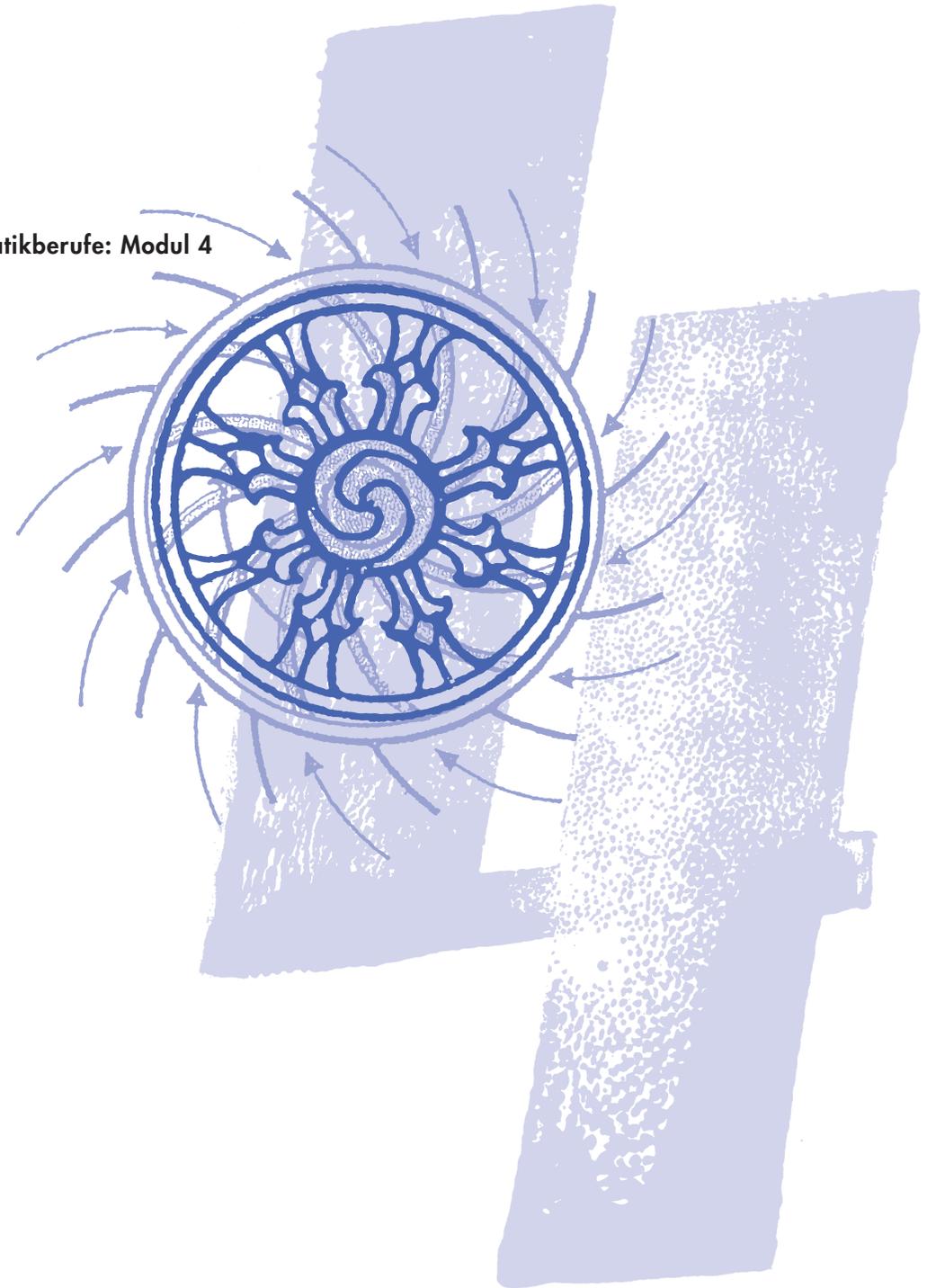


Thermische Maschinen

Energie im Unterricht, Module für Maschinenbau-, Elektro- und Informatikberufe: Modul 4

- 1 Einführung: Worum geht es ?**
- 2 Lernziele**
- 3 Vorschläge für den Unterricht**
- 4 Fachinformation**
 - **Grundlagen**
 - **Konventionelle thermische Kraftwerke**
 - **Wärmeleistungskopplung**
 - **Brennstoffzellen**
- 5 Aufgaben, Lösungsvorschläge**
- 6 Weiterführende Literatur**
- 7 Bild- und Textnachweis**
- 8 Vorlagen**



1 Einführung: Worum geht es ?

Die Erzeugung elektrischer Energie mit herkömmlichen Kraftwerken stösst an technische, politische und wirtschaftliche Grenzen: Die Wasserkraft, welche in der Schweiz rund 60% der gesamten Elektrizität erzeugt, ist schon stark genutzt; das zusätzliche Potenzial ist bei heutigen Energiepreisen nicht mehr gross. Die restlichen 40% werden in Kernkraftwerken erzeugt. Diese sind politisch sehr umstritten: Kontrovers sind vor allem die Risiken von Grosskatastrophen (GAU: **G**rösster **A**nzunehmender **U**nfall, wie er im Kernkraftwerk Tschernobyl passiert ist) mit ihren kaum absehbaren Folgen sowie die Entsorgung der nuklearen Abfälle, welche in den Kernkraftwerken anfallen. Weiter problematisch ist die Wirtschaftlichkeit der Kernkraftwerke im Umfeld des liberalisierten Elektrizitätsmarktes. Aufgrund der erwähnten Gesichtspunkte kann heute davon ausgegangen werden, dass in der Schweiz ein Ersatz der bestehenden Kernkraftwerke oder der Bau neuer Anlagen nur mit grossen Schwierigkeiten möglich sein wird.

Wird davon ausgegangen, dass die bestehenden Kernkraftwerke abgeschaltet werden, entsteht eine Lücke in der Produktion elektrischer Energie. Diese kann sinnvollerweise wie folgt gedeckt werden:

- Reduktion des Elektrizitätsverbrauchs durch effizientere Technologien (Beleuchtung, Lüftung, Kühlung, Heizung, Elektrogeräte, etc.)
- Reduktion des Elektrizitätsverbrauchs durch geändertes Konsumverhalten, indem die hochwertige Energieform Elektrizität bewusster verwendet wird
- Elektrizitätsproduktion aus erneuerbaren Energien (Kleinwasserkraft, Wind, Fotovoltaik, etc.)
- Elektrizitätsproduktion durch rationelle Nutzung der nicht erneuerbaren Energieträger (vor allem Erdgas und Heizöl) in Anlagen mit Wärmekraftkopplung

Bei der Elektrizitätsproduktion mit Wärmekraftkopplung kommen heute vor allem thermische Maschinen wie Dampfturbine, Gasturbine und Verbrennungsmotor im Einsatz. Künftig werden jedoch aller Voraussicht nach Brennstoffzellen zur direkten elektrochemischen Elektrizitätsproduktion eine zentrale Rolle spielen.

2 Lernziele

Die Lernenden ...

