H2 (High)
Brennwert $H_{O,N} \left[ \frac{kWh}{m^3} \right]$	10	11,238
Heizwert $H_{U,N} \left[ \frac{kWh}{m^3} \right]$	9	10,143
Dichte $\rho_{G,N} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$	0,8	0,7707
Methangehalt $r_i$ [Vol %]	79,6 – 85,4	93,2
Herkunft	Deutschland, Niederlande	Nordsee, Russland

$$(4.16) \text{ Dichteverhältnis } d_v = \frac{\rho_{G,N}}{\rho_{L,N}} = \frac{\rho_{G,N}}{1,293} = 0,622 \quad (\text{für Gruppe L})$$

Reibungsdruckverlust in Rohren:

$$(4.17) \text{ Rohrreibungsbeiwert } \lambda = \frac{1}{\left( 2 \cdot \lg \frac{D_i}{k} + 1,14 \right)^2} \quad \text{für } Re > 2320$$

mit  $k$  = Rauigkeitswert

$k = 0,04 - 0,1$  mm bei Stahlhochdruckleitungen

$k = 0,01$  nach Auskleidung der Rohre durch Epoxydharz

Einzelwiderstände, Armaturen, Bögen und Abzweigungen werden durch den Druckverlustbeiwert  $\zeta$  berücksichtigt.

$$(4.18) \Delta p = \frac{\rho \cdot c^2}{2} \cdot \zeta$$

einfacher: statt der Berechnung von  $\zeta$  benutzt man die integrale Rohrrauigkeit  $k_i$ .

- a)  $k_i = 0,1$  mm für Stahl, Guss und Kunststoffrohre ohne Ablagerungen; wenig Einbauten; geringe Vermaschung z.B. Hochdrucktransportleitung
- b)  $k_i = 0,5$  mm wie a) mit Einbauten und stärkerer Vermaschung
- c)  $k_i = 1,0$  mm wie b) mit Einbauten und geringen Ablagerungen z.B. Niederdruckverteilung



$$(4.24) \quad p_m = \frac{2}{3} \frac{p_1^3 - p_2^3}{p_1^2 - p_2^2}$$

Bemerkung: die Transportkapazität verringert sich mit steigender Gastemperatur um ca. 0,15% pro K. Bei Höhenunterschieden errechnet sich  $\Delta p$  zu

$$(4.25) \quad \Delta p = p_1 - p_2 + (\rho_G - \rho_L) \cdot g(H_2 - H_1)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}$   
 aus Gl. (4.21)

## 4.3 Elektroenergietransport

### 4.3.1 Geschichte

- Ersatz von Transmissionswellen durch elektrische Leitungen + elektrische Motoren in Manufakturen und Fabriken
- Standort der Elektroenergieerzeugung zunehmend in der Nähe der Primärenergiequellen; Transport als Drehstrom
- 1912 Deutschland erste 110 kV – Leitung  
 1924 USA erste 220 kV – Leitung  
 1952 Schweden erste 380 kV – Leitung  
 seit 1963 – 1965 in USA, Kanada, UDSSR 500 kV bzw. 735 kV – Leitungen

### 4.3.2 Definition nach VDE

$U \leq 1000 \text{ V}$  = Niederspannung (Verteilungsebene Abnehmer)

$U > 1000 \text{ V}$  = Hochspannung

Praktische Einteilung:

$3 \text{ kV} \leq U \leq 30 \text{ kV}$       Mittelspannung für Großabnehmer und regionale Verteilung

$60 \text{ kV} \leq U \leq 110 \text{ kV}$       Hochspannung für regionale und überregionale Verteilung,  
 Ferntransport

$U \geq 220 \text{ kV}$       Höchstspannung für Verbundwirtschaft

Faustformel Mitteleuropa: Trassenlänge in km = Spannungshöhe in kV

Netze: Strahlennetze, Ringleitungen,  
 → Verbindung mehrerer Ringnetze = vermaschtes Netz

Vorteil: Versorgungssicherheit

Nachteil: häufige, hohe Kurzschlussströme

Abhilfe: Normalbetrieb teilweise entkoppelt in Teilnetze mit alternativen

### Verbindungswegen bei Abschaltung von Abschnitten

Europa seit 1951: Verbundnetze UCPTe mit 8 Staaten  
 1995: erweitert auf 16 Staaten  
 versorgt 300 Mio. Menschen mit 400 GW

Vorteile: - Versorgungssicherheit  
 - Verminderung der Reservehaltung einzelner Kraftwerke und Netze  
 - Vergleichmäßigung der Tagesbelastungskurve

Ausblick: zukünftige Verbindung Ost – West über mehrer Tausend km mittels HGÜ – Trassen → Ausgleich tageszeitlicher Verschiebungen der Spitzenbelastung durch Energieaustausch.

#### Regelzeiten von Dampfkraftwerken:

Nach DVG (Deutsche Verbundgesellschaft) dauert das Ausregeln von 40 – 100% der Nennleistung 15 bis 30 min.

Gasturbinen und Pumpspeicherkraftwerke sind mit bis zu 45 s wesentlich schneller.

### 4.3.3 Freileitungen

BRD: 250000 km Niederspannungsleitungen (NSPL)  
 300000 km Hochspannungsleitungen (HSPL)

HSPL typisch: Stahlgittermast H = 59 m (380 kV)  
 Spannweite ca. 500 m  
 Oberstes Seil ist Erd- und Blitzableiterseil,  
 zusätzlich Zug- oder Bänderder

Leitenseile: Cu, Al oder Al – Legierung (Aldrey)

Widerstand von Al – Freileitungen:  $R = 32 \frac{\Omega}{mm^2 \cdot km}$

Durchbruchfeldstärke Luft:  $E = 20 \frac{kV}{cm}$ ; Praxis:  $17 \frac{kV}{cm}$

Problematisch: zu hohe effektive Randfeldstärke führt zu Teilentladungen (Korona = kranzförmige Leuchterscheinungen sowie Störungen im Funkverkehr)

Wirtschaftliche Stromdichte:  $i = 0,5 - 1,0 \frac{A}{mm^2}$

## 4.3.3.1 Verluste in Kabeln und Freileitungen

$$\text{Spezifischer Leitwert } \gamma_{Cu,20^{\circ}C} = 45 \frac{S \cdot m}{mm^2}; \quad \gamma_{Al,20^{\circ}C} = 35 \frac{S \cdot m}{mm^2}$$

$$\text{Temperaturbeiwert } \alpha_{Cu} \approx \alpha_{Al} \approx 0,004 \frac{1}{K}$$

$$(4.26) \text{ el. Widerstand } R_L = \frac{L}{\gamma_g \cdot A_L}$$

L = Länge des Leiters

$\gamma_g$  = temperaturabhängiger spezif. Leitwert

$A_L$  = Querschnitt

$$(4.27) \quad \gamma_g = \frac{\gamma_{20^{\circ}C}}{1 + \alpha (\vartheta_{(c)} - 20)}$$

größter Verlust = Stromwärmeverlustleistung  $P_I$  im Leiter  
+ dielektrische Verlustleistung  $P_D$  in der Isolierung

