

Über effiziente Produktion von

Elektrizität und Wärmeenergie

Stand: Oktober 2012 – 2019

© Ingenieurbüro Dr. Tilman Hasse

Ingenieurbüro Dr. Tilman Hasse

Eibenweg 5 • 76337 Waldbronn • Telefon: 07243 / 572113 • FAX: 07243 / 572114
tilman.hasse@t-online.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Über große Zahlen, physikalische Größen, Einheiten und über Verhältnisse und Prozentrechnung.....	5
	2.1 Fangen wir mit den großen Zahlen an:.....	5
	2.2 Physikalische Größen:.....	6
	2.3 Problemfall: Elektrische Energie – Wärmeenergie.....	7
	2.4 Verhältniszahlen.....	7
3	Über Energie, Temperatur, Entropie und Leistung.....	11
	3.1 Erster Hauptsatz der Thermodynamik.....	11
	3.2 Über Temperatur und Wärmeenergie.....	11
	3.3 Druckunterschied zwischen zwei Medien.....	13
	3.4 Entropie, zweiter Hauptsatz der Thermodynamik.....	15
	3.5 Wärmekraftmaschinen, Carnot – Faktor η_c	16
	3.6 Die Wärmepumpe.....	18
4	Wirkungsgrad von Kraftwerken mit Wärmekraftmaschinen, Leistungszahl einer Wärmepumpe und Leistungszahl einer Kältemaschine.....	20
	4.1 Kraftwerke mit Dampfturbinen.....	21
	4.2 Kraftwerke mit Dieselmotorantrieb.....	21
	4.3 Kraftwerke mit Gasturbinen und Dampfturbinen (sog. GuD – Kraftwerke, s.o.).....	21
	4.4 Wärmepumpen.....	22
	4.5 Kraft – Wärme – Kopplung (sog. KWK – Anlagen).....	22
	4.5.1 KWK – Anlage zur Erzeugung von Prozessdampf.....	23
	4.5.2 KWK – Anlage zur Erzeugung von Nahwärme mit Dieselmotoren, sog. Blockkraftheizwerk (BKHW).....	23
	4.6 Kältemaschinen.....	24
5	Thermische Nutzung der Sonnenenergie, Windkraftanlagen, Wasserkraftanlagen und Pumpspeicherkraftwerke, Fotovoltaik und Biomasse.....	26
	5.1 Thermische Nutzung der Sonnenenergie.....	26
	5.2 Windenergie.....	27
	5.3 Wasserkraftanlagen, Pumpspeicherkraftwerke.....	27
	5.4 Fotovoltaik.....	28
	5.5 Biomasse als Energieträger.....	30
6	Epilog.....	32

1 Einleitung

Elektrizität und Wärme sind die Schlüsselkomponenten unseres Energieversorgungssystems und spielen in unserer Gesellschaft eine zentrale Rolle. Jede Steigerung der Effizienz führt zu großen Einsparungen beim Primärenergieverbrauch und den Schadstoffemissionen. Es ist deshalb unverzichtbar, dass man sich ein Grundwissen aneignet, damit man die vielen, zum Teil sehr unterschiedlichen, Ansichten verstehen und beurteilen kann. In diesem Sinn möchte ich drei Zitate an den Anfang stellen:

„Unmündigkeit ist das Unvermögen, sich seines Verstandes ohne Leitung eines anderen zu bedienen. Selbstverschuldet ist diese Unmündigkeit, wenn die Ursache derselben nicht am Mangel des Verstandes, sondern der EntschlieÙung und des Mutes liegt, sich seiner ohne Leitung eines andern zu bedienen. Habe Mut, dich deines eigenen Verstandes zu bedienen!“ I. Kant 1784

„Die Frage, ob man die Mittel des sprachlichen Ausdrucks und der sprachlichen Verständigung auch beschreiben und untersuchen müsse, wurde spätestens dann akut, als Menschengruppen innerhalb einer bestimmten Gesellschaft feststellten, dass es trotz der gleichen Sprache oft nicht möglich war, sich mit anderen Gruppen zu verständigen.“ Johannes Volmert (Hrsg.) Grundkurs Sprachwissenschaft, 5.Auflage 2005, München

„Alles sollte so einfach wie möglich sein – aber nicht einfacher.“ (Albert Einstein)

Es geht also um Verstehen im doppelten Sinn, nämlich dass man unter denselben Worten auch dasselbe versteht und dass man die (physikalischen) Inhalte auch begreift. Außerdem darf eine Abhandlung, die für den Leser verständlich sein soll, keine unzulässigen Vereinfachungen enthalten.

Diese kleine Abhandlung über physikalisches Grundwissen im Zusammenhang mit Problemen der Energiewirtschaft soll dazu dienen, eine Verständigung zu ermöglichen und durch eigene Überprüfung grobe Fehler von Behauptungen aufzudecken. Heute strebt die „groÙe Politik“ an, dass im Jahr 2100 ca. 9 Milliarden Menschen auf dieser Welt friedlich und in angemessenem Wohlstand leben können, ohne das Ökosystem Erde zu gefährden. Dies kann nur mit äußersten Anstrengungen erreicht werden, wobei einerseits die Politik gefordert ist (darum geht es hier nicht), andererseits aber durch Wissenschaft und Technik zusammen mit der Wirtschaft Lösungen angeboten werden müssen, die auch wirklich funktionieren, d.h., die sowohl den physikalischen Grundgesetzen als auch den quantitativen Erfordernissen entsprechen. Dazu sind Meinungsvielfalt, Abwägungen und schließlich Bewertungen notwendig und erwünscht. Was aber in keinem Fall hilfreich ist, sind beliebige Meinungen, also Meinungen, die z.B. gegen Grundgesetze der Physik verstoßen oder einfach Fakten ignorieren bzw. Fakten fälschen.

Es ist heute unumstritten, dass alle Industrienationen in Zukunft wesentlich weniger nicht erneuerbare Energie, also Öl, Erdgas und Kohle verbrauchen sollen (Nahziel: die Hälfte des derzeitigen Verbrauchs), vor allem, damit für die Schwellenländer genügend Energie zur Verfügung steht bei gleichzeitiger Schonung des Ökosystems Erde. Um dieses ehrgeizige Ziel erreichen zu können, stehen einige etablierte und zugleich unumstrittene Verfahren zur Verfügung:

- bessere Wärmedämmung von Wohnungen, Büros und eventuell auch von

Industriebauten

- Verwendung von Solarkollektoren zur Wärmegegewinnung
- Verwendung von Wärmepumpen, natürlich auch in Kombination mit Solarkollektoren
- effizientere Nutzung aller Energiearten
- Einsatz von Fotovoltaik weltweit

Darüber hinaus gibt es zahlreiche weitere Möglichkeiten, die aber teils problematisch, zum Teil sogar ökologisch und / oder ökonomisch fragwürdig sind, die zum Teil noch in der Entwicklung sind und die teilweise erheblich subventioniert werden:

- Einsatz von Fotovoltaik in Deutschland
- Windenergie
- Einsatz von Biomasse zur Energiegewinnung, Biodiesel
- Kraft – Wärme – Kopplung (KWK – Anlagen)
- Thermische Solarkraftwerke
- Gezeitenkraftwerke

Politisch sind klare Zielsetzungen notwendig. Die Ziele, die angestrebt werden, sind z.T. sehr unterschiedlich:

- Weniger klimaschädliche Abgase, insbesondere weniger CO₂ (Kohlendioxyd)
- Herstellung von Kraftstoffen aus Biomasse (Biodiesel, Ethanol, Biokraftstoffe der zweiten Generation)
- Abschaltung der Kernkraftwerke in Deutschland
- Abhängigkeit von Erdgasimporten verringern
- usw. usw.

In dieser Abhandlung soll aber nicht „politisiert“ werden, sondern es soll versucht werden, Grundlagen und Fakten bereitzustellen, damit man eigenständig Zusammenhänge verstehen und beurteilen kann.

2 Über große Zahlen, physikalische Größen, Einheiten und über Verhältnisse und Prozentrechnung

2.1 Fangen wir mit den großen Zahlen an:

- kilo = k = 1000 = 10^3
- Mega = M = 1000 000 = 10^6 ==> auch Million
- Giga = G = 1000 000 000 = 10^9 ==> auch Milliarde
- Tera = T = 1000 000 000 000 = 10^{12}
- Peta = P = 1000 000 000 000 000 = 10^{15}
- Exa = E = 1000 000 000 000 000 000 = 10^{18}

Gelegentlich werden auch deka = d = 10 und hekto = h = 100 verwendet.

Man muss sich also zu dem Wort die Anzahl der Nullen hinter der 1 merken, also die Zehnerpotenz. Das Wort Billion sollte man nicht verwenden, da die Bedeutung im deutschen Sprachraum (=Tera) und im englischen Sprachraum (=Giga) unterschiedlich ist und damit schnell falsche Angaben um den Faktor 1000 entstehen.

Man muss sich unbedingt klar machen, dass eine **quantitative** Erfassung eines Sachverhalts sehr viel aussagekräftiger ist, als nur qualitative Aussagen – aber aufgepasst: Bei einer quantitativen Erfassung kommt es auf jede Zehnerpotenz an! Man sagt, eine quantitative Angabe ist ungefähr richtig, wenn der wahre Wert im Bereich -50% und +100% (bezogen auf die quantitative Angabe) liegt. Das ist zwar nicht besonders genau, zeigt aber doch, welches Ergebnis ungefähr zu erwarten ist.

Zu einer quantitativen Angabe muss also immer der zu erwartende Fehlerbereich angegeben werden, also z.B.: Der Fehlerbereich ist -50% bis +100% der quantitativen Angabe. Ist der Fehlerbereich kleiner, wird er meist symmetrisch angegeben, also z.B. $\pm 10\%$. Wird kein Fehlerbereich angegeben, sollte man mit $\pm 10\%$ rechnen, obwohl das oft nicht eingehalten wird.

Bildet man Differenzen zweier quantitativer Angaben, so müssen deren Fehlerbereiche absolut sehr viel kleiner sein als die zu erwartende Differenz – andernfalls kann man jedes beliebige Ergebnis erzeugen! Ein übrigens oft verwendetes Verfahren, ob aus Absicht oder aus Unkenntnis ist im Einzelfall schwer zu sagen.

Als Beispiel für eine große Zahl sei hier der Inlandsverbrauch von elektrischer Energie der BRD im Jahr 2008 genannt : 550 TWh (TeraWattStunden) = 550 Milliarden kWh = 1,98 EJ (ExaJoule). Ohne weitere Angabe erwarten wir also einen Fehlerbereich von $\pm 10\%$, absolut also ± 55 Milliarden kWh.

Rechnen wir ein klein wenig mit großen Zahlen. Nach Angaben vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit werden die erneuerbaren Energien durch die Vergütungsregeln des EEG (Erneuerbare – Energien – Gesetz) mit 20 Milliarden Euro im Jahr 2013 unterstützt, wobei die Kosten auf die allgemeinen Stromkosten umgelegt werden. Gleichmäßig verteilt auf 380 Milliarden kWh (Sonderregelungen für stromintensive Unternehmen sind berücksichtigt!) sind das 5,3 ct / kWh, also 5,3 Euro – Cent pro Kilowattstunde. Die Bundesbürger subventionieren damit die erneuerbaren Energien mit 20 Milliarden €. Dazu wird die Mehrwertsteuer von 19% erhoben, macht zusammen 23,8 Milliarden €, die von den Bundesbürgern im Jahr 2013 direkt über die Haushaltsstromrechnung bzw. indirekt über die eingekauften Produkte und Dienstleistungen zu zahlen

sind.