- geben Auskunft über die wichtigsten Arten der Elektrizitätsproduktion aus nicht erneuerbaren Energieträgern (Gas, Öl, Kohle, Uran) sowie die wirtschaftlichen, umweltrelevanten und politischen Problematiken.

Beispiele von Antworten:

Kernkraftwerk:

- Erzeugung von Dampf in nuklearem Reaktor; dieser treibt eine Dampfturbine an, welche mit einem Generator zur Elektrizitätsproduktion gekoppelt ist. Wirkungsgrad ca. 30%.
- Nutzung Abwärme schwierig und teuer, da grosse Wärmenetze nötig sind.
- Politischer Widerstand infolge von Radioaktivität und sehr hohen Risiken bei GAU.
- Endlagerung von radioaktiven Abfällen nicht gelöst.
- Neue Anlagen im liberalisierten Elektrizitätsmarkt kurzfristig nicht wirtschaftlich.

Konventionelles thermisches Kraftwerk

(Kohle, Öl oder Gas; ohne Abwärmenutzung):

- Erzeugung von Dampf in Dampfkessel; dieser treibt ein Dampfturbine an, welche mit einem Generator zur Elektrizitätsproduktion gekoppelt ist. Wirkungsgrad bis 40%.
- Hohe, nicht vermeidbare CO₂-Emission infolge Verbrennung fossiler Brennstoffe.
- Schadstoffemissionen (SO₂, NO_x und C_xH_y), reduzierbar mit hohem technischen Aufwand.

Kombikraftwerk

(Öl oder Gas; ohne Abwärmenutzung):

- Erzeugung von mechanischer Energie durch Kombination einer Gasturbine mit einer Dampfturbine; elektrischer Wirkungsgrad bis 60%.



- Hohe, nicht vermeidbare CO_2 -Emission infolge Verbrennung fossiler Brennstoffe.
- Schadstoffemissionen (CO , NO_x und C_xH_y), reduzierbar mit hohem technischen Aufwand.

Blockheizkraftwerk (Öl oder Gas):

- Erzeugung von mechanischer Energie mit einer Gasturbine oder mit Verbrennungsmotor.
- Nutzung der anfallenden Abwärme.
- Elektrischer Wirkungsgrad bis ca. 40%; thermischer Wirkungsgrad bis ca. 60%; Gesamtwirkungsgrad bis ca. 95%.
- Einsatz bei grossen Einzelobjekten und Wärmeverbund-Systemen.
- Wirtschaftlich, wenn die Randbedingungen gut sind.

Blockheizkraftwerk mit Stirlingmotor:

- Dank äusserer Verbrennung sind fast beliebige Wärmequellen möglich, auch erneuerbare (Holz, Sonne).
- Heute erst Pilotanlagen in Betrieb.

Brennstoffzelle (Öl oder Gas):

- Erzeugung von elektrischer Energie durch einen elektrochemischen Prozess, nicht über den thermodynamischen Prozess. Nutzung der anfallenden Abwärme.
- elektrischer Wirkungsgrad bis ca. 60%; Gesamtwirkungsgrad bis über 95%.
- keine Lärmemissionen und praktisch keine Schadstoffemissionen (ausser CO_2).



- erklären, was unter dezentraler Elektrizitätsproduktion zu verstehen ist, und welches die wichtigsten Vor- und Nachteile davon sind.
- können den Grund erläutern, warum der mechanische respektive elektrische Wirkungsgrad der thermischen Elektrizitätserzeugung physikalisch begrenzt ist.
- zählen die wichtigsten Randbedingungen auf, welche für die Realisierung einer Anlage mit Wärmekraftkopplung erfüllt sein müssen.
- kennen die Zukunftstendenzen der Wärmekraftkopplung.
- Einsatz bei praktisch allen Leistungen möglich.
- Heute erst Pilotanlagen in Betrieb; breite Markteinführung ab 2005 erwartet.
- Erzeugung von Elektrizität nahe bei den Verbrauchern.
- Vorteile: keine Übertragungsverluste; Kleinkraftwerke führen durch grosse Anzahl Anlagen zu grosser Versorgungssicherheit.
- Nachteile: eher hohe Elektrizitätsgestehungskosten; bei zu hoher Anzahl Anlagen auf kleinem Raum Probleme bezüglich Netzstabilität.
- Carnot-Wirkungsgrad: Der Wirkungsgrad ist im Wesentlichen abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke.
- Hoher Wärmebedarf, welcher möglichst gleichzeitig wie der Elektrizitätsbedarf anfällt.
- Hohe Tarife für Elektrizitätsbezug (und gegebenenfalls für Rücklieferung von Überschüssen).
- Hoher Elektrizitätsbedarf.
- Einsatz motorischer Wärmekraftkopplung bei bestehenden Wärmenetzen und grossen Heizanlagen.
- Brennstoffzelle: vor allem für Gas und Heizöl als Brennstoff
- Stirling-Motor: zur Verwendung von beliebigen Brennstoffen

3 Vorschläge für den Unterricht

- Exkursion in ein Kernkraftwerk. Telefonnummern:
 - Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG:
Besucherpavillon: 155 15 56
 - Kernkraftwerk Leibstadt AG: 056 / 267 71 11

- Exkursion in eine grössere Energiezentrale mit Blockheizkraftwerk:
Allgemeine Informationen:
 - WKK
WKK-Fachverband, Postfach
8050 Zürich
Tel 01/311 80 20
Fax 01/312 05 40
www.waermekraftkopplung.ch**Betreiber von Blockheizkraftwerken:**
 - Nordwestschweiz:
 - Elektra Birseck Münchenstein (EBM)
4142 Münchenstein
Tel 061/415 41 41
 - Arbeitsgemeinschaft für dezentrale Energieversorgung (ADEV)
Oristalstrasse 85, 4410 Liestal
Tel 061/921 94 50
 - Zentralschweiz:
 - EWL Energie Wasser Luzern,
Tel 041/369 41 11
Fax 041/369 44 55
 - HTA Horw
Tel 041/349 33 11
Fax 041/349 39 60
 - Kantonsspital Obwalden, 6060 Sarnen
Tel 041/666 44 22

- Zürich:
 - Amt für Hochbauten
Tel 01/216 51 11
Fax 01/212 19 36
- Winterthur:
 - Städtische Werke Winterthur
Tel 052/267 61 61
Fax 052/267 61 10

- Video über dezentrale Elektrizitätsversorgung und Wärmekraftkopplung (Bezugsquelle WKK-Fachverband)

- Bezüglich Art und Charakteristiken der Kraftwerke: Geführtes Brainstorming mit Aufschreiben der (richtigen) Antworten auf einem Prokischreiber (viele Informationen dürften bei den Lehrlingen aus der täglichen Diskussion bereits bekannt sein).

4 Fachinformation

4.1 Grundlagen

Was versteht man unter thermischen Maschinen?

Thermische Maschinen sind Anlagen, welche Wärmeenergie in mechanische Energie umsetzen. Die Wärmeenergie wird dabei hauptsächlich durch Verbrennung chemisch gespeicherter Energie (Öl, Gas, Kohle, Holz, Kehrlicht, etc.) oder durch Kernspaltung erzeugt.