$$(4.28) \quad \text{Verlustleistung } P_V = P_I + P_D \text{ mit}$$

$$(4.29) \quad P_I = I^2 \cdot R_L$$

$$(4.26) \text{ in } (4.29) : (4.30) \quad P_I = I^2 \cdot \frac{L}{\gamma_g \cdot A_L}$$

$$(4.31) \quad P_d = K \cdot \frac{U^2 \cdot f \cdot L}{\ln \frac{r_a}{r_i}}$$

f = Frequenz

K = werkstoffspezifische Konstante des Isoliermaterials

$r_a$  = äußerer Radius

$r_i$  = innerer Radius

$$(4.32) \quad \text{Wirkleistung Drehstrom } P = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi$$

$$(4.33) \quad \text{Scheinleistung } S = U \cdot I \cdot \sqrt{3}$$

$$(4.34) \quad \text{Stromwärmeverlust } W_{V,I} = 3 \cdot R_L \cdot \int_0^{t_B} I^2 \cdot dt$$

mit  $\alpha = \frac{I}{I_{\max}}$ ;  $\tau = \frac{t}{t_B}$  sowie der dimensionslosen Jahresdauerlinie

$$(4.35) \quad \alpha(\tau) = 1 + (\alpha_{\min} - 1) \cdot \tau^b \text{ gilt}$$

$$(4.36) \quad \text{Stromwärmeverlust } W_{V,I} = R_L \cdot \left( \frac{P_{\max}}{U \cdot \cos \varphi} \right)^2 \cdot t_B \cdot \int_0^1 \alpha^2(\tau) \cdot d\tau$$

$$= \dots\dots\dots$$

$$W_{V,I} = 3 \cdot R_L \cdot I_{\max}^2 \cdot t_B \cdot d$$

$$W_{V,I} = P_{V,I_{\max}} \cdot t_B \cdot d$$

d = Arbeitsverlustgrad

mit (4.37)  $d = 1 + \frac{2(\alpha_{\min} - 1)}{b + 1} + \frac{(\alpha_{\min} - 1)^2}{2b + 1}$

mit  $\alpha_{\min} = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}$ ;  $\alpha_m = \frac{W}{P_{\max} \cdot t_B} = \frac{P_m}{P_{\max}} = \frac{t_V}{t_B}$

$$b = \frac{\alpha_m - \alpha_{\min}}{1 - \alpha_m}$$

für überschlägige Rechnung gilt:

$$(4.38) \quad d \approx 0,083 \cdot \alpha_m + 1,036 \cdot \alpha_m^2 - 0,12\alpha_m^3$$

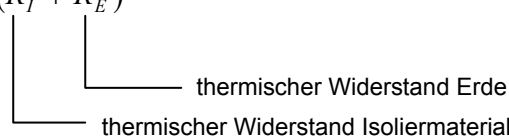
Berechnen der Leitertemperatur infolge der Stromwärmeverlustleistung  $P_I$  (Gl. 4.29) mit  $\vartheta_U$  = Umgebungstemperatur

$r_1$  = Leiterradius;  $r_2$  = Außenradius des Kabelmantels  
 $H$  = Überdeckungshöhe im Erdreich

gilt:

$$(4.39) \quad \Delta \vartheta = \vartheta_L - \vartheta_U = P_I \cdot \sum R_n$$

$$(4.40) \quad \vartheta_L = \vartheta_U + P_I (R_I + R_E)$$



$$(4.41) \quad R_I = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\lambda_I \cdot 2 \cdot \pi \cdot L}$$

$$(4.42) \quad R_E = \frac{\ln \left( \frac{2 \cdot h}{r_2} \right)}{\lambda_E \cdot 2 \cdot \pi \cdot L}$$



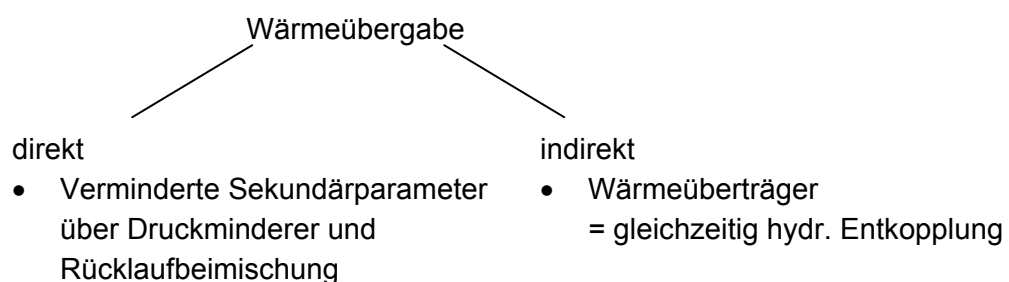
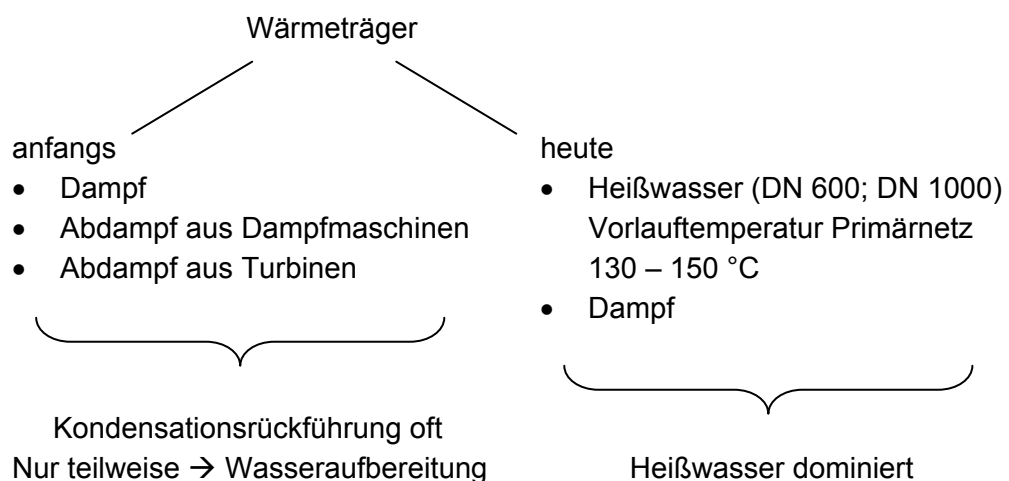
mit	$\lambda \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$	Stoffart
	0,17	PVC
	0,17	ölgetränktes Papier
	0,4	trockener Erdboden, PE
	1 – 1,5	feuchter Erdboden

#### 4.4 Wärmetransport

##### 4.4.1 Historie und Entwicklungstendenzen

Großstädte: 20 – 40% der Wohnungen sind mit Fernwärme auf Basis der KWK (Kraft – Wärme – Kopplung) versorgt.

Bsp. Berlin: Q = 10500 GWh; Trassenlänge L = 1030 km



Entfernung der Ankopplung von Fernwärme: 10 – 20 km

Netze mit verschiedenen Erzeugeranlagen möglich:

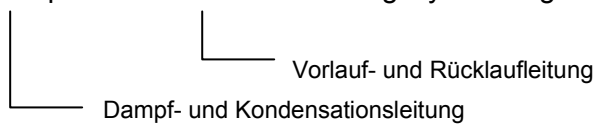
Bsp. Fernwärmeschiene Niederrhein gespeist aus

- Heizkraftwerk + Abwärme der  $H_2SO_4$  – Fabrik
- + Abwärme eines Hochofens

Nahwärmenetze werden vornehmlich durch BHKW oder HW versorgt.

