

Lernsequenzen

Unterrichtsmaterialien zum Thema Energie | Sekundarstufe 1

Heft 2



Wärme­kraftwerke



Inhalt



1 Von der Primärenergie zur Energiedienstleistung



2 Technik und Bauprinzipien von Wärmekraftwerken

2.1 Fossil befeuerte Kraftwerke	Seite 8
2.1.1 Die Vorgänge im Überblick	Seite 8
2.1.2 Brennstoffe und Brennstoffaufbereitung.....	Seite 9
2.1.3 Dampferzeuger	Seite 9
2.1.4 Dampfturbine	Seite 11
2.1.5 Generator	Seite 12
2.1.6 Wasser-Dampf-Kreislauf und Kondensator	Seite 13
2.1.7 Kühlung, Kühlverfahren und Kühltürme.....	Seite 14
2.1.8 Gasturbine.....	Seite 15
2.2 Kernkraftwerke	Seite 16
2.2.1 Grundlagen der Kernspaltung	Seite 17
2.2.2 Leichtwasserreaktoren	Seite 17
2.2.3 Druckwasserreaktor	Seite 18
2.2.4 Siedewasserreaktor.....	Seite 19
2.2.5 Kernfusion als Vision für die Zukunft.....	Seite 19
2.2.6 Sicherheit von Kernkraftwerken	Seite 20



3 Wirkungsgrade

3.1 Energieumwandlung und Verluste	Seite 21
3.2 Wärmekraftmaschinen und der Carnot-Wirkungsgrad	Seite 21



4 Effiziente Brennstoffausnutzung

4.1 Gas- und Dampfturbinenkraftwerke (GuD)	Seite 24
4.2 Kraft-Wärme-Kopplung	Seite 24
4.3 Brennstoffzellen als zukunftsweisende Technik	Seite 26
4.4 Leittechnik von Kraftwerken	Seite 27
4.5 Kraftwerksbetrieb	Seite 28
Vorschläge für eine Betriebserkundung	Seite 30
Vorschläge für einen fächerübergreifenden Projektunterricht	Seite 30
Literaturverzeichnis	Seite 31
Abbildungsverzeichnis	Seite 32



1 Von der Primärenergie zur Energiedienstleistung

Die Energieversorgung in Deutschland stützt sich im Wesentlichen auf die Nutzung nicht erneuerbarer Primärenergieträger mit begrenzten Reichweiten. Weltweit ist bei Erdöl mit ca. 43 Jahren die geringste und bei Braunkohle mit bis zu 550 Jahren die höchste statische Reichweite gegeben – unterstellt ist jeweils die derzeitige Nutzungsrate (vgl. Heft 1). Ob die ermittelten Reichweiten realistisch und ob die Energieträger künftig auch für den deutschen Energiemarkt überhaupt zugänglich sind, ist fraglich. Die neu gefundenen Lagerstätten, insbesondere die von Erdgas und Erdöl, können in der Regel nur unter immer schwierigeren Bedingungen, also höheren Kosten, erschlossen werden.

Andrerseits wird der Energiebedarf der Entwicklungs- und Schwellenländer mit Sicherheit stark ansteigen. Ein Inder hat heute weniger als ein Zehntel des Energieverbrauchs eines Europäers. Schon deshalb ist ein häuslicher Umgang mit den nicht erneuerbaren Primärenergieträgern dringend geboten.

Noch wichtiger sind die Folgen für die Umwelt. Die Verbrennung fossiler Energieträger führt zu Emissionen. Insbesondere steht das Kohlendioxid (CO_2) im Verdacht, für den anthropogenen Treibhauseffekt in hohem Maße mitverantwortlich zu sein. Deshalb sind Energieversorgungsunternehmen und Verbraucher aufgefordert, möglichst sparsam mit Energie umzugehen.

Für den Verbraucher der Endenergie steht die Auswahl, welcher Primärenergieträger eingesetzt wird, nicht im Vordergrund. Wichtig ist für ihn die so genannte Energiedienstleistung. Das ist z. B. ein richtig temperierter und beleuchteter Raum, das Telefonieren, Fernsehen und Arbeiten am Computer oder die Mobilität, die ein Fahrzeug verleiht. Dazu benötigt er Endenergien wie Strom, Erdgas, Heizöl, Kraftstoffe oder Wärmeenergie, die aus unterschiedlichen Primärenergieträgern gewonnen werden können.

