

VDI-Buch

Kraft-Wärme-Kopplung

Bearbeitet von
Gunter Schaumann, Karl W Schmitz

4., vollst. bearb. u. erw. Aufl. 2009. Buch. xvi, 456 S. Hardcover

ISBN 978 3 642 01424 6

Format (B x L): 15,5 x 23,5 cm

Gewicht: 958 g

[Weitere Fachgebiete > Technik > Energietechnik, Elektrotechnik > Thermische Energieerzeugung, Brennstoffenergietechnik](#)

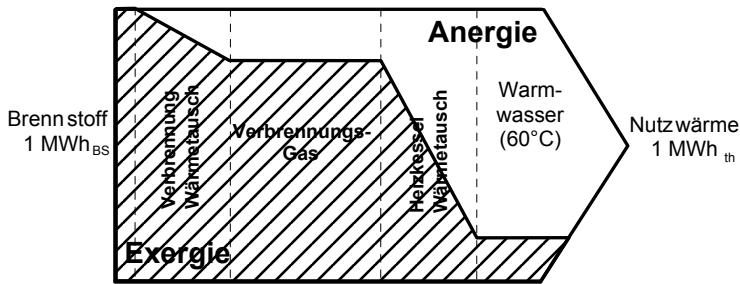
schnell und portofrei erhältlich bei


DIE FACHBUCHHANDLUNG

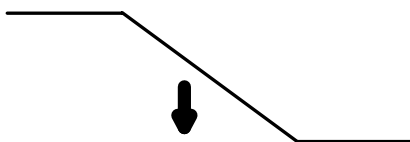
Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

2 Systemübersicht und Vorteile der KWK

Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen zeichnen sich durch eine besonders rationelle Energieumwandlung aus. Bei der Erzeugung von mechanischer Energie durch Verbrennen fossiler Brennstoffe entsteht ein großes Wärmepotential, welches z.B. bei der Stromerzeugung in konventionellen Großkraftwerken häufig ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird; in diesen Fällen ist dann zusätzlich Primärenergie zur Deckung des Wärmebedarfs erforderlich.



... bei großen Temperaturabsenkungen



"Kraft auskoppeln"

Abb. 2.0-1: Verbesserte Primärenergieausnutzung durch Auskoppeln von Kraft bei der Wärmeerzeugung

Der Hauptvorteil der KWK-Anlagen besteht in der systematischen Nutzung der im Brennstoff enthaltenen Exergie, also dem wertvollen Anteil der Energie. Das heißt einerseits, dass die Brennstoffenergie nicht einfach in niederwertige Wärme umgewandelt wird, sondern der Exergieabbau für Auskoppeln von Kraft/Strom genutzt wird (Abb. 2.0-1) und andererseits,

dass die bei der Stromerzeugung entstehende Umwandlungsabwärme auf einem genügend hohen Nutztemperaturniveau ausgekoppelt wird.

Bei optimaler Konzeption und optimalem Betrieb einer KWK-Anlage lässt sich bis zu einem Drittel der Primärenergie einsparen, die für die getrennte Erzeugung der elektrischen und der thermischen Nutzenergie aufzuwenden wäre. Bei der gekoppelten Erzeugung nach Abb. 2.0-2 werden statt $(60,5 + 75) \%$ nur noch 100% Brennstoff zur Deckung des Bedarfs von 54% Wärme und 27% Strom eingesetzt.

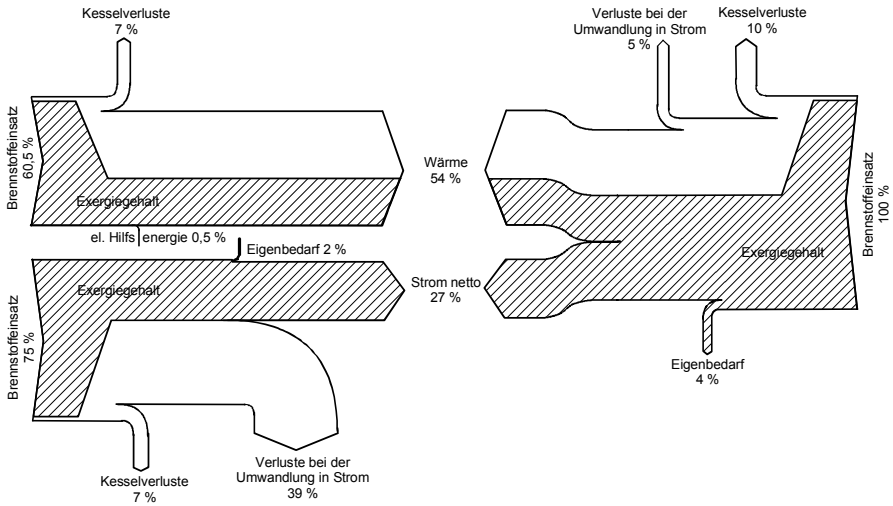


Abb. 2.0-2: Energie-/Exergiefluss für getrennte und gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung (Dampf mit $200 \text{ }^\circ\text{C}$)

Definition:

Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist die gleichzeitige Gewinnung von mechanischer und thermischer Nutzenergie aus anderen Energieformen mittels eines thermodynamischen Prozesses in einer technischen Anlage.

2.1 Anlagenübersicht

Eine gekoppelte Erzeugung von „Kraft und Wärme“ kann prinzipiell erfolgen durch:

- Auskopplung von Wärme bei der Stromerzeugung. Das ist eine strombedarfsorientierte KWK mit der prioritären Zielenergie Strom.
- Auskopplung von „Kraft“ (mechanische Energie, Strom) bei der Wärmeerzeugung. Das ist eine wärmebedarfsorientierte KWK mit der prioritären Zielenergie Wärme. Unter die Erzeugung mechanischer Energie fällt auch Druckluftherzeugung.