Die wichtigsten thermischen Maschinen sind:

– **Verbrennungsmotoren:**

- **Otto-Motor:** Ein Gemisch aus Brennstoff (Benzin oder Erdgas) und Luft wird in einer Brennkammer explosionsartig verbrannt. Durch die Explosion wird mechanische Energie frei, welche auf eine Kurbelwelle übertragen wird. Charakteristisch für den Otto-Motor ist, dass die Zündung des Gemisches über eine Zündvorrichtung (Zündkerze) erfolgt.
- **Dieselmotor:** Das Funktionsprinzip ist ähnlich wie beim Otto-Motor. Als Brennstoff wird jedoch Öl (Dieselöl) eingesetzt. Charakteristisch für den Dieselmotor ist, dass das Gemisch aus Brennstoff und Luft dadurch entzündet wird, dass es stark verdichtet und damit erhitzt wird. Dieselmotoren benötigen deshalb keine Zündvorrichtung.

Verbrennungsmotoren enthalten als Hauptkomponenten einen oder mehrere Zylinder, in welchen die Verbrennung stattfindet. Die Verbrennung kann je nach Bauart des Motors bei jeder Bewegung des Kolbens (Hub) erfolgen (Zweitaktmotor)

oder bei jedem zweiten Kolbenhub (Viertaktmotor). Beim Viertaktmotor wird jeder zweite Hub dazu verwendet, die entstehenden Abgase auszustossen und den Zylinder mit neuem Gemisch zu füllen.

- **Gasturbinen:** Bei Gasturbinen erfolgt die Verbrennung eines Gemisches aus Brennstoff (Erdgas, Öl oder Kerosin) und Luft kontinuierlich. Die aus der Verbrennung entstehenden heissen, sich stark ausdehnenden Gase treiben die Turbinenschaufeln an, welche die Bewegungsenergie auf die Welle übertragen.
- **Dampfmotoren:** Der in einem Dampfkessel erzeugte Dampf treibt einen Kolben an und entspannt sich dabei. Die entstehende lineare Bewegungsenergie wird über ein Gestänge in Rotationsenergie umgesetzt. Ein Dampfmotor kann einen oder mehrere Zylinder haben.
- **Dampfturbinen:** Gegenüber dem Dampfmotor wird der Dampf kontinuierlich zwischen rotierenden Turbinenschaufeln entspannt, welche die Bewegungsenergie auf die Welle übertragen.



Wo werden thermische Maschinen eingesetzt?

Verbrennungsmotoren:

- Fahrzeuge: Autos, Lastwagen, Motorräder (Otto-Motoren und Dieselmotoren)
- Propellerflugzeuge (Otto-Motoren)
- Schiffe (Dieselmotoren) und Boote (Otto-Motoren)
- Elektrische Generatoren in Wärmekraftkopplungsanlagen (Otto- oder Dieselmotoren), Notstromanlagen, sowie Kraftwerke für kleinere Netze auf Inseln oder in abgelegenen Gebieten (Dieselmotoren)
- Baumaschinen und Traktoren (meist Dieselmotoren)
- Werkzeuge wie Motorsägen oder Rasenmäher (Otto-Motoren)

Gasturbinen:

- Flugzeugtriebwerke (Düsen- und Turboprop-Triebwerke) und Helikoptertriebwerke (Kerosin)
- Gasturbinenkraftwerke und Kombikraftwerke (Erdgas und/oder Erdöl)
- Elektrische Generatoren in grösseren Wärmekraftkopplungs- und Notstromanlagen (Erdgas und/oder Heizöl)

Dampfmotoren:

- Dampflokomotiven und Dampfschiffe
- Elektrische Generatoren in kleinen Wärmekraftkopplungsanlagen mit Holz oder Biomasse als Brennstoffe (Anlagen sind erst im Ausland realisiert)
- Spielzeug-Dampfmaschinen

Dampfturbinen:

- Grosskraftwerke (Kernkraftwerke oder konventionelle thermische Kraftwerke)
- Kombikraftwerke; in Kombination mit Gasturbinen (Erdgas und/oder Erdöl)
- Elektrische Generatoren in Wärmekraftkopplungsanlagen mit Kehrlicht, Holz oder Biomasse als Brennstoffe

Wirkungsgrad thermischer Maschinen

Thermische Maschinen sind Anlagen zur Umwandlung von Energie. Deshalb gelten für sie die beiden Hauptsätze der Thermodynamik. Der erste Hauptsatz bedeutet, dass in einer thermischen Maschine (als geschlossenes thermodynamisches System) nie Energie erzeugt oder vernichtet werden kann. Die Energie wird lediglich von einer Form (zum Beispiel Brennstoff) in andere Formen (zum Beispiel Elektrizität und Wärme) umgewandelt.

Aus dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik folgt, dass der (mechanische) Wirkungsgrad einer thermischen Maschine (Verhältnis von mechanischer Leistung zum eingesetzten Brennstoff) begrenzt ist. Dieser Wirkungsgrad (Carnotscher Wirkungsgrad) ist von der Temperaturdifferenz zwischen dem Verbrennungsvorgang und der Temperatur der Abwärme abhängig. Der maximale thermische Wirkungsgrad des Carnotschen Kreisprozesses einer Wärmekraftmaschine ist durch die beiden Grenztemperaturen bestimmt, zwischen denen der Prozess abläuft:

$$\eta_c = \frac{(T_1 - T_2)}{T_1}$$

η_c = Carnotscher Wirkungsgrad [-]
 T_1 = höhere Temperatur [K]
 (entspricht der Verbrennungstemperatur)
 T_2 = tiefere Temperatur [K]
 (entspricht der Abwärmtemperatur)

Bei thermischen Maschinen zur Wärmekraftkopplung wird die mechanische Energie in einem Generator in elektrische Energie (Elektrizität) umgewandelt. Kann neben der elektrischen auch die thermische Energie (Abwärme) genutzt werden, so ist es üblich, von einem elektrischen und thermischen (Teil-)Wirkungsgrad, sowie einem Gesamtwirkungsgrad zu sprechen:

- elektrischer Wirkungsgrad = Elektrizitätsproduktion / Brennstoffeinsatz
- thermischer Wirkungsgrad = Wärmeproduktion / Brennstoffeinsatz
- Gesamtwirkungsgrad = (Elektrizitätsproduktion + Wärmeproduktion) / Brennstoffeinsatz

Typische Werte häufig eingesetzter thermischer Maschinen mit Wärmekraftkopplung sind in der folgenden Tabelle zu finden.

Der thermische Wirkungsgrad ist vor allem abhängig vom Temperaturniveau der Wärmenutzung: Ein tiefes Temperaturniveau ermöglicht einen höheren thermischen Wirkungsgrad.