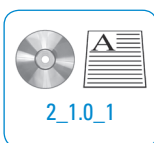
Finden auf dem Weg von der Primärenergie zur Sekundärenergie bzw. zur Endenergie Energieumwandlungen statt, so entstehen physikalisch bedingte Umwandlungsverluste in Form von nicht nutzbarer Wärmeenergie. Diese Verluste sind je nach Energieträger, Umwandlungsverfahren und Umwandlungsstufe

unterschiedlich groß. Um einzelne Energieträger in ihrer Effizienz zur Bereitstellung einer Energiedienstleistung vergleichend darzustellen, ist daher der komplette Pfad einer Umwandlungskette zu beachten. Erst ein solcher Vergleich zeigt auf, welcher Energieträger bei welchem Prozess am effizientesten eingesetzt werden kann.

Neben der Reichweite der Energieträger, der Effizienz der Umwandlung und Fragen der Wirtschaftlichkeit entscheiden auch die Bedürfnisse der Endverbraucher darüber, welche Energieträger letztlich genutzt werden. Das heißt konkret: Wann benötigt der Verbraucher welche Energiedienstleistung? Hieraus ergeben sich die Anforderungen an die eingesetzte Anlagentechnik.

Die Bedürfnisse der verschiedenen Kundengruppen sind sehr unterschiedlich. Ein in drei Schichten arbeitender Industriebetrieb benötigt rund um die Uhr Prozesswärme und Strom für Aggregate, Beleuchtung, Maschinen etc. Eine Bäckerei hat nachts den größten Energiebedarf. Tagsüber wird häufig nur der Verkaufsraum beleuchtet und im Winter zusätzlich beheizt. Ein ganz anderer Bedarf stellt sich bei den Haushalten ein. Wärme für Raumheizung wird nur zwischen September und April benötigt. Abgesehen von Elektro-Speicherheizungen wird Strom nahezu ausschließlich eingesetzt, wenn auch die Bewohner zu Hause sind und waschen, kochen, fernsehen usw.

Nach diesem Bedarf richten sich die Energieversorgungsunternehmen bei der Auswahl der Kraftwerkstechnik. An den Stellen, wo Strom und zugleich Wärme möglichst ganzjährig benötigt werden, werden bevorzugt Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) betrieben. Diese produzieren gleichzeitig Wärme und Strom und erzielen einen hohen Ausnutzungsgrad des eingesetzten Brennstoffs. Solche Anlagen bilden oft das Rückgrat der Energieversorgung innerhalb der Städte und in Industrieunternehmen. Es wird allerdings bundesweit erheblich mehr Strom benötigt als KWK-Anlagen erzeugen können. Denn Wärme und Strom werden nicht immer gleichzeitig gebraucht. Außerdem wäre das Verlegen eines großen Rohrnetzes für die Wärmeverteilung in dünner besiedelten ländlichen Gebieten viel zu teuer. Daher benötigen wir auch reine Stromerzeugungsanlagen.

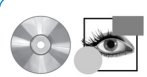




2 Technik und Bauprinzipien von Wärmekraftwerken

Wärmekraftwerke haben eines gemeinsam: Sie nutzen eine Wärmekraftmaschine (siehe S.21) zum Antrieb des Generators. Zu ihnen zählen Kraftwerke für fossile Brennstoffe wie Kohle, Öl und Gas, Kernkraftwerke, Kraftwerke, die Müll und Biostoffe verbrennen sowie geothermische und solarthermische Kraftwerke.

Die meisten Wärmekraftwerke sind Dampfkraftwerke, auf deren Technik Deutschlands Stromversorgung zum überwiegenden Teil basiert. Ihre Gemeinsamkeiten liegen darin, dass durch die Verbrennung eines Energieträgers bzw. durch Kernreaktion Wärme erzeugt und damit Wasser verdampft wird. Der Dampf treibt eine Dampfturbine an, die ihre mechanische Energie an einen Generator überträgt, in dem Strom erzeugt wird. Bei der Umwandlung von Wärme zu elektrischer Energie ist also Wasser/Wasserdampf das charakteristische Arbeitsmittel.



2.2.1_1

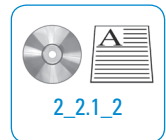
Dagegen wird in einem Gasturbinenkraftwerk kein Dampf erzeugt,

sondern das verbrannte, unter hohem Druck stehende Gas direkt auf die Turbinenschaufeln geleitet. Anstelle von Dampf treibt die Ausdehnung des Verbrennungsgases die Turbine an.

Blockheizkraftwerke zur gleichzeitigen Bereitstellung von Wärme und Strom arbeiten mit einem Verbrennungsmotor (siehe S.23).

2.1 Fossil befeuerte Kraftwerke

Fossil befeuerte Kraftwerke wandeln die im Brennstoff chemisch gebundene Energie in elektrische Energie um. Wie ein Dampfkraftwerk funktioniert, ist nachfolgend exemplarisch an einem mit Steinkohle befeuerten Dampfkraftwerk beschrieben. Die Unterschiede und Besonderheiten bei Kernkraftwerken werden ab S. 15 dargestellt.