Die bei KWK-Anlagen abgegebene mechanische Arbeit wird in der Regel unmittelbar in elektrische Energie umgewandelt. Den KWK-Anlagen im Sinne dieser Definition sind folgende Energieerzeugungsanlagen zuzuordnen:

- Blockheizkraftwerke (BHKW) mit Dieselmotor,
- Blockheizkraftwerke (BHKW) mit Ottomotor,
- Heizkraftwerke basierend auf
 - Gasturbinenanlagen mit nachgeschalteten Abhitzeesseln oder auf
 - GuD-Anlagen,
- Heizkraftwerke mit Dampfkesseln und Dampfturbinen,
- Heizkraftwerke mit Dampfkesseln und Dampfmotoren.

Ferner zählen hierzu Absorptions-Kälteanlagen (wenn die Heizenergie aus der bei Kraft- oder Stromerzeugung anfallenden Abwärme gewonnen wird), Brennstoffzellen-Heizkraftwerke, Stirlingmotorheizkraftwerke, Brüdenverdichteranlagen,, ORC-Heizkraftwerke, Gasmotor-Wärmepumpen und andere ähnliche Anlagensysteme.

Abbildung 2.1-1 zeigt am Beispiel einer Otto-Motorenanlage die mögliche Primärenergieeinsparung in Abhängigkeit des KWK-Anteils an der gesamten thermischen Leistung einer Energieerzeugungsanlage zur Heizwärmeversorgung typischer Verwaltungsgebäude.

Der optimale Einsatz einer KWK-Anlage ist gegeben, wenn zeitgleich ein Bedarf an thermischer und elektrischer oder mechanischer Energie vorliegt.

Sowohl Wärme als auch elektrische Energie müssen von der Erzeugungsanlage zum Verbraucher transportiert werden. Während dies bei Strom selbst über große Entfernungen relativ kostengünstig möglich ist, sind für den Wärmetransport oft erhebliche Investitionen in Heizwassernetze zu tätigen.

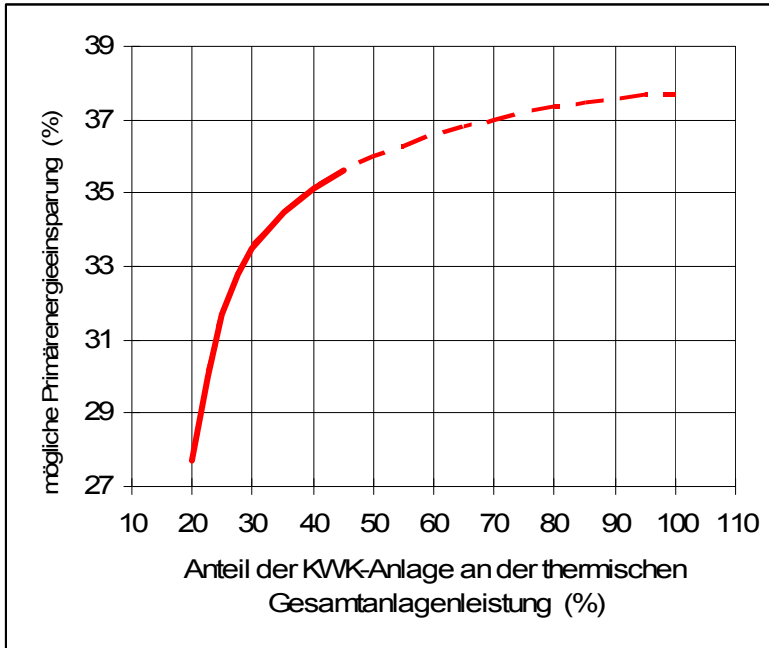


Abb. 2.1-1: Mögliche Primärenergieeinsparung bei der Wärmebereitstellung durch den Einsatz von KWK-Anlagen am Beispiel einer Verbrennungsmotor-BHKW-Anlage beim Einsatz zur Heizwärmeversorgung von typischen Verwaltungsgebäuden

Wirtschaftlich besonders interessant sind daher in der Regel kleinere, dezentral in Verbrauchernähe bzw. in Verbrauchschwerpunkten errichtete KWK-Anlagen. Die Einspeisung und Verteilung der elektrischen Energie erfolgt in diesen Fällen über die ohnehin erforderlichen und in der Regel vorhandenen Mittel- und Niederspannungsnetze, während die Wärmeenergie über Nahwärme- oder Fernwärmenetze verteilt wird. Bedarfsstrukturen dieser Art findet man bei:

- kommunalen Energieversorgungsunternehmen,
- Industriebetrieben,
- Hotelanlagen,
- Krankenhäusern,
- Universitäten,
- Wäschereien,
- Schwimmbädern,
- Kaufhäusern und Einkaufszentren,
- kommunalen Klärwerken,

- Reststoffdeponien
- u.a.m.

Die KWK-Anlagen stehen dort üblicherweise im Wettbewerb mit:

- konventionellen Dampf- oder Heißwasserkesselanlagen zur Wärmeerzeugung und
- zusätzlichem Strombezug aus dem örtlichen oder überregionalen Versorgungsnetz eines Energieversorgungsunternehmens (EVU).

Eigenstromerzeugungsanlagen mit fossilen Brennstoffen ohne Abwärmennutzung sind im hier behandelten Leistungsbereich selten anzutreffen und dienen dann meist nur der Notstromversorgung bei Netzausfall. Da bei mehr als 90% aller Anwendungen die in den KWK-Anlagen erzeugte mechanische Energie sofort in elektrische Energie umgewandelt wird, liegt auch der Schwerpunkt der nachfolgenden Ausführungen bei derartigen Systemen. Für die direkte mechanische Umsetzung der Energie (z.B. direkt von Verbrennungskraftmaschinen angetriebene Pumpen und Verdichter) gelten die Ausführungen sinngemäß.