Art der Maschine	Elektrischer Wirkungsgrad	Thermischer Wirkungsgrad	Gesamtwirkungsgrad
Heizkraftwerk mit Dampfturbine	0,35	0,50	0,85
Kombikraftwerk mit Gas- und Dampfturbine	0,50 bis 0,60	0,25 bis 0,35	0,85 bis 0,90
Blockheizkraftwerk mit Gasturbine	0,30	0,55	0,85
Blockheizkraftwerk mit Gasmotor	0,35 bis 0,40	0,50 bis 0,60	0,85 bis 0,98
Blockheizkraftwerk mit Dieselmotor	0,45	0,35 bis 0,45	0,85 bis 0,90

Abwärmenutzung thermischer Maschinen

Die Abwärme von stationären thermischen Maschinen, welche zur Elektrizitätsproduktion eingesetzt werden, kann zum Heizen oder für thermische Prozesse genutzt werden. Beispiele:

- Die Abwärme einer Kehrlichtverbrennungsanlage (mit Dampfturbine) wird in ein Fernwärmenetz eingespeist.
- Eine Gasturbine in einer Papierfabrik produziert elektrische Energie sowie Prozessdampf für die Papierproduktion (Beispiel: Papeterie de Versoix SA, Genf).
- Zwei Blockheizkraftwerke mit Gasmotoren produzieren Wärme und Elektrizität für ein Spital. Diese Motoren sind zudem für Notstrombetrieb bei Netzausfall ausgerüstet (Beispiel Kantonsspital Obwalden, Sarnen, Abb. 1).
- Ein Blockheizkraftwerk mit Gasmotor produziert Wärme und Elektrizität für ein grösseres Schulhaus (Hochschule für Technik und Architektur, Horw LU).

Der Transport von Wärme ist aufwändig und dementsprechend teuer (ein Meter Trasse kann je nach Randbedingungen und Kapazität zwischen 600 und 3000 Franken kosten). Die teure Wärmeverteilung ist der Hauptgrund dafür, warum die Abwärme aus den grossen thermischen Kraftwerken (vor allem Kernkraftwerke) nicht wirtschaftlich genutzt werden kann. Aus der Sicht einer optimalen Energienutzung sind kleinere Anlagen (gemäss den oben aufgeführten Beispielen) sinnvoller, welche in der Nähe von Siedlungsgebieten erstellt werden und die Abwärme nutzen können.

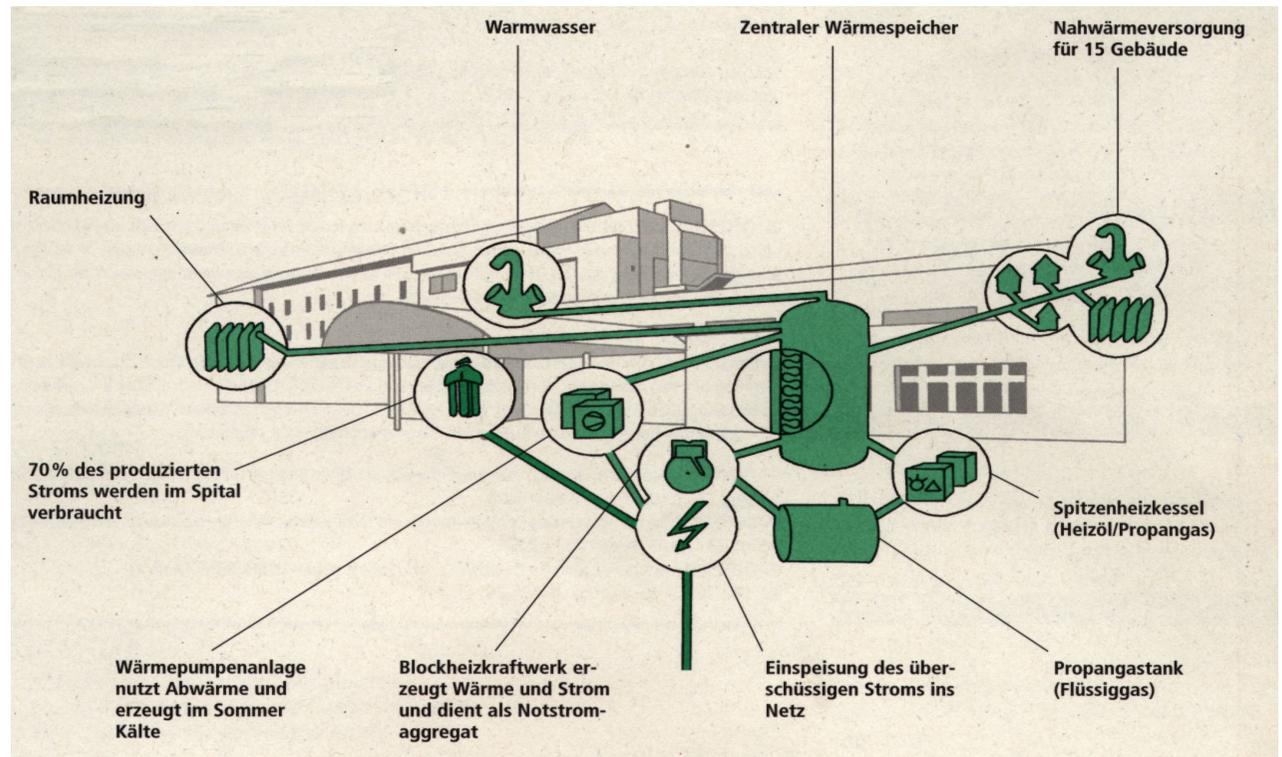


Abb. 1: Wärmeverbund Kantonsspital Obwalden, Sarnen

Zentrale und dezentrale Elektrizitätsproduktion

Die heute vorhandene Elektrizitätsversorgung basiert vor allem auf grossen Kraftwerken (Wasserkraft und Kernkraft). Sie ist deshalb mit relativ hohen Übertragungsverlusten (im Bereich von 5 bis 10%) behaftet.

Mittlere und kleine Anlagen zur Elektrizitätsversorgung (neben thermischen Maschinen wie Blockheizkraftwerke auch Kleinwasserkraftwerke, Windkraftanlagen, Fotovoltaikanlagen) dezentralisieren die Elektrizitätsversorgung. Eine dezentrale Elektrizitätsversorgung weist die folgenden wichtigen Charakteristiken auf:

- Weil die Elektrizitätsproduktion nahe bei den Verbrauchern ist, werden die Übertragungsverluste (durch Transportleitungen und Transformatoren) minimiert.
- Eine Vielzahl von kleineren Anlagen erhöht die Versorgungssicherheit, da sich ein Ausfall einer Anlage kaum auf die gesamte Elektrizitätsversorgung auswirkt.
- Kleine Anlagen sind politisch meist unbestritten und können deshalb schnell gebaut werden.
- Kleine Anlagen erlauben meist eine einfache und wirtschaftliche Abwärmenutzung.
- Die Netzstabilität (Frequenz und Spannung) wird durch die grossen Kraftwerke gewährleistet, welche international synchronisiert werden. Viele kleine Kraftwerke nahe beieinander können Massnahmen für die Netzstabilisierung erfordern (vor allem in relativ schwachen Netzen).

Ökologische Konsequenzen aus dem Betrieb thermischer Maschinen

Um die ökologischen Konsequenzen zu minimieren, ist bei allen thermischen Maschinen ein hoher Gesamtwirkungsgrad sowie eine möglichst vollständige Abwärmenutzung anzustreben.

Bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen (Öl, Gas, Kohle) in Verbrennungsmotoren und Dampfkesseln von Kraftwerken entsteht aus dem im Brennstoff gebundenen Kohlenstoff CO_2 . Weil für einen hohen Wirkungsgrad eine hohe Verbrennungstemperatur angestrebt werden muss (siehe Carnotscher Wirkungsgrad), entsteht in beträchtlichem Ausmass Stickoxid (NO_x). Während Stickoxide mit Katalysatoren reduziert werden können (beim Auto oder bei Kraftwerken), kann das einmal entstandene CO_2 mit technischen Massnahmen nicht reduziert werden.

Bei Betrieb der Kernkraftwerke entstehen sowohl radioaktive Emissionen beim Normalbetrieb als auch nukleare Abfälle bei der Entsorgung bzw. beim Rückbau.

Die ökologischen Konsequenzen werden im Grundlagenheft «Energie – Schlüsselgrösse unserer Zeit» ausführlich dargestellt (siehe weiterführende Literatur).

4.2 Konventionelle thermische Kraftwerke

Bei den konventionellen thermischen Kraftwerken steht die zentrale Produktion von Elektrizität im Vordergrund. Diese Kraftwerke werden für eine sehr hohe elektrische Leistung gebaut (über 300 MW_{el}); oft werden mehrere Blöcke auf dem gleichen Areal erstellt. Die anfallende Abwärme wird praktisch nicht genutzt, da solch grosse Kraftwerke infolge des Platzbedarfs und der Emissionen weit ausserhalb von dicht besiedelten Gebieten gebaut werden und die Wärmeverteilung nicht wirtschaftlich ist.

Funktionsweise

In den konventionellen thermischen Kraftwerken treibt Wasserdampf eine Dampfturbine an, welche einen elektrischen Generator antreibt. Der Dampf wird je nach Kraftwerkstyp in einem Atomreaktor oder in einem mit Öl, Gas oder Kohle befeuerten Dampfkessel erzeugt. Damit ein hoher Wirkungsgrad (Carnotscher Wirkungsgrad) erreicht wird, muss die Dampftemperatur (und somit auch der Dampfdruck) möglichst hoch sein.

Um die sehr grosse Abwärme abführen zu können, werden (vor allem bei Kernkraftwerken) die charakteristischen Kühltürme gebaut. Mit der Abwärme wird in sehr grossen Mengen Wasser verdampft; dies führt zu einer tiefen Abwärmtemperatur und einem entsprechend hohen Carnotschen Wirkungsgrad.

Wirtschaftlichkeit

Die Kosten für die produzierte Elektrizität (Stromgestehungskosten) bestehen bei allen Kraftwerksarten aus Kapitalkosten (Verzinsung und Amortisation des investierten Kapitals) sowie aus laufenden Kosten für Brennstoff und Betrieb. Bei Kernkraftwerken, welche aufgrund des äusserst risikoreichen Umgangs mit Kernbrennstoffen hohe Investitionen aufweisen, besteht der grösste Anteil der Gestehungskosten aus Kapitalkosten, während bei (vergleichsweise billigen) Öl-, Gas- oder Kohlekraftwerken ein grosser Teil der Gestehungskosten auf den Brennstoffverbrauch und die Massnahmen für die Schadstoffreduktion zurückzuführen sind. Ältere Kraftwerke mit tiefen Sicherheits- und Umweltstandards, welche zudem bereits zu einem grossen Teil amortisiert sind, weisen tiefe Stromgestehungskosten auf.

Kombikraftwerk (Öl oder Gas)

Ein thermisches Kraftwerk mit besonders hohem Wirkungsgrad ist das Kombikraftwerk: Der für den Betrieb der Dampfturbine benötigte Dampf wird dabei durch die Abwärme einer Gasturbine (in einem Abhitzekessel) erzeugt. Die Gasturbine kann mit Erdgas oder Erdöl betrieben werden.

Durch die Kombination von Gasturbine und Dampfturbine kann ein Wirkungsgrad von bis zu 60% erreicht werden. Durch den hohen Wirkungsgrad sind die Brennstoffkosten tiefer; deshalb ist das Kombikraftwerk tendenziell wirtschaftlicher als ein Kraftwerk ohne Gasturbine.