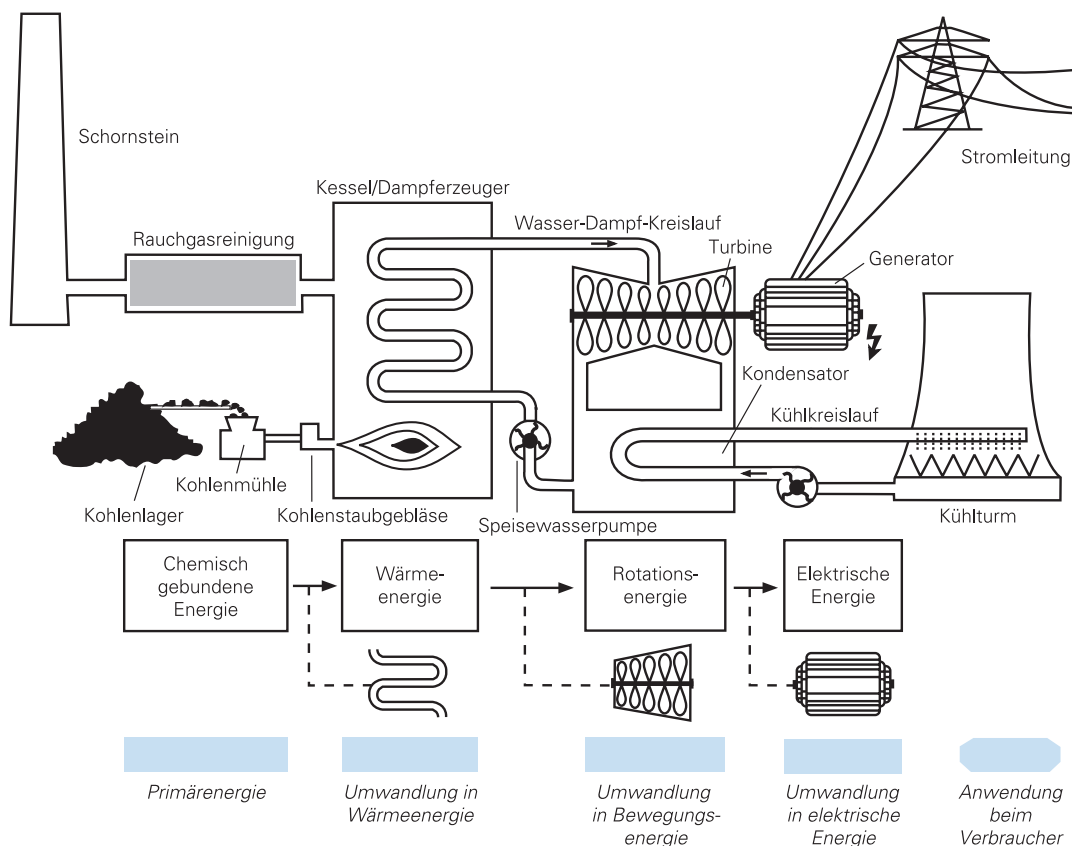
2.2.1_2

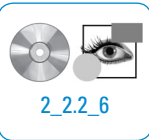
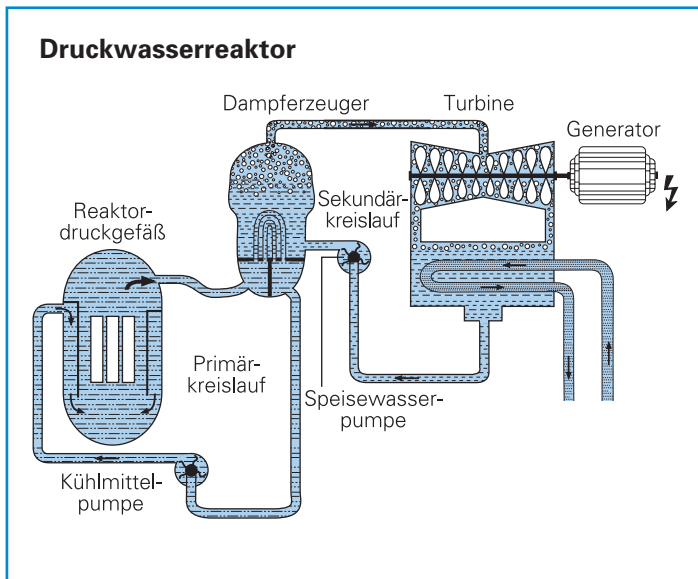
2.1.1 Die Vorgänge im Überblick

- 1) Im Feuerraum des Dampferzeugers wird die speziell aufbereitete, zu Staub fein gemahlene Kohle unter Luftzufuhr verbrannt. Dabei entsteht aus der chemischen Energie des Brennstoffs Wärme, mit

