

Forschungsprogramm
Umgebungs- und Abwärme,
Wärme-Kraft-Kopplung (UAW)

Maximale Primärenergienutzung und CO₂-Reduktion mit Wärmepumpenheizsystemen

- **thermodynamisch sinnvollere Heizsysteme**
- **Wärme-Kraft-Kopplung oder Kombikraftwerk?**
- **erreichbarer Nutzungsgrad**
- **ökologischer Nutzen**
- **Verbesserungspotential**

ausgearbeitet durch
Prof.Dr.Martin Zogg
Kirchstutz 3, 3414 Oberburg

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Juni 1998

Zusammenfassung

Niedertemperaturwärme hat einen Anteil von über 50% des Nutzenergiebedarfs der Schweiz. Heute werden mit der Kombination grösserer Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen und Kompressionswärmepumpen (WKK-WP-Systeme) beim Erzeugen von Niedertemperaturwärme aus fossilen Brennstoffen bereits **Nutzungsgrade von 150% und mehr** erreicht. Dasselbe gilt für die Kombination von Kombikraftwerken mit Kompressionswärmepumpen (GuD-WP-Systeme). Mit Heizkesseln können dagegen Nutzungsgrade von 100% nicht überschritten werden. Ein Ersatz der Kesselheizungen durch effiziente Wärmepumpenheizungssysteme (WKK-WP oder GuD-WP) brächte somit einen erheblichen Beitrag zur Senkung des Kohlendioxidausstosses und des Bedarfs an fossilen Brennstoffen.

Priorität zur Bereitstellung der für Wärmepumpenanlagen benötigten elektrischen Energie haben der durch den **Ersatz von Elektrowiderstandsheizungen** durch Wärmepumpen freigestellte elektrische Strom und elektrischer Strom aus **Kehrichtverbrennungsanlagen**. Diese Stromanteile vermögen bis ins Jahr 2010 einen grossen Teil des für Wärmepumpenheizanlagen benötigten elektrischen Stroms zu decken [1]. Die folgenden Überlegungen gelten für den darüber hinausgehenden Strombedarf von Wärmepumpenanlagen. Sie beschränken sich auf die Energieeffizienz und klammern kommerzielle und politische Gesichtspunkte bewusst aus.

Bilanzgebiet für die nachfolgend erörterten Wärmepumpenheizsysteme ist auch für die Schadstoffemissionen ein Bereich, in dem der durch alle Wärme-Kraft-Kopplungseinheiten produzierte elektrische Strom dem durch alle Kompressionswärmepumpen benötigten entspricht (**WKK-WP-Heizsystem im Stromgleichgewicht**). Es umfasst die Schweiz, da es nicht sinnvoll ist, das Bilanzgebiet über den Bereich von politischen und technischen Einfluss- und Handlungsmöglichkeiten hinauszuziehen.

Um Niedertemperaturwärme mit minimalem Verbrauch an Primärenergie und damit mit minimaler CO₂-Produktion zu erzeugen, gelten beim heutigen Stand der Technik für eine Bereitstellung von Niedertemperaturwärme mit Brennstoffen folgende Thesen:

1. Die Produktion von Niedertemperaturwärme durch eine Kombination effizienter Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen mit modernen Kompressionswärmepumpen (**WKK-WP-System**) ergibt gegenüber Kesselanlagen bereits heute **Einsparungen an Brennstoffen** und damit an CO₂-Ausstoss von **35% bis 50%** (Bild7).
2. Um diese hohe Brennstoffeinsparung zu erzielen, sollen der **elektrische Wirkungsgrad der WKK-Anlagen wenigstens 33%**¹ und die **Jahresarbeitszahl der Kompressionswärmepumpen wenigstens 3** betragen.
3. Bei der Verbesserung des WKK-WP-Systems kommt einer **Erhöhung der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen höchste Priorität** zu.²

¹ Auf den **unteren Heizwert** der eingesetzten Brennstoffe bezogene Wirkungsgrade.

² Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpenheizung ist von grossem Einfluss auf die Effizienz des Systems WKK-WP. Hier besteht ein **erhebliches Verbesserungspotential**: Bild 12.

