

KRAFT-WÄRME-KOPPLUNG

EFFIZIENZ VON KLEIN BIS GROSS



**MACH MIT.
BAU NACHHALTIG.**

Energieeffizientes Bauen in Sachsen



2

Seite Inhalt

04	Ausgangspunkt	29	Impressum
05	Wie funktioniert Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)	30	Kontakt
07	Historische Entwicklung		
08	Überblick und Darstellung konventioneller Technologien		
08	Verbrennungsmotoren		
09	Gasturbinen		
11	Dampfturbinen		
12	Gekoppelte Prozesse		
14	Wirtschaftlichkeit		
16	Klimaschutz		
17	Einsatzgebiete – heute und in Zukunft		
18	Staatliche Fördermaßnahmen		
20	KWK von morgen – innovative Zukunftstechnologien		
20	Stirlingmotoren		
21	Dampfexpansionsmaschinen		
22	Brennstoffzellen		
24	Best practice – Beispiele der innovativen Spitzentechnologie		
26	Begriffsklärungen		
27	Checkliste KWK-Installation		
28	Literaturverzeichnis		

→ Ausgangspunkt

Abb. 1: Gasturbinen-Heizkraftwerk Nossener Brücke, Dresden



Die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) stellt eine sehr effiziente Technologie zur nachhaltigen Entwicklung der Energieversorgung dar. Sie schont fossile Ressourcen und mindert die Abhängigkeit von Energieimporten. Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen können darüber hinaus zur Umsetzung des Klimaschutzprogramms der Bundesregierung beitragen. Diese hat der Wirtschaft und den privaten Haushalten die Verpflichtung auferlegt, den Ausstoß von CO_2 bis zum Jahr 2020 um 40 Prozent zu verringern [1].

Mit hocheffizienten KWK-Anlagen lassen sich nicht nur Betriebe, Schwimmbäder oder Hotels mit Elektroenergie und Wärme versorgen. Auch für Privathäuser, in denen heute meist herkömmliche Heizkesselanlagen Heizwärme und warmes Wasser bereitstellen, kann auf diese Weise Energie erzeugt werden. Die Integration von erneuerbaren Energien ist dabei ebenfalls möglich.

Da die in vielen Energieträgern enthaltene Energie nicht unmittelbar vom Verbraucher verwendet werden kann, ist eine Umwandlung in andere Energiearten notwendig. Bei der Umwandlung der Energieformen Primär-, Sekundär- und Endenergie in Nutzenergie treten in unterschiedlichem Maße Verluste auf, sodass die erzeugte Nutzenergiemenge immer kleiner ist als die ursprünglich eingesetzte Primärenergiemenge [2, 4].

Bei der zentralen Erzeugung von Elektroenergie besteht die Hauptproblematik darin, dass die in Großkraftwerken anfallende Wärme oft ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird. Neben diesen Verlusten entstehen Leitungsverluste aufgrund langer Transportwege für die Elektroenergie. Die beim Verbraucher benötigte Wärme muss über einen separaten Heizkessel erzeugt werden.

KWK-Anlagen können dagegen den Verbraucher gleichzeitig mit

den beiden wichtigsten Energiearten, Elektroenergie und Wärme, versorgen. Das grundsätzliche Prinzip der KWK besteht darin, dass die bei der Stromerzeugung anfallende Abwärme, z. B. zur Bereitstellung von Heizwärme und Brauchwasser, genutzt wird. Dadurch können die Verluste gegenüber der getrennten Erzeugung von Elektroenergie und Wärme minimiert und der Verbrauch an Primärenergie wesentlich vermindert werden.

Der KWK-Prozess sollte in der Nähe der Verbraucher beider Energiearten – also dezentral – stattfinden. Die dafür eingesetzten Anlagen bezeichnet man als Blockheizkraftwerke (BHKW). Durch die gleichzeitige Nutzung von Elektroenergie und Wärme können BHKW Gesamtwirkungsgrade der Energieumwandlung von über 90 Prozent erreichen.

Abb. 2: Vergleich des Primärenergiebedarfs bei der getrennten und der gekoppelten Erzeugung von Wärme und Elektroenergie

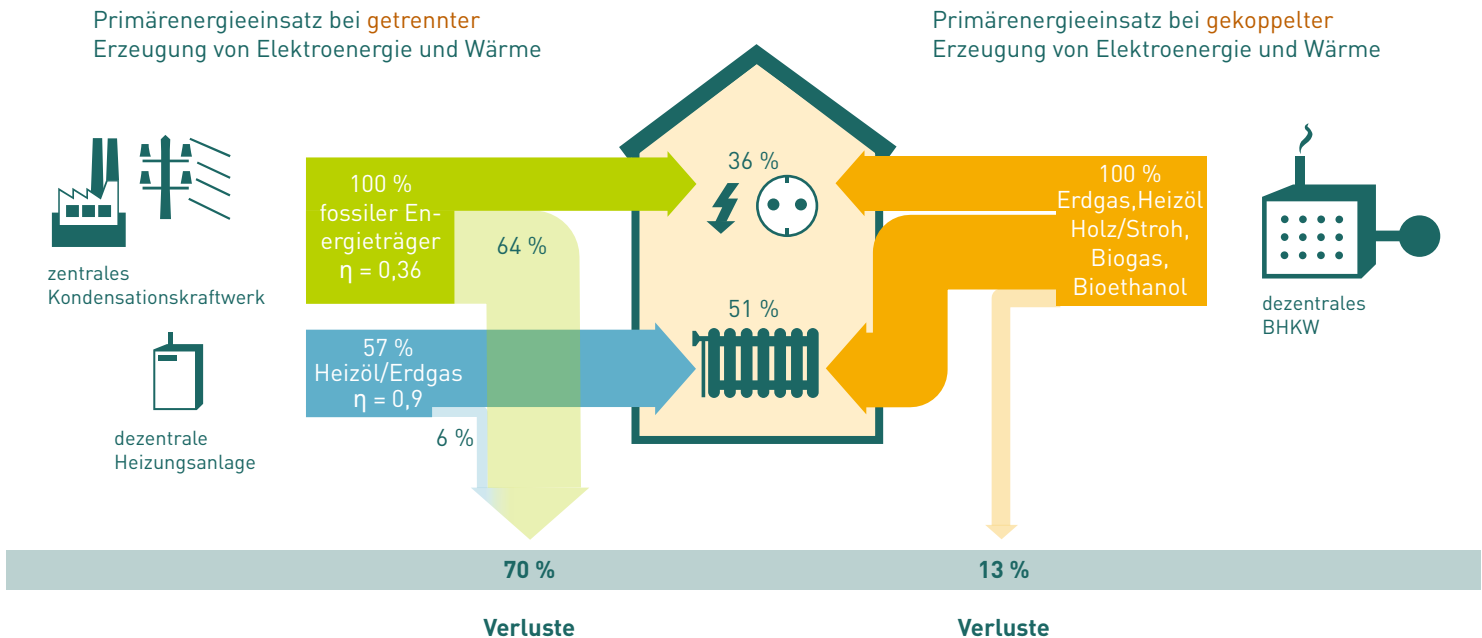
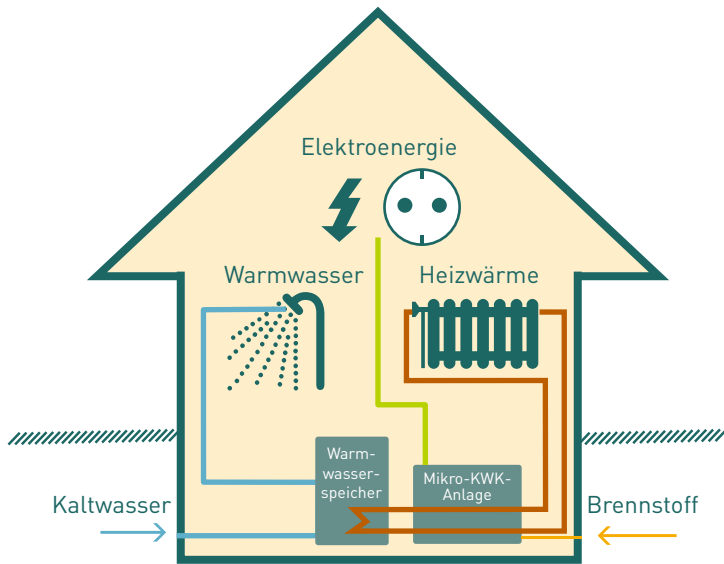
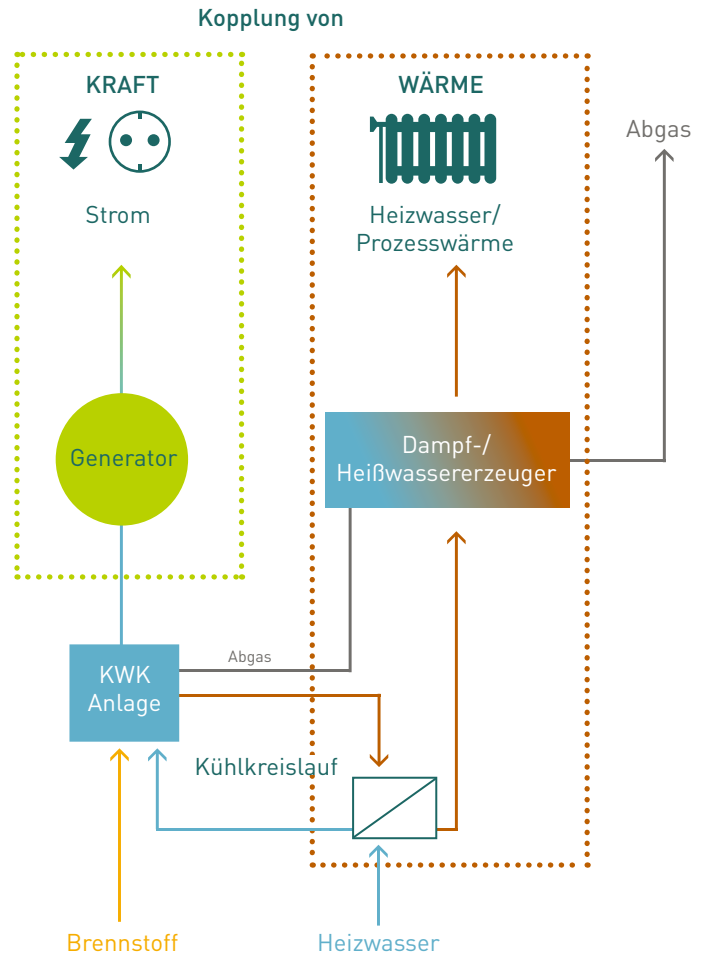


Abb. 3: Gleichzeitige Erzeugung von Elektroenergie und Wärme mit einer Mikro-KWK-Anlage im Einfamilienhaus



In Abbildung 4 ist der schematische Aufbau einer KWK-Anlage mit den wichtigsten Komponenten dargestellt. Die von der Verbrennungskraftmaschine (KWK-Anlage) gelieferte mechanische Energie wird mit Hilfe eines Generators in elektrische Energie umgewandelt. Die durch den Verbrennungsprozess entstehende Abwärme des Motorblocks (enthalten im Kühlwasser, Motoröl und dem Abgas) kann zur Erzeugung von Heiz- und Prozesswärme genutzt werden. Das Temperaturniveau dieser anfallenden Abwärme ist bei den einzelnen KWK-Technologien unterschiedlich und sollte bei der Anlagenauswahl berücksichtigt werden. Beispielhaft können (Mikro-) Gasturbinen genannt werden, bei denen Abwärme hoher Temperatur, insbesondere im Abgas, anfällt und als Prozesswärme nutzbar ist. Demgegenüber fällt bei Anlagen mit Verbrennungsmotoren der größte Teil der Abwärme im Kühlwasser an, das im Wesentlichen nur zu Heizzwecken verwendet werden kann [4, 5].