Abb.: 2.2.1_1

Prinzip der Energieumwandlung in einem Wärmekraftwerk am Beispiel eines Kohlekraftwerkes



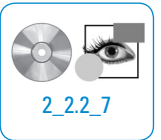
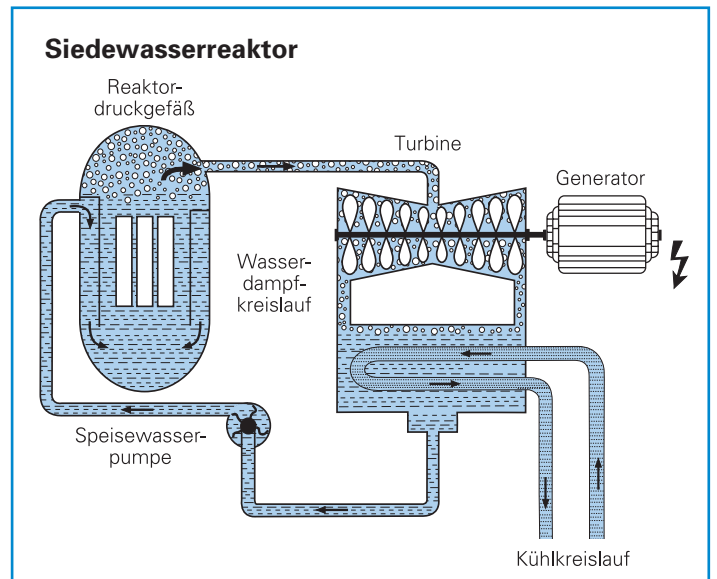


146 Neutronen im Kern hat (also zusammen mit den Protonen die Kernmasse 238), sind im Kern des im Reaktor spaltbaren Isotops $^{235}\text{Uran}$ 143 Neutronen (also Kernmasse 235).

Natürliche Uranvorkommen enthalten 99,3 % $^{238}\text{Uran}$ und 0,7 % $^{235}\text{Uran}$. Will man in einem mit normalem (leichtem) Wasser moderierten Reaktor eine selbst erhaltende Kettenreaktion erreichen, dann muss der Anteil von $^{235}\text{Uran}$ im Brennstoff allerdings durch ein spezielles Verfahren auf etwa drei bis vier Prozent angereichert werden. Der dann als Urandioxid (UO_2) vorliegende Brennstoff wird zu Tabletten gepresst und in die Hüllrohre eingefüllt, die zu Brennelementen zusammengefügt werden.

Das Wasser übernimmt bei Leichtwasserreaktoren neben der Funktion des Kühlmittels auch die des Moderators. Es bremst die freien Neutronen, die bei der Kernspaltung mit hoher Geschwindigkeit entstehen, so weit ab, bis sie langsam genug sind, um in die Atomkerne des $^{235}\text{Uran}$ einzudringen und deren Spaltung zu bewirken. Ohne die Moderatorfunktion des Wassers würde die Kettenreaktion nicht in Gang kommen oder abbrechen.

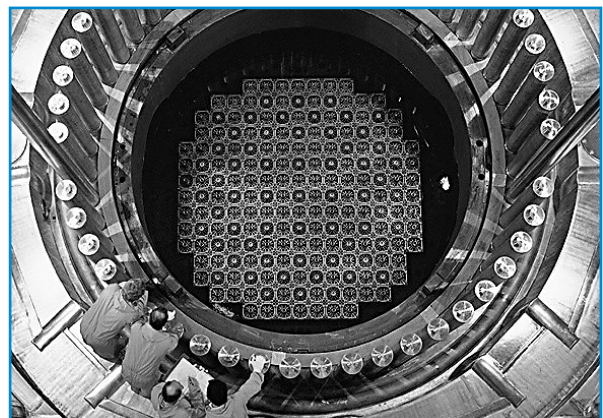
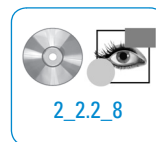
Um zu erreichen, dass die Kettenreaktion stabil bleibt, dass also pro Kernspaltung nicht mehr und nicht weniger als genau eines der entstehenden Neutronen wieder eine Kernspaltung bewirkt, gibt es Steuerstäbe, die mehr oder minder tief zwischen die Brennstäbe eingefahren werden können. Sie enthalten ein Material (z. B. Borcarbid), das die Eigenschaft hat, Neutronen abzufangen, bevor sie die Atomkerne erreichen. Je weniger langsame Neutronen für die Auslösung von Spaltvorgängen zur Verfügung stehen, desto geringer ist die Wärmeproduktion des Reaktors. Um den Reaktor abzuschalten, werden alle Steuerstäbe vollständig zwischen die Brennelemente eingefahren.