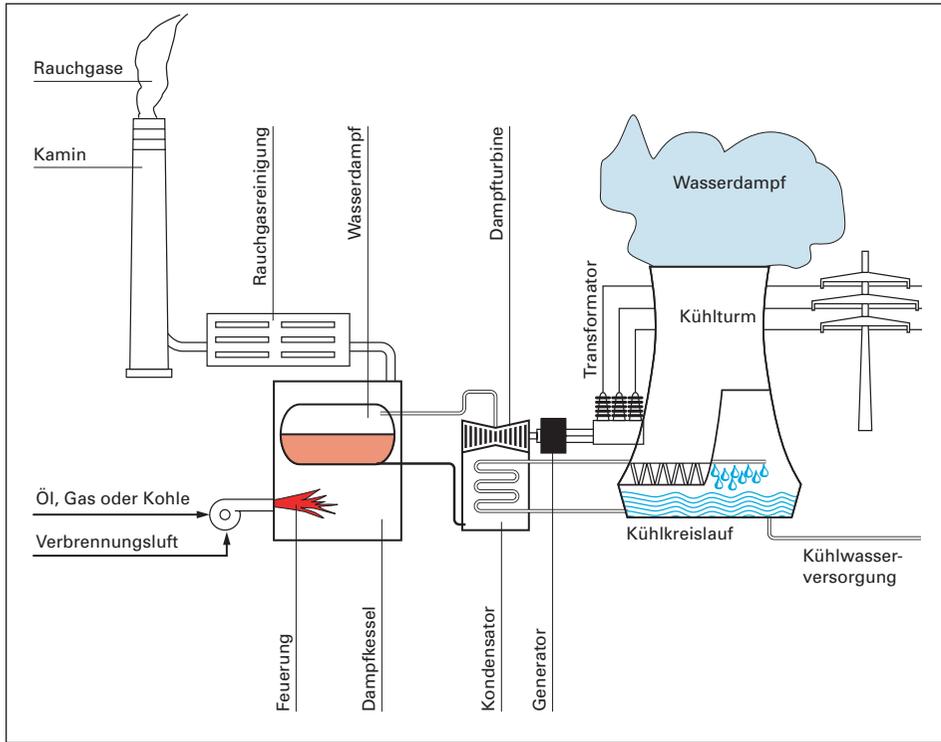


Abb. 2: konventionelles thermisches Kraftwerk

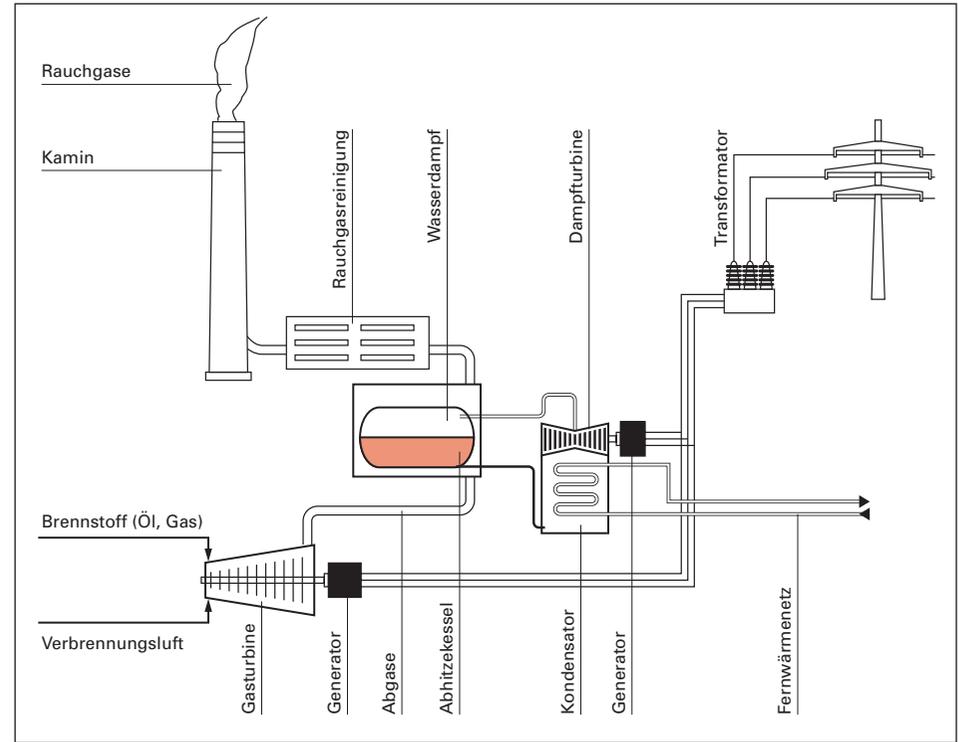


Abb. 3: Kombikraftwerk

4.3 Wärmekraftkopplung

Wärmekraftkopplung (Abkürzung: WKK)

Wärmekraftkopplung bedeutet kombinierte Produktion von Wärme (für Heizung und Prozesse) und Kraft, meist zur Elektrizitätsproduktion. Ein Blockheizkraftwerk (Abkürzung: BHKW) ist die kompakte Bauart eines Wärmekraftkopplungsmoduls, welches hauptsächlich in den Leistungsbereichen bis 1 MW_{el} mit Verbrennungsmotoren und von 1 bis $10 \text{ MW}_{\text{el}}$ mit Gasturbinen eingesetzt wird.

Gasmotor-Blockheizkraftwerke

Als Antriebsaggregate für Gasmotor-BHKW's werden **Industrie-Gasmotoren** eingesetzt. Diese stehen für einen Leistungsbereich von $20 \dots 1000 \text{ kW}_{\text{el}}$ zur Verfügung. Grössere Anlagen werden aus mehreren Modulen zusammengesetzt. Gasbetriebene Klein-BHKW's für einen Leistungsbereich von 5 bis $20 \text{ kW}_{\text{el}}$ basieren auf umgebauten **Fahrzeugmotoren**. Mit **standardisierten BHKW's** ist ein nahezu vollautomatischer und kostengünstiger Betrieb möglich.

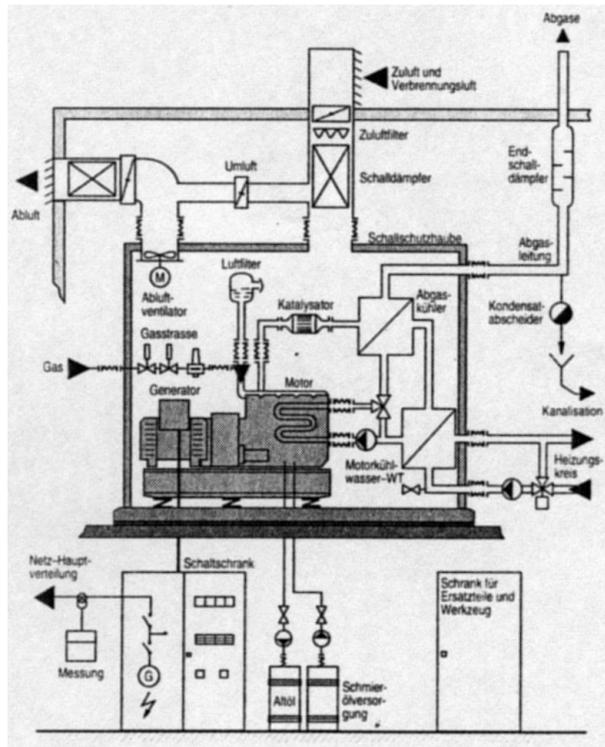


Abb. 4: Aufbau eines Gasmotor-Blockheizkraftwerks

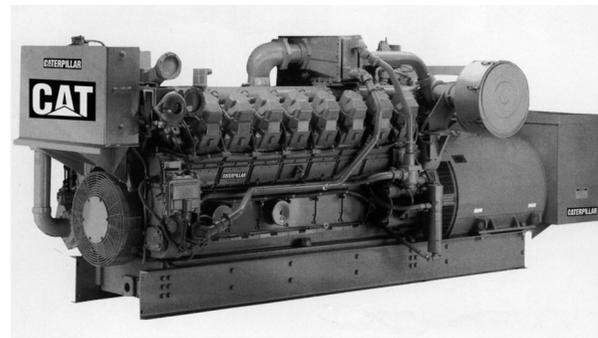


Abb. 5: Gasmotor-Blockheizkraftwerk: Motor-Generator-Einheit (links Motor, rechts Generator)

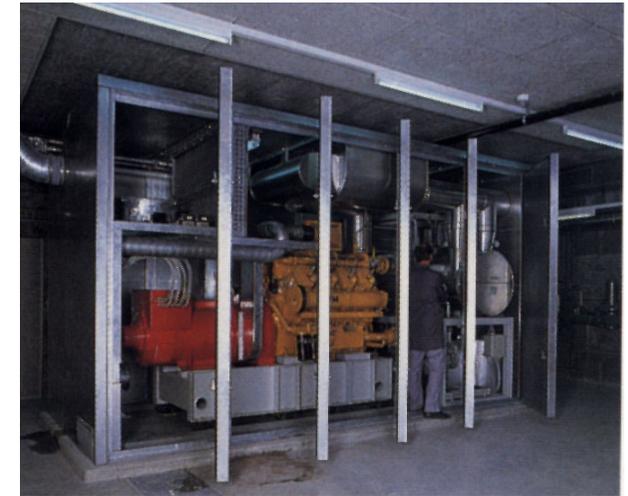


Abb. 6: Gasmotor-Blockheizkraftwerk: komplettes Modul mit (entfernter) Schallschutzhülle und Wärmeaustauscher



Abb. 7: Energiezentrale des Kantonsspitals Obwalden mit zwei Blockheizkraftwerken (Propan-Magermotoren)

Dieselmotor-Blockheizkraftwerke

Ein Dieselmotor-BHKW ist ähnlich aufgebaut wie ein Gasmotor-BHKW, unterscheidet sich von diesem aber durch die Motorenbauart, den Brennstoff und die Abgasreinigung. Der Dieselmotor wird mit Dieselöl (entspricht Heizöl EL) oder als so genannter Zündstrahlmotor mit einem Gemisch aus Dieselöl (mindestens 5%) und Gas (Erdgas, Flüssiggas, Deponie- oder Klärgas) betrieben.