In den vorgenannten Anwendungsgebieten werden im Regelfall Anlagen im Leistungsbereich bis zu einer elektrischen Gesamtleistung von ca. 25 MW bzw. einer thermischen Leistung von ca. 100 MW vorgefunden. Auf diesen Anwendungsbereich beziehen sich die nachfolgenden Ausführungen in erster Linie, gelten aber sinngemäß auch für leistungsstärkere Anlagen.

Im kleineren Leistungsbereich unter 1 MW_{el} dominieren die Motorheizkraftwerke. Die Leistungen beginnen bereits bei einer Abgabeleistung von 1 kW_{el}. Diese Kleinstanlagen werden für die Warmwasserversorgung und Raumheizung eingesetzt. Der von ihnen erzeugte Strom wird grundsätzlich in das Niederspannungsnetz eingespeist.

Die nachfolgenden Bilder 2.1-2 bis 2.1-5 zeigen eine Übersicht über die wesentlichen Unterschiede zwischen den reinen Wärme- oder Stromerzeugungssystemen und den darauf aufbauenden KWK-Anlagen.

Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen werden unterschieden in Anlagen mit einem und solche mit zwei Freiheitsgraden. Darunter ist zu verstehen, dass im ersten Fall Strom und Wärme immer in einem von der Anlage her festen Verhältnis erzeugt werden. Dagegen können Anlagen mit zwei Freiheitsgraden mit unterschiedlichen Strom-/Wärmeverhältnissen betrieben werden.

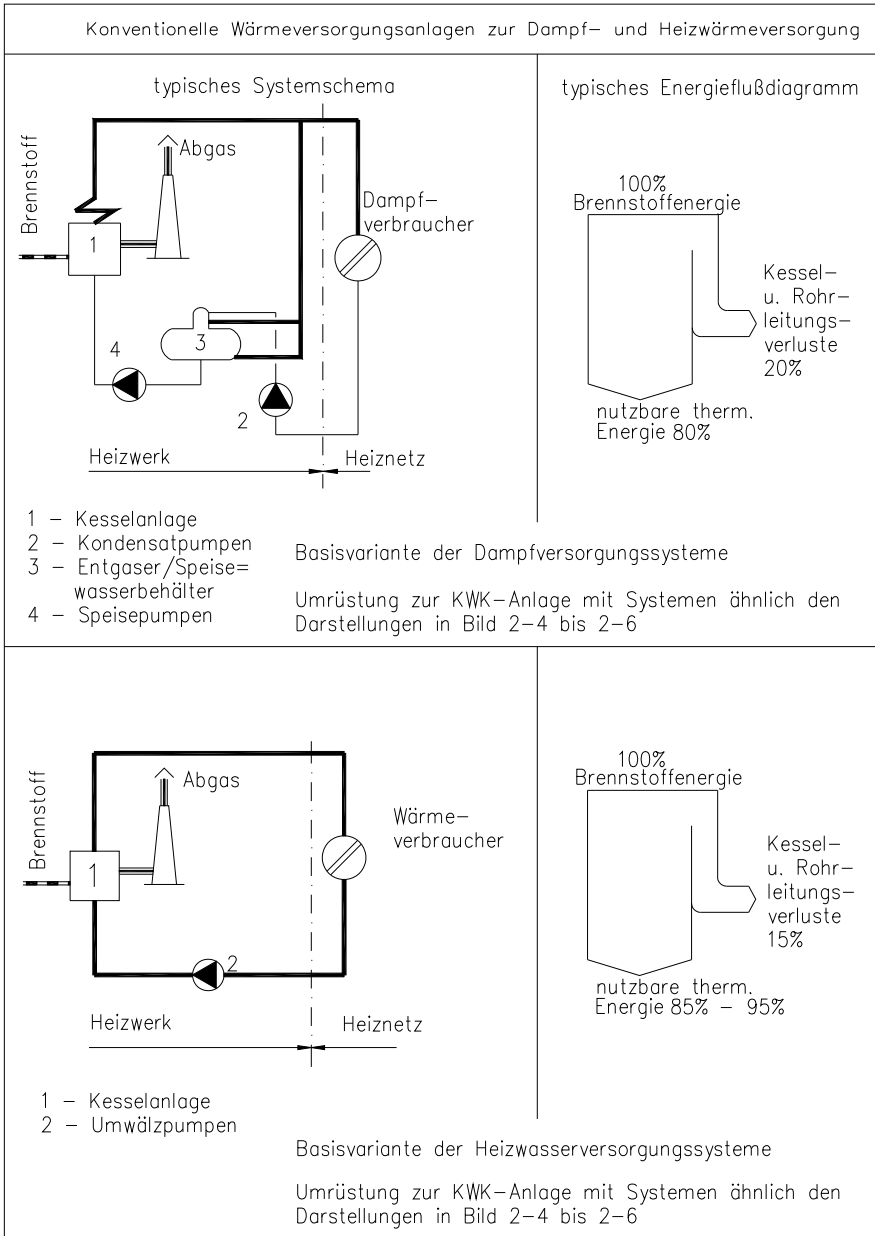


Abb. 2.1-2: Konventionelle Wärmeversorgungsanlagen zur Dampf- und Heizwärmeversorgung