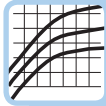
Bei den Leichtwasserreaktoren unterscheidet man zwischen Druck- und Siedewasserreaktoren, auf die in diesem Heft exemplarisch eingegangen werden soll:

2.2.3 Druckwasserreaktor

Kernstück der Anlage ist der Reaktorkern mit den Brennelementen aus angereichertem Urandioxid. Im Inneren des Reaktor-druckbehälters (RDB) befinden sich etwa 45.500 Brennstäbe (Bsp. Kernkraftwerk Biblis), in denen die Kernspaltung stattfindet und die Energie in Form von Wärme freigesetzt wird. Diese Wärme wird vom Wasser aufgenommen, das zwischen den Stäben hindurchgepumpt wird. Seine Temperatur steigt dabei auf etwa 330°C an und übernimmt in seiner Eigenschaft als „Kühlmittel“ die Wärmeabfuhr aus dem Reaktor. Vom Druckbehälter wird das heiße Wasser im Primärkreislauf zu einem Wärmetauscher, dem Dampferzeuger, geleitet. Der Name „Druckwasserreaktor“ ist auf die Tatsache zurückzuführen,



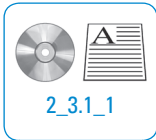
Blick auf den Reaktorkern im geöffneten Reaktor-druckbehälter



3 Wirkungsgrade

3.1 Energieumwandlung und Verluste

Zur Beschreibung des „Gütefaktors“ von Energieumwandlungen, wie sie sich z. B. in einem Wärmekraftwerk abspielen, dient der Begriff des Wirkungsgrads. Er gibt an, welcher Anteil der zugeführten Energie als Nutzenergie gewonnen wird. Der Anteil der Energie, der bei einem Kraftwerksprozess als Abwärme abgegeben wird, ist für den eigentlichen Nutzungszweck verloren.



Das Verhältnis von genutzter und zugeführter Energie heißt Wirkungsgrad η (ausgesprochen: „eta“). Dieser Wert sagt etwas über die Qualität der Umwandlung, in diesem Fall also etwas über die effiziente Ausnutzung des Brennstoffs, aus.

$$\eta = \frac{\text{genutzte Energie}}{\text{zugeführte Energie}}$$

3.2 Wärmekraftmaschinen und der Carnot-Wirkungsgrad

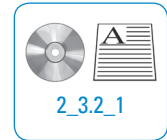
Die Tatsache, dass Energie nicht verloren gehen kann (vgl. 1. Hauptsatz der Thermodynamik, Heft 1), könnte zu der Annahme verleiten, dass es möglich sei, etwa einen vorgegebenen Energiebetrag vollständig in Wärme, mechanische oder eine andere Energie umzusetzen. Nahe an einen Wirkungsgrad von 100 % kommen Generatoren und Elektromotoren heran, d. h. mechanische und elektrische Energie können fast hundertprozentig ineinander umgewandelt werden. Anders ist es bei der Umwandlung von chemischer Energie und Wärmeenergie in mechanische Energie. Fossil befeuerte Steinkohlekraftwerke erreichen heute Wirkungsgrade von bis zu 46 %. Das bedeutet aber, dass der restliche Anteil von 54 % der zugeführten Wärme nicht ausgenutzt werden kann.

Ist dieser „Verlust“ an Energie auf Konstruktionsmängel der Anlagen zurückzuführen, oder gibt es hierfür andere Ursachen?

Rekapitulierend sei dazu noch einmal erwähnt:

Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik determiniert neben der Richtung, in der thermische Prozesse von selbst ablaufen (vgl. Heft 1), auch die Einschränkung, dass nicht jede Energieform in andere Energiefor-

men gleicher Wertigkeit umwandelbar ist. Während jede Energieform zu 100 % in Wärmeenergie umgewandelt werden kann, kann umgekehrt Wärme nie vollständig in mechanische Energie oder elektrische Energie umgewandelt werden. Zum Beispiel kann die Wärmeenergie, die einer „Wärmekraftmaschine“ (z. B. Dampfturbine, Otto- oder Dieselmotor) zugeführt wird, nur zum Teil in Bewegungsenergie und damit auch in elektrische Energie umgewandelt werden. Diese Einschränkung wird im 2. Hauptsatz der Thermodynamik beschrieben. In der Thermodynamik wird der Teil der Energie, der in mechanische Arbeit umgewandelt werden kann, Exergie oder Arbeitsenergie genannt, während man den Rest Energie oder Abfallenergie nennt.



In welchem Umfang es möglich ist, Wärmeenergie in mechanische Energie umzuwandeln, hängt von der Temperatur ab, mit der die Wärmeenergie zur Verfügung gestellt wird.