Abb. 4: Schematischer Aufbau einer KWK-Anlage



In der Praxis überwiegt derzeit noch die getrennte Erzeugung von Elektroenergie und Wärme. Die Kraft-Wärme-Kopplung gewinnt aber zunehmend an Bedeutung.

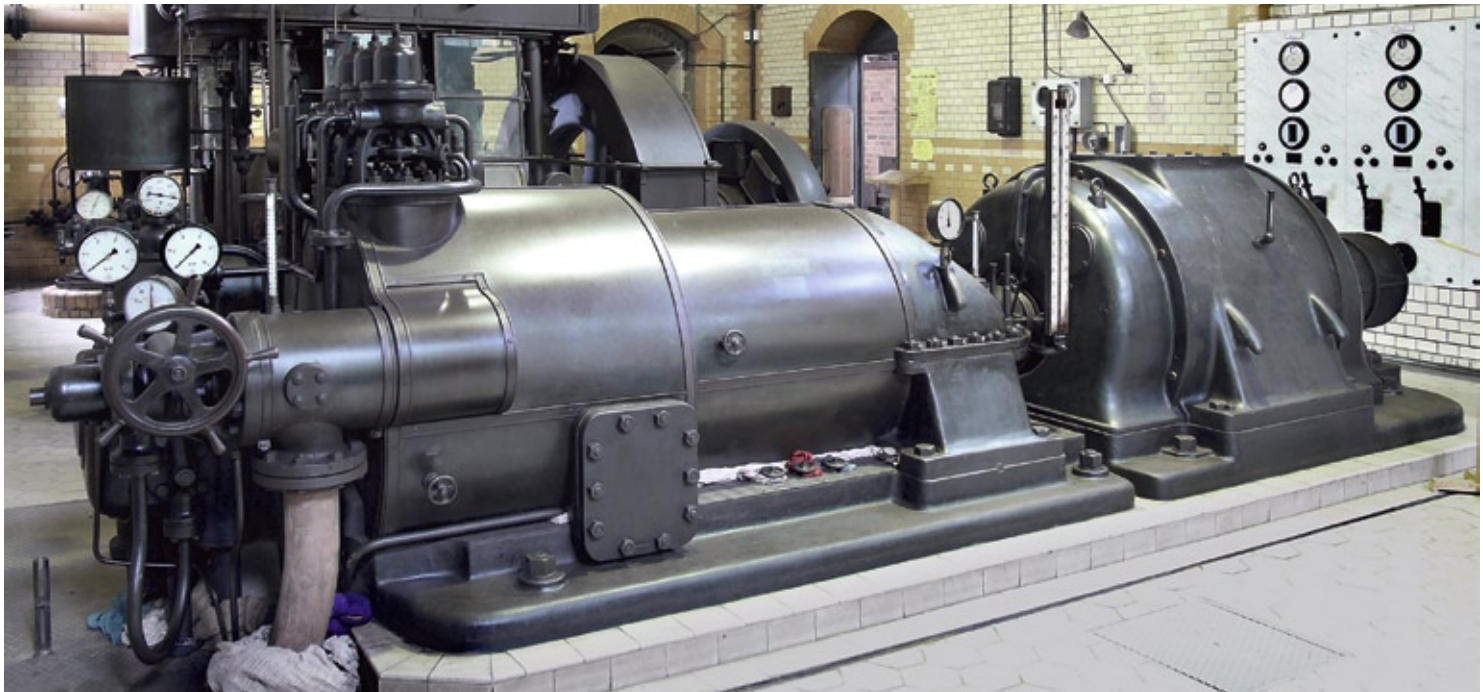
Zu Beginn des 20. Jahrhunderts war heißer Dampf die Hauptquelle für mechanische Energie. Als sich die Elektroenergieübertragung ausbreitete, reifte bei vielen Betreibern von Dampferzeugungsmaschinen der Gedanke, neben Dampf auch Elektroenergie zu erzeugen. So entstanden die ersten Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen.

In Deutschland verkörperte das 1902 fertig gestellte Heizkraftwerk der Beelitzer Heilstätten erstmals das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung. Heißdampf diente zur Erzeugung von Elektroenergie mit Dampfmaschinen auf Kohlebasis und wurde bei reduziertem Druck auch als Wärmeenergie genutzt, vor allem zur Fernheizung der Klinikgebäude [15]. In den fünfziger Jahren begann in Ballungszentren die Installation von ersten kleinen Heizkraftwerken mit Fernwärme-

netzen zur Gebäudebeheizung. Auch diese Anlagen arbeiteten auf Basis des Dampfkraftprozesses und wurden zunächst überwiegend mit Kohle und in der Folge teilweise mit Erdgas betrieben.

In den siebziger Jahren bekam die Fernwärmeversorgung auf Kohlebasis vor dem Hintergrund der Ressourcenschonung eine besondere Bedeutung. Den fossilen Brennstoffen Erdöl und Erdgas wurde nur noch eine Reichweite von wenigen Jahrzehnten zugesprochen. Durch das zunehmende Umweltbewusstsein in den achtziger Jahren wurde vorrangig Erdgas als Brennstoff in den Heizkraftwerken verwendet. Gleichzeitig gingen die ersten Blockheizkraftwerke in Betrieb, die auf Basis vorhandener Erdgasnetze dezentral Elektroenergie erzeugten und die Abwärme zur Beheizung von Gebäuden und Gebäudekomplexen lieferten [3].

Abb. 5: Dampfturbinenanlage im Heizkraftwerk Beelitz-Heilstätten



→ Überblick und Darstellung konventioneller Technologien

Konventionelle Technologien der KWK können in folgende Prinzipien unterteilt werden:

- Verbrennungsmotoren
- Gasturbinen
- Dampfturbinen
- gekoppelte Prozesse

Verbrennungsmotoren

In der KWK werden Verbrennungsmotoren im Leistungsbereich von ca. 1 kW_{el} bis ca. 7 MW_{el} verwendet. Man unterscheidet prinzipiell in Gas-Otto-Motoren und Diesel-Motoren.

Gas-Otto-Motoren

Die in der KWK eingesetzten Gasmotoren arbeiten thermodynamisch nach dem Otto-Prozess. Der Unterschied zu den herkömmlichen Otto-Motoren besteht in der Verwendung eines Gasmischers (Gemischaufbereitung) anstelle eines Vergasers oder einer Direkteinspritzung.

KWK-Anlagen arbeiten aufgrund der höheren Laufruhe und Lebensdauer überwiegend mit Vier-Takt-Motoren, die mit Erdgas oder Biogas (Klär- und Deponiegas) betrieben werden. Im Falle einer Biogasnutzung ist der Schwefelanteil im Rohgas zu beachten, der die Lebensdauer und die Abgasemission beeinflussen kann.

Die Regelung des Brennstoff-Luft-Mischungsverhältnisses (Lambda-Regelung) ist entscheidend für die effiziente Funktion und den umweltfreundlichen Betrieb des Motors. Das genaue Verbrennungsluftverhältnis wird durch ein Mischventil (Einspritzanlage) in der Gaszufuhr eingestellt. Eine Lambdasonde im Abgas erfasst den Istwert des Restsauerstoffs. Die Regelelektronik vergleicht die Werte

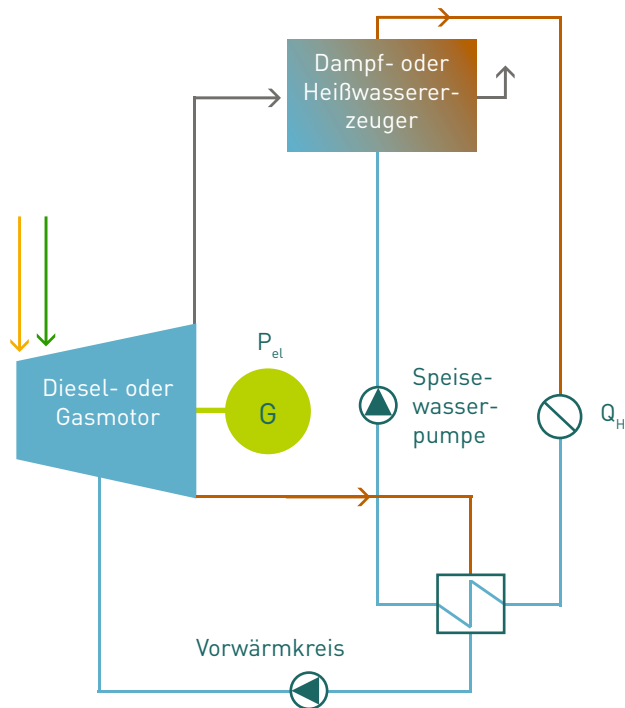
Abb. 6: Blockheizkraftwerk mit Gas-Otto-Motor



mit dem Sollwert und gibt entsprechende Signale an das Regelventil aus. Dadurch kann den einzelnen Zylindern zu jedem Zeitpunkt ein genau abgestimmtes Brennstoff-Luft-Gemisch zugeführt werden. Beim Gas-Otto-Motor wird das Gas-Luftgemisch fremd gezündet. Dies geschieht durch den Hochspannungsfunken einer Zündkerze. Zur Senkung der Abgasemissionen (NO_x, CO, H_xC_y) sind primäre und sekundäre Maßnahmen notwendig. Primäre Maßnahmen umfassen motorische Maßnahmen, durch die die Entstehung höherer Schadstoffkonzentrationen verhindert werden soll. Bei sekundären Maßnahmen wird dem Motor eine Abgasnachbehandlungsanlage nachgeschaltet. Dabei gibt es zwei technische Konzepte. Das Erste besteht im Betrieb des Motors bei einem ausgewogenen Brennstoff-Luftverhältnis (Lambda = 1) in Verbindung mit einem Dreiwegekatalysator. Beim zweiten Konzept (auch als Magerkonzept bezeichnet) wird der Gasmotor mit Luftüberschuss (Lambda = 1,4 bis 1,6) betrieben und die Restemissionen (NO_x, CO, H_xC_y) durch einen Oxida-

tionskatalysator entfernt. Dazu werden geregelte oder ungeregelte Katalysatoren verwendet, wobei geringere Anforderungen an die Regelgenauigkeit als bei der $\lambda = 1$ -Betriebsweise gestellt werden [4, 5, 6].

Abb. 7: Funktionsweise des Diesel- und Gasmotorenprozesses



P_{el} elektrische Leistung

Q_H Wärmeverbraucher

G Generator

— Speisewasser

— Dampf/Heißwasser

— Welle

— Brennstoff

— Rauchgase

— Luft

Diesel-Motoren

Die nach dem Dieselp Prozess arbeitenden Motoren sind ähnlich aufgebaut wie Otto-Motoren. Der wesentliche Unterschied besteht in der Zündung des Kraftstoff-Luft-Gemisches. Dieses wird bei Diesel-Motoren getrennt zugeführt. Zunächst wird die Verbrennungsluft unter hohem Druck im Zylinder verdichtet und dadurch auf ca. 700 bis 900 °C erhitzt. Danach erfolgt die Einspritzung des Kraftstoffs, der sich selbst entzündet. Dieser Motorentyp benötigt demzufolge keine Zündkerzen. Nur für den Kaltstartvorgang sind Zündhilfen, wie z. B. Glühkerzen, notwendig. Da bei der Verbrennung des Kraftstoffes ein Zündverzögerung auftritt, ist die Höchstdrehzahl bei diesem Motorentyp begrenzt. Eine Leistungssteigerung kann deshalb nur durch Aufladung (Zwangsbefüllung mit Verbrennungsluft) mit einem Aufladegeräte im Vergleich zu einem Saugmotor erreicht werden. Als Kraftstoffe werden Dieseldieselkraftstoff (Heizöl EL) oder Pflanzenöle (in dafür tauglichen Motoren) genutzt.