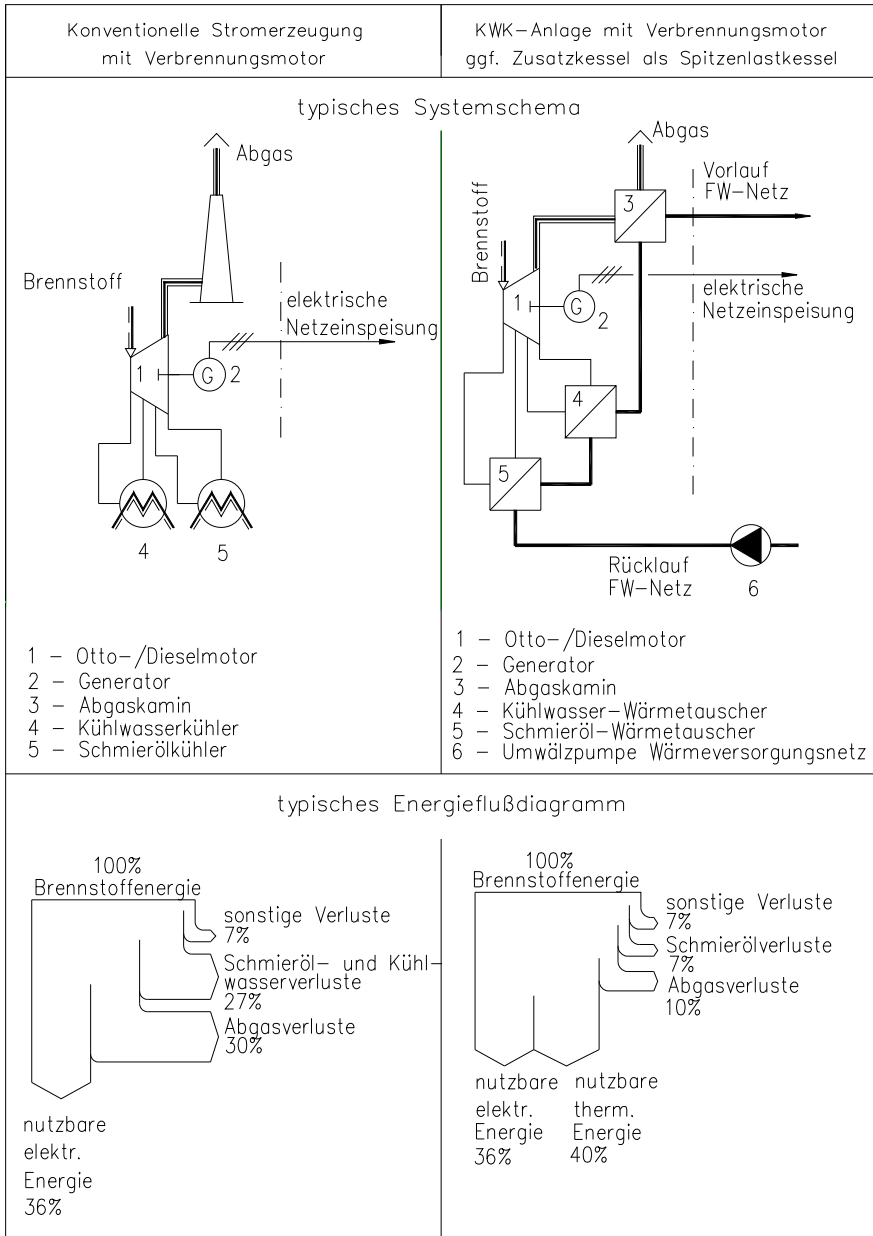


Abb. 2.1-3: Gegenüberstellung konventioneller Stromerzeugungsanlagen mit Verbrennungsmotoren gegenüber KWK/BHKW-Anlagen auf gleicher Anlagenbasis