2.2 Physikalische Größen:

Eine physikalische Größe ist ein Merkmal eines Objekts (Körper, Zustand oder Vorgang), das qualitativ charakterisiert und quantitativ ermittelt werden kann. Die physikalischen Grundgrößen mit den SI – Einheiten (statt Einheit sagt man auch Maßeinheit) sind:

- | | | | |
|---------------------------|-------|-------------|--------------------------|
| • Masse | m | Einheit: kg | Kilogramm |
| • Zeit | t | Einheit: s | Sekunde |
| • Länge | s,x,d | Einheit: m | Meter |
| • Elektrische Stromstärke | I | Einheit: A | Ampere |
| • absolute Temperatur | T | Einheit: K | Kelvin (0°C = 273,15 K) |

Im Kontext wichtige abgeleitete Größen mit den SI – Einheiten sind:

- | | | | |
|------------------------|---|-------------------------|---|
| • Kraft | F | Einheit: N | Newton = kg m / s ² |
| • Energie, Arbeit | W | Einheit: J | Joule = kg m ² / s ² = N · m |
| • Wärmeenergie, ~menge | Q | Einheit: J | Joule = kg m ² / s ² = N · m |
| • Entropie | S | Einheit: J/K | Joule pro 1° Kelvin |
| • Geschwindigkeit | v | Einheit: m / s | |
| • Leistung | P | Einheit: W | Watt = J / s = kg m ² / s ³ |
| • Fläche | A | Einheit: m ² | |
| • Volumen | V | Einheit: m ³ | |
| • Ladung | Q | Einheit: C | Coulomb = A · s |
| • Spannung | U | Einheit: V | Volt = W / A = kg m ² / (s ³ · A) |

Wir benötigen noch einige übliche Umrechnungen von Maßeinheiten. Für die Leistung ist es üblich, die Maßeinheit kW zu verwenden:

$$1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}, \quad 1 \text{ GW} = 1000 \text{ MW} = 1000000 \text{ kW}$$

Für die Energie ist eine übliche Maßeinheit die kWh (Kilowattstunde):

$$1 \text{ kWh (Kilowattstunde)} = 3600 \text{ kJ (Kilojoule)}$$

Für die Angabe des weltweiten Verbrauchs von Energie ist die Einheit „tonne of oil equivalent“ üblich. Das ist die Menge von Wärmeenergie, die frei wird, wenn man eine Tonne (=1000kg) Öl vollständig verbrennt, wobei ein international genormter Durchschnittswert verwendet wird:

$$1 \text{ tonne of oil equivalent} = 41,868 \text{ GJ (Gigajoule)} = 11630 \text{ kWh} \quad \text{bzw.}$$
$$1 \text{ million tonnes of oil equivalent} = 11,63 \text{ Milliarden kWh}$$

Es ist einleuchtend, dass man den Verbrauch von Kohle und Erdgas leicht auf die Einheit „tonnes of oil equivalent“ umrechnen kann. Ergänzend sei erwähnt, dass auch die Einheit „Tonne Steinkohleeinheit“ verwendet wurde bzw. manchmal noch wird:

$$1 \text{ Tonne Steinkohleeinheit} = 0,7 \text{ tonnes of oil equivalent}$$

2.3 Problemfall: Elektrische Energie – Wärmeenergie

Problematisch wird es, wenn man elektrische Energie mit Wärmeenergie vergleichen will, **weil elektrische Energie grundsätzlich wesentlich höherwertig ist**. Dies ist wesentlich wie folgt begründbar:

In unserer Umwelt – Luft, Wasser oder Erdreich – ist jede Menge Wärmeenergie gespeichert. Will man diese Wärmeenergie nutzen, muss man die Umwelt kühlen und mit der gewonnenen Energie z.B. Wasser erwärmen. Nach den Gesetzen der Physik geht das nur mit einer sogenannten **Wärmepumpe**. Z.B. kühlt man einen Luftstrom von 10°C auf 5°C ab und erhitzt mit der gewonnenen Wärmeenergie Wasser auf 55°C. Mit dem erhitzten Wasser kann man dann z.B. ein Haus heizen. Die Wärmepumpe selbst besteht meist aus einem mit elektrischer Energie betriebenen Kompressor bzw. Verdichter.

Mit 1kWh elektrischer Energie kann man mit Hilfe der Wärmepumpe locker 3kWh Wärmeenergie erzeugen – umgekehrt kann man mit 1kWh Wärmeenergie nur um die ½ kWh elektrische Energie erzeugen! Also beide Energiearten werden in der Einheit kWh gemessen und das führt schnell zu Missverständnissen

Das man mit 1kWh elektrischer Energie mit Hilfe der Wärmepumpe locker 3kWh Wärmeenergie erzeugen kann, klingt für Laien wie Zauberei, wie Hokus – Pokus. Warum das so ist und warum dies eben kein Hokus – Pokus ist, soll in dieser Abhandlung u.a. ausführlich erläutert werden.

Hervorzuheben ist auch der einfache Transport der elektrischen Energie über das Stromnetz. So kann man Windenergie leicht in das Stromnetz einspeisen und dann mit dieser Energie mit Hilfe der Wärmepumpe ein Haus heizen.

2.4 Verhältniszahlen

Verhältniszahlen sind Kennzahlen, die als Quotient (Zähler dividiert durch Nenner) gebildet werden. Sie dienen der Beschreibung von Strukturen und Entwicklungen und sind Gegenstand der Statistik (s. []). Verhältniszahlen spielen in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft eine immense Rolle, weil man damit Zusammenhänge schnell erfassen kann. Wichtige Verhältniszahlen sind Gliederungszahlen und Beziehungszahlen:

Beispiele für Gliederungszahlen

Eine Gliederungszahl wird auch Quote genannt. Gliederungszahlen beziehen sich immer auf einen Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt; sie haben mit einem zeitabhängigen Verlauf nichts zu tun wie etwa Wachstumsraten. Gliederungszahlen haben keine Maßeinheit.

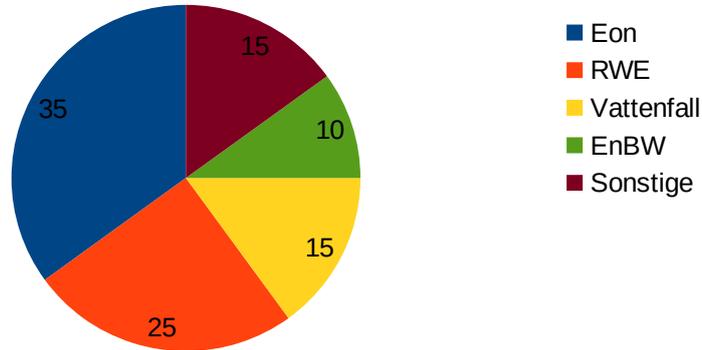
Ein Beispiel ist die Aufteilung der Stromerzeugung in Deutschland für das Jahr 2008 auf die Stromerzeuger :

- Eon : 192,5 Milliarden kWh, entspricht 35% von der Gesamterzeugung
- RWE : 137,5 Milliarden kWh, entspricht 25% von der Gesamterzeugung
- Vattenfall : 82,5 Milliarden kWh, entspricht 15% von der Gesamterzeugung
- EnBW : 55 Milliarden kWh, entspricht 10% von der Gesamterzeugung
- Sonstige : 82,5 Milliarden kWh, entspricht 15% von der Gesamterzeugung
- Gesamterzeugung: 550 Milliarden kWh

So eine Tabelle kann vorteilhaft als sog. Tortendiagramm dargestellt werden:

Stromerzeugung 2008

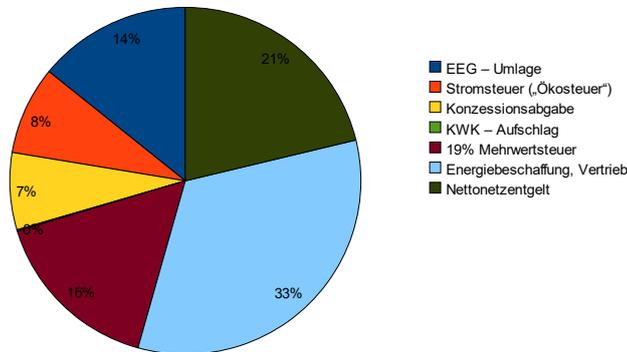
in % , insgesamt 550 Milliarden kWh



Ein weiteres Beispiel ist die Zusammensetzung des Strompreises für Privathaushalte (Quelle: BDEW / EnBW 2011) :

Zusammensetzung des Haushaltsstrompreises 2011

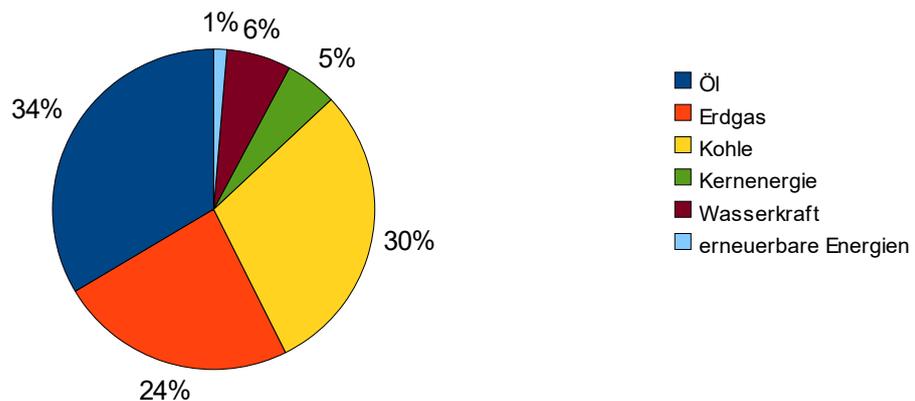
Angaben in % , Gesamt: 24,95 Cent pro kWh



Weitere Beispiele sind der Primärenergieverbrauch der Welt, der EU und von Deutschland für das Jahr 2010, nach Brennstoffen aufgeteilt (Quelle: BP Global Reports and publications: Statistical Review of World Energy 2011)

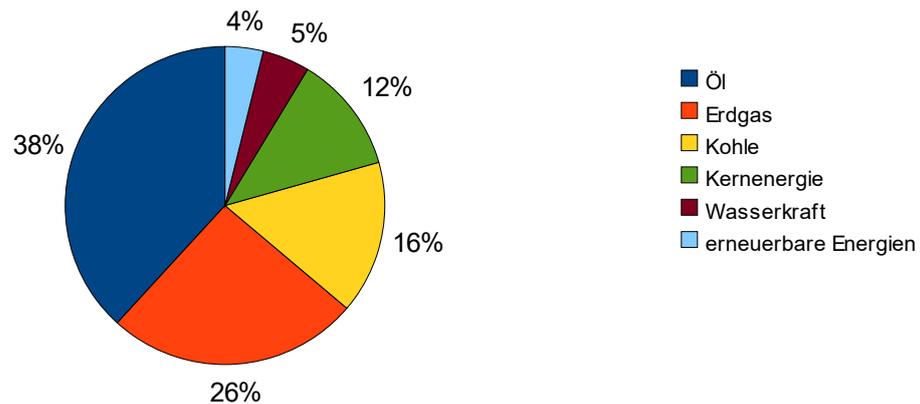
Primärenergieverbrauch der Welt 2010, nach Brennstoffen aufgeteilt

in % , Gesamtverbrauch 12002,4 million tonnes oil equivalent



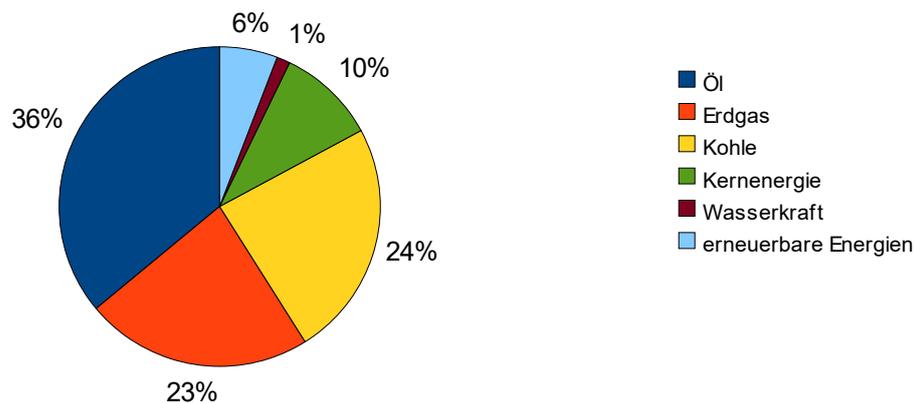
Primärenergieverbrauch der EU 2010, nach Brennstoffen aufgeteilt

in % , Gesamtverbrauch 1732,9 million tonnes oil equivalent



Primärenergieverbrauch von Deutschland 2010, nach Brennstoffen aufgeteilt

in % , Gesamtverbrauch 319,5 million tonnes oil equivalent



Beziehungszahlen

Beziehungszahlen setzen Kennzahlen eines Objekts sinnvoll ins Verhältnis. Wie Gliederungszahlen beziehen sie sich immer auf einen Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt, sie haben mit einem zeitabhängigen Verlauf nichts zu tun. Beziehungszahlen haben meist eine Maßeinheit. Z.B. hat man für ein Land (hier das Objekt) die Kennzahlen Fläche und Anzahl der Einwohner. Die Beziehungszahl „Anzahl der Einwohner / Flächeneinheit“ (Bevölkerungsdichte) hat die Maßeinheit „Einwohner pro m²“. Das Wörtchen pro ist gleichbedeutend mit „dividiert durch“ bzw. „geteilt durch“.

Beziehungszahlen sind grundsätzlich umkehrbar. Im Beispiel Bevölkerungsdichte erhält man so die sog. Arealitätsziffer mit der Maßeinheit m² pro Einwohner. Beziehungszahlen sind immer Durchschnittswerte; die Bevölkerungsdichte gibt also die durchschnittliche Dichte eines Landes an.