Die Rahmenbedingungen für dieses Phänomen, das auch als Carnot-Wirkungsgrad beschrieben wird, entdeckte der französische Physiker Nicolas L. Sadi Carnot (1796–1832), der vor dem Problem stand, den Wirkungsgrad von Dampfmaschinen zu verbessern und dabei eine fundierte Theorie über Wärmekraftmaschinen erarbeitete.

Er stellte fest, dass in Wärmekraftmaschinen der Anteil der zugeführten Wärmeenergie, der in mechanische Bewegungsenergie umgewandelt werden kann, um so größer

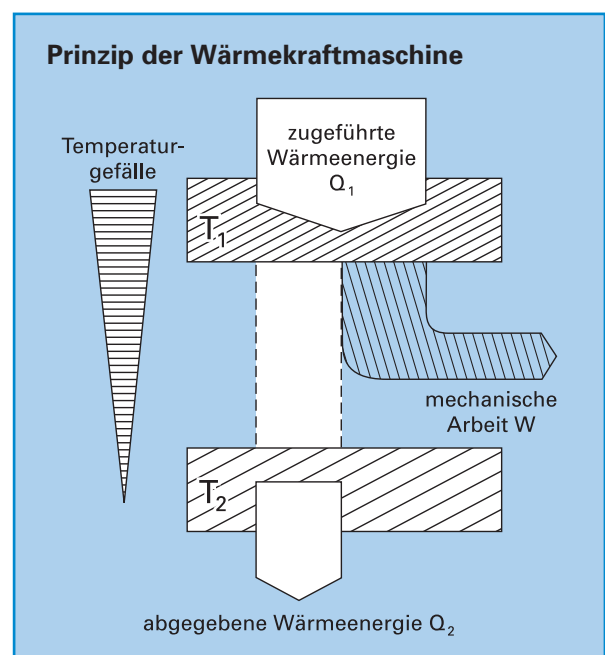
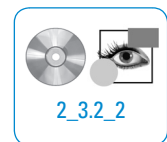


Abb.: 2_3_2_2

Die Differenz der bei der höheren Temperatur T_1 zugeführten Wärmeenergie Q_1 und der bei der niedrigeren Temperatur T_2 abgegebenen Wärmeenergie Q_2 entspricht der gewinnbaren mechanischen Arbeit W .

ist, je größer der Temperaturunterschied ist, mit dem ein Verbrennungsmotor bzw. eine Dampfturbine arbeitet. Das bedeutet, dass der Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen umso höher ist, je höher die Temperatur des Mediums bei der Wärmezufuhr und je niedriger seine Temperatur bei der Wärmeabfuhr ist (vgl. Abb. 3_2.3_2).

Mit folgender Formel und dem Begriff des thermodynamischen Wirkungsgrads wird der durch die Natur vorgegebene größtmögliche theoretische Wirkungsgrad für die Umwandlung von Wärme in mechanische Energie beschrieben:

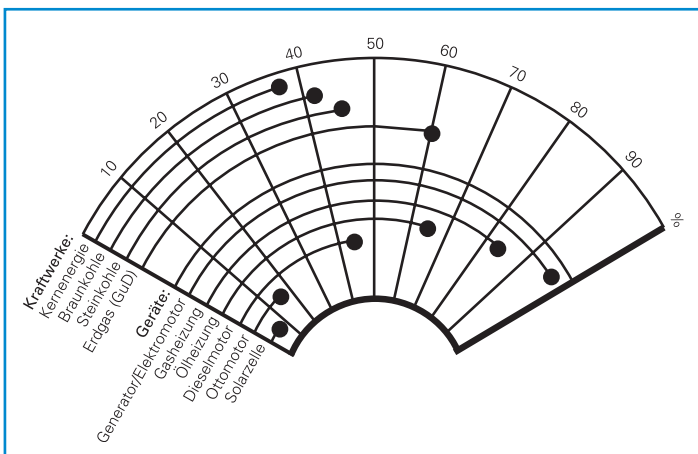
$$\eta_{c,th} = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Mit $\eta_{c,th}$ (eta) wird für den idealen Carnot-Prozess das Verhältnis der theoretisch erzeugbaren mechanischen Energie (W) zur aufgewendeten Wärmeenergie (Q_1) ausgedrückt. Der thermodynamische Wirkungsgrad stellt einen Idealwert – ein Denkmodell – dar, der von den Temperaturen T_1 (die Temperatur bei der Wärmezufuhr) und T_2 (die Temperatur bei der Wärmeabfuhr) abhängig ist, jeweils gemessen als absolute Temperatur in Kelvin (K). Die Temperatur T_1 wird nach oben durch Werkstoffe begrenzt, während T_2 nicht niedriger sein kann als die Umgebungstemperatur – denn sonst könnte man ja die Abwärme nicht mehr an die Umgebung abführen. In fossil befeuerten Dampfkraftwerken erlauben die Werkstoffe für Rohre und Turbinenbauteile heute Temperaturen bis etwa 620°C ($T_1=893\text{ K}$). Die Umgebungstemperatur liegt bei etwa 27°C ($T_2=300\text{ K}$). Damit ergibt sich ein maximaler thermodynamischer Wirkungsgrad von 66% ($\eta_{c,th}=1-300/891$). Unter den angegebenen Temperaturgrenzen ist dies der theoretisch maximal erreichbare Wirkungsgrad. Dieser