4. Wenn keine geeignete zentrale Wärmeversorgung eingebaut werden kann, sind beim **Er-satz vorhandener Einzelraum-Elektrowiderstandsheizungen** durch Einzelraum-Elektrowärmepumpen Jahresarbeitszahlen unter 3 zulässig.
5. Bei der Verwendung **erneuerbarer Brennstoffe** (wie Holz, Klärgas, Deponiegas, Biogas) sind WKK-Anlagen auch bei elektrischen Wirkungsgraden unter 33% sinnvoll.
6. Auch die **Blockheizkraftwerke mit kleinen Leistungen** sind der Luftreinhalteverordnung zu unterstellen und sollen bei Gesamtwirkungsgraden von wenigstens 90% ebenfalls einen elektrischen Wirkungsgrad von 33% erreichen.³
7. **WKK-WP-Heizsysteme im Stromgleichgewicht** ermöglichen eine maximale Nutzung der Umgebungswärme für die Produktion von Niedertemperaturwärme. Sie erreichen deshalb **die höchste Brennstoffeinsparung und die höchstmögliche Reduktion des CO₂-Ausstosses**.
8. Eine **über den Eigenbedarf der WKK-WP-Heizsysteme im Stromgleichgewicht hinausgehende Stromproduktion durch effiziente WKK-Anlagen** (WKK-Betrieb ohne Stromverwertung durch Wärmepumpen) ist energetisch sinnvoll, wenn ein Wärmepumpenbetrieb infolge sehr hoher Vorlauftemperaturen oder Problemen mit geeigneten Wärmequellen nicht vertretbar ist und die Wärme vollständig genutzt wird.⁴
9. Mit Erdgas betriebene WKK-Anlagen sollten die **Emissionsgrenzwerte** der alten Luftreinhalteverordnung (LRV92) nicht überschreiten.⁵
10. Die Kombination moderner **Kombikraftwerke ohne Abwärmenutzung** mit Wärmepumpen (GuD-WP-System) ist energetisch den besten WKK-WP-Systemen im Stromgleichgewicht **gleichwertig**.⁶

³ Von den sich in Entwicklung befindenden **Brennstoffzellensystemen** sind auch für kleinere Einheiten bei sehr geringen Emissionen elektrische Wirkungsgrade über 33% zu erwarten. Die in letzter Zeit entwickelten **Kleinstblockheizkraftwerke** mit konventionellen Verbrennungsmotoren oder Stirlingantrieben erfüllen die Forderung eines minimalen elektrischen Wirkungsgrads von 33% dagegen klar nicht. Falls sie sich aus anderen Gründen (vorhandenes Wärmeverteilsystem mit hohen Vorlauftemperaturen, problematische Wärmequellen für die Wärmepumpe, vorhandene Infrastruktur) trotzdem durchsetzen, soll für eine entsprechende Emissionsüberwachung gesorgt werden.

⁴ Das WKK-WP-System im Stromgleichgewicht stösst an Grenzen, wenn bei den mit Wärmepumpen zu bedienenden Verbrauchern zu viele Heizungswärmeverteilsystemen mit sehr hoher Vorlauftemperatur existieren oder wenn die Erschliessung geeigneter Wärmequellen problematisch ist. Für die Deckung des Wärmebedarfs der durch das WKK-WP-System im Stromgleichgewicht schlecht versorgbaren Bezüger ist eine **zusätzliche Stromproduktion durch effiziente WKK-Anlagen** auch energetisch sinnvoll. Darüber hinaus sollte die Erzeugung von elektrischem Strom aus der Sicht eines minimalen Verbrauchs an Brennstoffen und einer maximalen Reduktion des CO₂-Ausstosses in hocheffizienten Kombikraftwerken erfolgen.

⁵ Nach der neuen LRV 98 übertreffen die **maximal zulässigen Stickoxidemissionen** von BHKWs jene von Kombikraftwerken wesentlich: Bild 11. Das Einhalten der LRV 92 ist kein technisches Problem – aber ein wirtschaftliches.

⁶ Die Kombination moderner **Kombikraftwerke ohne Abwärmenutzung** mit elektrischen Wirkungsgraden über 55% mit Wärmepumpen (GuD-WP-System) erreicht Nutzungsgrade, die den besten „WKK-WP-System im Stromgleichgewicht“ **durchaus ebenbürtig** sind (Bild 7) – und dies mit gemäss LRV 98 geringeren Stickoxidemissionen.

Die thermodynamisch und ökologisch sinnvollere Heizung

Es ist eine Binsenwahrheit, dass man mit Heizkesseln nicht mehr Wärme an einen Verbraucher (Raumheizung, Warmwasserbereitung) abgeben kann, als bei der Verbrennung freigesetzt wird: Bild 1.