Sehr oft wird eine Beziehungszahl gebildet, indem man für ein Objekt den „Output“ ins Verhältnis zum „Input“ setzt. In unserem Zusammenhang sind Wirkungsgrad einer

Wärmekraftmaschine, die Leistungszahl einer Wärmepumpe und die Leistungszahl einer Kältemaschine wichtige Beziehungszahlen dieser Art, die der Bewertung einer Maschine dienen und die allgemein folgendermaßen aufgebaut sind:

$$\text{Bewertungsverhältnis} = \frac{\text{Nutzenergie}}{\text{Aufzuwendende Energie (die wir bezahlen müssen)}}$$

Haben wir eine Maschine, die über die Zeit kontinuierlich arbeitet, deren Nutzleistung über die Zeit also konstant ist (was wir im Folgenden immer voraussetzen), so können wir das Bewertungsverhältnis auch folgendermaßen angeben:

$$\text{Bewertungsverhältnis} = \frac{\text{Nutzleistung}}{\text{Aufzuwendende Leistung (die wir bezahlen müssen)}}$$

3 Über Energie, Temperatur, Entropie und Leistung

3.1 Erster Hauptsatz der Thermodynamik

Die Energie ist eine physikalische Größe und zwar eine Erhaltungsgröße, das heißt, man kann sie nicht erzeugen und auch nicht verschwinden lassen oder anders ausgedrückt: In einem abgeschlossenen System bleibt die Energie konstant oder: gibt ein System Energie ab, so nimmt ein anderes System dieselbe Energiemenge auf. Die SI-Einheit der Energie ist das Joule (J), das Formelzeichen W , speziell für Wärmeenergie Q . Es gibt sehr unterschiedliche Formen der Energie, die sich zumindest zum Teil ineinander umwandeln lassen:

- kinetische Energie bzw. Energie der Bewegung : $W_{\text{kin}} = 0,5 \cdot m \cdot v^2$ (m = Masse des Massenpunktes bzw. des Körpers bei geradliniger Bewegung, v = Geschwindigkeit)
- Energie der Lage bzw. potenzielle Energie: $W_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$ (m = Masse des Körpers, g = Fallbeschleunigung (= 9,807 m / s² für unsere Erde) und h = Höhe)
- Volumenarbeit: $W_V = p \cdot \Delta V$ (konstanter Druck mal Volumendifferenz)
- Elektrische Energie: $W_e = U \cdot I \cdot t$ (U = Spannung, I = Strom, t = Zeit)
- Wärme, Wärmemenge Q

Hier sind nun fünf Energieformen aufgeführt, wobei die ersten vier thermodynamisch eine Einheit bilden. Die ersten vier Energieformen lassen sich nämlich „theoretisch vollständig“ ineinander umwandeln. So kann man elektrische Energie dazu verwenden, mittels Pumpen Wasser in eine Talsperre zu pumpen. Man wandelt elektrische Energie also in Energie der Lage um und umgekehrt kann man anschließend die Energie der Lage wieder in elektrische Energie umwandeln. Theoretisch vollständig heißt, dass man diesen Vorgang zumindest im Labor mit einem Wirkungsgrad von nahezu 100% darstellen kann. Man kann auch kinetische Energie oder Energie der Lage oder elektrische Energie zu 100% in Wärme umwandeln. Diesen Vorgang kann man aber theoretisch nicht (und natürlich erst recht nicht in der Praxis oder im Labor) vollständig umkehren – man spricht von einem **irreversiblen** Vorgang. Darauf kommen wir weiter unten noch ausführlich zu sprechen. Zunächst soll etwas genauer geklärt werden, was es mit der Wärmeenergie und der Temperatur auf sich hat. Dazu zusammenfassend:

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik – Der Energieerhaltungssatz:

In einem abgeschlossenen System kann der Gesamtbetrag der Energie weder vergrößert noch verkleinert werden. Es können lediglich die verschiedenen Energiearten ineinander umgewandelt werden.

3.2 Über Temperatur und Wärmeenergie

Die Temperatur ist eine aus der Erfahrung bekannte physikalische Größenart, mit der wir die Begriffe „warm“ und „kalt“ verbinden. Sie ist eine der wenigen Basisgrößen der Physik und kann damit nicht aus anderen Größenarten abgeleitet werden.

Bringt man zwei Stoffe mit verschiedenen Temperaturen miteinander in Berührung, so wird der Stoff mit der höheren Temperatur kälter und der mit der niedrigeren Temperatur wärmer. Erfahrungsgemäß stellt sich eine gemeinsame Temperatur ein, die sich nicht mehr ändert. Diesen Beharrungszustand nennt man thermisches Gleichgewicht und bezeichnet das physikalische Phänomen als „**nullten Hauptsatz der Thermodynamik**“.

Wärmeenergie kann durch Reibung direkt aus mechanischer Energie erzeugt werden und man kann auf diese Weise eine genau definierte Wärmemenge erzeugen. Die Temperatur des Stoffs, dem man auf diese Weise eine bestimmte Wärmemenge zugeführt hat, erhöht sich oder bleibt gleich; dies ist abhängig von der Stoffmasse und der Art des Stoffs und von dessen Aggregatzustand (fest, flüssig, gasförmig). Wechselt der Stoff gerade seinen Aggregatzustand von fest nach flüssig bzw. von flüssig nach gasförmig, so bleibt die Temperatur sogar konstant bis die Änderung erfolgt ist. Die folgende Abbildung zeigt die Temperaturänderung von 1 kg Wasser in Abhängigkeit von der zugeführten Energie.

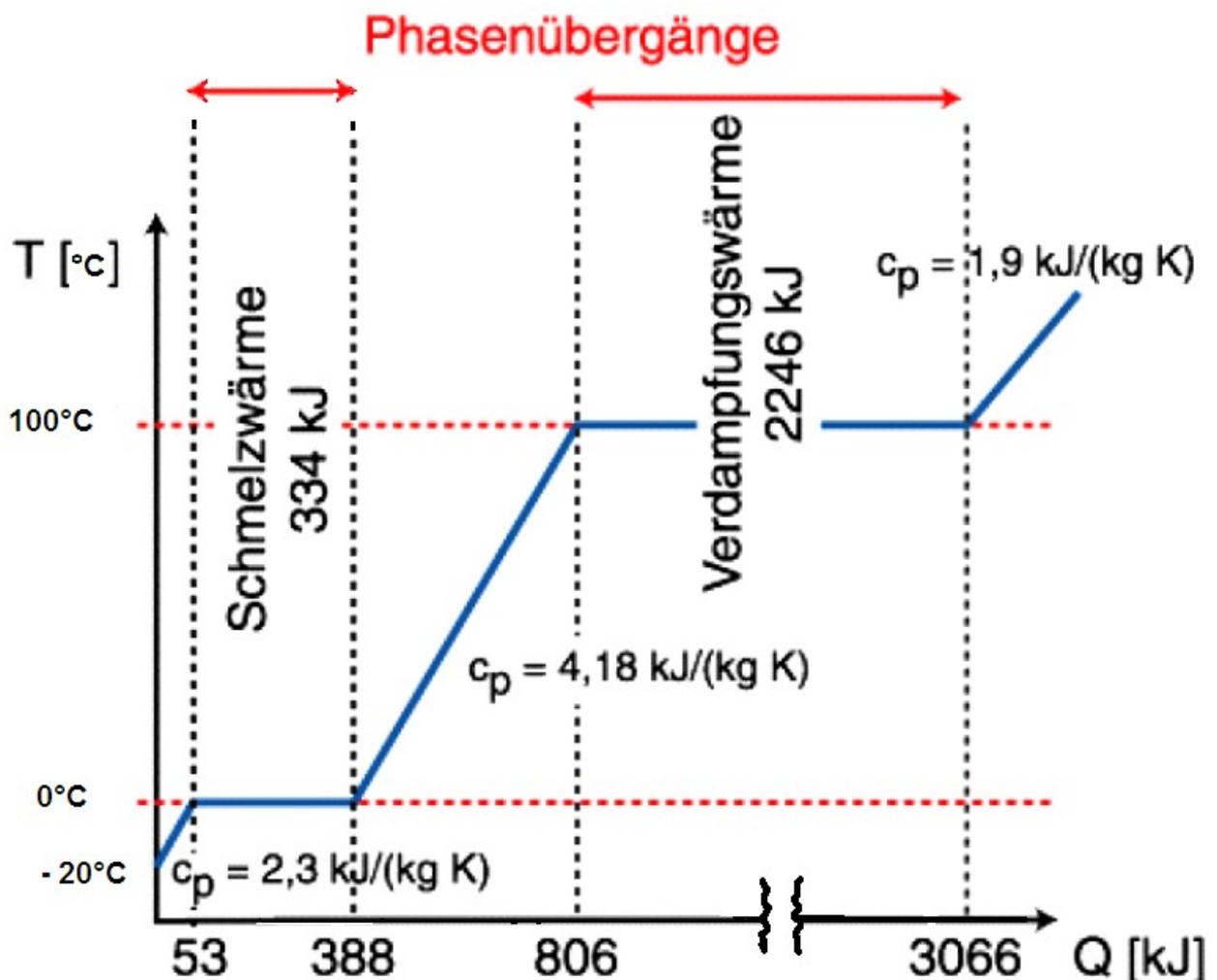


Bild 1 : Temperaturverlauf und Wärmeenergie bei Erwärmung von 1 kg Wasser bei Normaldruck von 101300 Pa.

Die Erwärmung beginnt bei einer Wassertemperatur von -20°C . Nach Zuführung von 53 kJ steigt die Temperatur auf 0°C . Dort verharrt sie, bis weitere 334 kJ Wärmeenergie, die sog. Schmelzwärme, zugeführt worden ist. Ähnliches passiert bei der Verdampfung, für die

die Verdampfungswärme von 2246 kJ notwendig ist. Beim Abkühlen müssen die entsprechenden Wärmemengen abgeführt werden.

Das klingt gut: Wir kühlen Wasser und erhalten damit Wärmeenergie! Wasser haben wir jede Menge in den Ozeanen, die ja sowieso „zu warm“ sind und damit wäre ja das Energieproblem der Menschheit gelöst. Leider gibt es Gesetze der Physik, die besagen, dass das so einfach nicht geht. Aber wir können feststellen, dass Wärmeenergie genügend vorhanden ist – wir können sie nur nicht direkt nutzen. Man benötigt offenbar noch andere physikalische Zutaten.

3.3 Druckunterschied zwischen zwei Medien

Nochmals: Wir alle wissen, dass Wärme von selbst, also ohne Einsatz äußerer Arbeit, nur vom wärmeren Medium zum kälteren Medium fließen kann und fließt. Ein Fließen vom kälteren Medium zum wärmeren Medium würde **nicht** dem Energieerhaltungssatz widersprechen – es muss also neben der Energie noch etwas anderes geben, damit eine Beschreibung dieser Phänomene gelingt.

Ein Beispiel: Freie Ausdehnung und Ausdehnung mit Erzeugung von Arbeit

Das Bild 2 zeigt einen Zylinder, der nach außen wärmedicht (adiabatisch bzw. isentrop) ist. In Bild 2a ist der Zylinder mittels einer Trennwand in zwei Kammern aufgeteilt, wobei sich in der linken Kammer ein ideales Gas mit einer Masse m , einem Druck p und einer Temperatur T befindet. In der rechten Kammer sei ein Vakuum. Nun wird der Zustand 2a auf zwei verschiedene Weisen geändert: In 2b hat sich das Gas über ein Loch in der Trennwand frei ausgedehnt. Es zeigt sich, dass – nach Beruhigung über eine angemessene Zeitdauer – sich die **Temperatur nicht geändert** hat und damit die Wärmeenergie, die im Gas gespeichert war, auch weiterhin gespeichert ist. Jedem ist aus Erfahrung sofort einsichtig, dass sich der Vorgang nicht von selbst rückgängig macht, die Zustandsänderung also **irreversibel** ist. Und es hat sich etwas Entscheidendes geändert: Man kann nun nicht mehr die Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Energie vollziehen, wie dies in Bild 2c angedeutet ist. Dort wurde angenommen, dass die Trennwand in Bild 2a ein Kolben ist, mit dem über eine angedeutete Kolbenstange z.B. kinetische Energie (=mechanische Energie der Bewegung) über einen Kurbeltrieb auf ein Schwungrad erzeugt wird. Und tatsächlich kann man zeigen, dass dem Gas genau so viel Wärmeenergie entnommen wird, wie kinetische Energie erzeugt wird – wenn man von Reibungseffekten absieht. Die Temperatur des Gases hat sich entsprechend **abgesenkt**. Dieser Vorgang ist umkehrbar, denn das Schwungrad kann die in ihm gespeicherte kinetische Energie wieder dazu verwenden, den Kolben in die Position gemäß Bild 2a zu bringen und die kinetische Energie wird wieder vollständig in Wärmeenergie umgewandelt – der Vorgang ist also **reversibel**.