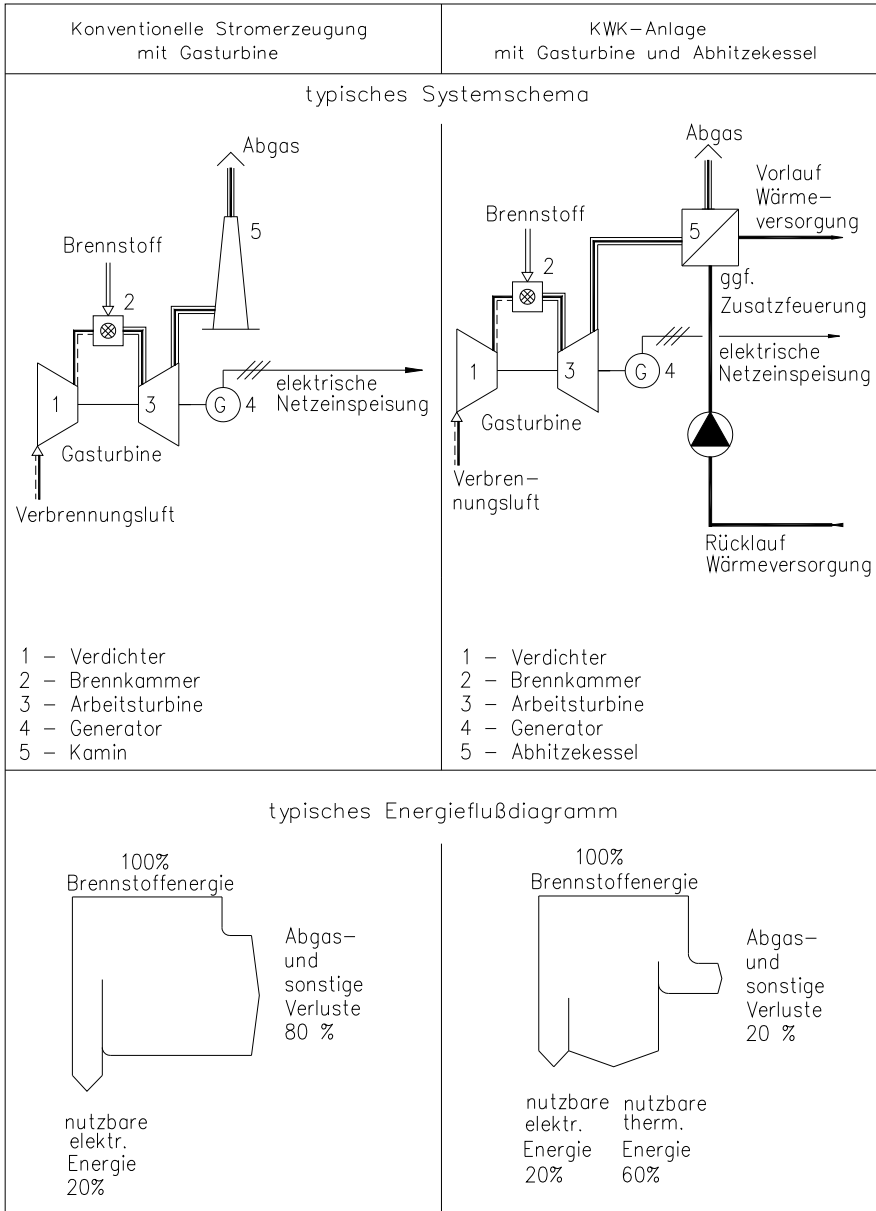


Abb. 2.1-4: Gegenüberstellung konventioneller Stromerzeugungsanlagen mit Gasturbinen gegenüber KWK-Anlagen auf gleicher Anlagenbasis

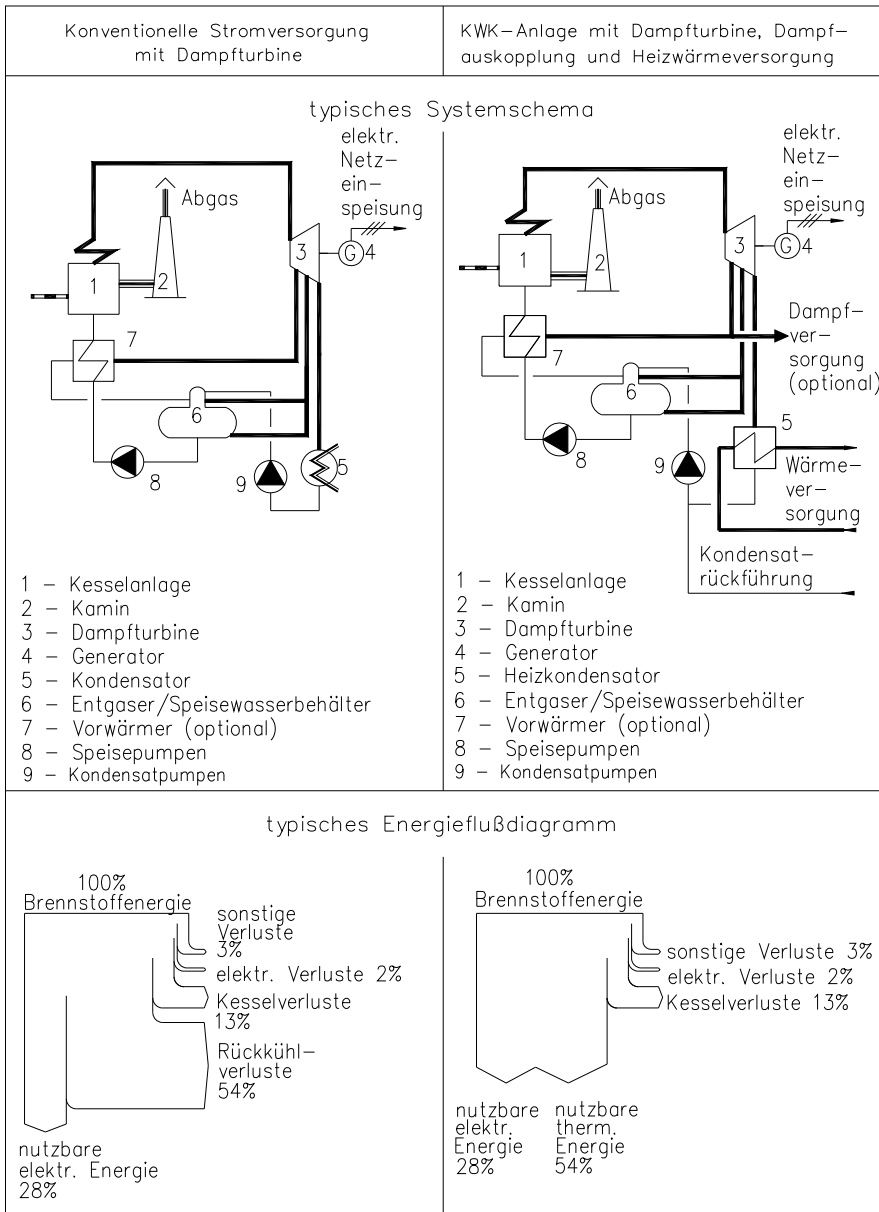


Abb. 2.1-5: Gegenüberstellung konventioneller Stromerzeugungsanlagen mit Dampfturbinen gegenüber KWK-Anlagen auf gleicher Anlagenbasis

Zu den KWK-Anlagen mit einem Freiheitsgrad zählen Anlagen ohne Möglichkeit einer ungekoppelten Stromerzeugung:

- Gegendruckdampfturbinenanlage GDT,
- Entnahmegegendruckdampfturbinenanlage EG(D)T,
- Gasturbinenanlage mit Abhitzeessel
 - GT-AHK ohne AHK-Bypass
 - GuD - GT mit einer GDT (GuD-GDT)
 - GuD - GT mit einer EGDT (GuD-EG(D)T)
 - GuD - beides mit Zusatzfeuerung des AHK,
- BHKW-Verbrennungsmotor BHKW-VM (nur wenn die Abhitzenutzungs-einrichtung nicht abschaltbar ist)
 - BHKW-Stirlingmotor BHKW-SM,
- Brennstoffzellen(heiz)kraftwerk BZ(H)KW
- Dampfmotor DM
- ORC-Anlage ORC
-