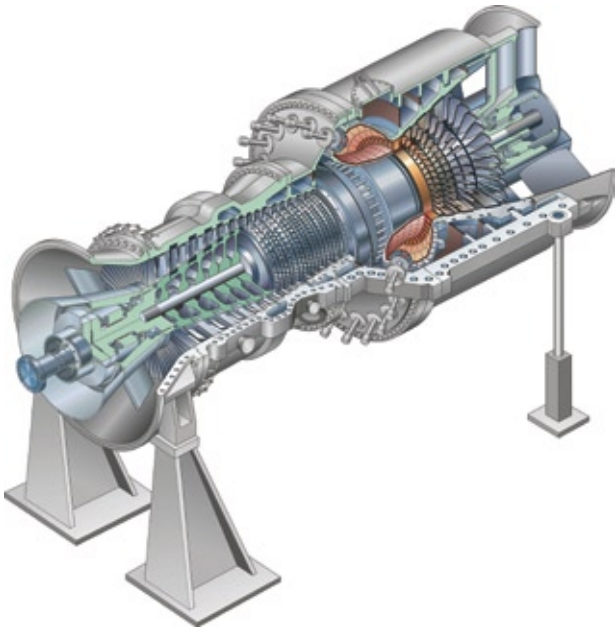
Vorteile von Diesel-Motoren gegenüber den Otto-Motoren bestehen in dem etwas geringeren spezifischen Kraftstoffverbrauch und in der mitunter längeren Lebensdauer. Dem gegenüber stehen beispielsweise ein schlechteres Leistungsgewicht und vor allem ein größerer Aufwand für die Abgasreinigung. Diese muss aufgrund des erhöhten Partikelaustrittes (Dieselruß, Feinstaub) durch einen Partikelfilter ergänzt werden [2, 5, 6].

Gasturbinen

In KWK-Anlagen kommen Gasturbinen für Anlagenleistungen von ca. 30 kW_{el} bis über 250 MW_{el} zur Anwendung. Gasturbinen arbeiten thermodynamisch nach dem Joule-Prozess. Sie bestehen aus dem Verdichter, den Brennkammern und der Turbine, wobei der Verdichter und die Turbine zumeist auf einer Welle angeordnet sind. Als Brennstoffe können sowohl gasförmige (z. B. Erdgas, Biogas) als auch flüssige Treibstoffe (z. B. Heizöl, Kerosin, Schweröle) eingesetzt werden.

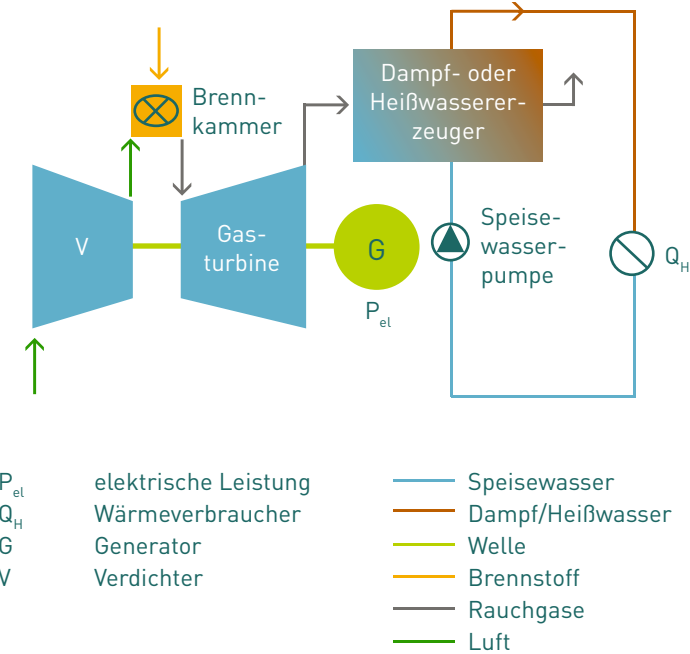
Der Verdichter (mehrstufig) saugt große Luftmengen an und komprimiert diese mithilfe von entsprechend angeordneten Schaufelreihen. Dabei steigen Temperatur und Druck des Gases, das, entweder durch eine äußere Verbrennung oder durch Einspritzen von Kraftstoff in die Brennkammer, zusätzlich erhitzt wird. Der erzeugte heiße Gasstrahl (800 bis 1200 °C) wird auf die mehrreihig angeordneten Schaufelräder der Entspannungsturbine gelenkt, versetzt diese in Drehung und gibt dabei Arbeit ab. Das Gas wird in der Turbine auf Umgebungsdruck entspannt und weist immer noch Temperaturen von bis zu 500 °C auf. Die in der Turbine gewonnene Rotationsenergie wird teilweise zum Antrieb des Verdichters benötigt, zum anderen Teil wird sie als Nutzenergie, z. B. als Antrieb eines Generators, abgeführt. Der Wirkungsgrad dieser Anlagen liegt zwischen 15 und 40 Prozent.

Abb. 8: Ansicht und Aufbau der Gasturbine



Zur Erhöhung des Wirkungsgrades des Gasturbinenprozesses gibt es verschiedene Prozessvariationen, wobei hauptsächlich zwischen zwei Anlagenarten unterschieden wird: Anlagen mit offenem Kreislauf und Anlagen mit geschlossenem Kreislauf und äußerer Wärmezufuhr (Rekuperator). Beim offenen Kreislauf wird das Arbeitsmedium ständig erneuert, beim geschlossenen Kreislauf hingegen kontinuierlich umgewälzt. Zur Wirkungsgradverbesserung können zusätzlich Zwischenkühler, Zwischenüberhitzer und Rekuperatoren in den Kreislauf eingebracht werden. Die Nutzung des heißen Abgases kann auch in Kombination mit einer Dampfturbine (GuD-Prozess) erfolgen. Vorteile der Gasturbinen bestehen in der schnellen Verfügbarkeit, wodurch sie, analog zu Verbrennungsmotoren, sehr gut zur Spitzenlastabdeckung bei der Stromversorgung oder Notstromversorgung geeignet sind.

Abb. 9: Funktionsweise des Gasturbinenprozesses



Mikro-Gasturbinen sind neu entwickelte High-Tech-Produkte, die sich für dezentrale Stromversorgung und Kraft-Wärme-Kopplung im Leistungsbereich unterhalb von $500 \text{ kW}_{\text{el}}$ eignen. Ein konstruktiver Unterschied zu herkömmlichen Gasturbinen besteht neben der kleineren Bauweise vor allem darin, dass ein schnelllaufender Permanentmagnet-Generator direkt auf der Antriebswelle der Turbine angeordnet ist und mithilfe einer Leistungselektronik die Anpassung an die Netzfrequenz erfolgt. Mit Rekuperatoren können elektrische Wirkungsgrade von 25 bis 28 Prozent erreicht werden. Ein Rekuperator nutzt auch in diesem Fall die Wärmeenergie aus den Turbinenabgasen und erwärmt damit die Verdichteraustrittsluft, bevor diese in die Brennkammer gelangt. Aufgrund der hohen Abgastemperatur von 250 bis 300°C ist die Nutzung der Abgaswärme, vor allem zur Deckung des Prozesswärmebedarfs für kleinere Industriebetriebe oder zur thermischen Kälteerzeugung, sinnvoll [2, 4, 5, 6].

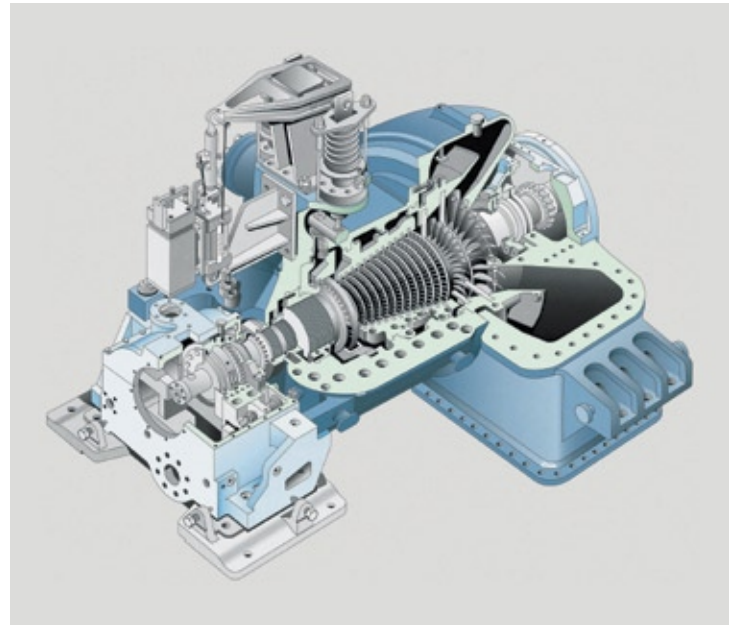
Dampfturbinen

Dampfturbinen sind Wärmekraftmaschinen, die prinzipiell nach dem Clausius-Rankine-Kreisprozess arbeiten. Sie bestehen aus den Hauptkomponenten Dampfkessel mit Überhitzer, Turbine, Kondensator und Speisewasserpumpe. Neben der Erzeugung von elektrischer Energie kann Prozessdampf oder Heizwärme auf einem für den Anwender nutzbaren Temperaturniveau bereitgestellt werden (Kraft-Wärme-Kopplung). Dampfturbinen-Kraftwerke werden in der KWK im Leistungsbereich von 0,5 bis $1600 \text{ MW}_{\text{el}}$ eingesetzt. Moderne Dampfkraftwerke können derzeit elektrische Wirkungsgrade von bis zu 45 Prozent erreichen.

Bei diesem Wasser-Wasserdampf-Kreisprozess wird Wasser im Kessel verdampft und anschließend im Überhitzer auf die gewünschte Temperatur gebracht. Dieser Frischdampf strömt durch die Turbine, die einen Generator antreibt. Der aus der Turbine austretende Dampf kondensiert im Kondensator und wird mithilfe der Speisewasserpumpe auf den Prozessdruck gebracht und dem Kes-

sel zugeführt. Zur Dampferzeugung können prinzipiell alle gasförmigen, flüssigen und festen Brennstoffe oder heiße Abgase dienen.

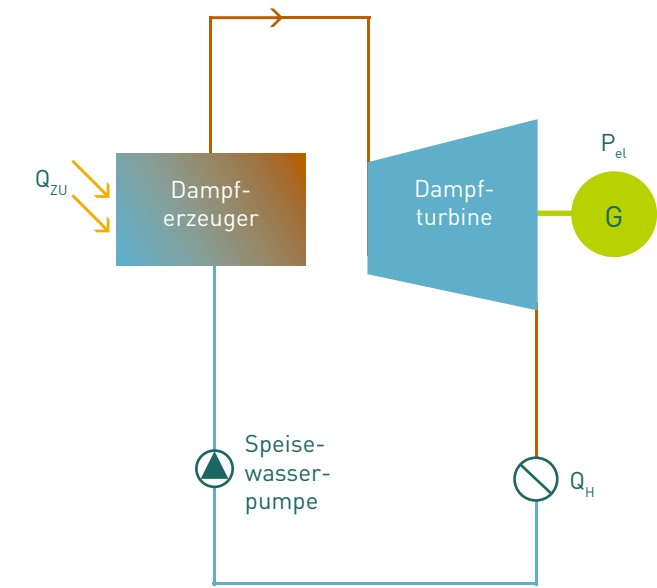
Abb. 10: Ansicht und Aufbau der Dampfturbine



Man unterscheidet im Wesentlichen zwei Prozesstypen, den Dampfprozess mit Kondensationsturbine und den Dampfprozess mit Gegendruckturbine. Bei Einsatz einer Kondensationsturbinenanlage wird der Dampf bis auf einen niedrigen Druck (nahe dem Umgebungsdruck) entspannt. Somit liegt die Kondensationstemperatur nahe der Umgebungstemperatur. Auf diese Weise wird das Druckgefälle vollständig zur Erzeugung von elektrischer Energie genutzt. Im Kondensator wird als Kühlmedium meistens Umgebungsluft oder Flusswasser verwendet und die frei werdende Kondensationswärme zumeist ungenutzt an die Umgebung abgegeben. In Gegendruckturbinen wird der Dampf bis zu einem im Vergleich zu Kondensationsanlagen erhöhten Druck- und Temperaturniveau

oberhalb von Umgebungsdruck und Umgebungstemperatur entspannt. Der Turbinenausstrittsdampf ist technisch weiterverwendbar und kann für technische Prozesse oder thermisch über einen Heizwärmekondensator genutzt werden.