#### 4.4.2 Physikalische und technische Grundlagen des leitungsgebundenen Wärmetransports

Dampf- oder Heißwasserleitungssystem = geschlossener Kreislauf + Dämmschicht



$$(4.43) \quad \dot{Q}_D = \Delta \dot{H}_D = \dot{m} (h_D - h_K)$$

Dampf
Kondensat

$$(4.44) \quad \dot{Q}_{HW} = \Delta \dot{H}_{HW} = \dot{m} \cdot c_P (\vartheta_{VL} - \vartheta_{RL})$$

Heißwasser
Vorlauf
Rücklauf

##### 4.4.2.1 Überhitzter Dampf

Für überhitzten Dampf gilt mit  $p_1$  = Druck am Leitungsanfang

$p_2$  = Druck am Leitungsende

$$(4.45) \quad p_1^2 - p_2^2 = \lambda \frac{16}{\pi^2 \cdot D_i^5 \cdot \rho_1} \frac{T_m}{T_1} p_1 \cdot L \cdot \dot{m}^2$$

$$(4.46) \quad T_m = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

### 4.4.2.2 Gesättigter Dampf

für gesättigten Dampf gilt:

$$(4.47) \quad p_1^2 - p_2^2 = \lambda \frac{16}{\pi^2 \cdot D_i^5 \cdot \rho_1} \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} \cdot p_1 \cdot L \cdot \dot{m}_1^2$$

/ Sattdampfmassendurchsatz am Leitungsende  
 \ Sattdampfmassendurchsatz am Leitungsanfang

Der dem Wärmeverlust proportionale Teil des Sattdampfs  $\dot{m}_1$  kondensiert. Dieser muss über Streckenkondensatableiter abgeführt werden. Der Rücklauf ist eine Kondensatleitung geringeren Durchmessers.

### 4.4.2.3 Heißwassersysteme

$$(4.48) \quad p_{VL} > p_{Siede} + \Delta p_{Sicherheit} \quad (\text{zur Vermeidung des Aufdampfens})$$

$$(4.49) \quad \Delta p = p_1 - p_2 = \Delta p_R + \Delta p_{ST} \quad \text{stat. Druckdifferenz} = 0, \text{ da sich VL und RL ausgle.}$$

└───┬───┘  
 Reibungsdruckverlust

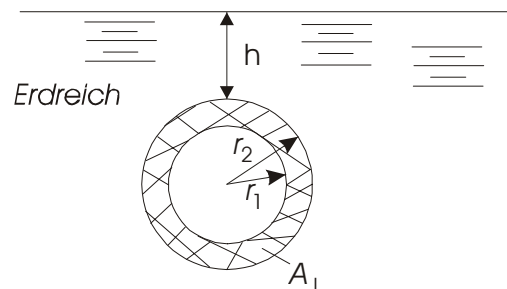
$$(4.50) \quad \Delta p = \frac{8 \cdot \lambda \cdot L \cdot (1 + \alpha) \cdot \dot{m}^2}{\rho \cdot \pi^2 \cdot D_i^5}$$

Forderungen für den Druckverlauf:

- |    |  |                                   |   |   |
|----|--|-----------------------------------|---|---|
| a) | $p_1 > p_s$                                      | siehe Gl. (4.48)                  | } | Druckhalteeinrichtung<br>beim Wärmeerzeuger |
| b) | $p_{\text{Ende RL}} > \text{NPSH}_{\text{erf.}}$ | am Saugstutzen<br>der Umwälzpumpe |   |   |
| c) | $p < p_{\text{max}}$                             | (z.B. PN 10; 16; 25)              |   |   |

Anhand eines Druckverlaufdiagramms wird an allen Punkten des Netzes der jeweilige Druck sichtbar.

Wärmeverlustleistung  $\dot{Q}_V$ :



Für erdverlegte Leitungen:

$$(451) \quad \dot{Q}_V = \frac{\vartheta_i - \vartheta_u}{\sum R_n} \approx \frac{\vartheta_i - \vartheta_u}{R_I + R_E}$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{thermischer Widerstand des Erdreichs}}$   
 $\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Wärmedämmung Isolation}}$

mit (4.52)  $R_I = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\lambda_I \cdot 2\pi \cdot L}$   $r_2 = \text{äußerer-}, r_1 = \text{innerer Radius der Dämmschicht}$

$$(4.52b) \quad R_E = \frac{\ln \frac{2h}{r_2}}{\lambda_E \cdot 2\pi \cdot L}$$

Überdeckungshöhe

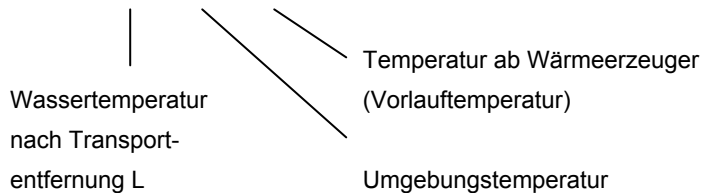
frei verlegte Leitungen:

$$(4.53) \quad R_E = R_a = \text{äußerer thermischer Widerstand}$$

$$(4.53a) \quad R_a = \frac{1}{A_I \cdot \alpha_a}$$

$$(4.54) \quad \boxed{\vartheta_i = \vartheta_u + (\vartheta_{i,WE} - \vartheta_u) \cdot e^{-\frac{1}{m \cdot c_p \cdot \sum R_n}}}$$

$\sum R_n = \text{Summe aller thermischen Widerstände}$



bei abgeschalteter Leitung folgt in Abhängigkeit der Zeit t

$$(4.55) \quad \vartheta_i = \vartheta_u + (\vartheta_{i,0} - \vartheta_u) \cdot e^{-\frac{t}{m \cdot c_p \cdot \sum R_n}}$$

$$(4.55a) \quad \vartheta_i = \vartheta_u + (\vartheta_{i,0} - \vartheta_u) \cdot e^{-\frac{t}{t'}}$$

$t' = m \cdot c_p \cdot \sum R_n$   
 $\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Zeitkonstante}}$

z.B. zur rechnerischen Bestimmung der Gefahr des Einfrierens bei tiefen Außentemperaturen.

### 4.4.3 Rohre und Verlegeverfahren

$$(4.56) \quad s = \frac{D_a \cdot p}{2\sigma_{zul} \cdot g_n + p}$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Qualitätszahl von Schweißnähten}}$

für Stahlrohre gilt  $\sigma_{zul} = \frac{K}{S} = \frac{\text{Mindeststreckgrenze}}{\text{Sicherheitsbeiwert}}$

für Kunststoffe:  $\sigma_{zul} = 2 - 3 \frac{N}{\text{mm}^2}$  nach ISO R 161

übliche Druckstufen PN 10; 16; 25

für  $g_{VL} > 100^\circ\text{C}$  Stahlrohre

für  $g_{VL} < 100^\circ\text{C}$  Kunststoffrohre

Dämmstoffe: - früher Glas- und Mineralwolle  
 - heute eher KMR = Kunststoffverbundmantelrohre =  
 Polymethandämmschicht + PE – Mantel  
 - Nachteil: VL – Temperatur auf 130 – 135°C beschränkt

bei Sanierung von 150°C Netzen mit KMR kann häufig die Temperatur durch Wärmedämmungsmaßnahmen in den Abnehmeranlagen auf 130°C reduziert werden.