Zu den KWK-Anlagen mit zwei Freiheitsgraden zählen:

- KWK-Anlagen mit der Möglichkeit geringfügiger oder gelegentlicher ungekoppelter Stromerzeugung
 anteilige Stromerzeugung ohne Wärmenutzung (Hilfskühler, Bypass, ...)
 - anteilige Wärmeerzeugung ohne gekoppelte Stromerzeugung (z.B. mittels Dampfentnahme vor der Turbine bzw. zwischen den einzelnen Turbinenstufen) ...
- KWK-Anlagen mit Kondensationsstromerzeugung
 - Dampfturbinenanlagen
 - Entnahmekondensationsanlage EKT
 - Anzapfkondensationsanlage AKT
 - Gas- und Dampfturbinenanlagen GuD
 - GuD AK und GuD EK

Als Referenzsysteme für die getrennte Erzeugung kommen unter Berücksichtigung der Bilanzgrenzen in Frage:

- Bezug aus dem Netz der öffentlichen oder betrieblichen Versorgung,
- Kraftwerke, die mit dem gleichen Energieträger wie die KWK-Anlage betrieben werden,
- Kraftwerke, die mit einem anderen Energieträger wie die KWK-Anlage betrieben werden,
- Fern-/Nahwärmenetz,
- Wärmeerzeuger (Warmwasser, Heißwasser, Dampf),

- Wärmepumpen,
-

2.2 Energetische und ökologische Vorteile der KWK

Kraft-Wärme-Kopplung ist aus energietechnischer Sicht sinnvoll, wenn zur Erzeugung der geforderten Zielenergien in der gesamten Umwandlungskette durch KWK der Primärenergieaufwand reduziert wird. Damit verbunden sind bei gleichartigen Brennstoffen Reduktionen der CO₂- und anderer Emissionen [VDI-Richtlinie 4608]. Der Vorteil der Wärmeerzeugung mit Kraft-Wärme-Kopplung gegenüber getrennter Erzeugung von Strom und Wärme hängt von den als Referenz herangezogenen Kraftwerken und Wärmeerzeugungstechniken ab. Sowohl bei der Bewertung des Kraft-Wärme-Kopplungs-Systems als auch bei der Bewertung der herangezogenen Referenzsysteme ist der jeweilige technische Fortschritt zu berücksichtigen. Energetische und ökologische Bewertungen führen zu technisch-wissenschaftlichen Aussagen, die alleine aber für den Investor noch keine Auswahlempfehlungen darstellen. Erst durch die spätere Wirtschaftlichkeitsbetrachtung kann eine Auswahl im Hinblick auf die Marktgegebenheiten getroffen werden.

Als Zielenergien für KWK-Systeme kommen in Frage:

- Elektrischer Strom mit der Größe W_{el} für die elektrische Arbeit und P_{el} für die elektrische Leistung
- Mechanische Energie mit der Größe W_{mech} für die mechanische Arbeit und P_{mech} für die mechanische Leistung
- Raumwärme und Wärme für Warmwasser mit der Größe Q_{RH} für die Wärme und \dot{Q}_{RH} für die Wärmeleistung
- Prozesswärme mit der Größe Q_{PW} für die Wärme und \dot{Q}_{PW} für die Wärmeleistung
- „Kälte“ mit der Größe Q_K für die Kälte (Wärme unterhalb von der Umgebungstemperatur T_u) und \dot{Q}_K für die Kälteleistung

Das Leistungsverhältnis der Zielenergien:

Wenn für den Zielenergiebedarf ein festes Verhältnis zwischen der Bedarfsleistung für die elektrische/mechanische Energie und der Bedarfsleistung für den Nutzwärmestrom besteht, dann lässt sich die Stromkennzahl des Bedarfs σ_{Bed} definieren [VDI-Richtlinie 4608]. Für diesen Bedarfsfall

ist zunächst zu prüfen, welche KWK-Anlage für den jeweiligen Einsatzfall am besten geeignet ist.

Um zu prüfen, ob und in welchem Umfang Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen effizienter als die getrennte Erzeugung der Zielenergien arbeiten, müssen Referenzsysteme, mit denen dieselbe Menge und Art von Zielenergien erzeugt werden können, zum Vergleich herangezogen werden. Dies sind Wärmeerzeuger oder vor Ort vorhandene Wärmenetze, sowie Kondensationskraftwerke oder das elektrische Verbundnetz. Dafür sind die elektrischen und thermischen Brennstoffnutzungsgrade zu bestimmen.

Grundsätzlich bieten sich drei Arten von Referenzsystemen an:

- Die vorhandene Technologie des Anlagenbestandes, welcher ersetzt wird (z.B. Erneuerung eines bestehenden Kohlekraftwerkes durch einen Neubau). Die Jahresnutzungsgrade sind aus dem Verhältnis der jährlich nutzbar abgegebenen Arbeit zu den jährlich zugeführten Primärenergie-mengen zu ermitteln.
- Repräsentative Durchschnittswerte der Nutzungsgrade (z.B. durchschnittliche elektrische und thermische Nutzungsgrade der getrennten Energieerzeugung). Konkret gilt für das Jahr 2000, dass zur Bereitstellung von 1 kWh elektrischer Energie beim Verbraucher ein Primärenergieeinsatz von 9,2 MJ erforderlich war. Dies entspricht einem durchschnittlichen Kraftwerkswirkungsgrad im Verbundnetz von $\eta_{KW} = \eta_{el} = 39,1 \%$.
- Stand der Technik als Referenz für Neuanlagen. Als Referenzwerte für den Netto-Jahresnutzungsgrad für die Stromerzeugung können Werte aus Tabelle 2.2-1 dienen. Dabei handelt es sich um Bestwerte für das Jahr 2003 von in 2002/03 errichteten Anlagen.
- Als Referenz für die getrennte Wärmeerzeugung ist der Wirkungsgrad η_{Kessel} für einen vor Ort alternativen Wärmeerzeuger mit dem vorgesehenen Brennstoff anzusetzen.