Abb. 11: Funktionsweise des Dampfturbinenprozesses



P_{el}	elektrische Leistung	— Speisewasser
Q_H	Wärmeverbraucher	— Dampf
Q_{ZU}	Zugeführte Wärme	— Welle
G	Generator	

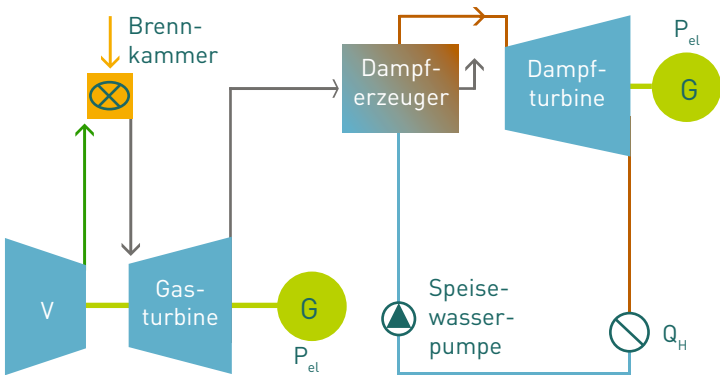
Neben diesen zwei Prozesstypen gibt es weitere Varianten von Dampfturbinenanlagen, die eine Anpassung der Dampfparameter an die z. T. wechselnden Bedürfnisse der Verbraucher ermöglichen sollen und eine Kombination von Kondensations- und Gegendruckanlage darstellen [2, 6, 7].

Derartige Schaltungsvarianten sind:

- Entnahme-Gegendruckturbinenanlage,
- Entnahme-Kondensationsturbinenanlage,
- Anzapf-Kondensationsturbinenanlage und
- Gegendruckturbinenanlage mit Drossel- und Kondensationsmöglichkeit.

Gekoppelte Prozesse

Abb. 12: Funktionsweise des Gas- und Dampfprozesses



P_e	elektrische Leistung	— Speisewasser
Q_H	Wärmeverbraucher	— Dampf/Heißwasser
G	Generator	— Welle
V	Verdichter	— Brennstoff
		— Rauchgase
		— Luft

Eine effiziente Nutzung der Brennstoffenergie lässt sich vor allem durch die Kombination von Gas- und Dampfturbinenprozess (GuD-Prozess) realisieren. Bei diesen Kombiprozessen wird mit der Wärmeenergie des heißen Abgases der Gasturbinenanlage Hochdruckdampf erzeugt, der in einer Dampfturbine entspannt wird.

Typische GuD-Anlagen kombinieren Gasturbinenanlagen mit Abhitzekesseln und Gegendruck- oder Entnahmekondensations-Dampfturbinen. Der GuD-Prozess ist sehr variabel und kann auf vielfältige Art und Weise an den Bedarf angepasst werden. Dies kann beispielsweise durch Variation des Verhältnisses von Gas-

turbinenleistung zu Dampfturbinenleistung erfolgen. Soll der Dampfzustand vor der Dampfturbine verbessert werden, besteht außerdem die Möglichkeit des Einsatzes einer Zusatzfeuerung.

Insgesamt erlauben die GuD-Prozesse eine erheblich bessere Energieausnutzung, da das Temperaturgefälle zwischen der hohen Eintrittstemperatur der Gasturbine und der niedrigen Abwärmtemperatur der Dampfturbine genutzt werden kann. Dadurch ist ein elektrischer Gesamtwirkungsgrad von über 60 Prozent erreichbar. In der Praxis kommen GuD-Anlagen mit Leistungen zwischen 80 und 830 MW_{el} pro Einheit (Gas- und Dampfturbine) zum Einsatz [2, 6].

Abb. 13: Dampfturbine im GuD-Kraftwerk



→ Wirtschaftlichkeit

KWK-Anlagen weisen einen höheren spezifischen Investitionsaufwand als Kraftwerke auf. Durch den geringeren Bedarf an Primärenergie wird die Wirtschaftlichkeit der KWK dann erreicht, wenn die Energiekosteneinsparung den Mehraufwand an Kosten in einem möglichst kurzen Zeitraum ausgleicht. Die Energiekosteneinsparung wird in entscheidender Weise von den Brennstoff- und Elektroenergiepreisen und von der zu erwartenden Energiepreisentwicklung bestimmt. Für den wirtschaftlichen Betrieb von KWK-Anlagen sind neben den Erzeugungskosten insbesondere die Konditionen für Bezug und Einspeisung von Elektroenergie und die Charakteristik des Wärme- und Elektroenergiebedarfs entscheidend.

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit von Anlagen gibt es verschiedene Verfahren. Dazu müssen die unterschiedlichen Randbedingungen beachtet werden. So ist es entscheidend, ob ein privater Nutzer in eine Anlage investiert oder ein Unternehmen. Bei Unternehmen kommen z. B. steuerliche Aspekte zum Tragen, die bei einem privaten Nutzer nicht auftreten. Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit gibt es Richtlinien, die angewandt werden können. Die VDI-Richtlinie 2067 gibt z. B. ein Berechnungsverfahren (Annuitätenmethode) für die Wirtschaftlichkeit vor. Auch werden Vorgaben für die anzusetzenden Wartungskosten oder die Berechnung des Wärmebedarfs und des Energieaufwands für verschiedene Einsatzfälle angegeben. Die VDI-Richtlinie 6025 gibt weitere Berechnungsverfahren für die Wirtschaftlichkeit an, die unterschiedlichen Bedürfnissen gerecht werden. Zu empfehlen sind jedoch nur Berechnungsverfahren, die alle Kosten, insbesondere die Kapitalkosten, einbeziehen. Die VDI-Richtlinie 2067 berücksichtigt z. B. die unten aufgeführten Kosten und ist daher für die Berechnung für Unternehmen und private Investoren geeignet. Die Erlöse und Kosten einer KWK-Anlage setzen sich wie folgt zusammen:

Kosten

- Kapitalgebundene Kosten (Kosten für Abschreibung der Investitionskosten mit entsprechender Dauer und Zinssatz)
- Verbrauchsgebundene Kosten (Kosten für Brennstoffe und Hilfsenergie)

- Betriebsgebundene Kosten (Instandhaltungs-, Wartungs- und Personalkosten)

Erlöse

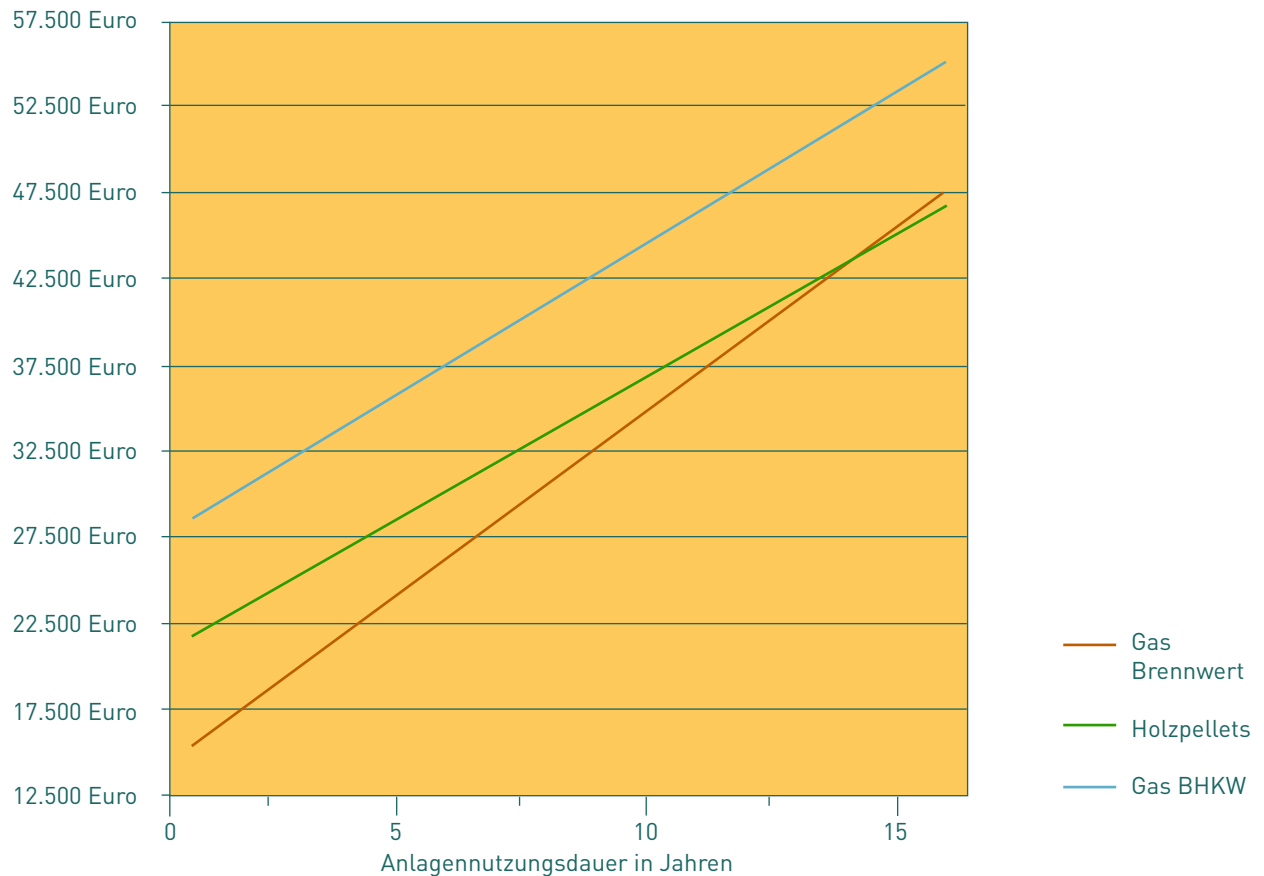
- Stromtarif und Leistungspreis (Kosten der Leistungsbereitstellung)
- Vergütung für die in das öffentliche Netz eingespeiste Elektroenergie
- Erlöse aus der Wärmeversorgung über das Fernwärmenetz
- Steuererstattungen (Mineralölsteuer, Ökosteuer, Wegfall Stromsteuer)
- Vermiedene Stromausfallkosten durch Notstrombetrieb

Investition und Betriebskosten während der Anlagennutzungszeit sind die entscheidenden Faktoren bei einer vergleichenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Heizungsanlagen. Im Kapitel best practice“ kann am Beispiel eines Mehrfamilienhauses gezeigt werden, dass der wirtschaftliche Betrieb möglich ist. Für einen wirtschaftlichen Betrieb in Ein- und kleinen Mehrfamilienhäusern (4 WE) müssen die Investitionskosten noch deutlich sinken. Im folgenden Vergleich wurde ein Neubau mit 140 m² Nutzfläche, einem Heizwärmebedarf von 20.000 kWh/Jahr, einem Warmwasserenergieverbrauch von ca. 3.000 kWh/Jahr und einem Stromverbrauch von 5.000 kWh/Jahr angenommen. Dabei wurden die durchschnittlichen Kosten für die Investition in Euro pro installiertem kW und die Betriebs- und Verbrauchskosten in Euro pro kWh Wärme- und Stromverbrauch sowie Stromerlöse für BHKW Erdas- und Pelletsheizungsanlagen ermittelt (Stand 4. Quartal 2008). Außerdem fanden die Energiepreise der regionalen Versorger und der KWK-Stromeinspeisepreis Berücksichtigung (Abbildung 14). Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass sich die höheren Investitionskosten von Mikro-KWK-Anlagen im Verlauf der Anlagennutzung nicht amortisieren. Bei einer Nutzungszeit im Einfamilienhaus

von 15 Jahren ist nicht mit einer Kostenersparnis zu rechnen. Diese hier berechneten Werte können aufgrund unterschiedlicher Einflussfaktoren wie Anlagenart, Wirkungsgrad, Wärmebedarf, Warmwasserverbrauch und Betriebsweise differieren und sind nur als Orientierung zu verstehen. Auf jeden Fall muss mit der Planung einer KWK-Anlage eine Wirtschaftlichkeitsberechnung anhand der tatsächlichen Rahmenbedingungen und möglichen Anlagenkon-

figuration erfolgen. Die Energiepreise unterliegen je nach Energieträger in letzter Zeit stärkeren Schwankungen, sodass es sinnvoll ist, mit mehreren Szenarien zu rechnen. Eine gute Grundlage für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit einer Investition stellt die VDI-Richtlinie 2067 dar. Wichtig ist, dass die Kapitalkosten der Investition berücksichtigt werden.