Wegen der höheren Kosten (hauptsächlich infolge der Abgasreinigung) werden Dieselmotor-BHKW vor allem für grössere Leistungen (ab ca. 200 kW_{el}) erstellt.

Der elektrische Wirkungsgrad ist gegenüber einem Gasmotor-BHKW höher. Der thermische Wirkungsgrad und somit der Gesamtwirkungsgrad hängen stark von der Nutzung der Abgaswärme ab. Werden die Abgase im Abgaswärmeaustauscher unter 180°C abgekühlt, treten zwei Probleme auf: Einerseits greift die durch Kondensation von SO₂ entstehende Säure das Material des Abgaswärmeaustauschers an. Andererseits verschmutzt der Abgaswärmeaustauscher durch die Kondensation hochsiedender Kohlenwasserstoffe.

Für die Abgasreinigung sind zwei Verfahren nötig: Entstickung der Abgase mit Katalysator sowie Russpartikelfilter. Moderne Dieselmotoren erreichen mit Abgasreinigung Emissionswerte für NO_x und CO, welche mit Gasmotoren vergleichbar sind. Sehr viel

problematischer sind die Emissionen von Kohlenwasserstoffen, weil unter anderem polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) emittiert werden, welche als krebsfördernd gelten.

Gasturbinen-Blockheizkraftwerke

Für industrielle Einsatzgebiete oder für grössere Wärmeversorgungen mit Temperaturen von über 120°C stehen Gasturbinen im Vordergrund. Wirtschaftlich einsetzbar sind solche Anlagen jedoch erst ab einer elektrischen Leistung von 1 MW. Die Anforderungen an die Schadstoffemissionen von Gasturbinen erfordern spezielle Massnahmen.

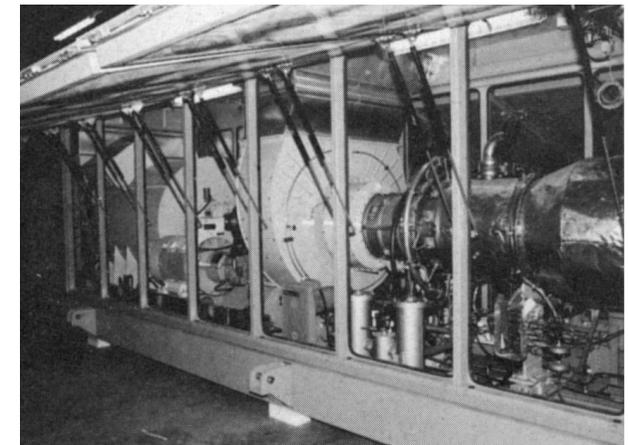


Abb. 8 Gasturbinen-Blockheizkraftwerk: Gasturbine (rechts) und Generator (links)



Stirlingmotor-Blockheizkraftwerke

Der Stirlingmotor ist seit langer Zeit eine vielversprechende Alternative zum Gas- oder Dieselmotor, weil die Verbrennung nicht im Motor selbst, sondern extern erfolgt. Dies hat den grossen Vorteil, dass praktisch beliebige Brennstoffe, zum Beispiel Holz oder auch Sonnenenergie, eingesetzt werden können. Es wurden verschiedene Motorkonzepte mit Helium, Wasserstoff und Luft als Arbeitsmittel in Form von Pilotanlagen realisiert. Wichtige technische Probleme sind jedoch noch nicht gelöst, und der mechanische Wirkungsgrad ist noch unbefriedigend.

Randbedingungen für den Einsatz von Blockheizkraftwerken

Blockheizkraftwerke produzieren gleichzeitig Wärme und Elektrizität. Damit die Investitionen für den Bau der Blockheizkraftwerke amortisiert werden können, müssen die folgenden Randbedingungen vorhanden sein:

- Der Wärmebezug soll möglichst gleichmässig über eine längere Zeit anfallen. Ideal ist Prozesswärme, welche das ganze Jahr über benötigt wird (Beispiel Papierfabrik).
- Es sind lange Laufzeiten zu erreichen (angestrebt werden 4000 Vollbetriebsstunden pro Jahr).
- Die Tarife für Elektrizität müssen relativ hoch sein, damit sich die Produktion lohnt.
- Die produzierte Elektrizität soll möglichst im gleichen Objekt verwendet werden können. Der Verkauf von Überschüssen an das lokale Elektrizitätswerk ist zwar möglich, doch die Tarife sind meist tief.

Fast alle Kantone schreiben bei der Realisierung von Blockheizkraftwerken die vollständige Wärmenutzung vor.

4.4 Brennstoffzelle

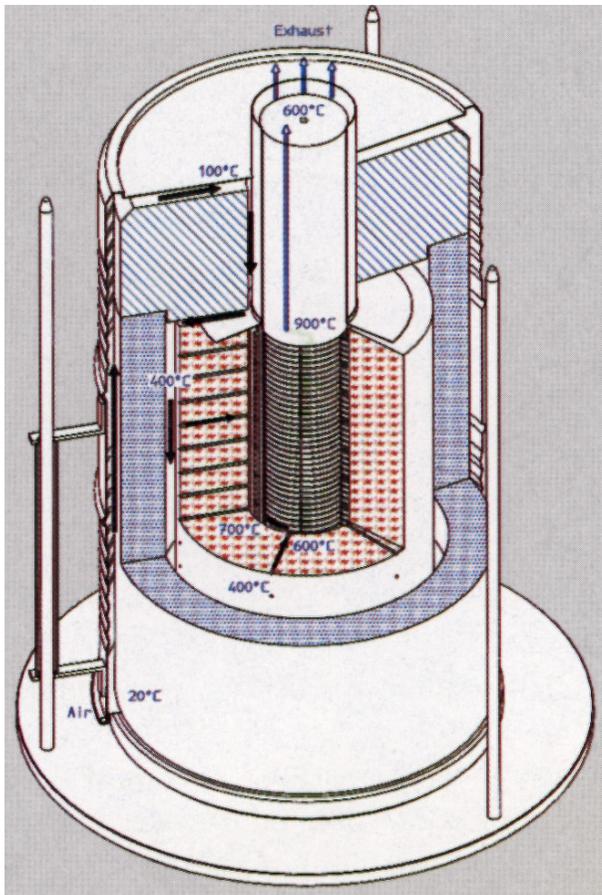


Abb. 9: Feststoffelektrolyt-Brennstoffzelle (Beispiel Sulzer Hexis)

In der Brennstoffzelle werden Wärme und Kraft nicht in einer thermodynamischen Maschine erzeugt, sondern Elektrizität entsteht durch einen elektrochemischen Prozess unter Abgabe von Abwärme.

Zurzeit sind drei mit Erdgas betriebene Brennstoffzellensysteme in Erforschung und Entwicklung. Sie unterscheiden sich insbesondere durch die Art des Elektrolyten, in welchem der elektrochemische Prozess abläuft. Alle Zellentypen weisen gegenüber WKK-Anlagen mit thermodynamischen Maschinen den Vorteil auf, dass die Elektrizitätserzeugung geräuschlos und praktisch ohne Schadstoffemissionen erfolgt.