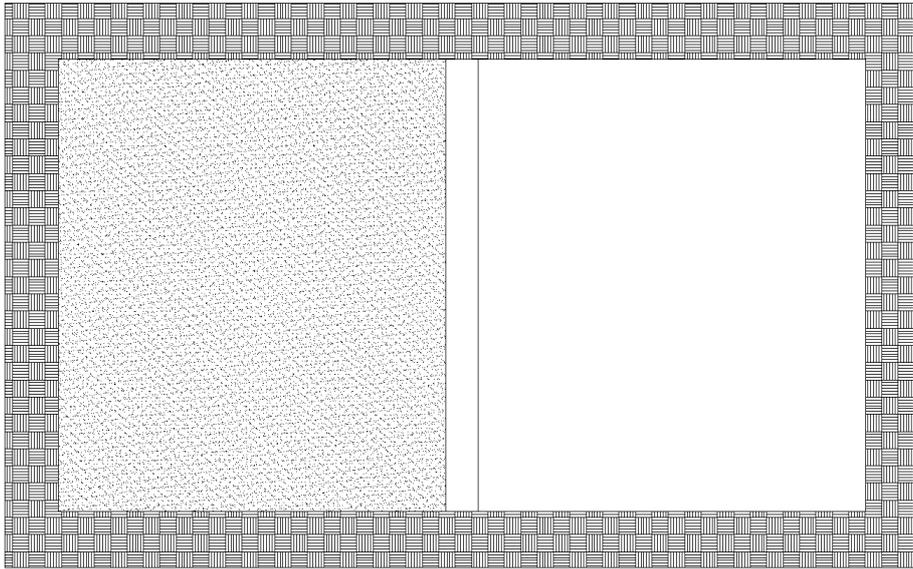


Bild 2a

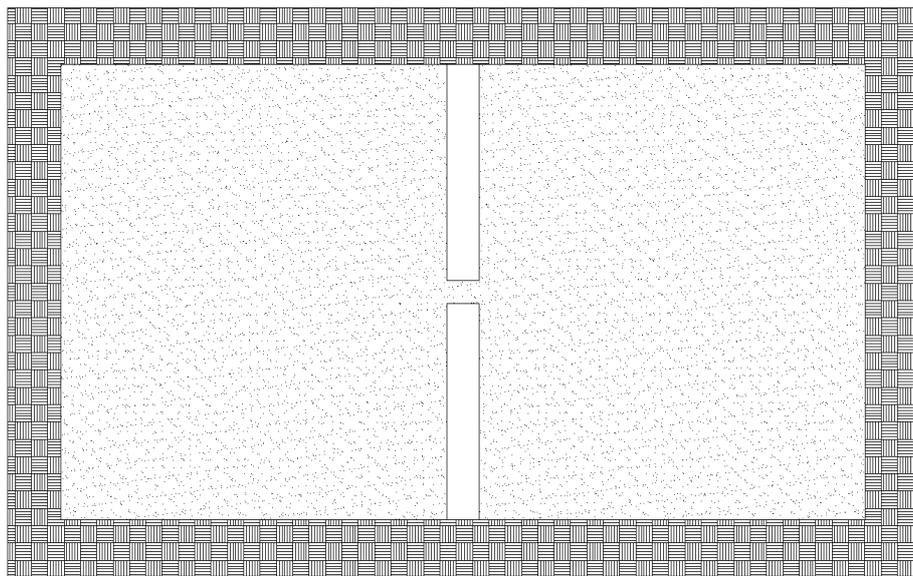


Bild 2b

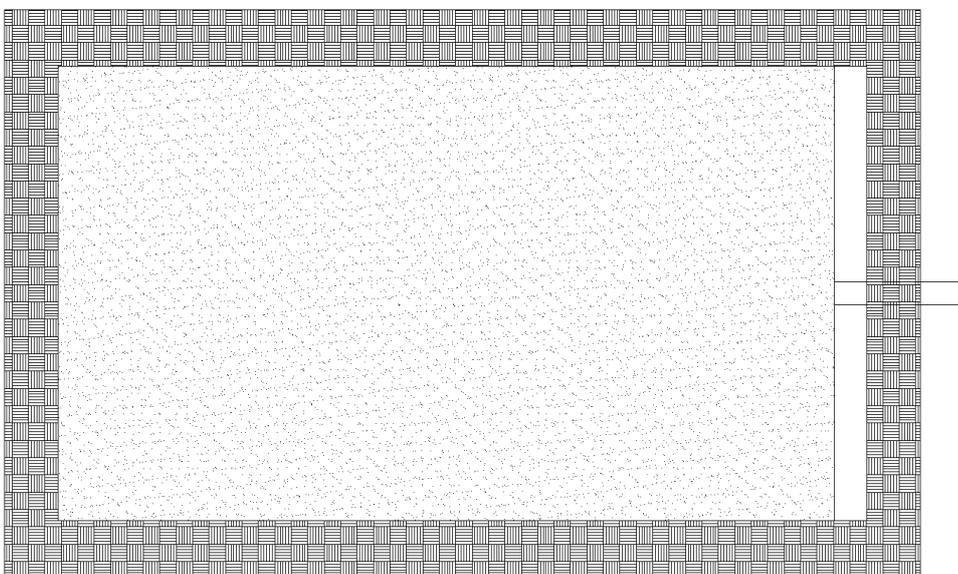


Bild 2c

Wie diese beiden ungleichen Vorgänge zeigen, benötigt man eine weitere physikalische Größe, um z.B. irreversible Vorgänge beschreiben zu können, denn die freie Ausdehnung gemäß Bild 2b verstößt keineswegs gegen den Energieerhaltungssatz. Diese zusätzliche Größe ist die **Entropie S**. Beim Vorgang gemäß Bild 2b nimmt die Entropie zu, während beim Vorgang gemäß Bild 2c die Entropie konstant bleibt, aber die Temperatur hat sich erniedrigt. Um also den Zustand wie in Bild 2b zu bekommen, muss Wärmeenergie hinzugefügt werden, bis die ursprüngliche Temperatur erreicht ist – und dann, also nach Wärmezuführung im Fall 2c, ist in beiden Fällen die **Entropiezunahme** gleich!

3.4 Entropie, zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

Neben der physikalischen Größe **Energie** ist die physikalische Größe **Entropie** die zweite Größe, die benötigt wird, um die Vorgänge bei Wärmekraftmaschinen, Wärmepumpen oder Kältemaschinen verstehen zu können. Deshalb wollen wir uns mit der Größe etwas näher beschäftigen.

Die Entropie erschließt sich nicht aus Alltagserfahrungen, sondern wird mit Hilfe verschiedener physikalischer Versuche hergeleitet. Wir wollen hier nur die Verhältnisse in einer Maschine betrachten. Dazu nehmen wir an, dass die Maschine als System nach außen hin wärmedicht ist, dass man aber gezielt Wärmeenergie zuführen bzw. abführen kann und dass man kinetische Energie abnehmen kann. Ohne weiter auf Formeln eingehen zu wollen, sei trotzdem bemerkt:

- Wird eine Wärmeenergiemenge ΔQ dem System bei der Temperatur T zugeführt (ΔQ größer 0) bzw. abgeführt (ΔQ kleiner 0), so ergibt sich die **Entropieänderung** $\Delta S = \Delta Q / T$

Es gilt also:

- Die Entropieänderung ist von der aktuellen Temperatur abhängig
- Die Entropie nimmt zu, falls Wärmeenergie dem System zugeführt wird
- Die Entropie nimmt ab, falls Wärmeenergie vom System abgeführt wird
- Die Entropie nimmt zu, falls irreversible Änderungen – also Verluste – im System auftreten

Mit der Energiebilanz und der Entropiebilanz kann nun das Prinzip der Wärmekraftmaschine erklärt werden. Hier werden zur Vereinfachung einige Annahmen getroffen:

- Die Wärmekraftmaschine sei wärmedicht verpackt, man kann aber gezielt Wärmeenergie zuführen bzw. abführen
- Die Wärmekraftmaschine gebe eine konstante Leistung ab
- Die Wärmekraftmaschine sei im physikalischen Sinn verlustfrei; d.h., die in der Maschine ablaufenden physikalischen Prozesse sind reversibel (=theoretisch umkehrbar)

Wir betrachten nun eine Zeitdauer T_D von z.B. 100 s. Während dieser Zeitdauer T_D wird der Wärmekraftmaschine

- Wärmeenergie zugeführt: Q_{zu} , z.B. durch Verbrennungsenergie
- Wärmeenergie abgeführt: Q_{ab} , z.B. durch einen Kühlturm
- mechanische Energie entzogen (und z.B. einem Generator zugeführt): E_{mech}

Die Vorzeichen ergeben sich für Q_{zu} (zugeführt) zu größer Null, für Q_{ab} (abgeführt) zu kleiner Null und für E_{mech} (entzogen) zu kleiner Null. Wir alle wissen noch aus der Schulzeit, dass der Wärmekraftmaschine in der Gesamtsumme weder dauerhaft Energie zugeführt werden kann (die Maschine würde sonst verglühen) noch dauerhaft Energie entzogen werden kann, d.h., die Summe von Q_{zu} , Q_{ab} und E_{mech} muss Null sein:

$$\text{➤ } Q_{zu} + Q_{ab} + E_{mech} = 0$$

Diese **Energiebilanz** entspricht dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik für Wärmekraftmaschinen. Nun muss aber – was leider weniger bekannt ist – auch der 2. Hauptsatz der Thermodynamik für Wärmekraftmaschinen erfüllt sein! Während der Zeitdauer T_D wird der Wärmekraftmaschine nämlich

- Wärmeenergie zugeführt: Q_{zu} und damit auch (wie oben ausgeführt) Entropie: S_{zu}
- Wärmeenergie abgeführt: Q_{ab} und damit auch (wie oben ausgeführt) Entropie: S_{ab}

Die Vorzeichen ergeben sich für S_{zu} (zugeführt) zu größer Null und für S_{ab} (abgeführt) zu kleiner Null. Auch für die **Entropiebilanz** der Wärmekraftmaschine muss die Gesamtsumme von S_{zu} und S_{ab} Null sein:

$$\text{➤ } S_{zu} + S_{ab} = 0$$

Deshalb muss man auch **zwingend Wärmeenergie abführen**. Diese Entropiebilanz entspricht dem **2. Hauptsatz der Thermodynamik für Wärmekraftmaschinen**.

Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik hat weitreichende Folgen, die es zu verstehen gilt! Recht anschaulich werden die Folgen erst mit Zahlenbeispielen, die im nächsten Abschnitt folgen. Zunächst halten wir einige Fakten fest:

- **Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik ist nicht verhandelbar**, sondern ein physikalisches Gesetz!
- Die Wärmeenergie Q_{zu} sollte also bei möglichst hoher Temperatur T_{zu} zugeführt werden und die Wärmeenergie Q_{ab} sollte bei möglichst niedriger Temperatur T_{ab} abgeführt werden. Ist $E_{mech} = - (Q_{zu} + Q_{ab})$ (s.o.), so sprechen wir von einer idealen Maschine, der **Carnotmaschine**, siehe nächster Abschnitt 3.5.

3.5 Wärmekraftmaschinen, Carnot – Faktor η_c

Für eine Bewertung betrachten wir eine Wärmekraftmaschine, der über eine Verbrennung Wärme mit der konstanten Wärmeleistung $P_{Q_{zu}}$ zugeführt wird und die mechanische Energie mit der konstanten mechanischen Nutzleistung P_{mech} abgibt. In diesem Fall spricht man vom Gesamtwirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine und bezeichnet diesen mit dem griechischen Buchstaben η_{ges} :

$$\eta_{ges} = \frac{P_{mech}}{P_{Q_{zu}}}$$

Bei einer Wärmekraftmaschine sind von besonderem Interesse die Eintrittstemperatur T_{zu} und die Austrittstemperatur T_{ab} des treibenden Gases (bei Dampfmaschinen also des Dampfes). Dies hat folgenden Grund:

Theoretisch kann man sich vorstellen, dass die Temperatur T_{zu} während der gesamten Wärmeenergiezuführung konstant ist und die Temperatur T_{ab} während der gesamten Wärmeenergieabführung auch konstant ist und dass – wie vorausgesetzt – wir es mit einer idealen, d.h. verlustfreien Wärmekraftmaschine zu tun haben. Eine solche Maschine hat sich als erster der Herr **Carnot (1796 – 1832)** ausgedacht, weshalb man sie auch kurz als **Carnotmaschine** bezeichnet. Für eine solche Maschine lässt sich der Wirkungsgrad η_C leicht angeben:

- Gegeben sind $Q_{zu} > 0$ mit T_{zu} und T_{ab} in Kelvin für einen Takt
- Man hat $S_{zu} + S_{ab} = 0 = Q_{zu} / T_{zu} + Q_{ab} / T_{ab} \rightarrow Q_{ab} = - (Q_{zu} \cdot T_{ab} / T_{zu})$
- Also: $\eta_C = - E_{mech} / Q_{zu} = (Q_{zu} + Q_{ab}) / Q_{zu} = 1 - T_{ab} / T_{zu}$
- Beispiel: $T_{zu} = 600^\circ\text{C} = 873,15\text{K}$, $T_{ab} = 30^\circ\text{C} = 303,15\text{K} \rightarrow \eta_C = 0,653 = 65,3\%$

$$\eta_C = 1 + \frac{Q_{ab}}{Q_{zu}} = 1 - \frac{T_{ab}}{T_{zu}} \quad \text{bzw.} \quad \eta_{ges} = \frac{P_{mech}}{P_{Q_{zu}}} = \eta_C = 1 - \frac{T_{ab}}{T_{zu}} \quad , \quad \text{wobei } T_{ab} \text{ und } T_{zu} \text{ in K=Kelvin}$$

eingesetzt werden müssen, siehe Beispiele weiter unten. Man kann leicht zeigen, dass bei jeder anderen Wärmekraftmaschine, bei der die Temperatur T_{zu} nicht überschritten wird und bei der die Temperatur T_{ab} nicht unterschritten wird, der **Wirkungsgrad kleiner als η_C** sein muss.

In der Praxis haben wir es nie mit einer idealen Maschine zu tun, sondern mit Maschinen, bei denen insbesondere Verluste durch Reibung und Strömungsverluste auftreten. Es gilt also der fundamentale Zusammenhang:

$\eta_{ges} < \eta_C$ für **alle** Wärmekraftmaschinen; in Worten: Der **Carnot – Faktor η_C** begrenzt den Wirkungsgrad aller Prozesse, in deren Verlauf Energie, z.B. Brennstoffenergie, zunächst in Wärme und schließlich in mechanische Arbeit umgewandelt wird. Maßgebend für den Carnot – Faktor η_C sind die Eintrittstemperatur T_{zu} und die Austrittstemperatur T_{ab} des treibenden Gases der Wärmekraftmaschine.

Aus diesem für die Praxis wichtigen fundamentalen physikalischen Gesetz können wir einige wichtige Erkenntnisse ableiten:

- Je größer die Differenz der Eintrittstemperatur T_{zu} und der Austrittstemperatur T_{ab} , also $T_{zu} - T_{ab}$, ist, einen umso größeren Gesamtwirkungsgrad können wir erwarten.
- Der Rest der eingesetzten Energie, also $1 - \eta_{ges}$, wird als Wärmeenergie wieder abgeführt (Kühltürme, Wasserkühlung).
- Es gibt offensichtlich (aus Sicht des Menschen) **edle Energie**, z.B. Elektrizität, und **direkt nicht brauchbare Energie**, z.B. die Wärmeenergie, die in 4°C warmen Wasser enthalten ist, die natürlich gewaltig ist!
- **In der Praxis: $\eta_{ges} = (0,5 \text{ bis } 0,65) \cdot \eta_C$**

3.6 Die Wärmepumpe

Grundsätzlich kann eine Wärmekraftmaschine auch „**umgekehrt**“ betrieben werden, d.h., man möchte keine mechanische Energie E_{mech} gewinnen ($E_{\text{mech}} < 0$, weil sie dem System entzogen wird), sondern möchte möglichst viel Wärmeenergie Q_{ab} gewinnen, wobei dann mechanische Energie dem System zugeführt werden muss, also $E_{\text{mech}} > 0$. Man spricht dann von einer **Wärmepumpe** und Bild 3.6.1 zeigt dazu eine Skizze. Dem System wird aus der Umwelt Wärmeenergie $Q_{\text{zu}} > 0$ bei niedriger Temperatur T_{zu} zugeführt, über den Verdichter mechanische Energie $E_{\text{mech}} > 0$ zugeführt und an die Heizung viel Wärmeenergie $Q_{\text{ab}} < 0$ abgeführt wird bei hoher Temperatur T_{ab} . Wir betrachten zunächst die ideale **Carnot – Wärmepumpe, Index C**.