2_3.2_3

Abb.: 2_3.2_3



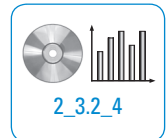
Wirkungsgrade im Vergleich

Durchschnittlicher Brennstoffeinsatz je erzeugter Kilowattstunde in den Steinkohlekraftwerken der öffentlichen Versorgung

Jahr	Brennstoffeinsatz	Wirkungsgrad
1950	580 g SKE/kWh	21,2 %
1955	490 g SKE/kWh	25,1 %
1960	402 g SKE/kWh	30,6 %
1965	360 g SKE/kWh	34,1 %
1970	344 g SKE/kWh	35,7 %
1975	333 g SKE/kWh	36,9 %
1980	322 g SKE/kWh	38,1 %
1985	350 g SKE/kWh	35,1 %
1990	349 g SKE/kWh	35,2 %
1994	349 g SKE/kWh	35,2 %
2000	329 g SKE/kWh	37,3 %
2004	323 g SKE/kWh	38,0 %
Stand der Technik bei Neuanlagen:		
2005	268 g SKE/kWh	45,9 %

Abb.: 2_3.2_4

ist praktisch nicht erreichbar; zum einen, weil der von Carnot zu Grunde gelegte thermodynamische Prozess in dieser Idealform praktisch nicht durchführbar ist und zum anderen, weil immer Wärme- und Reibungsverluste auftreten. Immerhin erreichen Kohlekraftwerke mit 46% heute 70% der im idealen Carnot-Prozess theoretisch denkbaren Brennstoffeffizienz von 66%.



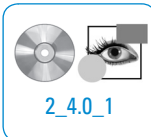
2_3.2_4

Etwas anders sehen die Temperaturverhältnisse beim Gasturbinenprozess aus. Hier tritt das Gas mit einer sehr hohen Temperatur von bis zu 1.200°C in die Turbine ein. Da das Gas aber nur bis auf Atmosphärendruck entspannt werden kann, kühlt es sich in der Turbine nur bis auf etwa 500°C ab. Der Wirkungsgrad eines idealen Carnot-Prozesses mit diesen Temperaturen läge bei 48%. In Wirklichkeit kommt man mit einem Gasturbinenprozess auf etwa 35%.



4 Effiziente Brennstoffausnutzung

Für den Kraftwerksprozess lässt sich zusammenfassend festhalten, dass der thermische Wirkungsgrad, also das Verhältnis der gewonnenen mechanischen Energie zur zugeführten Wärmeenergie, aus den genannten physikalischen Gründen niemals den Wert 1 erreichen kann. Dennoch wird stetig an der Verbesserung des Wirkungsgrads innerhalb der physikalischen Rahmenbedingungen gearbeitet. Zu den wichtigsten Maßnahmen zur Erzielung einer möglichst effizienten Brennstoffausnutzung zählen beim Dampfkraftprozess die Zwischenüberhitzung des Dampfes und die Speiswasservorwärmung, die bereits seit Jahrzehnten angewandt werden. Außerdem gelang es den Ingenieuren, Werkstoffe zu entwickeln, die immer höheren Temperaturen und Drücken standhalten. So konnte man die Temperaturen bei der Wärmezufuhr immer weiter erhöhen. Durch verbesserte Kühlverfahren konnten die Temperaturen bei der Wärmeabfuhr immer näher an die Umgebungstemperatur herangeführt werden. Schließlich werden die Turbinenverluste durch Optimierung der Leit- und Laufschaufeln reduziert und Verluste durch Reibung



2_4_0_1

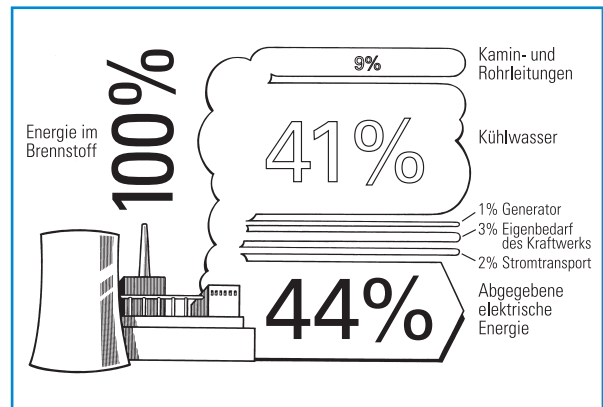
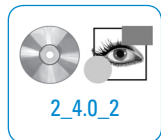