Abb. 14: Gesamtkosten einer Mikro-KWK-Anlage 5 kW_{el} im Vergleich zu anderen Heizanlagen im Einfamilienhaus



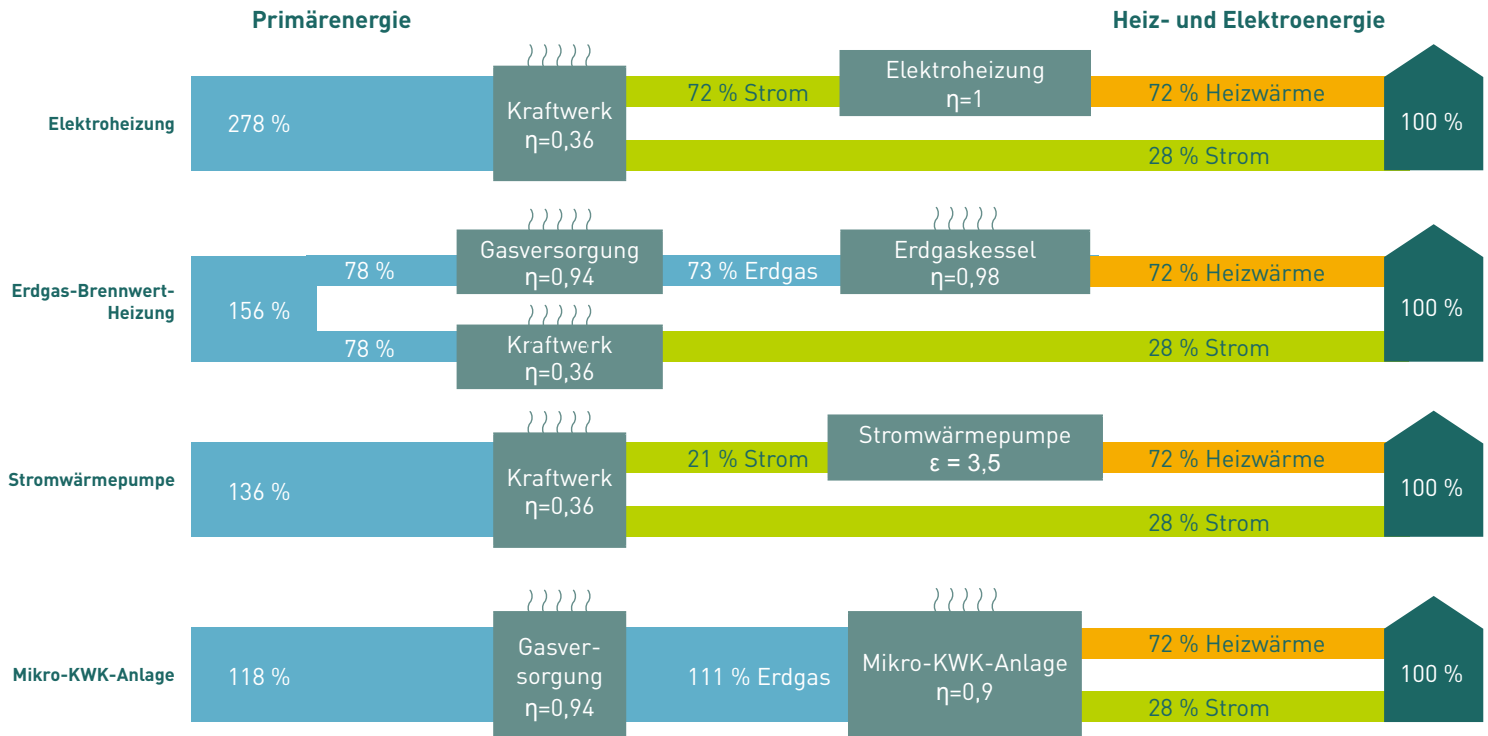
→ Klimaschutz

KWK-Anlagen können in mehrfacher Hinsicht zum Klimaschutz beitragen. Einerseits wird mit der gekoppelten Erzeugung von Elektroenergie und Wärme weniger Primärenergie benötigt. Das führt zu einer Verminderung der Schadstoffemissionen gegenüber der getrennten Erzeugung in Kraftwerken und Kesselanlagen. Andererseits werden in KWK-Anlagen überwiegend emissionsarme Brennstoffe, wie z. B. Erdgas, verwendet. So tritt zusätzlich eine Reduzierung der Umweltbelastung ein. Weitere Vorteile des Einsatzes von Erdgas sind die guten verbrennungstechnischen Eigenschaften (sehr hohe Wirkungsgrade) und die Möglichkeit der direkten Nutzung als Primärenergieträger.

Im Vergleich zu anderen fossilen Energieträgern bietet Erdgas die günstigsten Voraussetzungen für eine emissionsarme Verbrennung. Insbesondere der geringere Kohlenstoffgehalt verursacht weniger CO₂-Emissionen.

Die einzigen nennenswerten Schadstoffe, die bei der Verbrennung von Erdgas auftreten können, sind Stickstoffoxide (NO_x). Die schädlichen Stickstoffoxide werden bei höheren Verbrennungstemperaturen gebildet. Bei KWK-Anlagen können die NO_x-Emissionen durch motorische Maßnahmen und nachgeschaltete Katalysatoren erheblich vermindert werden. Damit werden die gesetzlichen Emissionsgrenzwerte eingehalten [2, 11].

Abb. 15: Primärenergieeinsatz zur Erzeugung von Heiz- und Elektroenergie mit verschiedenen Heizsystemen



Für KWK-Anlagen sind Einsatzfelder prädestiniert, in denen ein ganzjähriger, gleichzeitiger Bedarf von Elektroenergie und Wärme besteht. Im Vergleich zu reinen Heizungsanlagen (1800 h pro Jahr) sollte die jährliche Betriebsdauer von KWK-Anlagen das Drei- bis Vierfache betragen, damit ein effizienter und wirtschaftlicher Betrieb gewährleistet werden kann. Da KWK-Anlagen überwiegend wärmegeführt (nach dem Wärmebedarf geregelt) betrieben werden, ist eine sorgfältige Planung und Auslegung der Anlagentechnik zwingend notwendig. Einflussfaktoren wie tages- und jahreszeitliche Lastgänge sind dabei zu berücksichtigen. Mögliche Einsatzgebiete von KWK-Anlagen sind in Abbildung 16 dargestellt. Diese konzentrieren sich auf folgende drei Bereiche:

- Wohnungswirtschaft
- öffentliche Einrichtungen
- Industrie und Gewerbe

Abb. 16: Einsatzfelder von KWK-Anlagen

Wohnungs- wirtschaft	öffentliche Einrichtungen	Industrie und Gewerbe
• Nahwärmenetze in Wohnsiedlungen • Mehrfamilienhäuser • größere Ein- und Zweifamilienhäuser	• Schwimmbäder, Sportstätten • Krankenhäuser, Altenheime • Bildungseinrichtungen • Verwaltungsgebäude	• Supermärkte, Bäckereien, Metzgereien • Kaufhäuser • Hotels und Gaststätten • Brauereien, Molkereien

Bei größeren Einrichtungen sind oftmals Kombinationen der KWK-Anlagen mit Wärmerückgewinnungsanlagen, Wärmepumpen und Kälteanlagen sinnvoll, um den Primärenergieeinsatz zu verringern. Neben den bereits auf dem Markt verfügbaren Mikro- und Mini-KWK-Anlagen mit elektrischen Leistungen von > 5 kW_{el} werden seit einigen Jahren verstärkt Geräte im Leistungsbereich von 1 bis 3 kW_{el} entwickelt. Sie sind für Ein- bis Dreifamilienhäuser konzipiert.

Diese Mikro-KWK-Anlagen (Beispiele s. Abb. 17, 18) werden auch als Strom erzeugende Heizungen (SeH) bezeichnet und stellen ein neues zukunftsträchtiges Einsatzfeld von KWK-Anlagen dar. Neben herkömmlichen Antriebstechnologien (z. B. Gasmotoren) werden auch in dieser Gerätekategorie verstärkt innovative Technologien (z. B. Brennstoffzellen, Stirlingmotoren oder Dampfexpansionsmaschinen) verwendet. Der Einsatz dieser Geräte verfolgt dabei das Ziel, den Grundbedarf an elektrischer Energie im Objekt zu decken und nur den Spitzenbedarf aus dem öffentlichen Energieversorgungsnetz zu beziehen. Überschüssig erzeugte Elektroenergie aus der KWK kann ebenfalls an das öffentliche Energieversorgungsnetz abgegeben werden.

Abb. 17: Mikro-KWK-Anlagen



v.l. ecopower - PowerPlus Technologies GmbH (Otto-Motor); WhisperGen - WhisperTech Limited (Stirling-Motor); lion®-Powerblock OTAG Vertriebs GmbH & Co. KG (Freikolben-Dampfmaschine)

Abb. 18: Mikro-KWK-Anlagen



v.l. inhouse5000 - Riesaer Brennstoffzellentechnik GmbH (Brennstoffzelle); Dachs HKA - Senertec GmbH (Otto-Motor); Ecowill - Honda Motor Co. Ltd. (Otto-Motor)

→ Staatliche Fördermaßnahmen

KWK-Anlagen können einen hohen Beitrag zur Energieeinsparung und CO₂-Minderung leisten. In dieser Hinsicht hat sich Deutschland die Erhöhung des Anteils von elektrischer Energie aus KWK-Anlagen mit dem Integrierten Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung vom 5. Dezember 2007 als politisches Ziel gesetzt. Demnach soll der Anteil von Elektroenergie aus KWK an der jährlichen Gesamtstromerzeugung in Deutschland bis zum Jahr 2020 auf etwa 25 Prozent erhöht werden. Auch in der Europäischen Gemeinschaft wird die stetige Steigerung des Anteils effizienter KWK-Anlagen als Aufgabe hoher Priorität gesehen. Staatliche Fördermaßnahmen beinhalten beispielsweise Steuererleichterungen, Investitionszulagen und garantierte Abnahmepreise für besonders wirtschaftlich erzeugten Strom.

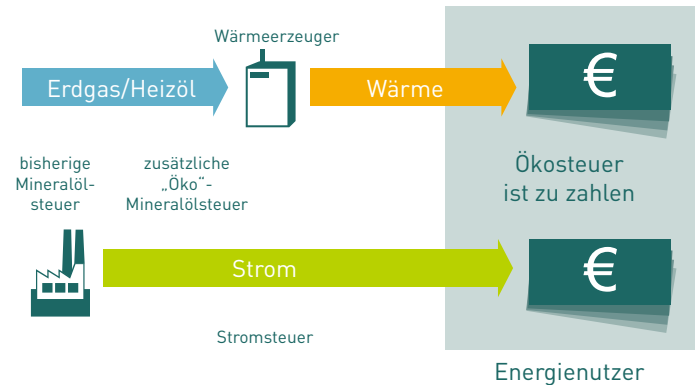
Um die Wirtschaftlichkeit der KWK zu verbessern, wurde bereits im April 2002 das KWK-Gesetz verabschiedet. Es fördert den KWK-Strom, der in das allgemeine Versorgungsnetz eingespeist wird. Ziel des Gesetzes sind der Schutz und die Modernisierung bestehender KWK-Anlagen, der Ausbau der Elektroenergieerzeugung in kleinen KWK-Anlagen sowie die Unterstützung der Markteinführung von Brennstoffzellen-Anlagen.