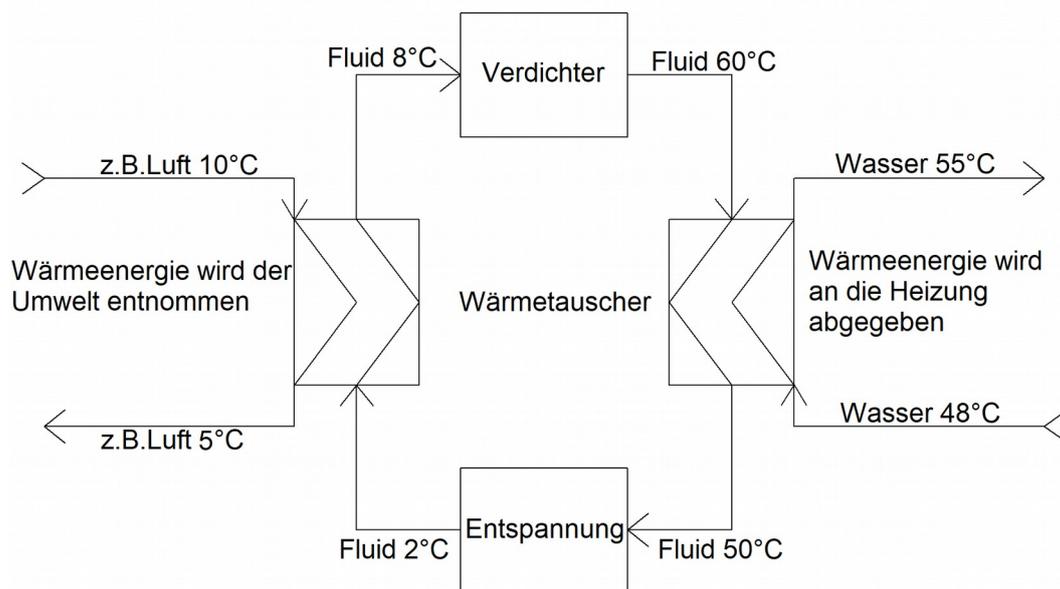


Bild 3.6.1 Prinzip der Wärmepumpe

Natürlich gelten die Gleichungen der Thermodynamik und man erhält:

- $Q_{\text{zu}} + Q_{\text{ab}} + E_{\text{mech}} = 0$ 1. Hauptsatz
- $S_{\text{zu}} + S_{\text{ab}} = 0$ 2. Hauptsatz
- Gegeben sind $Q_{\text{zu}} > 0$ mit T_{zu} und T_{ab} in Kelvin für einen Takt
- Man hat $S_{\text{zu}} + S_{\text{ab}} = 0 = Q_{\text{zu}} / T_{\text{zu}} + Q_{\text{ab}} / T_{\text{ab}} \rightarrow Q_{\text{ab}} = - (Q_{\text{zu}} \cdot T_{\text{ab}} / T_{\text{zu}})$
- Es interessiert nun die **Wärmepumpen – Leistungszahl** $\epsilon_{\text{WP}_C} = - Q_{\text{ab}} / E_{\text{mech}}$
- $\epsilon_{\text{WP}_C} = - Q_{\text{ab}} / E_{\text{mech}} = (Q_{\text{zu}} \cdot T_{\text{ab}} / T_{\text{zu}}) / (Q_{\text{zu}} \cdot (T_{\text{ab}} / T_{\text{zu}} - 1)) = T_{\text{ab}} / (T_{\text{ab}} - T_{\text{zu}})$
- Beispiel: $T_{\text{ab}} = 55^\circ\text{C} = 328,15 \text{ K}$ und $T_{\text{zu}} = 10^\circ\text{C} = 283,15 \text{ K} \rightarrow \epsilon_{\text{WP}_C} = 7,3$

Die Bewertung einer Wärmepumpe erfolgt mit der **Wärmepumpen – Leistungszahl** ϵ_{WP} :

- $\epsilon_{\text{WP}} = |P_{\text{ab}}| / P_{\text{WP}}$ mit $|P_{\text{ab}}|$: Wärmenutzleistung und P_{WP} : (meist elektrische) Antriebsleistung der Wärmepumpe.
- Natürlich gilt: $\epsilon_{\text{WP}} < \epsilon_{\text{WP}_C}$
- **In der Praxis gilt:** $\epsilon_{\text{WP}} = (0,45 \text{ bis } 0,6) \cdot \epsilon_{\text{WP}_C}$

- Die Temperaturschwankungen sind eher klein; so erhält man etwa zum obigen Beispiel: $T_{\text{ab}} = 45^{\circ}\text{C} = 318,15\text{ K}$ und $T_{\text{zu}} = -10^{\circ}\text{C} = 263,15\text{ K} \rightarrow \epsilon_{\text{WP}_C} = 5,8$
- In der Praxis werden so aus 1kW elektrischer Leistung 2,5 kW bis 6 kW Heizleistung, je nach Art der Heizung (z.B Fußbodenheizung) und Bauart der Wärmepumpe(z.B. Luft – Wasser oder Erdreich – Wasser)

Es kann nicht deutlich genug hervorgehoben werden, dass Wärmepumpen grundsätzlich mit elektrischer Energie aus Windkraftanlagen oder aus Wasserkraftanlagen oder aus Fotovoltaik betrieben werden können und man in diesem Fall vollkommen ohne CO₂ – Ausstoß und perfekt umweltfreundlich heizt!

Aber selbst bei Verwendung von Strom, der mit einem GuD – Kraftwerk erzeugt wurde, sieht die Gesamtbilanz sehr positiv aus: Unter Berücksichtigung der Netzverluste wird aus 1kWh Wärmeenergie 0,53 kWh elektrische Energie gewonnen und mit der Wärmepumpe kann damit ca. 2kWh Wärmeenergie zum Heizen erzeugt werden. Der Ansatz, Strom aus GuD – Kraftwerken zur Bilanz heran zu ziehen, ist durchaus sinnvoll, da Wärmepumpen meist an Stelle von Erdgasheizungen bzw. Ölheizungen installiert werden und andererseits werden GuD – Kraftwerke mit Erdgas oder Öl betrieben.

4 Wirkungsgrad von Kraftwerken mit Wärmekraftmaschinen, Leistungszahl einer Wärmepumpe und Leistungszahl einer Kältemaschine

Im Folgenden betrachten wir folgendes:

- Kraftwerke mit Dampfturbinen
- Kraftwerke mit Dieselmotorantrieb
- Kraftwerke mit Gasturbinen und Dampfturbinen (sog. GuD - Kraftwerke)
- Wärmepumpen – das sind Maschinen, die der Umgebung mit niedriger Temperatur, z.B. 10°C, Wärmeenergie entnehmen, also abkühlen, und einem Medium (z.B. Wasser) mit höherer Temperatur (z.B. 50°C) zuführen.
- Kraft – Wärme – Kopplung (sog. KWK - Anlagen)
- Kältemaschinen – das sind Maschinen, die unsere Kühlschränke oder Gefriertruhen kühlen.

Unter einem Kraftwerk verstehen wir hier eine Anlage, mit der Strom aus Wärme, die durch Verbrennung von Brennstoffen entsteht, erzeugt wird. Wichtig ist der elektrische Gesamtwirkungsgrad η_{ges_elektr} :

$$\eta_{ges_elektr} = \frac{P_{elektr}}{P_{Q-zu}} = \eta_C \cdot \eta_V \quad \text{mit } \eta_V \text{ als Faktor, der durch Verluste entsteht.}$$

Einige Bemerkungen dazu:

- Folgende Brennstoffe werden bzw. können für Kraftwerke zum Einsatz kommen:
 - Feste Brennstoffe: Steinkohle, Braunkohle, Torf
 - Flüssige Brennstoffe: Dieselöl, Kerosin, Biodiesel (dazu gehört auch das berüchtigte Palmöl)
 - Gasförmige Brennstoffe: Erdgas, Biogas, Bio – Erdgas (SNG: Substitute Natural Gas)
- Konventionelle Dampfkraftanlagen, also Kraftwerke mit Dampfturbinen, bestehen aus einem Wärmetauscher (Dampfkessel, Dampferzeuger), in dem durch die Verbrennung von festen, flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen Dampf erzeugt wird, mit dem eine Dampfturbine angetrieben wird. Anschließend wird im Kondensator (auch ein Wärmetauscher) wieder Wasser erzeugt, das in den Dampferzeuger gepumpt wird.
- Eine GuD – Anlage besteht aus den drei wesentlichen Komponenten Gasturbine, Dampferzeuger und Dampfturbine. Die benötigte Verbrennungsluft wird aus der Umgebung angesaugt, über ein Filter vom Staub gereinigt und auf einen Druck von ca. 17 bar verdichtet. Dabei erwärmt sie sich auf ca. 300°C. Dieser Massenstrom wird in der Brennkammer, unter Zuführung von z.B. Erdgas oder Diesel, auf 1100°C bis 1300°C erhitzt und nachfolgend in der Gasturbine entspannt. So wird die notwendige Leistung für den Antrieb des Luftverdichters ebenso erzeugt wie für einen ersten Generator; die Temperatur des Massenstroms sinkt hierdurch auf etwa 550°C. Die heißen Rauchgase werden in den Dampferzeuger geleitet und geben dort den größten Teil ihrer Energie ab; mit dem gewonnenen Dampf wird in der nachgeschalteten Dampfturbine über einen zweiten Generator elektrische Energie

erzeugt.

4.1 Kraftwerke mit Dampfturbinen

Dort entstehen Verluste durch:

- Verluste bei der Verbrennung und Dampferzeugung im Kessel
- Turbinenverluste
- Rohrleitungsverluste
- mechanische und elektrische Verluste
- Eigenbedarf

Ein typisches Beispiel: $T_{ab} = 20^{\circ}\text{C} = 20+273,15 \text{ K} = 293,15 \text{ K}$; $T_{zu} = 620^{\circ}\text{C} = 620+273,15 \text{ K} = 893,15 \text{ K}$ Es folgt: $\eta_C = 0,67 = 67\%$. Für große Kraftwerke – also Kraftwerke mit mehr als 100 MW Leistung – erreicht man $\eta_{ges_elektr} = 44\%$, so dass $\eta_V = 0,66$ gilt; d.h., von dem physikalisch theoretisch erreichbaren Wert kann praktisch nur 66% genutzt werden.

4.2 Kraftwerke mit Dieselmotorantrieb

Dort entstehen Verluste durch:

- Verluste bei der explosionsartigen Verbrennung
- mechanische und elektrische Verluste
- Eigenbedarf

Ein typisches Beispiel: $T_{ab} = 20^{\circ}\text{C} = 20+273,15 \text{ K} = 293,15 \text{ K}$; $T_{zu} = 1100^{\circ}\text{C} = 1100+273,15 \text{ K} = 1373,15 \text{ K}$ Es folgt: $\eta_C = 0,79 = 79\%$. Für Kraftwerke ab 50 kW bis ca. 1MW Leistung erreicht man $\eta_{ges_elektr} = 42\%$, so dass $\eta_V = 0,53$ gilt; d.h., von dem physikalisch theoretisch erreichbaren Wert kann praktisch nur 53% genutzt werden.

Kraftwerke mit Dieselmotorantrieb werden nur für kleine (ca.1MW) bis sehr kleine (ca.10kW) Leistungen verwendet; sie werden oft für kleine Anlagen mit Kraft – Wärme – Kopplung (KWK) verwendet. Ob das wirklich sinnvoll ist, werden wir später diskutieren, wobei auch ins Gewicht fällt, dass die Abgaswerte nicht so günstig sind, wie bei Großkraftwerken mit kontinuierlicher Verbrennung und extrem aufwändiger Abgasreinigung. Typische Abgaswerte bei Dieselmotorantrieb sind (neben CO_2 und H_2O natürlich):

Ungefähre Abgaswerte (bei Normbedingungen mit Dieselkraftstoff)

- Stickoxide (NO_x) 2,0 g/kWh
- Kohlenmonoxid (CO) 1,5 g/kWh
- Staub (C) 0,02 g/kWh
- Organische Stoffe (HC) 0,46 g/kWh

4.3 Kraftwerke mit Gasturbinen und Dampfturbinen (sog. GuD – Kraftwerke, s.o.)

Dort entstehen Verluste durch:

- Verluste bei der Verbrennung in der Gasturbine und bei der Dampferzeugung im Kessel
- Turbinenverluste
- Rohrleitungsverluste

- mechanische und elektrische Verluste
- Eigenbedarf

Ein typisches Beispiel: $T_{ab} = 20^{\circ}\text{C} = 20 + 273,15 \text{ K} = 293,15 \text{ K}$; $T_{zu} = 1100^{\circ}\text{C} = 1100 + 273,15 \text{ K} = 1373,15 \text{ K}$ Es folgt: $\eta_c = 0,79 = 79\%$. Für Kraftwerke ab 50 MW bis ca. 1000MW Leistung erreicht man $\eta_{ges_elektr} = 59\%$, so dass $\eta_v = 0,75$ gilt; d.h., von dem physikalisch theoretisch erreichbaren Wert kann praktisch 75% genutzt werden.