Kraft-Wärme-Kopplung ist eine für jeden Energieträger mögliche Technik. Deshalb sind Bewertungen zunächst unabhängig vom Energieträger vorzunehmen.

Tabelle 2.2-1: Anhaltswerte für Netto-Jahresnutzungsgrade von Kondensationskraftwerken η_{KW}

Brennstoff	Erdgas	Steinkohle	Biomasse (Holz)	Braunkohle
Netto Jahresnutzungsgrad	53% Leistung > 350 MWel	42% Leistung > 350 MWel	> 30% Leistung < 20 MWel	40% Leistung > 350 MWel

Primärenergieeinsparung

Zur Ermittlung der Primärenergieeinsparung sind die Bilanzgrenzen der Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage und des Referenzsystems in gleicher Weise zu ziehen.

Um die Effizienz unterschiedlicher Kraft-Wärme-Kopplungs-Systeme miteinander vergleichen zu können, wird die relative/prozentuale Primärenergieeinsparung zusätzlich ermittelt.

Die relative Primärenergieeinsparung als Quotient aus dem Primärenergieaufwand für die getrennte Erzeugung PE und dem Primärenergieaufwand ($PE - \Delta PE$) für die gekoppelte Erzeugung stellt eine Effizienzkennzahl für die KWK dar.

Effizienzkennzahl der KWK : $\gamma_{KWK} = \frac{PE}{PE - \Delta PE}$
--

Die Effizienzkennzahl γ_{KWK} nimmt immer dann, wenn das Kraft-Wärme-Kopplungssystem hinsichtlich des Brennstoffaufwandes (Primärenergieaufwandes) vorteilhafter als das Referenzsystem mit getrennter Erzeugung ist, Werte größer als Eins an.

Emissionsminderung

Werden als Primärenergie kohlenstoffhaltige Brennstoffe eingesetzt, dann hat der geringere Primärenergieaufwand durch effizientere Energienutzung bei Verwendung gleicher Brennstoffe auch die Verringerung der Kohlendioxidemission und aller anderen an die Menge des Primärenergieaufwandes gebundenen Emissionen wie Schwefeloxid und Methanverluste in der Umwandlungskette, zur Folge. Alle anderen, nicht Brennstoff gebundenen Emissionen wie z.B. Stickoxide müssen separat behandelt werden.

In dem seit 1.4.02 geltenden Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz wird auf die AGFW-Richtlinie FW308 als anerkannte Regel der Technik zur KWK-Stromermittlung verwiesen. In der FW 308 wird das Nutzungsgradpotenzial eingeführt, für das ein Grenzwert vorgegeben wird, der von KWK-Anlagen mindestens erreicht werden sollte, um eine Förderung von Kondensationsstrom weitestgehend auszuschließen.

Dies entspricht allerdings nur der Brennstoffausnutzung, ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Qualität der Zielenergien Strom, Hochtemperatur-Wärme, Niedertemperatur-Wärme oder Kälte.

Energetisch richtig ist dagegen, wenn die Qualität der Zielenergien (Exergie) in die Bewertung eingeht.

Der Zusammenhang zwischen Primärenergieeinsparung und der Effizienz-Kennzahl der KWK ¹

Für die reine Erzeugung von Strom und Wärme lässt sich aus dem exergetischen Wirkungsgrad für den getrennten und den gekoppelten Prozess

$$\zeta_{\text{getrennt}} = \frac{\eta_{el,KWK} \left(1 + \frac{\eta_C}{\sigma}\right)}{\frac{\eta_{el,KWK}}{\eta_{KW}} + \frac{\eta_{th,KWK}}{\eta_{Kessel}}} = \frac{(\sigma + \eta_C) \eta_{KW} \cdot \eta_{Kessel}}{\sigma \cdot \eta_{Kessel} + \eta_{KW}}$$

$$\zeta_{KWK} = \eta_{el,KWK} \left(1 + \frac{\eta_C}{\sigma}\right) = \eta_{th,KWK} (\sigma + \eta_C)$$

die relative Primärenergieeinsparung und damit die Effizienzkennzahl ableiten. Dabei ist η_C der Carnotfaktor der Wärme und σ die Stromkennzahl der erzeugten und der abgenommenen Zielenergien. Auf Grund der ungefähren Gleichheit der Primärenergie der Brennstoffe und ihrer Exergie gilt für die Effizienzkennzahl γ_{KWK} :

$$\gamma_{KWK} = \zeta_{KWK} / \zeta_{\text{getrennt}} = \text{PE} / (\text{PE} - \Delta \text{PE})$$

bzw.

$$\gamma_{KWK} = \frac{\eta_{el,KWK}}{\eta_{KW}} + \frac{\eta_{th,KWK}}{\eta_{Kessel}}$$

Für die Primärenergieeinsparung folgt:

$$\Delta \text{PE} = \text{PE} \left(1 - \gamma_{KWK}^{-1}\right) = \text{PE} \left(1 - \frac{1}{\frac{\eta_{el,KWK}}{\eta_{KW}} + \frac{\eta_{th,KWK}}{\eta_{Kessel}}}\right)$$

¹ [VDI-Bericht 1767, 2003, Schaumann, G.]