Das am 1. Januar 2009 in Kraft getretene neue KWK-Gesetz bringt für die Betreiber von KWK-Anlagen einige Veränderungen. Die aus wirtschaftlicher Sicht wichtigste Änderung besteht darin, dass der Anlagenbetreiber auch auf selbst genutzten Strom künftig den KWK-Zuschlag in Höhe von 1,5 bis 5,11 Ct/kWh, je nach elektrischer Anlagenleistung, vergütet bekommt. Bei einer elektrischen Leistung bis 50 kW werden 5,11 Cent/kWh vom Netzbetreiber gezahlt. Für Anlagen mit 50 kW bis 2 MW sind es für maximal 30.000 Volllaststunden 2,11 Cent/kWh und bei Anlagen mit mehr als 2 MW 1,5 Cent/kWh. Alle Anlagen (bis 50 kW), die bis zum 31. Dezember 2016 in Betrieb genommen wurden oder werden, erhalten den KWK-Zuschlag für die Dauer von 10 Jahren ab Inbetriebnahme [13].

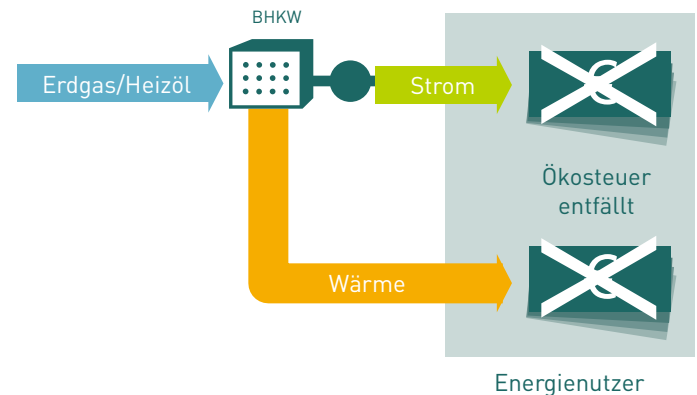
Neben dem KWK-Gesetz gibt es als zusätzliches Förderinstrument der KWK seit 1999 die „Ökologische Steuerreform“ (aktualisiert

Abb. 19: Steuerersparnis durch KWK

Ökosteuer verteuert Energie bei der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme



Steuerersparnis durch Kraft-Wärme-Kopplung



Bei KWK $\leq 2.000 \text{ kW}_{\text{el}}$
Jahres- bzw. Monatsnutzungsgrad $\geq 70 \%$

2003). Sie soll in mehreren Stufen über eine Stromsteuer und eine erhöhte Mineralölsteuer Anreize zur Verbreitung dezentraler Energieversorgungsstrukturen und sparsamer Technologien liefern. Das Gesetz verteuert dabei einerseits die Verwendung von Energie, bietet andererseits aber steuerliche Vorteile für KWK-Anlagen (Abb. 19).

Ein weiteres Förderinstrument wurde mit dem Inkrafttreten des Gesetzes für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG) im Jahr 2000 geschaffen. Es soll den Ausbau von Energieversorgungsanlagen, die mit erneuerbaren Energieträgern betrieben werden, beschleunigen. Mit diesem Gesetz (Neufassungen in den Jahren 2004 und 2009) wird den Betreibern der zu fördernden Anlagen über einen bestimmten Zeitraum ein fester Vergütungssatz für den erzeugten Strom gewährt. Dieser orientiert sich an den Kosten der jeweiligen Erzeugungsart, um so einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlagen zu ermöglichen.

Darüber hinaus gibt es weitere Richtlinien und Programme, die Investitionen in KWK-Anlagen unterstützen sollen. Beispielsweise fördert die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) Investitionen in Anlagen und Maßnahmen, die Energie sparen und den Kohlendioxidausstoß reduzieren. Die KfW bietet den Investoren langfristige zinsgünstige Darlehen mit Festzinssätzen und tilgungsfreien Anlaufjahren.

Gemäß den Richtlinien zur Förderung von Mini-KWK-Anlagen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) vom 18. Juni 2008 wird derzeit die Neuerrichtung von Mini-KWK-Anlagen, inklusive der notwendigen Anlagenperipherie im Leistungsbereich bis 50 kWel, zusätzlich gefördert. Das betrifft eine Basisförderung bei Einhaltung bestimmter Voraussetzungen und zusätzlich die Gewährung eines Umweltbonus für Anlagen mit besonders niedrigen Schadstoffemissionen [2, 12].

Die Richtlinie „Klimaschutz und Energieeffizienz“ des Freistaates Sachsen unterstützt ebenfalls den Einsatz von KWK-Anlagen mit Investitionszuschüssen.

Die Finanzierung von KWK-Neuanlagen über sogenannte Contracting-Modelle ist eine weitere Möglichkeit. Dabei bietet sich die Zusammenarbeit mit Netzbetreiber- bzw. Energieversorgungsunternehmen als Contracting-Partner an. Sie übernehmen sowohl die komplette Finanzierung als auch den Anlagenbetrieb. Durch die Nutzung von Synergieeffekten aus Planung, Bau und Betrieb der Anlagen in Verbindung mit entsprechenden Energiebezugspreisen können Contractoren in der Regel günstige Konditionen anbieten.

Vorteilhaft für Unternehmen ist:

- durch moderne und effiziente Anlagen eine hohe Versorgungssicherheit zu erlangen, ohne hohe Investitionskosten tragen zu müssen,
- ökologisch wertvolle, durch Kraft-Wärme-Kopplung erzeugte Energie zu Marktpreisen zu beziehen,
- Kosten für notwendige Ersatz- oder Neuinvestitionen zu vermeiden,
- Fixkosten durch Übernahme von Personal einzusparen, um sich hierdurch ausschließlich auf ihr Hauptgeschäft konzentrieren zu können.

→ KWK von morgen - innovative Zukunftstechnologien

Neben den konventionellen Technologien der Kraft-Wärme-Koppelung wurden in den letzten Jahren innovative Anlagen entwickelt, die sich teilweise schon auf dem Wege der Markteinführung befinden. Hierbei handelt es sich um:

- Stirlingmotoren
- Dampfexpansionsmaschinen
- Brennstoffzellen

Diese Anlagen arbeiten vorwiegend im unteren Leistungsbereich ($< 250 \text{ kW}_{\text{el}}$) und sind für den häuslichen und gewerblichen Einsatz konzipiert.

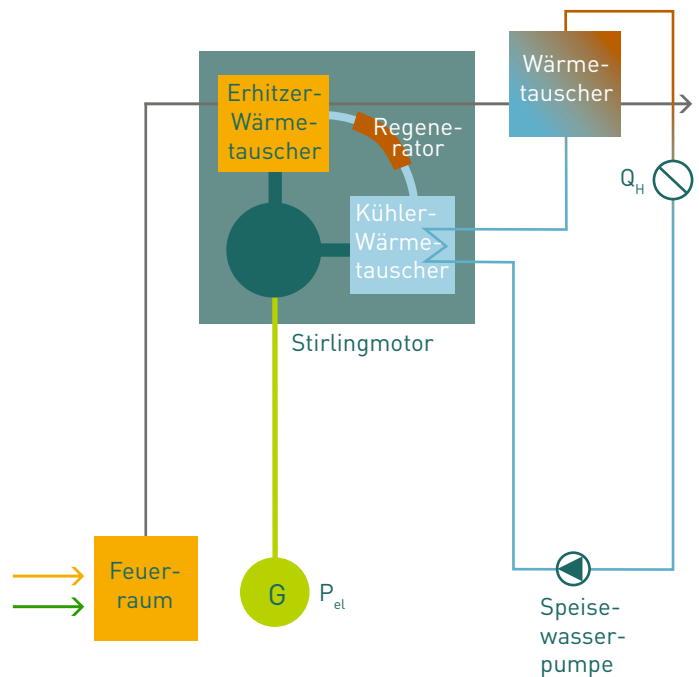
Stirlingmotoren

Stirlingmotoren sind Wärmekraftmaschinen, die Wärme hoher Temperatur in mechanische Energie und in Wärme niedriger Temperatur umwandeln.

Der Stirlingmotor nutzt wie alle anderen Wärmekraftmaschinen den Effekt der Druck- bzw. Volumenvergrößerung von Gasen bei Temperaturerhöhung. Die Besonderheit besteht darin, dass die Wärme von außen, z. B. durch eine externe Verbrennung, auf ein im Motor eingeschlossenes Arbeitsgas übertragen wird. Das ermöglicht den Einsatz nahezu beliebiger Energieträger. Zum Antrieb sind daher alle gasförmigen, flüssigen und festen Brennstoffe sowie Wärmestrahlung (z. B. Sonnenenergie) geeignet, solange deren Temperatur ausreichend hoch ist. Die Wärmeübertragung erfolgt durch meist metallische Wände, wobei am Erhitzer Wärme hoher Temperatur in den Motor gebracht wird und am Kühler Abwärme bei niedrigerer Temperatur abgegeben wird. Die Volumenvergrößerung wirkt als Kraft auf einen Kolben, der über einen Pleuel die Kurbelwelle antreibt. Das Arbeitsgas wird bei jeder Umdrehung der Maschine erwärmt und abgekühlt, d. h. es wird

zwischen zwei Zylindern hin- und hergeschoben. Es durchströmt dabei zwei Wärmeübertrager, die es erhitzen oder abkühlen. Folglich strömt es in den einen Zylinder erwärmt ein und drückt den Kolben nach unten. In den anderen Zylinder strömt es abgekühlt und saugt dessen Kolben an.

Abb. 20: Funktionsweise des Stirlingmotors



P_{el} elektrische Leistung
 Q_{H} Wärmeverbraucher
 G Generator

Speisewasser
Dampf
Welle
Brennstoff
Rauchgase
Luft

Da bei Stirlingmotoren keine Fremdstoffe in den Motor gelangen können und die Motorteile wenig belastet werden, besitzen diese längere Wartungsintervalle und eine höhere Lebensdauer als übliche Verbrennungsmotoren. Stirlingmotoren können auch als kleine Motoren und im Teillastbereich hohe Wirkungsgrade erreichen. Die derzeit entwickelten Anlagen besitzen elektrische Leistungen zwischen 1 und 50 kW [4, 6, 7].

Dampfexpansionsmaschinen

Dampfkolbenmotoren

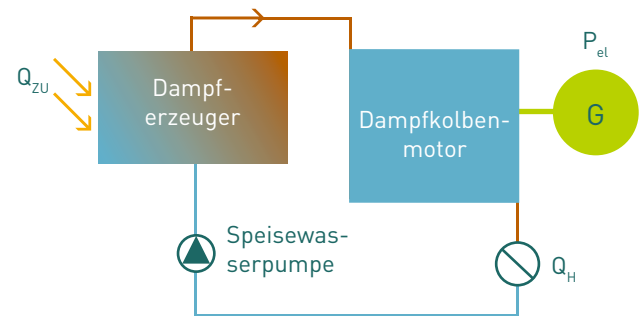
Dampfkolbenmotoren sind prinzipiell schnelllaufende Kolbendampfmaschinen, deren Zylinder und Steuerungsorgane blockweise zusammengefasst sind. Dampfkolbenmotoren können aus einem bis sechs Arbeitszylindern bestehen. Zu jedem Zylinder gehört ein Regelkolben, der die benötigte Dampfmenge über den Hub dieses Kolbens regelt. Somit besitzt dieser Motor zwei Wellen, eine Arbeitswelle und eine Regelwelle. Dampfkolbenmotoren werden mit Sattdampf oder überhitztem Dampf mit Eintrittsdrücken von 6 bis 60 bar betrieben. Beim Betrieb mit überhitztem Dampf kann aufgrund des höheren Enthalpiegefälles beim gleichen Motor um bis zu 60 Prozent mehr elektrische Leistung erzeugt werden.