Alternative: Absenkung der Rücklauftemperatur

### 4.4.4 Wirtschaftlichkeit des Wärmetransports

Definitionen:  $I_{0,R}$  = Investitionskosten der Rohrleitungen  
 $I_{0,P}$  = (Festkosten  $K_f$ ) = Investitionskosten der Pumpen  
 $K_v$  = variable Kosten für Pumpen  
 $= P_E \cdot W_E$   
 $\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Stromkosten}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{erforderliche Elektroenergie}}$   
 $a$  = Annuitätenfaktor

bei Vernachlässigung von Wärmeverlusten folgt für die jährlichen Kosten  $K_a$

$$(4.57) \quad K_a = K_f + K_v = I_{0,R} \cdot a_R + I_{0,P} \cdot a_P + P_E \cdot W_E$$

$$\text{mit (4.58) } W_E = \int_0^{t_B} P_P dt$$

$$(4.59) \quad I_{0,R} = f(\text{Rohrdurchmesser } D_i, \text{ Länge } L_R) \\ = (x_R + y_R \cdot D_i) \cdot L_R$$

$$(4.60) \quad I_{0,P} = f(\text{Auslegungsleistung } P_{P,0}) \\ = x_P + y_P \cdot P_{P,0}$$

$$(4.61) \quad K_a(D_i) = (x_R + y_R \cdot D_i) \cdot L_R \cdot a_R + x_P \cdot a_P + \frac{C(y_P \cdot a_P \cdot \dot{m}_0^3 + P_E \cdot t_B \cdot \dot{m}_m^3)}{\pi^2 \cdot \rho^2 \cdot \eta_P \cdot \eta_M \cdot D_i^5}$$

mit (4.62)  $C = 8\lambda \cdot (1 + \alpha) \cdot L_R$  und  $\dot{m}_m^3 = \int_0^{t_B} \dot{m}^3 dt$

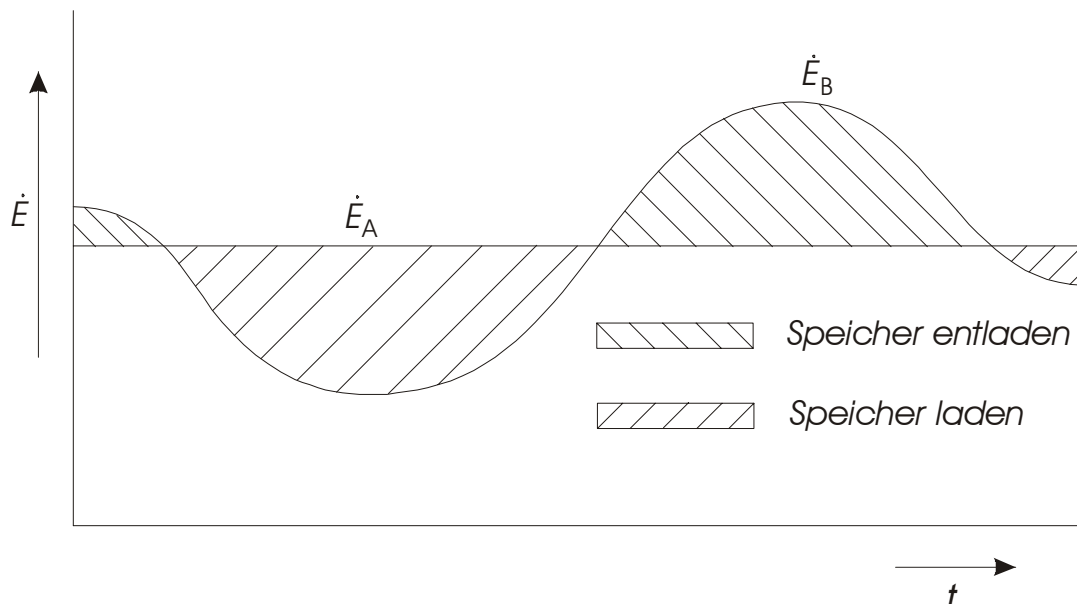
$$(4.63) \quad D_{i,opt} = \sqrt[6]{\frac{40\lambda(1+\alpha)(Y_P \cdot a_P \cdot \dot{m}_D^3 + P_E \cdot t_B \cdot \dot{m}_m^3)}{\pi^2 \cdot \rho^2 \cdot \eta_P \cdot \eta_M \cdot Y_R \cdot a_R}}$$

## 5 Speicherprozesse

Angebot und Bedarf von Nahrung und Energie stimmen zeitlich ungenügend überein. Anpassung der Momentanwerte von Angebot und Bedarf ist nicht sinnvoll und nicht wirtschaftlich. → zeitlicher Ausgleich durch Speicherprozesse

Ziel: Betrieb von Anlagen mit möglichst konstanter Leistung ( $\dot{E}_A$  = Leistungsangebot)

Betriebswirtschaftliche möglicher Nebeneffekt: „Werterhöhung“ der gespeicherten Energien durch tarifzeitliche unterschiedliche Preise



$\dot{E}_B$  = Leistungsbedarf

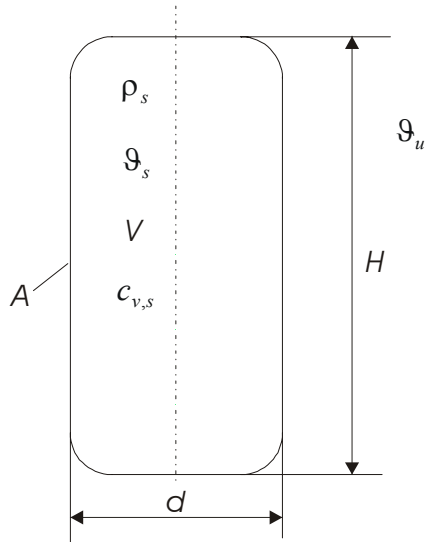
für  $\dot{E}_B < \dot{E}_A \rightarrow$  Speicherladung

für  $\dot{E}_B > \dot{E}_A \rightarrow$  Speicherentladung

Stoffliche Speicherung dominiert, da direkte Speicherung elektrischer Energien bedeutungslos ist.