Mit 59% haben GuD – Kraftwerke einen sehr hohen Wirkungsgrad und sind damit prädestiniert für künftig zu bauende Kraftwerke.

4.4 Wärmepumpen

Das Prinzip Wärmepumpe wurde bereits ausführlich im Abschnitt 3.6 beschrieben. Zur Wiederholung:

Man kann nicht deutlich genug hervorgehoben werden, dass Wärmepumpen grundsätzlich mit elektrischer Energie aus Windkraftanlagen oder aus Wasserkraftanlagen oder aus Fotovoltaik betrieben werden können und man in diesem Fall vollkommen ohne CO₂ – Ausstoß und perfekt umweltfreundlich heizt!

Aber selbst bei Verwendung von Strom, der mit einem GuD – Kraftwerk erzeugt wurde, sieht die Gesamtbilanz sehr positiv aus: Unter Berücksichtigung der Netzverluste wird aus 1kWh Wärmeenergie 0,53 kWh elektrische Energie gewonnen und mit der Wärmepumpe kann damit ca. 2kWh Wärmeenergie zum Heizen erzeugt werden. Der Ansatz, Strom aus GuD – Kraftwerken zur Bilanz heran zu ziehen, ist durchaus sinnvoll, da Wärmepumpen meist an Stelle von Erdgasheizungen bzw. Ölheizungen installiert werden und andererseits werden GuD – Kraftwerke mit Erdgas oder Öl betrieben.

4.5 Kraft – Wärme – Kopplung (sog. KWK – Anlagen)

Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bzw. Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) ist die gleichzeitige Gewinnung von elektrischer Energie und nutzbarer Wärme für Produktionsprozesse (Prozesswärme, Prozessdampf) oder nutzbarer Wärme für Heizzwecke (Fernwärme oder Nahwärme) in einem Kraftwerk. Dahinter steckt die Idee, die Abgabe von ungenutzter Abwärme an die Umgebung weitestgehend zu vermeiden. Ob das in jedem Fall wirklich sinnvoll funktioniert, wollen wir jetzt untersuchen. Siemens schreibt dazu in einer aktuellen (2012) Broschüre zutreffend: „Dabei (bei Verwendung von Kraft-Wärme-Kopplung) sind Wirkungsgrade von 60 bis zu 95 Prozent möglich“. Ein Wirkungsgrad von 95% ist natürlich fantastisch und es gibt tatsächlich einen Anwendungsfall, nämlich bei der Erzeugung von Prozessdampf, bei dem der Wirkungsgrad auch nahezu erreicht wird. Ein Wirkungsgrad von 60% hingegen ist äußerst fragwürdig und rechtfertigt – wie wir sehen werden – eine KWK – Anlage nicht. Die aktuelle Anwendung von KWK – Anlagen ist vielfältig:

- KWK – Anlage zur Erzeugung von Prozessdampf
- KWK – Anlage zur Erzeugung von Nahwärme mit Dieselmotoren
- KWK – Anlage zur Erzeugung von Nah – und/oder Fernwärme mit GuD – Kraftwerken
- sog. KWK – Mikroanlagen für Ein – oder Mehrfamilienhäuser

4.5.1 KWK – Anlage zur Erzeugung von Prozessdampf

Prozessdampf wird in großen Mengen für unterschiedliche chemische Prozesse benötigt und ist Dampf bei einer bestimmten Temperatur und einem bestimmten Druck. Letzterer soll uns hier nicht interessieren. Der Einfachheit halber nehmen wir wieder eine kontinuierlich konstante Dampf – und Stromerzeugung an, wobei der Dampf eine Temperatur von 200° C bei konstantem Massenstrom haben soll. Dies entspricht einer konstanten Wärmeleistung P_{QD} , die fest vorgegeben ist. Bei kontinuierlicher Zuführung eines Brennstoffs mit anschließender Verbrennung steht eine theoretische Wärmeleistung P_{QB} an. Setzen wir die Verluste, die bei der Verbrennung und Dampferzeugung im Kessel und durch Eigenbedarf entstehen, pauschal mit 7% an, so erhalten wir die Formel:

$$P_{QB} = P_{QB} \cdot \eta_C \cdot \eta_V + P_{QB} \cdot (1 - \eta_C \cdot \eta_V - 0,07) + P_{QB} \cdot 0,07 = P_{\text{elektr}} + P_{QD} + P_V$$

Damit ergibt sich, da ja P_{QD} vorgegeben wird,

$$P_{QB} = P_{QD} / (1 - \eta_C \cdot \eta_V - 0,07) \text{ und damit weiter für den Nutzungsgrad } G_{\text{Nutz}} = P_{\text{Nutz}} / P_{QB} \text{ mit } P_{\text{Nutz}} = P_{\text{elektr}} + P_{QD} : G_{\text{Nutz}} = 1 - 0,07 = 0,93 = 93 \%$$

Man sieht, dass der Nutzungsgrad unabhängig davon ist, ob Elektrizität erzeugt wird oder nicht erzeugt wird ($\eta_C \cdot \eta_V = 0$). Für $\eta_C \cdot \eta_V = 0$ erhält man $P_{QB} = P_{QD} / 0,93$ und für $\eta_C \cdot \eta_V > 0$:

$$\Delta P_{QB} = P_{QD} / (1 - \eta_C \cdot \eta_V - 0,07) - P_{QD} / 0,93 = P_{QD} / (0,93 \cdot (0,93 - \eta_C \cdot \eta_V))$$

ΔP_{QB} ist also die zusätzliche Wärmeleistung, die für die Erzeugung von elektrischem Strom benötigt wird. Damit ergibt sich der fantastische Wirkungsgrad $P_{\text{elektr}} / \Delta P_{QB}$ für die Erzeugung von elektrischem Strom tatsächlich zu $0,93 = 93\%$.

Da die Wärmeleistung für die Erzeugung von Prozessdampf P_{QD} vorgegeben ist, kann man also umso mehr extrem günstigen Strom erzeugen, je größer $\eta_C \cdot \eta_V$ ist. Man wird also – wenn möglich – ein GuD – Kraftwerk wählen.

Man erkennt schon hier, dass **der Nutzungsgrad eine sehr beschränkte Aussagekraft** hat. Das hängt damit zusammen, dass man für die Berechnung des Nutzungsgrads hochwertige elektrische Energie mit niederwertiger Wärmeenergie aufaddiert. Außerdem muss natürlich darauf hingewiesen werden, dass wir uns bei dieser Betrachtung keine Gedanken darüber machen, was nun eigentlich mit der Wärmeenergie, die im Prozessdampf steckt, passiert.

Die Möglichkeit, bei der Erzeugung von Prozessdampf sehr günstig Strom zu produzieren, ist schon lange bekannt und die ersten KWK – Anlagen dieser Art wurden – ganz ohne staatliche Förderung – daher schon vor dem 2. Weltkrieg in Betrieb genommen.

4.5.2 KWK – Anlage zur Erzeugung von Nahwärme mit Dieselmotoren, sog. Blockkraftheizwerk (BKHW)

Nahwärme bedeutet die Versorgung von Haushalten oder Bürogebäuden mit Wärmeenergie zum Heizen, wobei die Entfernung von der KWK – Anlage z.B. weniger als 1km beträgt. Hier reden wir von Anlagen, die 100 kW bis 500 kW elektrische Energieleistung haben. Die Idee ist es nun, die Wärmeenergie, die im Kühlwasser und in den Abgasen steckt, für Heizzwecke zugänglich zu machen. Dazu benötigt man Wärmetauscher in der Anlage, Rohrleitungen zu den Verbrauchern und wieder Wärmetauscher bei den Verbrauchern. Der realisierbare Gesamtwirkungsgrad liegt bei ca.

50% bezogen auf die theoretisch verfügbare Wärmeenergie. Da die Stromerzeugung sich nicht von der in Abschnitt 4.2 unterscheidet, erhalten wir die folgende Gleichung:

$$P_{\text{QB}} = P_{\text{QB}} \cdot \eta_{\text{C}} \cdot \eta_{\text{V}} + 0,5 \cdot P_{\text{QB}} \cdot (1 - \eta_{\text{C}} \cdot \eta_{\text{V}}) + 0,5 \cdot P_{\text{QB}} \cdot (1 - \eta_{\text{C}} \cdot \eta_{\text{V}}) = P_{\text{elektr}} + P_{\text{QH}} + P_{\text{V}} \quad \text{mit:}$$

P_{QB} : theoretische Wärmeleistung des Brennstoffs

P_{elektr} : elektrische Energieleistung ohne Netzverluste

P_{QH} : verfügbare Heizleistung vor Ort

P_{V} : Verlustleistung

$\eta_{\text{C}} \cdot \eta_{\text{V}}$: 0,42 = 42 %

Als Brennstoffe kommen in Frage: Dieselöl, Kerosin, Biodiesel (dazu gehört auch das berüchtigte Palmöl)

Als Beispiel nehmen wir eine Anlage, die kontinuierlich 100 kW elektrische Energieleistung hat. Dafür wird eine Wärmeleistung durch kontinuierliche Zuführung von Brennstoff von 238 kW benötigt. Gleichzeitig können Verbraucher real mit 69 kW Heizleistung versorgt werden.

Wie kann man nun dieses Ergebnis bewerten? Am besten durch Vergleich mit einer realistischen Alternative. Da wir es mit flüssigem Brennstoff zu tun haben, kommt ein GuD – Kraftwerk in Frage, s. 4.3. Bei einem Wirkungsgrad von 59% und einer Brennstoffleistung von 238 kW können wir 140 kW hochwertigen elektrischen Strom erzeugen – alles gedacht als Teilleistung eines großen Kraftwerks natürlich. Von den 140 kW ziehen wir die 100 kW, die vom BKHW geleistet werden, ab – bleiben 40 kW übrig, die wir über das Netz den Verbrauchern zum Heizen mit Wärmepumpen zuführen. Bei einem angenommenen Netzverlust von 10% erzielen wir also gemäß 4.4 eine Heizleistung von $36 \text{ kW} \cdot 4 = 144 \text{ kW}$, also doppelt so viel, wie mit dem BKHW. Dabei wurde hier zu Gunsten des BKHWs angenommen, dass dieses im optimalen Betriebszustand betrieben wird und dass auch die anfallende Wärmeleistung kontinuierlich abgenommen wird. Der Vergleich fällt also sehr deutlich **zu Gunsten des GuD – Kraftwerks mit Wärmepumpen** aus, insbesondere, wenn man noch folgende Vorteile bedenkt:

- Ein GuD – Kraftwerk kann praktisch immer im optimalen Betriebszustand gefahren werden, gleich, wie viel Strom für Wärmepumpen angefordert wird.
- Die Abgasreinigung ist bei einem GuD – Kraftwerk deutlich besser, als bei einem Blockkraftwerk.
- Viele Blockkraftwerke würden vergleichsweise sehr viel Fachpersonal benötigen.
- Wärmepumpen können grundsätzlich auch mit elektrischer Energie aus Windkraftanlagen oder aus Wasserkraftanlagen oder aus Fotovoltaik betrieben werden.
- Wärmepumpen können bei hoher Netzbelastung automatisch abgeschaltet und bei niedriger Netzbelastung wieder zugeschaltet werden.
- Es wird keine Infrastruktur von Rohrleitungen zur Versorgung der Haushalte benötigt.

4.6 Kältemaschinen

Abschließend gehen wir kurz auf Kältemaschinen ein. Kältemaschinen sind Maschinen,

die der Umgebung mit hoher Temperatur T_U , z.B. 25°C , Wärmeenergie zuführen, also aufheizen, und einem Medium (z.B. Kühlschrank) mit niedriger Temperatur T_K (z.B. 5°C) entnehmen, also abkühlen. Die Bewertung eines Kältemaschinenprozesses erfolgt mit der **Kältemaschinen – Leistungszahl ϵ_{KM}** :

$$\epsilon_{KM} = - P_K / P_{AP} \quad \text{mit } P_K : \text{Nutzleistung Wärmeentzug und} \\ P_{AP} : \text{(meist elektrische) Antriebsleistung der Kältemaschine.}$$

Theoretisch kann man auch eine Kältemaschine als ideale Carnot – Kältemaschine laufen lassen und erhält dafür die

Carnot – Leistungszahl $\epsilon_{KM_C} = T_K / (T_U - T_K)$; die Temperaturen T_K, T_U müssen in Kelvin angegeben werden.

Beispiel : $T_U = 25^\circ\text{C} = 298,15 \text{ K}$ und $T_K = 0^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$; es ergibt sich : $\epsilon_{WP_C} = 11$.

Natürlich kann man diesen physikalisch theoretischen Wert in der Praxis nicht erreichen. In etwa gilt für Kompressions – Kältemaschinen:

$$\epsilon_{KM} = \epsilon_{KM_C} \cdot 0,5$$

Im angegebenen Beispiel werden so mit 1 kWh elektrischer Energie ca. 5,5 kWh Wärmeenergie entzogen.