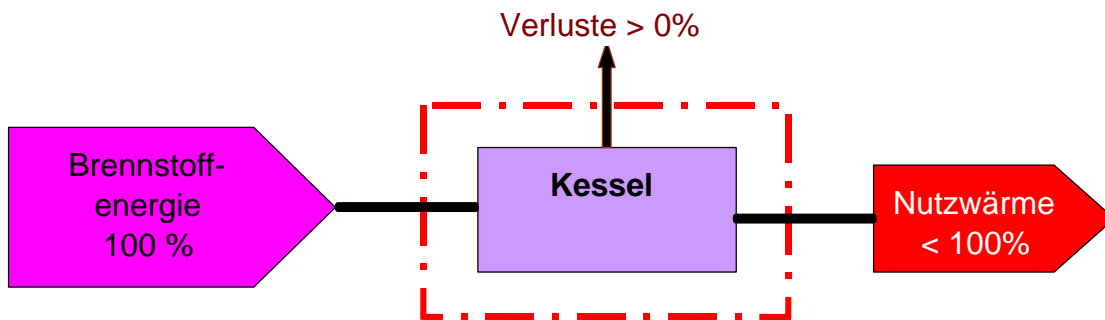


Bild 1: Geringe Nutzung der Brennstoffenergie bei der Kesselheizung.

Der Nutzungsgrad ist das Verhältnis der an den Wärmeverbraucher (Raumheizung, Warmwasserbereitung, Niedertemperaturprozesswärme) abgegebenen Nutzwärme zu der mit dem Brennstoff zugeführten Brennstoffenergie:

$$\text{Nutzungsgrad} = \frac{\text{abgegebene Nutzwärme}}{\text{zugeführte Brennstoffenergie}}$$

Ersetzt man den Kessel gemäss dem Bild 2 durch einen Verbrennungsmotor, der den Verdichter einer Wärmepumpe über eine direkte mechanische Kopplung antreibt, sind Nutzungsgrade über 150% erreichbar. Grund dafür ist die Nutzung der Umgebungswärme mit der Wärmepumpe. Diese Systeme mit mechanischer Übertragung der Antriebsleistung von der WKK-Arbeitsmaschine (z.B. Verbrennungsmotor, Turbomaschine) an den Verdichter der Wärmepumpe sind wenig flexibel im Einsatz und haben sich auch mechanisch als problematisch erwiesen (unterschiedliche Dynamik der beiden Maschinen).

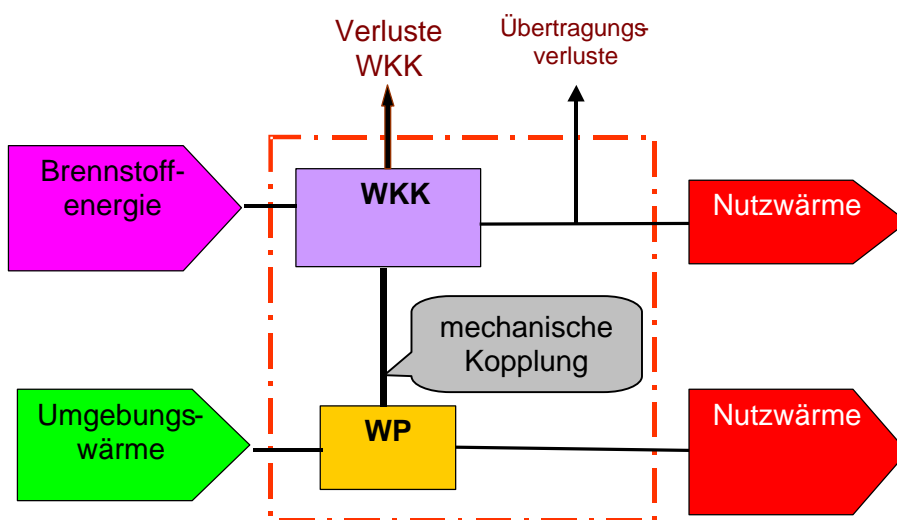


Bild 2: Kombination einer WKK-Einheit mit einer Wärmepumpe durch mechanische Kopplung (z.B. Verbrennungsmotor und Wärmepumpenverdichter mit direkter Wellenverbindung).