### 5.1 Wärmespeicher

Speichertemperatur  $\vartheta_s$  meist  $> \vartheta_u$  (Umgebung)  $\rightarrow$  entscheidend ist Wärmeverlust



$$(5.1) \vartheta_s - \vartheta_u = \Delta \vartheta_0 \cdot e^{\left( -\frac{A}{V} \frac{K}{c_{v,s} \cdot \rho_s (1 + \delta)} \cdot t \right)} = \Delta \vartheta$$

mit (5.2)  $K$  = Wärmedurchgangskoeffizient

$$\text{und (5.3) } \delta = \frac{m_W \cdot C_W}{m_S \cdot C_{v,S}}$$

$$= \frac{\text{Masse Wand} \cdot \text{Wärmekapazität Wand}}{\text{Masse Speichermedium} \cdot \text{Wärmekapazität Speichermedium}}$$

und (5.4)  $\Delta \vartheta_0 = \vartheta_{s,0} - \vartheta_u$  zum Zeitpunkt  $t = 0$

Behälterart	A / V
Allgemein	$C \cdot V^{-\frac{1}{3}}$
Kugelbehälter	$4,84 \cdot V^{-\frac{1}{3}}$
Zylinderbehälter mit geradem Boden	$1,846 \cdot \frac{1 + 2\varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot V^{-\frac{1}{3}}$
Zylinderbehälter mit Kugelboden	$7,68 \cdot \frac{\varepsilon}{(3\varepsilon - 1)^{\frac{2}{3}}} \cdot V^{-\frac{1}{3}}$

$$\varepsilon = \frac{\text{Länge}}{\text{Durchmesser}} = \frac{h}{d}$$

$$(5.5) \quad Q = V \cdot \rho_s \cdot c_{v,s} (1 + \delta) (\Delta \vartheta_0 - \Delta \vartheta)$$

$$(5.6) \quad \frac{Q}{V \cdot \rho_s \cdot c_{v,s} (1 + \delta)} = \Delta \vartheta_D - \Delta \vartheta$$

$$(5.7) \quad \frac{Q}{V \cdot \rho_s \cdot c_{v,s} (1 + \delta) \cdot \Delta \vartheta_D} = 1 - \frac{\Delta \vartheta}{\Delta \vartheta_D}$$



q

$$(5.8) \quad q = 1 - e^{-\frac{A}{V} \frac{K \cdot t_{St}}{c_{v,s} \cdot \rho_s (1 + \delta)}}$$

Wird ein Gesamtvolumen in mehrere gleiche Behälter aufgeteilt, steigt der Wärmeverlust entsprechend Gleichung (7):

$$(5.9) \quad \frac{\Delta q}{q_0} = \frac{1 - q_0}{q_0} \left( 1 - (1 - q_0)^{\frac{K}{K_0} n^{\frac{1}{3}} - 1} \right)$$

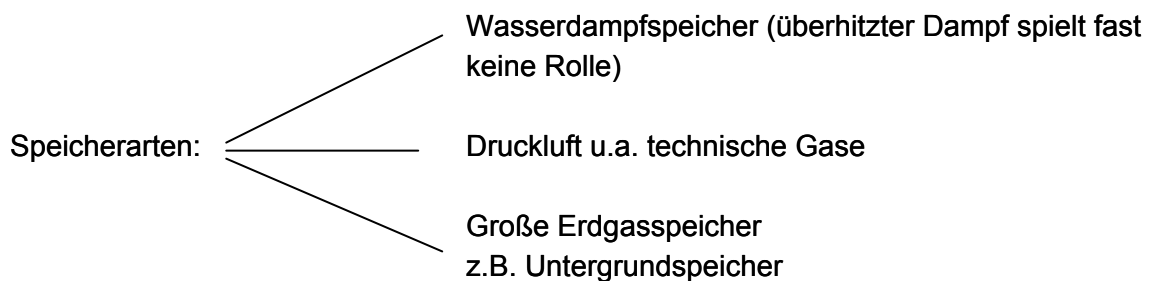
dabei ist:  $q_0$  = Wärmeverlust eines Vergleichsbehälters  
mit  $V = V_{\text{ges}}$   
 $n$  = Anzahl der Speicherbehälter

$$(5.10) \quad \frac{K}{K_0} = n^{-\frac{1}{3}}$$

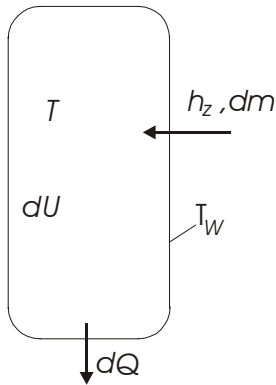
für gleiche Isolierdicke ergibt sich die Vergrößerung des Wärmeverlustes nach (4.72):

(5.11)	n	2	3	4	5	6
	$\frac{\Delta q}{q}$ in [%]	25	43	56	68	79

## 5.2 Speicherung im fluiden Einphasengebiet







Beschreibung durch 2 Grenzfälle:

- Einspeisung und Entnahme kleiner Massenströme  
 $\approx$  isotherme Zustandsänderung
- Ladung und Entladung großer Massenströme  
 $\approx$  adiabates System

Annahme:

- homogenes System
- Temperatur des zugeführten Mediums sei konstant, d.h.  $h_z = \text{const.}$
- Arbeitsmedium ist ein ideales Gas

- A: = Innenfläche des Speichers
- T: = Temperatur des Mediums
- $T_w$ : = Temperatur der Wand
- $\alpha$  := Wärmeübergangskoeffizient
- Z1:= Zustand vor der Beladung
- Z2:= Zustand nach der Beladung

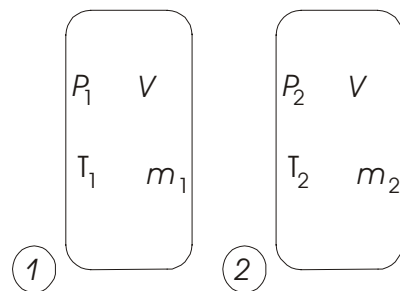
$$(5.12) \quad dQ = \alpha \cdot A \cdot (T - T_w) dt$$

$$\text{Def.: } \tau_z = \frac{T_z}{T_1}; \quad \kappa = \frac{c_p}{c_v}; \quad \pi = \frac{p_2}{p_1}; \quad \tilde{q}_{12} = \frac{Q_{12}}{m_1 \cdot c_v \cdot T_1}$$

Temperaturverhältnis zwischen Anfang und Ende des Einspeisevorgang ergibt sich zu

$$(5.13) \quad \frac{T_2}{T_1} = \frac{\pi \cdot \kappa}{\kappa \cdot T_z - 1 + \pi \cdot \tilde{q}_{12}} \cdot \tau_z$$

$$(5.14) \quad \text{Speicherfähigkeit } \mu_L = \frac{m_2}{m_1} = \frac{\pi}{\kappa}$$



spezifische Speicherfähigkeit  $\lambda$

= Verhältnis der eingespeisten Masse / Speichervolumen

$$(5.15) \quad \lambda = \frac{m_2 - m_1}{V} = \frac{m_1}{V} \left( \frac{m_2}{m_1} - 1 \right) = \frac{m_1}{V} (\mu_L - 1)$$

$$(5.16) \quad \lambda = \frac{p_1}{R \cdot T_1} (\mu_L - 1)$$

für isotherme Zustandsänderung: (1)  $p_1 \cdot V = m_1 \cdot R \cdot T_1$   
 (2)  $p_2 \cdot V = m_2 \cdot R \cdot T_1$

$$\frac{(2)}{(1)} \frac{p_2}{p_1} = \frac{m_2}{m_1} \Rightarrow (5.17) \pi = \mu_L$$

für adiabate Systeme und Annahme  $T_1 = T_2$

(1)  $p_1 \cdot V = m_1 \cdot R \cdot T_1$   
 (2)  $p_2 \cdot V = m_2 \cdot R \cdot T_2$

$$\frac{(2)}{(1)} \frac{p_2}{p_1} = \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \boxed{\pi = \mu_L \cdot \frac{T_2}{T_1}} \quad (5.18)$$