- Phosphorsäure-Brennstoffzelle: Als Brennstoff für die Elektrizitätsproduktion wird Wasserstoff benötigt, welcher in einer Vorstufe zur Brennstoffzelle (Reformer) durch einen chemischen Prozess aus Erdgas gewonnen wird. Eine Pilotanlage mit einer elektrischen Leistung von 200 kW ist seit 1993 in Genf erfolgreich in Betrieb. Der elektrische Wirkungsgrad liegt bei 40 bis 43%.
- Karbonatschmelze-Brennstoffzelle: Analog zur Phosphorsäure-Brennstoffzelle muss zuerst aus Erdgas Wasserstoff produziert werden. Zurzeit befindet sich dieser Zellentyp noch im Forschungsstadium.
- Feststoffelektrolyt-Brennstoffzelle: Als Elektrolyten werden Keramik- oder Polymermembranen eingesetzt. Der grosse Vorteil der Zelle mit Keramikmembran ist die direkte Verwendung von Erdgas als Brennstoff ohne den «Umweg» über Wasser-

stoff. Ein weiterer Vorteil ist, dass der Prozess ohne korrosive oder toxische Substanzen arbeitet. Pilotanlagen sind bereits seit einigen Jahren in Betrieb.

Energiepolitische Beurteilung und Zukunftsaussichten

Brennstoffzellen (insbesondere die Feststoffelektrolyt-Brennstoffzelle) weisen ein sehr hohes Entwicklungspotenzial auf:

- Die Elektrizitätsproduktion erfolgt (im Unterschied zu den wartungsintensiven thermischen Maschinen) praktisch ohne bewegte Teile und ohne Verschleiss.
- Die Elektrizitätsproduktion erfolgt geräuschlos und praktisch schadstofffrei.
- Die Technologie ist für alle Leistungsbereiche, von der Stromversorgung für Mobiltelefone bis zu den Grosskraftwerken, einsetzbar.
- Die Leistung sowie die Anteile von Elektrizitäts- und Wärmeproduktion der Brennstoffzelle können variiert werden.
- Analog zu der Mikroelektronik ist eine (billige) Massenproduktion aus technischer Sicht möglich und auch zu erwarten.

Die erfolgversprechendste Anwendungsart der Brennstoffzelle ist ein Modul, welches auf einen typischen Haushalt abgestimmt ist. Dieses Gerät soll im «Besenschrank» einer Wohnung Platz finden und sowohl den Wärme- wie auch den Elektrizitätsbedarf abdecken.

5 Aufgaben, Lösungsvorschläge

Lernauftrag 1

Erarbeiten Sie in Gruppen die Charakteristiken, Vor- und Nachteile der verschiedenen Kraftwerksarten. Präsentieren Sie anschliessend Ihre Ergebnisse in der Klasse.

(Dieser Lernauftrag kann auch als Einstieg nach einer kurzen Einführung dienen).

Lernauftrag 2

Skizzieren Sie:

- a) das Schema eines konventionellen Kraftwerks
- b) das Schema eines Kombikraftwerks

Beschriften Sie die wichtigsten Komponenten und halten Sie den wesentlichen Unterschied durch farbige Markierung fest.

Lernauftrag 3

Gehen Sie der Frage nach, weshalb bei grossen Kraftwerken die Abwärme praktisch nie genutzt wird. Befragen Sie zu diesem Zweck einen Kraftwerksbetreiber.

Lernauftrag 4

Zählen Sie die verschiedenen möglichen Antriebe für ein Blockheizkraftwerk auf, und nennen Sie die Gründe, die für die Wahl ausschlaggebend sein können. Erstellen Sie dazu eine tabellarische Übersicht mit den Charakteristiken und den allfälligen Vor- und Nachteilen.

(Verwendung der Fachinformation, Kapitel 4.3, gestattet).

6 Weiterführende Literatur

- Schweiz. Fachverband für Wärmekraftkopplung: Wärmekraftkopplung: Die kombinierte Erzeugung von Wärme und Strom, Potenziale, Markt, Innovationen, Zürich 2001
- Schweiz. Fachverband für Wärmekraftkopplung: Wärmekraftkopplung: Die kombinierte Erzeugung von Wärme und Strom, Wirtschaftlichkeit, Politik, Markt, Liestal 1996
- Bundesamt für Konjunkturfragen, Elektrizität und Wärme, Grundlagen und Zusammenhänge, RAVEL im Wärmesektor Heft 1, EDMZ Bestellnr. 724.357d, Bern 1993
- Bundesamt für Konjunkturfragen, Wärmekraftkopplung: Gasmotor-Blockheizkraftwerke effizient planen, bauen und betreiben, RAVEL im Wärmesektor Heft 4, EDMZ Bestellnr. 724.358d, Bern 1994
- Recknagel Sprenger Hönmann: Taschenbuch für Heizung+Klimatechnik, R. Oldenbourg Verlag GmbH, München 1992
- Wolfgang Suttor: Praxis Kraft-Wärme-Kopplung, Technik, Umfeld, Realisierung von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, C.F. Müller Verlag, Karlsruhe 1993

7 Bild- und Textnachweis

- Energie 2000: Ausbau Kantonsspital Obwalden, Sarnen, Energien intelligent kombiniert, Bern 1998 (Abb. 1 und 7)
- Energie – Schlüsselgrösse unserer Zeit, Fachbuchreihe Energie im Unterricht, Verlag Berufsbildung Sauerländer AG, Aarau:
Band 1: Grundlehrmittel, 1997 (Auszüge als Basis für Abb. 2 und 3)
Band 2: Lehrerteil zum Grundlehrmittel, 1999
Bezug: Walter Gille, Zürichbergstr. 46a, 8044 Zürich
- Bundesamt für Konjunkturfragen, Wärmekraftkopplung: Gasmotor-Blockheizkraftwerke effizient planen, bauen und betreiben, RAVEL im Wärmesektor Heft 4, Bern 1994 (Abb. 4)
- Schweiz. Fachverband für Wärmekraftkopplung: Wärmekraftkopplung: Die kombinierte Erzeugung von Wärme und Strom, Wirtschaftlichkeit, Politik, Markt, Liestal 1998 (Abb. 5, 6 und 9)
- Bundesamt für Konjunkturfragen, Elektrizität und Wärme, Grundlagen und Zusammenhänge, RAVEL im Wärmesektor Heft 1, Bern 1993 (Abb. 8)

8 Vorlagen

Art der Maschine	Elektrischer Wirkungsgrad	Thermischer Wirkungsgrad	Gesamtwirkungsgrad
Heizkraftwerk mit Dampfturbine	0,35	0,50	0,85
Kombikraftwerk mit Gas- und Dampfturbine	0,50 bis 0,60	0,25 bis 0,35	0,85 bis 0,90
Blockheizkraftwerk mit Gasturbine	0,30	0,55	0,85
Blockheizkraftwerk mit Gasmotor	0,35 bis 0,40	0,50 bis 0,60	0,85 bis 0,98
Blockheizkraftwerk mit Dieselmotor	0,45	0,35 bis 0,45	0,85 bis 0,90