Abb.: 2_4_0_2

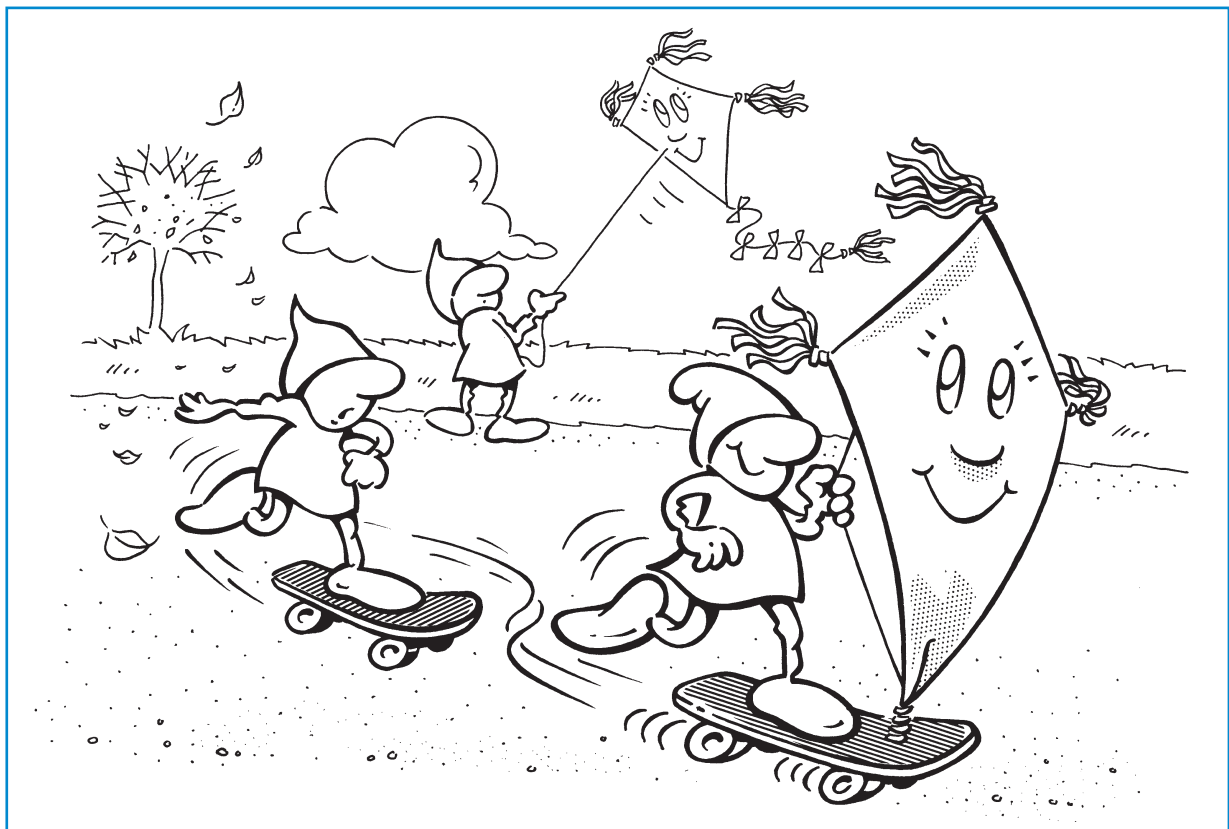
Energieflussdiagramm eines Wärmekraftwerks

und Wärmeverluste im gesamten Prozess minimiert. Auch beim Gasturbinenprozess konnte der Wirkungsgrad gesteigert werden. Noch vor wenigen Jahren war die Turbineneintrittstemperatur auf ca. 1.000 °C beschränkt. Dies war durch die verwendeten Materialien der Turbinen bedingt. Inzwischen versteht man es, die extrem heißen Stellen mit Keramikplatten zu versehen. Keramik ist unempfindlicher gegen hohe Temperaturen. Doch dehnen sich die Keramikplatten, die auf die Schaufeln der Turbine aufgeschraubt werden, anders als Stahl. Die sich daraus ergebenden Probleme zu lösen, war eine hohe Anforderung an die Entwickler. Inzwischen ist es gelungen, die Gasturbineneintritt-



2_4_0_2

Abb.: 2_4_0_1



Die Kombination bringt's! Karikatur zum Prinzip des Gas- und Dampfturbinenprozesses