5 Thermische Nutzung der Sonnenenergie, Windkraftanlagen, Wasserkraftanlagen und Pumpspeicherkraftwerke, Fotovoltaik und Biomasse

Fossile Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas sind gekennzeichnet durch:

- Sie können sich nur über den Zeitraum von Millionen Jahren regenerieren und sind damit nur begrenzt verfügbar.
- Die Fördermenge pro Tag weltweit ist begrenzt
- Bei der Nutzung entsteht das klimaschädliche Gas CO₂
- Durch die Förderung und Transport sind schon große Umweltkatastrophen entstanden und durch hohe Preise ist auch die umweltschädliche Förderung aus Ölsand rentabel

Durch eine nachhaltige Energiegewinnung aus Sonneneinstrahlung, Windenergie und Wasserkraft versucht man den Verbrauch fossiler Energieträger stark zu reduzieren. Eine zwielfichtige Rolle spielt in diesem Zusammenhang die Verwertung von Biomasse. In diesem Sinn nachhaltige Energien bezeichnet man auch als erneuerbare Energien, regenerative Energien oder alternative Energien.

Die Sonnenenergie kann direkt oder indirekt genutzt werden durch:

- Erwärmung eines Mediums (Luft, Wasser, Spezialflüssigkeiten in Kollektoren)
- Umwandlung von Windenergie in Elektrizität mittels Windkraftanlagen
- Wasserkraftanlagen, Pumpspeicherkraftwerke
- Fotovoltaik
- Biomasse als Energieträger

5.1 Thermische Nutzung der Sonnenenergie

Die Sonne erwärmt die uns umgebende Luft, natürlich auch im Winter. Eine Wärmepumpe, die der Luft Wärmeenergie entzieht (s. Abschnitt 4.4), nutzt also Sonnenenergie.

Eine sehr effiziente und ausgereifte Vorrichtung zur Sammlung der im Sonnenlicht enthaltenen Energie ist der Sonnenkollektor oder auch Solarkollektor, der mit der absorbierten Sonnenenergie ein Übertragungsmedium (z.B. Heizwasser) aufheizt, wobei nahezu das gesamte Strahlungsspektrum des Sonnenlichtes mit relativ hohem Wirkungsgrad – typischerweise zwischen 60 und 75 % – ausgenutzt wird. Zentraler Bestandteil des Kollektors ist der Solarabsorber, der Lichtenergie der Sonne in Wärme umwandelt und diese an einen ihn durchfließenden Wärmeträger abgibt. Mit Hilfe dieses Wärmeträgers wird die Wärme aus dem Kollektor abgeführt (z.B. über Wärmeüberträger) und anschließend direkt verwendet oder gespeichert, z.B. zur Warmwasserbereitung oder zur Raumheizung in Verbindung mit einer weiteren Heizquelle. Ökologisch und auch ökonomisch ideal ist die Kombination einer Wärmepumpenheizung mit Solarkollektoren.

Solarkollektoren für Heizzwecke nehmen Licht annähernd gleichmäßig aus allen Richtungen auf, sie müssen nicht der Sonne nachgeführt werden und liefern auch bei

Bewölkung noch eine gewisse Leistung, wobei bei Sonneneinstrahlung Temperaturen bis 80°C erreicht werden.

Daneben gibt es konzentrierende Kollektoren, die nach dem Prinzip des Brennspiegels arbeiten und deutlich höhere Temperaturen erzielen. Parabolrinnenkollektoren in Sonnenwärmekraftwerken in südlichen Ländern erreichen Temperaturen um 400 °C, mit denen ein Dampfkraftwerk betrieben werden kann. Derartige Verfahren sind nur bei starkem direktem Sonnenlicht lohnend.

5.2 Windenergie

Eine Windkraftanlage (WKA) wandelt die Energie des Windes in elektrische Energie um und speist diese in das Stromnetz ein. In der Fachliteratur hat sich auch die Bezeichnung Windenergieanlage (WEA) etabliert und in der Umgangssprache spricht man oft von Windmühlen.

Man unterscheidet Offshore – Windkraftanlagen, deren Fundamente in der See stehen (in Deutschland in Nord – oder Ostsee) und Onshore – Windkraftanlage, deren Fundamente auf dem Festland stehen. Onshore – Windkraftanlagen haben heute eine Nennleistung von ca. 2 – 3 MW, während Offshore – Windkraftanlagen eine Nennleistung von 3,6 bis 6 MW aufweisen. Die Rotoren mit den Flügeln weisen Durchmesser von 80 m bis etwa 120 Metern auf, wobei die Gesamthöhe dabei bis zu 200 Metern erreichen kann.

Weltweit war Ende 2011 eine Nennleistung von gut 238 GW installiert. Die höchste Leistung wies dabei China mit rund 63 GW auf, danach folgten die USA mit 47 GW, Deutschland mit 29 GW, Spanien mit 21 GW und Indien mit 16 GW.

Mit verstärkter Nutzung der Windenergie erhöht sich prinzipiell die erforderliche Regelleistung. Regelleistung wird zur Deckung von Differenzen zwischen Ein- und Ausspeisung benötigt. Insbesondere muss die durch Windspitzen entstehende Überproduktion von elektrischer Energie kompensiert werden. Sehr gut geeignet sind dafür Pumpspeicherkraftwerke, weil diese sehr schnell große Mengen elektrischer Energie durch Hinaufpumpen von Wasser in ein Staubecken (z.B. Stausee) speichern können bei einem Gesamtwirkungsgrad von ca. 80%. Die Bereitstellung von Regelleistung verursacht erhebliche Kosten.

Ein weiteres, noch weitgehend ungelöstes Problem, ist die Speicherung von Elektrizität. Natürlich eignen sich dafür wegen des sehr guten Wirkungsgrads bestens Pumpspeicherkraftwerke – aber dazu müsste ein Ausbau in erheblichen Umfang erfolgen.

5.3 Wasserkraftanlagen, Pumpspeicherkraftwerke

Eine Wasserkraftanlage oder auch Wasserkraftwerk ist ein Kraftwerk, das die Energie der Bewegung des aus einem Staubecken abfließenden Wassers auf eine Wasserturbine überträgt. Die Wasserturbine wiederum treibt einen Generator an, der die mechanische Energie in elektrische Energie umwandelt.

Weltweit werden knapp 88 % der erneuerbaren elektrischen Energie mit Wasserkraftwerken erzeugt; das entspricht etwa 20 % der gesamten Stromerzeugung. Norwegen deckt fast seinen gesamten Elektrizitätsbedarf mit Wasserkraft, Brasilien rund 80 %. In Österreich beträgt die Wasserkraftquote rund 55 % (36 TWh) an der gesamten

Stromproduktion.

In Deutschland sind Wasserkraftwerke mit einer installierten Leistung von 4,7 GW vorhanden. Zu einem erheblichen Teil dienen sie zur Bereitstellung von Regelleistung.

Bei Pumpspeicherkraftwerken wird mit Hilfe von Elektromotoren Wasser in ein Staubecken hinauf gepumpt. Über das gleichzeitig vorhandene Wasserkraftwerk kann dann elektrische Energie erzeugt werden. In Deutschland dienen Pumpspeicherkraftwerke hauptsächlich zur Bereitstellung von Regelleistung – Ausspeisung von überschüssiger Energie und Einspeisung von plötzlich benötigter Energie. Aber natürlich kann auch einfach nur Energie gespeichert werden.

5.4 Fotovoltaik

Unter Fotovoltaik versteht man die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie mit Hilfe von Solarzellen. Seit 1958 wird sie in der Raumfahrt genutzt. Inzwischen wird die Fotovoltaik zur Stromversorgung in vielen Bereichen eingesetzt.

Zur Beurteilung von Fotovoltaikanlagen wird die erreichbare Spitzenleistung (Peak für Spitze) angegeben, die im Sommer bei Sonnenschein und klarem Himmel erreicht wird, und zwar standardisiert auf $1000\text{W}/\text{m}^2$ Einstrahlung und 25°C . Man fügt der Einheit ein P (für Peak) als Index bei, also kW_P oder MW_P , und bezeichnet diese **Spitzenleistung als Nennleistung**. Der **Ertrag** ist die elektrische Energie, die in einem Jahr „geerntet“ werden kann.

Neben Nennleistung und Ertrag ist der **Wirkungsgrad** von großer Bedeutung. Der Wirkungsgrad wird unter genormten Bedingungen bestimmt als Verhältnis von abgegebener elektrischer Leistung zur eingestrahlten Leistung. Die Normbedingungen sehen insbesondere eine Modultemperatur von 25°C , senkrechte Einstrahlung mit $1000\text{W}/\text{m}^2$ und ein bestimmtes Einstrahlungsspektrum vor. Im realen Betrieb weichen die Bedingungen davon meistens deutlich ab, so dass der reale Wirkungsgrad deutlich niedriger ist. Je höher der Wirkungsgrad ist, desto geringer kann die Fläche für die Anlage gehalten werden. Der Wirkungsgrad kann für unterschiedliche Systemgesamtheiten betrachtet werden:

- die nackte Solarzelle
- das Solarpanel bzw. -modul
- die gesamte Anlage inklusive Wechselrichter bzw. Laderegler und Akkus.

Leider ist die Fotovoltaik in Deutschland ziemlich in Verruf geraten wegen exorbitanter Subventionen, die per Gesetz zu 100% auf die Stromkunden abgewälzt werden. Wer eine Fotovoltaikanlage aufs Dach oder auf eine Freifläche baut, bekommt **20 Jahre lang eine festgelegte Einspeisevergütung**, die anfangs dem 20 – fachen des Strompreises an der Strombörse entsprochen hat (ca. $0,6\text{€}/\text{kWh}$) und im Jahr 2011 noch immer dem ca. 6 – fachen des Strompreises an der Strombörse entspricht (ca. $0,3\text{€}$). Die Vergütung war und ist so lukrativ, dass ein wahrer Run auf die Solarmodule eingesetzt hat. Das rächt sich jetzt. 2010 schraubte sich die EEG-Umlage für regenerative Energien, die der Endverbraucher zahlen muss, auf 3,5 Cent pro Kilowattstunde. 1,5 Cent – also etwa 40 Prozent – entfallen davon auf die Fotovoltaik – das sind über 5 Milliarden € in 2011 ohne Mehrwertsteuer. Insgesamt schieben wir weit über 50 Milliarden an Subventionen für Fotovoltaik vor uns her, die bis ca. 2030 bezahlt werden müssen. Darin enthalten sind nicht die Kosten, die für zusätzlichen Netzausbau, zusätzliche Regeltechnik mit Verbrauch von

sog. 5 – Min. Strom (ca. 0,5 € an der Strombörse) und Kraftwerksleistung, die im Hintergrund wegen der schwankenden Einspeisung mit erheblichen Kosten bereitgehalten werden muss. Die enorme Wachstumsdynamik hat das Fördersystem an den Rand des Zusammenbruchs gebracht. Denn ihm **fehlt eine eingebaute Bremse**, die einen ungezügelden Ausbau von Solaranlagen mit meist veralteter Technik verhindert.

Und was haben diese Subventionen bewirkt? Es wurden ab 2000 große Fabriken gebaut, in denen Solarzellen mit relativ niedrigem („alte Technik“) Wirkungsgrad von ca.10% bis 16 % verbaut wurden und werden, deren Verkauf sich nur lohnt, weil die Stromverbraucher zwangsweise diese unsinnige Technik bezahlen müssen. Reich werden dabei nur einige Investoren. Wegen der exorbitant hohen Subventionen ging es im In – und Ausland nie um Forschung, sondern nur um den Bau von Fabriken mit einem hohen Output von Solarzellen, die in „Germany“ verbaut wurden, um die Subventionen zu kassieren. Daran sind nicht die Investoren schuld, sondern die Gesetze sind so von der Rot – Grünen Regierung verabschiedet worden – ohne Sinn und Verstand, aber mit irrsinnig hohen Kosten, die der Bürger nun zahlen muss. Die Fehlentwicklungen seien kurz zusammenfassend aufgeführt:

- Subventioniert wurde nicht Forschung und Entwicklung, sondern der Bau von riesigen Fabriken weltweit zur Produktion von Solarzellen. Diese Zellen wurden in riesigen Fotovoltaikanlagen in „Germany“ verbaut. Damit kann der Investor 20 Jahre lang die staatlich garantierten Subventionen kassieren.
- Gleichzeitig ist die Speichertechnik nicht forciert worden, so dass heute wegen der Zwangsannahme von Strom aus Fotovoltaikanlagen teilweise Strom verschenkt werden muss (z.B. an Österreich, die damit ihre Talsperren auffüllen).
- In 2011 beträgt der durchschnittliche Preis von Strom an der Strombörse ca. 5,5 Cent, die Abgabe nach dem EEG 3,5 Cent. Dies entspricht einem Aufschlag von 63,6%.
- Durch den hohen Strompreis in Deutschland werden Produktionen ins Ausland verlagert. Deutschland ist z.B. eines der Länder, die extrem viel Aluminium benötigen (Auto – und Flugzeugindustrie); Aluminium wird aber zum größten Teil aus dem Ausland importiert, z.B. aus Kasachstan , wo die notwendige Energie für die Aluminiumproduktion „preiswert“ mit wenig effizienten und äußerst umweltschädlichen Kraftwerken erzeugt wird.
- Wegen der Verlagerung von Produktion wegen hoher Strompreise gehen hierzulande eine Menge Arbeitsplätze verloren.
- Die EEG – Abgabe ist unsozial, da insbesondere Familien mit Kindern belastet werden, wohingegen „Dinks“ (double income, no kids) natürlich von der Abgabe kaum etwas merken.
- Nach 20 Jahren müssen riesige Flächen mit dann völlig veralteter Solartechnik entsorgt und die Flächen renaturiert werden.
- Der Beitrag für die Stromversorgung in Deutschland ist gering. Das hat folgende Gründe:
 - absolut liegt die zwangsweise Stromeinspeisung von Fotovoltaik bei nur 3%
 - für die Produktion von Solarzellen sind erhebliche Strommengen notwendig (natürlich billiger Strom für die Industrie); allein deshalb ist die Produktion von Solarzellen für Deutschland schon fragwürdig!