Der Dampfkolbenmotor arbeitet nach dem Prinzip des geschlossenen Kreisprozesses. In einem Abhitzeessel (eventuell mit Überhitzer) wird Dampf erzeugt. Dieser strömt anschließend in die Zylinder des Dampfkolbenmotors, wo er durch Entspannung mechanische Arbeit leistet, die im Generator in elektrische Energie umgewandelt wird. Der Abdampf gelangt in den Kondensator, wo die anfallende Kondensationswärme als Fern- oder Prozesswärme genutzt werden kann. Der Kreislauf wird wieder geschlossen, indem das Wasser mit einer Speisewasserpumpe auf Betriebsdruck gebracht und dem Kessel zugeführt wird.

Der elektrische Wirkungsgrad dieser Anlagen beträgt ca. 10 bis 20 Prozent und ist damit aufgrund hoher Verluste, insbesondere

durch den Abdampf, im Vergleich zu anderen Wärmekraftmaschinen gering. Ein weiterer Nachteil des Dampfkolbenmotors besteht in seinem hohen Wartungsaufwand.

Abb. 21: Funktionsweise einer KWK-Anlage mit Dampfkolbenmotor



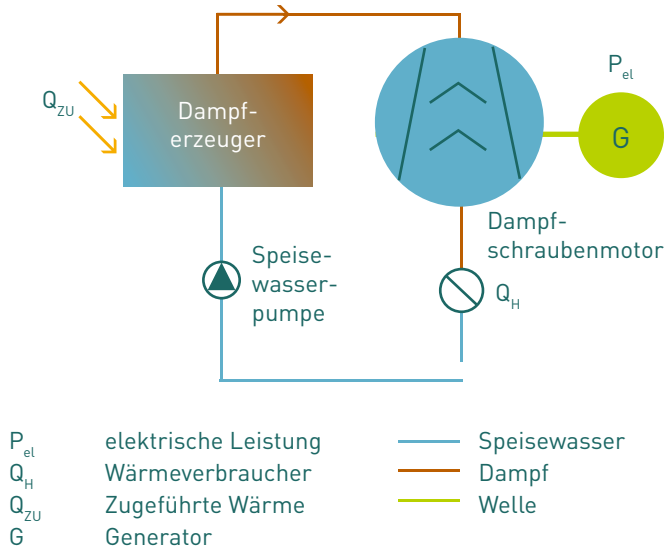
P_{el}	elektrische Leistung	— Speisewasser
Q_H	Wärmeverbraucher	— Dampf
Q_{ZU}	Zugeführte Wärme	— Welle
G	Generator	

Vorteile gegenüber anderen Wärmekraftanlagen sind vor allem das sehr gute Teillastverhalten und die hohe Verfügbarkeit. Grundsätzlich können unterschiedliche Wärmequellen und Brennstoffe eingesetzt werden. Dadurch sind z. B. neben der Abhitzenutzung aus Abgasen und Rauchgasen auch heizwertarme Brenngase und Festbrennstoffe (Deponiegas, Biogas, Biomasse, Müll,...) verwertbar. Das typische Einsatzgebiet dieser Motoren ist die dezentrale Energieversorgung mittels KWK im Leistungsbereich von 2 bis 2000 kW_{el} [6].

Dampfschraubenmotoren

Dampfschraubenmotoren gehören zur Gruppe der mehrwelligen Rotationsverdrängermaschinen und basieren auf handelsüblichen Schraubenkompressoren.

Abb. 22: Funktionsweise einer KWK-Anlage mit Dampfschraubenmotor



Sie bestehen aus zwei schrägverzahnten, rotierenden Wellen, die ineinander eingreifen und von einem Gehäuse eng umschlossen werden. Beim Einlassvorgang strömt der Dampf durch eine Gehäuseöffnung in den dahinterliegenden Zahnlückenraum der Rotoren ein. Bei weiterer Rotordrehung schließt sich der Einlassquerschnitt. Der Expansionsvorgang kann mit fortschreitender Rotordrehung aufgrund des wachsenden Volumens zwischen den Rotoren beginnen. Die Profillücken zwischen den Rotoren werden zur Auslassöffnung hin immer größer, wodurch der Dampf expandieren und die Rotoren antreiben kann. Die an den Rotoren erzeugte mechanische Arbeit wird im Generator in elektrische Energie umgewandelt. Im anschließenden Kondensator erfolgt die Übertragung der anfallenden Kondensationswärme an Fern- oder Prozesswärmeverbraucher. Die Speisewasserpumpe bringt das Wasser wieder auf Betriebsdruck und fördert es in den Kessel, womit der Kreislauf wieder geschlossen ist.

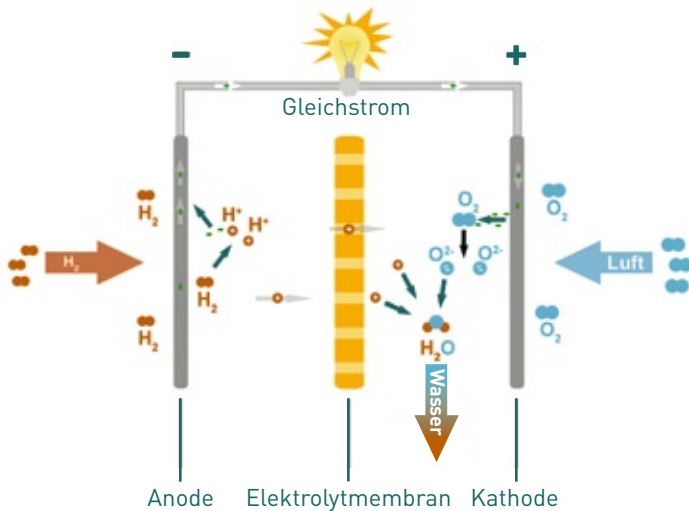
Das typische Einsatzgebiet dieser Motoren ist ebenfalls in der dezentralen Energieerzeugung mittels KWK zu sehen. Zur Dampferzeugung können, wie schon beim Dampfkolbenmotor dargestellt, unterschiedliche Wärmequellen und Brennstoffe eingesetzt werden. Im Gegensatz zu den Dampfkolbenmotoren stellen die Dampfschraubenmotoren nur geringe Anforderungen an die Dampfqualität, sodass eine Expansion bis weit in das Nassdampfgebiet möglich ist. Der Dampfschraubenmotor bietet aber auch die Möglichkeit zur Energiewandlung von Wärmepotentialen auf niedrigerem Temperaturniveau und kann auch als Energiewandler in Sattedampf- und Nassdampfprozessen in einem für Turbinen nicht zugänglichen Bereich eingesetzt werden. Vorteile gegenüber anderen Wärmekraftanlagen bestehen außerdem im sehr guten Teillastverhalten und im geringen Instandhaltungsaufwand. Nachteilig ist ähnlich wie beim Dampfkolbenmotor der niedrige elektrische Wirkungsgrad von 10 bis 20 Prozent. Im Gegensatz zum Dampfkolbenmotor, der schon die Marktreife erreicht hat, befindet sich der Dampfschraubenmotor noch im Entwicklungsstadium. Diese Anlagen eignen sich zur dezentralen Strom- und Wärmeversorgung kleinerer bis mittlerer Leistungen (20 bis 2000 kW_{el}) [6].

Brennstoffzellen

Brennstoffzellen können die im Brenngas enthaltene Energie durch ihr elektrochemisches Prinzip direkt und ohne Umweg in elektrische und thermische Energie wandeln und stellen damit eine äußerst effektive und umweltfreundliche Variante der Energieerzeugung dar. Die Arbeitsweise besteht darin, dass in der Brennstoffzelle Wasserstoff und Sauerstoff unter Abgabe von elektrischer und thermischer Energie zu Wasser reagieren. Prinzipiell sind alle Brennstoffzellen ähnlich aufgebaut. Sie besitzen zwei Elektroden (Anode und Kathode), zwischen denen sich ein Elektrolyt befindet, der den Austausch von Ionen ermöglicht, aber für Gase undurchlässig ist. Beide Elektroden sind über einen äußeren Stromkreis miteinander verbunden, sodass in einem angeschlossenen Verbraucher ein elektrischer Strom fließen kann. Die Art der ausgetauschten Ionen ist vom Elek-

trolyten abhängig. Es müssen sich daher entweder H^+ -Ionen von der Anode zur Kathode oder umgekehrt O_2^- -Ionen von der Kathode zur Anode bewegen können. Die Wahl des Elektrolyten (und damit die Auswahl des Zelltyps) ist darüber hinaus für die Betriebstemperatur, die einsetzbaren Brenngase und folglich für das Anwendungsgebiet entscheidend.

Abb. 23: Funktionsprinzip der Brennstoffzelle

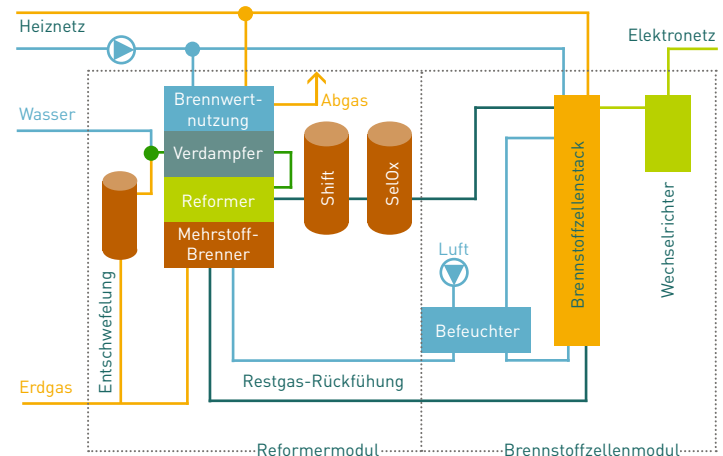


Die maximale elektrische Spannung (Leerlaufspannung) einer einzelnen Zelle beträgt beim offenen Stromkreis in Abhängigkeit von Gaszusammensetzung und Zelltemperatur ca. 0,9 bis 1,1 Volt. Wird elektrische Arbeit verrichtet, sinkt dieser Wert auf ca. 0,6 bis 0,8 V ab (aufgrund innerer elektrischer Widerstände der Zelle). Um technisch nutzbare Spannungen zu erhalten, müssen daher mehrere solcher Einzelzellen zu sogenannten Zellstapeln (engl. „Stacks“) in Reihe geschaltet werden. Die bei der elektrochemischen Reaktion anfallende Wärme muss durch Kühlung abgeführt werden.

Da Brennstoffzellen-Anlagen in der Lage sein müssen, in der Praxis übliche Brennstoffe, wie z. B. Erdgas, verwenden zu können, sind neben dem Zellstapel diverse periphere Komponenten notwendig.

Besondere Bedeutung hat die Gasaufbereitung, die aus der Brennstoffreformierung und Gasreinigung besteht. In Abbildung 24 ist der allgemeine Aufbau einer Brennstoffzellen-Anlage mit den wichtigsten Stoff- und Energieströmen dargestellt.

Abb. 24: Prinzipieller Aufbau einer Brennstoffzellen-Anlage



Eine Klassifizierung von Brennstoffzellen-Anlagen ist auf zwei Arten möglich. Einerseits können diese Anlagen nach der Höhe der Prozesstemperatur in Nieder- und Hochtemperatur-Brennstoffzellen, andererseits nach der Art des Elektrolyten unterteilt werden. Charakteristisch für Brennstoffzellen-Anlagen sind ihre hohe Stromkennzahl (Verhältnis von Strom zu Wärme), die hohen Wirkungsgrade auch im Teillastbereich und die äußerst geringen Emissionen im Vergleich zu herkömmlichen BHKW. Des Weiteren zeichnen sich Brennstoffzellen durch einen geringen Lärmpegel aus, der eine verbrauchernahe Installation dieser Anlagen erlaubt.

Die Zukunft der Brennstoffzellentechnik wird bestimmt sein von der technischen Weiterentwicklung und von wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. In der Phase der Markteinführung muss eine Kostenreduktion eintreten, sodass diese Technik ihren Platz auf dem Markt erobern kann [2, 4, 6, 7, 8].