(5.18a)  $\boxed{\frac{\pi}{\mu_L} = \frac{T_2}{T_1}}$

(5.19) Energiesatz:  $U_2 - U_1 = \Delta m \cdot h_1$  | da  $dQ=0$

$$m_2 \cdot c_V \cdot T_2 - m_1 \cdot c_V \cdot T_1 = (m_2 - m_1) c_P \cdot T_1 \quad | \cdot \frac{1}{c_P \cdot T_1}$$

$$\frac{m_2}{\kappa} \cdot \frac{T_2}{T_1} - \frac{m_1}{\kappa} = m_2 - m_1 \quad | \cdot \frac{1}{m_1}$$

$$\frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{T_2}{T_1} - \frac{1}{\kappa} = \frac{m_2}{m_1} - 1$$

(5.20)  $\frac{\mu_L}{\kappa} \cdot \frac{T_2}{T_1} - \frac{1}{\kappa} = \mu_L - 1$

(5.18) in (5.20):(5.21)  $\frac{\mu_L}{\kappa} \cdot \frac{\pi}{\mu_L} - \frac{1}{\kappa} = \mu_L - 1$  |  $\cdot \kappa$

$$\pi - 1 = \kappa \cdot \mu_L - \kappa$$

$$\mu_L = (\pi - 1 + \kappa) \cdot \frac{1}{\kappa}$$

(5.22)  $\boxed{\mu_L = \frac{\kappa - 1}{\kappa} + \frac{\pi}{\kappa}}$

Entladung:

Z2:= Zustand im vollständig geladenen Zustand

Z3:= Zustand im entladenen Zustand

Für die beiden Grenzfälle isotherme und adiabate Zustandsänderung ergeben sich unter der Annahme  $p_3 = p_1$

isotherm

$$(5.23) \quad \mu_E = \frac{m_2}{m_3} = \pi$$

adiabat

$$(5.24) \quad T_3 = T_2 \cdot \pi^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}$$

$$(5.25) \quad \mu_E = \pi^{\frac{1}{\kappa}}$$

## 6 Thermische Energieanlagen

### 6.1 Feuerungen und Kessel

- Meistens zur Warmwasser- und Dampferzeugung
- Feuerungen sind meistens in Kesseln integriert

Ziel: größtmögliche Heizleistung bei erforderlichem Temperaturniveau liefern  
d.h. vollkommene und vollständige Verbrennung  
d.h. Wärmeverluste durch Strahlung, Leitung, Konvektion und Abgasstrom minimieren

Definition:

$\eta_{F,O}$  = Feuerungswirkungsgrad bezogen auf den Brennwert

$\eta_{F,U}$  = Feuerungswirkungsgrad bezogen auf den Heizwert

$\eta_{ex,F}$  = exergetischer Feuerungswirkungsgrad

$$(6.1) \quad \eta_{F,O} = \frac{\dot{m}_{VG}(h_{VG} - h_{VG,0})}{\dot{m}_L(h_L - h_{L,0}) + \dot{m}_{Br}(h_{Br} - h_{Br,0} + H_0)}$$

Indizes: VG:= *Verbrennungsgas*

L:= *Luft*

Br:= *Brennstoff*

$$(6.2) \quad \eta_{F,U} = \frac{\dot{m}_{VG}(h_{VG} - h_{VG,0} - \mu_w \cdot r)}{\dot{m}_L(h_L - h_{L,0}) + \dot{m}_{Br}(h_{Br} - h_{Br,0} + H_u)}$$

mit  $\mu_w$  := Masseanteil Wasser im Verbrennungsgas

r:= Verdampfungsenthalpie des Wassers bei 25°C; p=1,013 bar

Richtwert  $\eta_{F,O} \approx 0,99$  für große Feuerungen

$\eta_{ex}$  ist deutlich geringer wegen begrenzter Verbrennungstemperaturen bzw. wegen hoher Temperaturdifferenzen zur Nutzungstemperatur.

$$(6.3) \quad \eta_{ex,F} = \frac{\dot{m}_{VG} \cdot e_{VG}}{\dot{m}_L \cdot e_L + \dot{m}_{Br} \cdot e_{Br}}$$

wobei e = spezifische Exergie [J/kg]

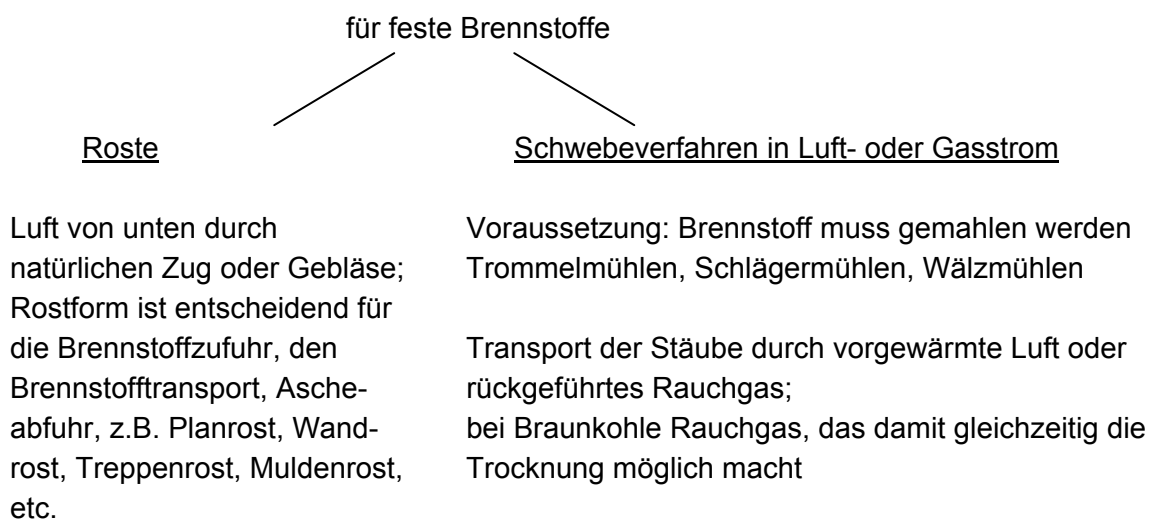
$\lambda$  = Luftverhältnis; Luftüberschusszahl

Feuerungsart	Optimalwerte für $\lambda$	Maßnahmen zur Schadstoffreduzierung
Gasfeuerung	1,07	gute Mischung von Luft und Brennstoffen
Ölfeuerung	1,09	Erwärmung von Schweröl
Kohlenstaubfeuerung	1,2	gute Mischung
Wirbelschichtfeuerung	1,2	gute Mischung
Rostfeuerung	1,35	gute Mischung

#### Schadstoffreduzierungsmaßnahmen:

- Vortrocknung des Brennstoffs (Braunkohle)
- Rauchgasrückführung (=Trocknung und Erwärmung des Brennstoffs + Senkung der Verbrennungstemperatur)
- Wasser- oder Dampfeinspritzung (Senkung der Verbrennungstemperatur)
- Einbauten in den Verbrennungsraum zur Flammenkühlung
- $\lambda$ -Sonde (O<sub>2</sub>-Messung nach Verbrennung → Regelstrecke)