Dasselbe Ergebnis für die Primärenergieeinsparung und für die Effizienz-Kenngröße wäre entstanden, wenn die Wärme nicht mit dem Carnotfaktor bewertet worden wäre, also wenn die energetischen Wirkungsgrade eingesetzt worden wären.

Vorteil der KWK bei der Exergienutzung

In Abbildung 2.2-1 werden die Exergiewirkungsgrade der gekoppelten und getrennten Erzeugung über der Stromkennziffer der Anlage dargestellt. Dabei wird von einem Referenzsystem mit Kraftwerkswirkungsgraden von $\eta_{KW} = 0,35; 0,45; 0,55$ ausgegangen und von einer Wärmeerzeugung mit einem Kesselwirkungsgrad von $\eta_{Kessel} = 0,90$ und einer Temperatur der Wärme gemäß einem Carnotfaktor von $\eta_C = 0,15$. Die KWK-Anlage soll eine Gesamteffizienz von $\omega = 0,80$ bzw. $0,85$ haben. Man erkennt, dass die KWK-Anlage bis hinunter zu Stromkennziffern von $\sigma = 0,20$ immer im Vorteil ist. Bei der Auskopplung der Wärme aus sonst im Kondensationsbetrieb eingesetzten Kraftwerken mit der Leistung P_0 kann der exergetische Wirkungsgrad höher oder niedriger werden gemäß folgender Gleichung, die im übrigen der obigen Gleichung entspricht:

$$\zeta = \frac{P_0 + \dot{Q}_H(\eta_C - g)}{\dot{W}_B} = \eta_{el,KWK} + \eta_C \cdot \eta_{th,KWK} = \eta_{el,KWK} \left(1 + \frac{\eta_C}{\sigma} \right)$$

Darin setzt die Stromverlustkennziffer die elektrische Leistungsminderung

$$g = \frac{P_0 - P}{\dot{Q}_H}$$

$P_0 - P$ ins Verhältnis zur ausgekoppelten Wärme.

In Abbildung 2.2-2 ist für moderne hocheffiziente GuD-Anlagen und Steinkohle-Dampfturbinenkraftwerke die Stromausbeute und der Brennstoffausnutzungsgrad (= Gesamteffizienz) über der reziproken Stromkennzahl der Anlage aufgetragen.

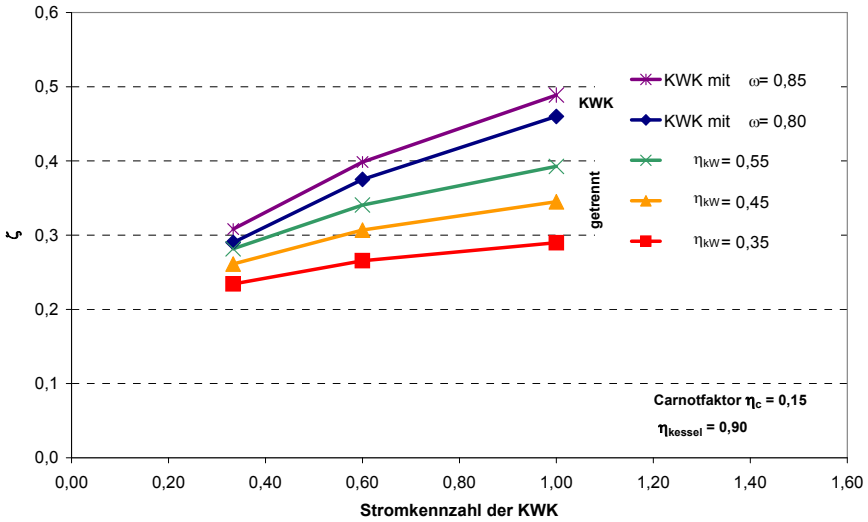


Abb. 2.2-1: Exergiewirkungsgrade der gekoppelten und getrennten Erzeugung von Wärme und Strom

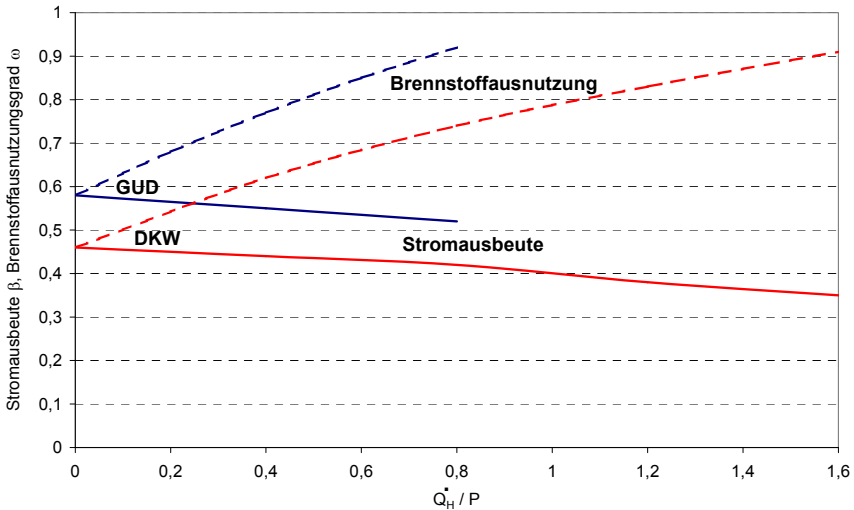


Abb. 2.2-2: Brennstoffausnutzungsgrad und Stromausbeute bei Wärmeauskopp- lung aus modernen GUD- und Steinkohlekraftwerken, aufgetragen über der rezip- roken Stromkennzahl

(mit $\eta_{el,GUD,nenn} = 0,58$ und $\eta_{el,DKW,nenn} = 0,46$)