- Wegen der extremen Schwankungen sind kostenintensive und ökologisch schädliche Maßnahmen (z.B. der Betrieb von Kohlekraftwerken in Teillast, um die Netzschwankungen ausregeln zu können, 5 – Min. Strom) notwendig.

Zum Schluss noch eine Bemerkung zur Größe von Subventionen:

- Eine Subvention von 40 000 000.-€ ist schon sehr viel!
- Eine Subvention von 400 000 000.-€ ist 10 x mehr!!
- Eine Subvention von 4 000 000 000.-€ ist nochmals 10 x mehr!!!
- Eine Subvention von 40 000 000 000.-€ ist nochmals 10 x mehr!!!!

Wenn man etwas subventionieren will, muss wenigstens die Größenordnung der Subvention festgelegt werden und genau und nachvollziehbar begründet werden! Beides wurde bei dem Gesetz zur Förderung der Fotovoltaik nicht getan!

Nun aber genug geschimpft. Natürlich ist die Fotovoltaik eine Zukunftstechnik zur Energiegewinnung auch in großem oder sehr großem Ausmaß. Grund für den Optimismus sind die Erfolge, die in der Forschung in den letzten Jahren erzielt worden sind. Hierzu zählen vor allem Solarzellen mit hoher Lichtkonzentration und gestapelten Halbleiterschichten, die auch am Fraunhofer – Institut Freiburg entwickelt wurden und die u.a. von der kalifornischen Firma Solar Junction zur Marktreife entwickelt wurden. Solche Zellen können einen Wirkungsgrad von über 40% erzielen. Ein anderer Ansatz basiert auf der Verwendung von Nanostrukturen; für solche Zellen liegt der theoretisch erreichbare Wirkungsgrad bei 66%. Diese Zellen sind aber noch in der Entwicklung und bis zur Marktreife werden noch einige Jahre vergehen.

Vor allem in Amerika, China, Australien und Afrika gibt es Flächen mit entsprechender Ausdehnung und Sonneneinstrahlung, die für die Energiegewinnung mit solchen Solarzellen genutzt werden können und für die die Nutzung auch schon eingeplant ist. Natürlich muss das Speicherproblem gelöst werden; auf die diskutierten Ansätze soll hier aber nicht eingegangen werden. **Insgesamt kann man davon ausgehen, dass Solarzellen der neuen Generationen weltweit einen sehr bedeutenden Einsatz für die Erzeugung elektrischer Energie haben werden.**

5.5 Biomasse als Energieträger

Unter Biomasse versteht man ganz allgemein die Masse lebender und toter Organismen. Wir wollen uns hier auf die Masse lebender oder toter pflanzlicher Organismen wie Holz, Mais, Getreide, Ölpalmen, Zuckerrohr usw. beschränken.

Die pflanzliche Biomasse spielt für die ökologische Bilanz unserer Erde eine überragende Rolle, weil z.B. in den Regenwäldern Brasiliens und Borneos unermessliche Mengen von CO₂ gebunden sind und immer wieder neu gebunden werden. Kohlenstoffdioxid – also CO₂ – gehört zu den klimaschädlichen Gasen, die bei Verbrennung organischer Stoffe wie Benzin, Heizöl, Dieselmotortreibstoff oder Erdgas in großen Mengen entstehen. Durch Pflanzenwachstum wird CO₂ der Atmosphäre wieder entzogen.

Die Grundidee für die Verwendung von Biomasse als Energieträger ist es, gerade soviel Biomasse zu verwenden, wie auch nachwachsen kann – und man hofft, so CO₂ neutral zu wirtschaften. Leider funktioniert das im großen Maßstab nicht – im Gegenteil wird sogar der Umwelt und dem Klima geschadet. Dies hat im Wesentlichen zwei Gründe:

- Werden Energiepflanzen wie Mais, Ölpalmen, Zuckerrüben usw. angebaut, werden auch klimaschädliche Gase von den Ackerflächen freigesetzt, u.a. Methan (ca. 30 mal schädlicher als CO₂) und Lachgas (ca. 300 mal schädlicher als CO₂). Die Ökobilanz verschlechtert sich weiter erheblich, wenn synthetisch hergestellter Dünger verwendet wird, was in Europa praktisch immer der Fall ist. Weitere gravierende ökologischen Probleme werden durch Monokulturen verursacht.
- Die Energiepflanze Ölpalme (das gilt auch für andere Energiepflanzen wie z.B. Soja) wird in großen Plantagen angebaut. Nur selten werden ehemalige Ackerflächen zu Ölpalmenplantagen umgenutzt; meist werden große Regenwaldflächen abgeholzt mit dem Hauptziel, dort Ölpalmenplantagen anzulegen. Ölpalmen wachsen besonders gut in tropischen Gebieten, also dort, wo auch Regenwälder sind. Vor allem in Malaysia und in Indonesien wurden durch Abholzung von Wäldern riesige Plantagen angelegt, die zudem überwiegend in ökologisch nicht nachhaltiger Weise betrieben werden.

Obwohl dieser Sachverhalt seit Jahren bekannt ist, wurden und werden sogenannte Biokraftstoffe wie Biodiesel aus Palmöl oder Ethanol erheblich steuerlich gefördert. Erst jetzt (2012) scheint ein Umdenken einzusetzen. Auch spielt zusätzlich die Erkenntnis eine Rolle, dass „Kraftstoffe vom Acker“ auch das Problem Hunger in unserer Welt verschärfen.

Natürlich sind nicht alle Anwendungen so negativ zu bewerten. Z.B. ist das Heizen mit gut getrocknetem Holz, das aus ökologisch einwandfreier Forstwirtschaft stammt, sicher ökologisch vertretbar, obwohl auch hier das Feinstaubproblem in den Abgasen noch nicht vollständig gelöst ist. Eine weitere ökologisch vertretbare Anwendung ist die Gewinnung von Energie aus Bioabfällen (Biogas, Biokraftstoffe der 2. Generation).

Bei dem Thema „Energie aus Biomasse“ haben wir es also nicht nur mit fragwürdiger Subvention zu tun, sondern das, was gefördert wird, ist zum Teil ökologischer Wahnsinn!

6 Epilog

Die Energieversorgung Deutschlands und Europas in den nächsten Jahrzehnten unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten zu sichern und umzubauen ist Hauptaufgabe von Politik zusammen mit den Behörden, den Energieversorgern und den Netzbetreibern. Diese Herausforderung stellt sich, nachdem die Energiewende nach dem großen Erdbeben und der Nuklearkatastrophe in Japan beschlossen wurde. Bis zum Jahr 2022 sollen alle deutschen Kernkraftwerke abgeschaltet werden und bis zum Jahr 2050 sollen die Treibhausgas – Emissionen um über 80% gegenüber 1990 reduziert werden.

Um diese Ziele zu erreichen hat man Ende 2012 zum wiederholten Mal festgestellt, dass man dafür ein Gesamtkonzept benötigt, um z.B. den Ausbau der Stromnetze mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien und dem Ausbau der Pumpspeicherkraftwerke zu koordinieren. Das ist freilich sehr schwierig, da sehr viele mitentscheiden wollen, denn:

- Wer oder was ist „die Politik“? Da sind 16 Bundesländer mit den Landesparlamenten, die Bundesregierung mit dem Bundestag und die Kommission mit dem Europaparlament.
- Wer oder was sind „die Behörden“? Da sind die Bundesnetzagentur, das Umweltbundesamt und die Ministerien. Aber natürlich haben auch regionale Behörden großen Einfluss.
- Wer oder was sind „die Energieversorger“? Da sind natürlich die Großen: E.ON, RWE, EnBW und Vattenfall, aber dazu noch eine Menge kleinerer Unternehmen.
- Wer oder was sind „die Netzbetreiber“? Da sind: Tennet TSO GmbH (100% im Besitz des niederländischen Staats seit 1.1.2010, ehemals E.ON), TransnetBW (Tochter von EnBW), Amprion (Haupteigentümer der Amprion ist ein Konsortium von Finanzinvestoren unter der Führung von Commerz Real, ehemals RWE), Elia System Operator S.A. (ein börsennotierter belgischer Übertragungsnetzbetreiber mit Sitz in Brüssel, hat 50Hertz Transmission GmbH in 2010 von Vattenfall gekauft)

Man sieht, dass sehr viele beteiligt sind. Damit ist es sehr schwierig, wenn nicht gar unmöglich, einen Konsens zu finden. So ist das Wahrscheinlichste, dass überall irgendwelche Fakten geschaffen werden, die dann zu Sachzwängen führen, die sehr große Kosten verursachen, die natürlich (Sachzwang) auf die Bürger abgewälzt werden. Nur wenn an Stelle von Singularinteressen mehr die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems und bezahlbare wettbewerbsfähige Energiepreise sich durchsetzen, kann die Energiewende gelingen. Vermutlich wird es einfache, schnelle und günstige Lösungen für die Energiewende nicht geben. Schlechte Lösungen, dafür schnell realisiert, verursachen Kosten, die dann über viele Jahre hinweg von den Bürgern bezahlt werden müssen.

Wenden wir uns zum Schluss noch einmal der Elektrizität zu, der edelsten aller Energieformen, und fassen das Wesentliche zusammen.

- **Elektrizität kann auf vielfältige Weise erzeugt werden:**
 - durch Kohlekraftwerke, insbesondere auch Braunkohlekraftwerke (sehr hohe Emission von Kohlendioxid pro kWh)
 - durch GuD – Kraftwerke (mittel hohe Emission von Kohlendioxid pro kWh)
 - durch Wind – Kraftwerke (geringe Emission von Kohlendioxid pro kWh (Herstellung/Wartung))

- durch Wasser – Kraftwerke (geringe Emission von Kohlendioxid pro kWh (Herstellung/Wartung))
- durch Fotovoltaikanlagen (geringe Emission von Kohlendioxid pro kWh (Herstellung/Wartung))
- durch Kernkraftwerke (geringe Emission von Kohlendioxid pro kWh (Herstellung/Wartung))
- **Anwendung von Elektrizität**
 - Beleuchtung, Betreiben elektronischer Geräte (Fernseher, Computer etc.)
 - Kühlung (Kühlschränke, Kühlanlagen, Klimatisierung)
 - Sehr effizientes Heizen mit Wärmepumpenheizung, eventuell in Kombination mit Geoenergie aus 60 – 80m Tiefe oder mit Solarkollektoren. Wärmepumpenheizungen sind auch deshalb sehr effizient, weil es natürlich egal ist, wie die Elektrizität erzeugt wurde (eine Heizung mit Erdgas braucht immer Erdgas!) und weil die Wärmepumpenheizung zu Zeiten von Leistungsspitzen ferngesteuert abgeschaltet werden kann.
 - dezentraler Antrieb von Maschinen, insbesondere Werkzeugmaschinen und Pumpen
 - Kraftfahrzeuge mit Elektroantrieb
- **Transport von Elektrizität**
 - Der Transport von Elektrizität gestaltet sich relativ einfach über Hochspannungsnetze für weite Entfernungen und danach über untergeordnete Netze.
 - Wichtiger Bestandteil der Netze ist die Regelung, die immer feiner und genauer gestaltet wird.
- **Speicherung von „zu viel Elektrizität“, ein noch weitgehend ungelöstes Problem**
 - Für die Speicherung eignen sich vorrangig die Pumpspeicherkraftwerke, die heute einen sehr hohen Wirkungsgrad von 80% bis über 90% haben. Dieser Wirkungsgrad gilt über die gesamte Prozesskette vom Hochpumpen des Wassers mit erneuerbarem Strom und weiter zurück zu elektrischer Energie!
 - Darüber hinaus kann man mit überschüssigem Strom Wasserstoff oder Methan erzeugen, das sog. Power-to-Gas Konzept, das auch die Speicherung und den Transport der Gase umfasst. Zu bemängeln ist der relativ niedrige Wirkungsgrad der gesamten Prozesskette von erneuerbarem Strom zu Gas und weiter zu elektrischer Energie (ca. 35% bei Wasserstoff bzw. ca. 28 % bei Methan); aber u.U. stehen diesen Wirkungsgraden ein Wirkungsgrad von Null gegenüber, nämlich der „Nicht-Nutzung“ der zur Verfügung stehenden Windenergie im Falle der Abregelung von Windkraftanlagen bei geringem Strombedarf bzw. der „Nicht-Nutzung“ von Fotovoltaik – Strom. Methan ist vollkommen mit Erdgas kompatibel.
 - Speicherung in Akkumulatoren: Für kleine Stromverbraucher (Handies, Computer, Akkuschauber usw.) schon lange etabliert wird die Verwendung von Akkumulatoren im großen Maßstab auch für den Elektroantrieb von Kraftfahrzeugen entwickelt.

Im Zusammenhang mit Elektrizität ist in vielen Bereichen eine sehr intensive Entwicklung im Gange, so insbesondere bei der Regelung der Netze, Stichwort: Smart Grid, und bei der Weiterentwicklung der Akkumulatorentechnik.

Bei der Energiewende – also Ersetzung von fossilen Energieträgern und Kernkraft durch erneuerbare Energien – spielt die Elektrizität eine zentrale Rolle und es bleibt zu hoffen, dass für die Energiewende in Deutschland und darüber hinaus in Europa ein tragfähiges, zukunftsweisendes und belastbares Gesamtkonzept entwickelt wird.