#### Feuerungsarten:



flüssige Brennstoffe: Feinstverteilung oder Verdampfung in Luft vor der Verbrennung;

Vorwärmung zur Verringerung der Zähigkeit bis 90°C bei Schweröl

gasförmige Brennstoffe:

nichtleuchtende Flammen

- O<sub>2</sub> wird mit hohem Anteil vor Verbrennung zugemischt

leuchtende Flammen

- dürfen wegen Rußbildung die Wände nicht berühren

### Regelung der Feuerungsleistung

- Brennstoffe und Luftzufuhr müssen gleichzeitig verändert werden
- Laständerungsgeschwindigkeit:  
gering bei Rostfeuerung  
hoch bei Kohlenstaub-, Öl-, und Gasfeuerung

Einfache Regelung bei Kleinanlagen:

- Einstufenbrenner (Volllast und Aus)
- Zweistufenbrenner (Volllast, Teillast und Aus)
- Modulierende Brenner (kontinuierliche Leistungsverstellung im Regelbereich von 30-100%)

Stöchiometrische Verbrennung siehe Vorlesungsskript THDY III

## 6.1.1 Warmwasser-, Heißwasser- und Dampferzeuger

Kessel = Warmwasser + Heißwasser + Dampferzeuger  
Verfügbar von 5 kW – 2000 MW

$$(6.4) \quad \eta_{K,O} = \frac{\dot{Q}_N}{\dot{m}_L (h_L - h_{L,0}) + \dot{m}_{Br} (h_{Br} - h_{Br,0} + H_0)}$$

$$(6.5) \quad \eta_{K,U} = \frac{\dot{Q}_N}{\dot{m}_L (h_L - h_{L,0}) + \dot{m}_{Br} (h_{Br} - h_{Br,0} + H_U)}$$

Nutzwärme  $\dot{Q}_N$  für Dampferzeuger und Zwischenüberhitzer

$$(6.6) \quad \dot{Q}_N = \dot{m}_D (h_D - h_{SP}) + \dot{m}_{D,Z} \cdot \Delta h_Z$$

Massendurchsatz Dampf (under  $\dot{m}_D$ )  
 Enthalpie Speisewasser (under  $h_{SP}$ )  
 Massendurchsatz Dampf Zwischenüberhitzung (under  $\dot{m}_{D,Z}$ )  
 Zwischenüberhitzung (under  $\Delta h_Z$ )

große Kessel  $\eta_{K,U} \approx 0,90$ 

- Braunkohle  $\leq 0,90$
- Erdgas, Erdöl  $\geq 0,90$

Bei Ausnutzung des im Verbrennungsgas enthaltenen  $H_2O_D$

Steigerung von  $\eta_{K,U}$  um
 

- 6% bei Öl
- 10-12% bei Erdgas

$$(6.7) \quad \text{Jahresnutzungsgrad } \zeta_{K,a} = \frac{\text{Nutzenergie pro Jahr}}{\text{jährlicher Brennstoffenergieaufwand}}$$

### 6.1.2 Heizkessel

Warmwasser- (<100°C) und Heißwassererzeugung (>100°C) für Raumheizung, Warmwasserbereitung (Brauchwasser, Schwimmbäder), technologische Zwecke

5 kW ≤ P ≤ 100 MW

konventionell aus Stahl, Grauguss  
 Brennwertkessel: austenitischer Stahl

#### 6.1.2.1 Dampferzeuger

<p>Großwasserraumkessel                  100 kW &lt; P &lt; 20 MW                  0,15 t/h &lt; <math>\dot{m}</math> &lt; 30 t/h                  p ≤ 30 bar; <math>t_{max} \leq 450^\circ C</math>                   geringere Investitionskosten</p>	<p>Wasserrohrkessel                  Heizfläche = wasserdampfführende Rohre                   p ohne Begrenzung nach oben                  p mit Begrenzung nach unten wegen                  höhere Investitionskosten                  - Rostfeuerungen bei kleinen Leitungen                  - Kohlenstaub-, Gas- und Ölfeuerung für beliebige Leistungen</p>
---	---

Rauchrohre haben gegenüber Flammrohren größere Wärmeübertragungsfläche bei gleicher Länge. (Bild 57 oben)

Das Flammrohr ist außendruckbelastet, daher zur Stabilisierung stark gewellt ausgeführt (gegen Durchliegen und Einbeulen).

### 6.1.2.2 Abhitzekessel

= Ausnutzung von Abgasen aus

- Gasturbinen (bis  $t = 500^{\circ}\text{C}$ )
- Verbrennungsmotoren
- Schmelzöfen

durch Erzeugung von

- Warmwasser oder
- Wasserdampf

Bei der Erzeugung von 2 Druckstufen gelingt eine bessere Nutzung der Exergie der Abgase.

- Auslegung wie Heizkessel
- kann mit Zusatzfeuerung ausgerüstet sein
- $\text{O}_2$  im Abgas von Gasturbinen reicht i.d.R. zur Nachverbrennung aus

## 6.2 Kernreaktoren

### 6.2.1 Reaktortypen und Kraftwerkskonzepte

Unterscheidung nach

- kinetischer Energie der Neutronen
- thermische Neutronen

schnelle Neutronen

- Mischung und Anreicherung des Kernbrennstoffs
- Kühlmittel, das die thermische Energie aus dem Reaktor heraustransportiert

z.B. Schnelle Brüter:

- hohe Anreicherung mit spaltbarem Material
- Kühlmittel mit hoher Leistungsdichte und geringer Neutronenabbremswirkung (flüssiges Natrium)
- keine praktische energiewirtschaftliche Bedeutung wegen erheblicher technischer und wirtschaftlicher Probleme

Moderatoren: thermische Neutronen werden abgebremst

- sollen mit möglichst wenig Stoßreaktionen schnelle Neutronen abbremsen
- H<sub>2</sub>O, D<sub>2</sub>O
- Graphit (gasgekühlte Reaktoren)

Leichtwasserreaktoren: Wasser ist Moderator und gleichzeitig Kühlmittel

Primärkreislauf ohne Dampfbildung → 100 < p < 150 bar

Temperaturverlauf Primärseite gegenüber Sekundärseite siehe Blatt 59

Verbesserung durch Siedewasserreaktor:

Vorteil

- Erzeugt Dampf im Reaktor
- direkt zur Dampfturbine
- höhere Dampfdaten
- z.B. KKW Gundremmingen
- KKW Lingen

Nachteil

- radioaktive Kontamination
- komplizierter Wärmeübergang im Reaktor (Filmsieden!)

hat sich nicht durchgesetzt

Historie weiterer Bauvarianten:

50er	GB und F:	CO <sub>2</sub> – gekühlte Magnox-Reaktoren (natürliches metallisches Uran in Hülle aus Magnesium <u>n</u> on <u>O</u> xidizing, Alu, Be und Calcium t <sub>gas</sub> = 400°C)
60er	GB	AGR (Advanced Gas Cooled Reactor) (auf 1,6 – 2,5% angereichertes oxidiertes Uran in Hülle aus Edelstahl (t <sub>gas</sub> = 670°C)) → η <sub>th</sub> ≥ 40%
60er	BRD	Kugelhaufenreaktor Jülich Betrieb von 1967 – 1988; P <sub>el</sub> = 15 MW t <sub>gas</sub> = 950°C (für Hochtemperaturprozesswärme und Chemie)
1983 – 1989		Thorium – Hochtemperatur – Reaktor Hamm-Uentrop (675000 Graphitkugeln mit je 10g Thorium + 1g Uran)