→ Best practice - Beispiele der innovativen Spitzentechnologie

Ecopower

Leistungsdaten:

Elektrische Leistung	1,3 - 4,7 kW
Thermische Leistung	4,0 - 12,5 kW
Brennstoff	Erdgas
Funktionsprinzip	Otto-Motor

Einsatzbeispiel:

Mehrfamilienhaus in Eilenburg mit 16 Wohneinheiten

Das Objekt besitzt eine beheizte Fläche von 1.100 m². Neben der KWK-Anlage kommt ein Spitzenlastkessel mit einer thermischen Leistung von 47 kW zum Einsatz. Im Heizungssystem sind außerdem ein Pufferspeicher (1.000 Liter) und ein Warmwasserspeicher (600 Liter) integriert.

Stromerzeugung (netto) im Jahr 2008	18 MWh/a
Wärmeerzeugung im Jahr 2008	61 MWh/a
CO ₂ -Einsparung gegenüber der getrennten Strom- und Wärmeerzeugung (Kraftwerks-Mix / Brennwertkessel)	3,1 t/a (14,2 %)
Kosteneinsparung	620 €/a

Abb. 25: Mikro-KWK-Anlage Ecopower der Fa. PowerPlus Technologies GmbH



Sokratherm GG140

Leistungsdaten:

Elektrische Leistung	140 kW
Thermische Leistung	216 kW
Brennstoff	Erdgas
Funktionsprinzip	Otto-Motor

Einsatzbeispiel: Kreiskrankenhaus Stollberg

Neben dem BHKW werden zur Beheizung des Objektes (15.000 m² beheizte Fläche) zwei Heizkessel mit einer Gesamtleistung von 1.800 kW genutzt. Als Wärmespeicher kommen im Heizungssystem Pufferspeicher mit einem Gesamtvolumen von 10.000 Litern und zur Brauchwasserversorgung Warmwasserspeicher mit insgesamt 8.000 Litern Volumen zum Einsatz.

Stromerzeugung (netto)	870 MWh/a
Wärmeerzeugung	1.600 MWh/a
CO ₂ -Einsparung gegenüber der getrennten Strom- und Wärmeerzeugung (Kraftwerks-Mix / Brennwertkessel)	193 t/a (25,1 %)
Kosteneinsparung	49.000 €/a

Abb. 26: BHKW „SOKRATHERM GG 140“ der
Fa. SOKRATHERM GmbH & Co. KG



→ Begriffsklärungen

Primärenergie

Als Primärenergie wird Energie bezeichnet, die aus natürlich vorkommenden Energieformen oder Energiequellen zur Verfügung steht. Zu den Primärenergieträgern gehören die fossilen Brennstoffe wie Kohle, Erdöl, Erdgas und Uran sowie die erneuerbaren Energiequellen wie Wasserkraft, Sonnenenergie, Windkraft, Geothermie, Gezeitenenergie und Biomasse.

Sekundärenergie

Sekundärenergien sind Energiequellen, die bei Energiewandlungsprozessen aus Primärenergiequellen auftreten und nicht der Primärenergie zugeordnet werden können. Um eine Vielzahl von Primärenergieträgern für den Verbraucher nutzbar machen zu können, ist eine Umwandlung in Sekundärenergie notwendig. Sekundärenergie ist die nach der Umwandlung der Primärenergie verbleibende Energie. Sie wurde in leichter speicherbare, nutzbare bzw. transportierbare Energieformen umgewandelt. Sekundärenergieträger sind z. B. Elektroenergie, Warmwasser und Flüssiggas.

Endenergie

Als Endenergie wird die vom Verbraucher genutzte Energie bezeichnet. Sie stellt den Teil der Primärenergie dar, der nach Abzug von verlustbehafteten Transport- und Umwandlungsprozessen genutzt werden kann. Endenergieträger sind zum Beispiel Elektroenergie, Fernwärme, Gas, Heizöl, Benzin oder Kerosin.

Nutzenergie

Nutzenergie ist die Energieform, die der Verbraucher tatsächlich zur Befriedigung seiner Bedürfnisse benötigt. Sie wird beim Verbraucher durch die Umwandlung aus Endenergie gewonnen. Formen der Nutzenergie sind beispielsweise Wärme, Kälte, Licht, mechanische Arbeit, chemisch gebundene Energie oder Schallwellen.

Verteilung und Verbrauch der Energieträger

Die Verteilung der einzelnen Energieträger erfolgt auf unterschiedliche Art und Weise und ist vom Aggregatzustand der einzelnen Energieträger abhängig.

Während gasförmige und flüssige Energieträger (z. B. Erdgas, Erdöl) in Rohrleitungen (Pipelines) transportiert werden können, erfolgt der Transport von Elektroenergie zum Verbraucher mit Hilfe von Drähten (Leiterbahnen). Der vielseitigste Energieträger ist Elektroenergie, die sich mit äußerst geringen Verlusten in jede andere Nutzenergie direkt beim Verbraucher umwandeln lässt.

Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad beschreibt die Effizienz von Energiewandlungen und Energieübertragungen. Er ist durch das Verhältnis von abgegebener Leistung (Nutzen) zu zugeführter Leistung (Aufwand) definiert. Die Differenz von zugeführter und abgegebener Leistung nennt man Verluste. Bei Wärmeerzeugern unterscheidet man Normnutzungsgrad und Jahresnutzungsgrad.

Normnutzungsgrad

Der Normnutzungsgrad ist ein nach einheitlichen Prüfbedingungen (DIN 4702) ermittelter Wirkungsgrad eines Heizkessels, der die unterschiedlichen Nutzungsbedingungen innerhalb eines Jahres berücksichtigt (Winterbetrieb, sommerliche Warmwasserbereitung). Der Normnutzungsgrad ist bedeutsam für die vergleichende Bewertung von Heizkesseln bzw. Thermen.

Jahresnutzungsgrad

Der Jahresnutzungsgrad eines Heizkessels bzw. einer Heizanlage berücksichtigt die während eines Jahres auftretenden Verluste. Das kann z. B. der Abstrahlungsverlust, der Betriebsbereitschaftsverlust, der Verteilungsverlust und der Bereitschaftsverlust der Warmwasserbereitung sein.

Der Einsatz einer KWK-Anlage zur Versorgung eines Objektes mit Elektroenergie und Wärme ist nur sinnvoll, wenn verschiedene technische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen erfüllt werden. Deshalb ist bei der Planung und Auslegung einer KWK-Anlage eine genaue Aufnahme der Rahmendaten erforderlich.

Dabei müssen folgende Kriterien vorrangig beachtet werden:

- ☒ möglichst vollständige Nutzung der bei Betrieb der KWK-Anlage anfallenden Wärme (wärmegeführter Betrieb),
- ☒ Übereinstimmung bzw. Anpassung des Temperaturniveaus von Erzeuger (KWK-Anlage) und Verbraucher,
- ☒ Mindestvoraussetzungen für Installation (Aufstellort, Brennstoffversorgung, Anbindung Heizungsnetz) und Betrieb des Gerätes (Jahresenergiebedarf, typische Verläufe des Wärme-/Strombedarfs des Objektes) müssen erfüllt sein.

Liegen über diese Kriterien keine ausreichenden Angaben vor, müssen entsprechende Messungen durchgeführt und die nötigen Angaben ermittelt werden.

Eine Hilfestellung bei der Planung einer KWK-Anlage kann die BHKW-Checkliste der ASUE leisten. Mit Hilfe des Berechnungstools ist es möglich, auf Basis der wichtigsten Daten des Objektes eine erste grobe Abschätzung über Auslegung und Wirtschaftlichkeit zu erstellen [14].

Bei der Abarbeitung dieser BHKW-Checkliste sind folgende Daten des Objektes erforderlich:

- ☒ gegenwärtiger jährlicher Bedarf an Wärme und Strom (Leistung, Menge), ggf. auch zurückliegende Jahre (Jahresabrechnungen der Energieversorger) oder Wärmebedarfsberechnung für das Objekt

- ☒ derzeitige jährliche Energiekosten (Wärme, Strom) bzw. aktuelle Energiebezugspreise
- ☒ Art und Parameter der benötigten Wärmeträger (Vor- und Rücklauftemperaturen, bei Dampf auch Drücke)
- ☒ Energiebedarfsstruktur (Heizung, Warmwasser, ggf. Prozesswärme), Jahresganglinien bzw. Jahresdauerlinien

→ Literaturverzeichnis

- [1] Meseberger Beschlüsse der Bundesregierung, Umweltbundesamt, 23.08.2007
- [2] Wikipedia; www.wikipedia.de, September 2008
- [3] Attig, D.: Zukunftschancen der Kraft-Wärme-Kopplung in einem liberalisierten Energiemarkt. Vortrag Deutsche Physikalische Gesellschaft - Arbeitskreis Energie, Heidelberg, 1999
- [4] ASUE – Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.: Mikro-KWK. Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Hamburg, 2000
- [5] BHKW-Infozentrum: <http://www.bhkw-infozentrum.de>, September 2008
- [6] Technologie Portrait Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik, Technische Universität Graz, <http://www.energytech.at>, Wien, 1999 - 2008
- [7] BHKW-Info: www.bhkw-info.de, September 2008
- [8] Erler, F.; Kühne, W.; Krause, H.: „Leitlinien für den Einsatz von Brennstoffzellen-BHKW“, GASWÄRME International (54) Nr. 1/2005
- [9] ASUE – Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.: Die Strom erzeugende Heizung. Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Hamburg, 2007
- [10] Strom und Wärme: <http://www.bhkw-infos.de>, September 2008
- [11] ASUE – Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.: Die „Ökologische Steuerreform“. Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Hamburg, Stand 01.01.2003
- [12] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Richtlinien zur Förderung von Mini-KWK-Anlagen. Bundesanzeiger Nr. 96, 18.06.2008
- [13] Bundesgesetzblatt Jahrgang 2008 Teil I Nr. 49: Gesetz zur Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung, Fassung 2009. Bonn, 31.10.2008
- [14] ASUE – Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.: BHKW-Checkliste. Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Hamburg, Stand 30.06.2007
- [15] Förderverein Heiz-Kraft-Werk Beelitz-Heilstätten e.V.: <http://www.heilstaetten.beelitz-online.de/HEIZKRAFTWERK/Foerderung/forderverein.html>, Mai 2009

Herausgeber

Sächsische Energieagentur – SAENA GmbH

Pirnaische Straße 9 · 01069 Dresden

Telefon: 0351 4910-3152

E-Mail: info@saena.de · Internet: www.saena.de

Geschäftsführer:

Christian Micksch und Harald Herter

Redaktion

SAENA GmbH

Gestaltung/Layout

Heimrich & Hannot GmbH, Dresden

Druck

Druckerei Thieme, Meißen

Bildnachweis

Titelbild - BMU, ASUE

Abb. 1 - Wikipedia

Abb. 2, 3, 4, 7, 9, 11, 12, 14, 15, 16, 19 (Vorlage ASUE), 20,
21, 22, 23 (Vorlage Wikipedia), 24 (Vorlage Riesaer
Brennstoffzellentechnik GmbH) - SAENA GmbH

Abb. 5 - Eberhard Lanz, Bamberg

Abb. 6 - Viessmann Werke

Abb. 8, 10, 13 - Siemens Pressebild

Abb. 17, 25, 26 - ASUE

Abb. 18 - Riesaer Brennstoffzellentechnik GmbH, ASUE

→ Kontakt

Sächsische Energieagentur – SAENA GmbH

Pirnaische Straße 9 · 01069 Dresden

Telefon: 0351 4910-3152

E-Mail: info@saena.de · Internet: www.saena.de

Weitere Informationen unter:

www.bau-nachhaltig.de

www.keds-online.de

www.gewerbeenergiepass.de

www.stromspartakiade.de

www.sachsen.pendlernetz.de

www.energie-kino.de

<http://passivhaus.saena.de>

<http://smartmeter.saena.de>