## 6.2.2 Kernkraftwerke im Wettbewerb

Spezifische Kosten und Kostenanteile siehe Blatt 60a

$$k_E = \frac{i_o(a_1 + f_{B,P} + f_{B,I} + f_{B,V}) + i_n \cdot a_S}{t_V} + K_V$$



## 6.3 Konventionelle Dampfkraftwerke

### 6.3.1 Wirkungsgraddefinitionen (siehe Blatt 51)

### 6.3.2 Gasturbinenkraftwerke

- a) seit 50er Jahren  $t_{\text{ein}} \approx 700^\circ\text{C}$   
anfangs Mehrwellenanlagen mit Zwischenkühlung, Zwischenüberhitzung und Regeneration
- b) seit 60er Jahren einfache Einwellenanlagen  
kompakte Bauweise durch getrennte Nutzturbine  
 $n_{\text{Hochdruckturbine}} \neq n_{\text{Nutzurbine}}$   
→ abhängig von Belastung
- c) bei großen Einheiten Einwellenanlagen mit Zwischenerhitzung  
( $t_{\text{ein}} \approx 1200^\circ\text{C}$ )  
 $\eta_{th} = 0,38$  ohne Regeneration
- d) von Strahlurbine abgeleitete Turbine  
 $P_{\text{nutz}}$  wird von Niederdruckturboersatz abgegeben

## 6.4 Blockheizkraftwerke (Kraft – Wärme – Kopplung)

### 6.4.1 Prinzipaufbau

bestehend aus Kolbenmotoren mit Abwärmenutzung

$$5 \text{ kW} < P_{\text{BHKW}} < 20 \text{ MW}$$

Ottomotor                      Dieselmotor

$$\text{Bff: Gas: } 0,28 < \eta_{\text{Otto}} < 0,35 \qquad 0,4 < \eta_{\text{Diesel}} < 0,46$$

$$0,85 < \eta_{\text{ges}} < 0,95$$

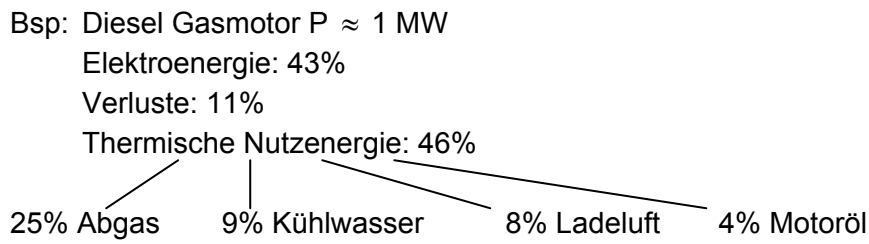
für  $P > 1 \text{ MW}$  → Gasturbine möglich  $\eta_{\text{Gasturbine}} \approx 0,30$

Vorteil:  $t_{\text{Abgas}} \approx 500^\circ\text{C}$

Abwärme Kolbenmaschine: Abgas, Kühlwasser, Motoröl, Ladeluftkühler

Nur Abgas hohe Temperatur:  $500^\circ\text{C}$  ohne Abgasturbolader  
 $300^\circ\text{C}$  mit Abgasturbolader

$t_{\text{Kühler}} \approx 90^\circ\text{C}$



$K_{I, \text{BHKW}} \gg K_{I, \text{HK}}$

Ziel: jährlich hohe Volllaststundenzahl

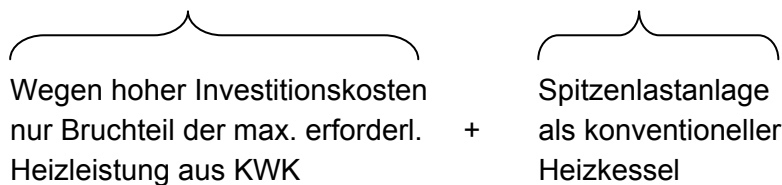
### 6.4.2 Energetische und ökologische Effektivität der Kraft – Wärme – Kopplung

Voraussetzung: gleichzeitiger Bedarf von Elektrizität und Wärme im Versorgungsgebiet

Brennstoffeinsparung abhängig von:

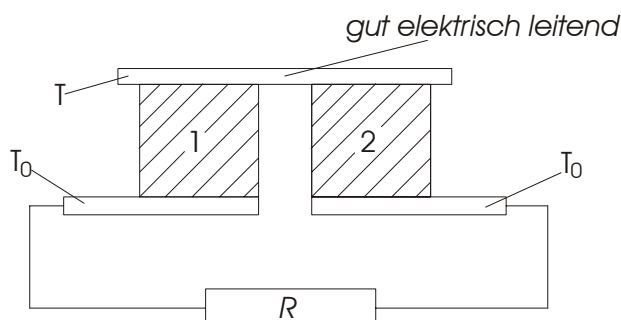
- Temperaturniveau der benötigten Heizwärme
- Lastgang Wärmebedarf  $\neq$  Lastgang Elektroenergiebedarf
- (größere Schwankungen) (kleinere Schwankungen)

Auslegung KWK meist in Kombination mit Heizkessel



Ausführungen:  $P \leq 10 \text{ MW}$ : meist Kolbenmotoren  
 $P > 10 \text{ MW}$ : GuD – Anlagen  
 Ab  $P > 1 \text{ MW}$ : Gasturbinen möglich  
 $0,85 < \eta_{ges} < 0,95$

Seebeck – Effekt:



Thermogenerator schematisch

$\eta \leq 10\%$

Elektronen gehen von Metall mit kleiner Austrittsarbeit zu Metall mit größerer Austrittsarbeit über.

Brennstoffe: flüssige und gasförmige Brennstoffe

- Am besten Erdgas: - kein Brennstofflager beim Verbraucher  
- Kaum Schwefel enthalten  
- geringe CO<sub>2</sub> – Emission wegen hohen H<sub>2</sub> – Anteil

## 6.5 Wärmeübertragung und Wärmetransformation

### 6.5.1 Wärmeübertrager zur Wärmerückgewinnung

= wichtige Elemente der Wärmerückgewinnung

- heiße Abgase aus Kesselanlagen
- heiße Abgase aus Gasturbinen
- Abluft aus Gebäuden
- Kühlwasser

innerhalb thermodynamischer Kreisprozesse zur Wirkungsgradverbesserung

- dampfbeheizte Speisewasservorwärmer
- interne Wärmeüberträger (Temperaturwechsler)

Wärmerückgewinnung nach VDI – Richtlinie 2071:

Wärmerückgewinnung in raumluftechnischen Anlagen

I. Trennflächen – Wärmeübertrager (Rekuperator)

= dominierend

- Ausführung mit glatten, rauen, gerippten Rohren
- Gleich-, Gegen- oder Kreuzstromausführung
- sichere stoffliche Trennung

II. Kreislauf – Verbund – Regenerator mit Zwischenkreislauf