Die wesentlich bessere Lösung erhält man, wenn man die mechanische Kopplung durch eine elektrische Übertragung der Antriebsenergie über einen Generator in der WKK-Einheit, über das vorhandene Stromnetz und über Elektromotoren in den Wärmepumpen ersetzt: **Bild 3**. Man muss zwar durch die elektrischen Verluste in Generator, Übertragungsleitung und Elektromotor eine kleine Einbusse im Nutzungsgrad in Kauf nehmen. Dafür verschwinden die mechanischen Probleme der direkten Ankopplung der Wärmepumpe, und der Betrieb wird wesentlich flexibler.

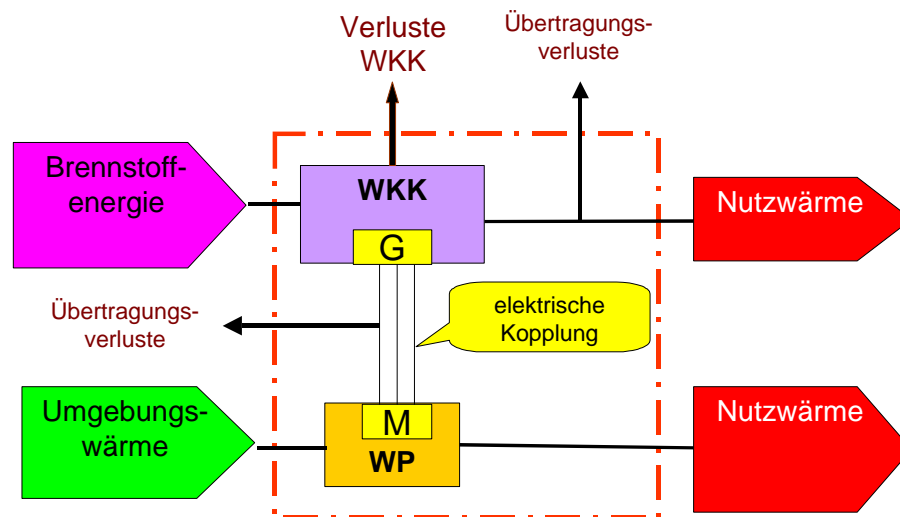


Bild 3: Kombination einer WKK-Einheit mit einer Wärmepumpe durch elektrische Kopplung.

Die Wärmepumpen können im selben Raum wie die WKK-Einheit aufgestellt sein. Meistens werden mit dem erzeugten elektrischen Strom aber externe Wärmepumpen angetrieben. Selbstverständlich zieht man keine separaten Stromleitungen von der WKK-Einheit zu den externen Wärmepumpen, sondern benützt das vorhandene Elektrizitätsverteilungsnetz. Der Nutzungsgrad und die CO₂-Einsparung bleiben dabei – abgesehen von kleinen Übertragungsverlusten – dieselben.

Sobald man das öffentliche Stromnetz zur Übertragung der Antriebsleistung von der WKK-Einheit zu den Wärmepumpen benützt, warnen Skeptiker, dass man die Emissionen nun mit einem Strommix bestimmen müsse. Damit ergeben sich mannigfaltige Interpretationsmöglichkeiten – vom miesen, osteuropäischen Braunkohlenstrom bis zum einheimischen Strom aus Wasserkraft, mit und ohne Transitanteil. Dass dies für Wärmepumpenheizsysteme im Stromgleichgewicht irrelevant ist, erkennt man leicht durch einen Vergleich der Heizsysteme nach Bild 2 und Bild 3. Beide Systeme ergeben bei vernachlässigbaren elektrischen Übertragungsverlusten dieselben Emissionen und sind somit ökologisch etwa gleichwertig!

Wärme-Kraft-Kopplung oder Kombikraftwerk?

Wir wollen nun die Überlegenheit der Wärmepumpenheizsysteme an drei Beispielen für den Verbund WKK-WP und den Verbund Kombikraftwerk-WP (GuD-WP) näher erläutern. Als erstes betrachten wir das Beispiel eines grösseren, modernen Blockheizkraftwerks mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 35% und einem Gesamtwirkungsgrad von 90% im Verbund mit modernen Wärmepumpenanlagen mit einer Jahresarbeitszahl von 3,5: **Bild 4**. Dieses WKK-WP-System produziert aus 100% Brennstoffenergie durch die Nutzung von 85% Umgebungsenergie eine Gesamtnutzwärme von 174%. Dabei wird eine Übertragung der elektri-

schen Energie im Niederspannungsnetz auf Wärmepumpen in der Nähe des BHKWs (z.B. innerhalb einer Gemeinde) mit den mittleren Übertragungsverlusten eines Niederspannungsnetzes von 2.5% berücksichtigt.

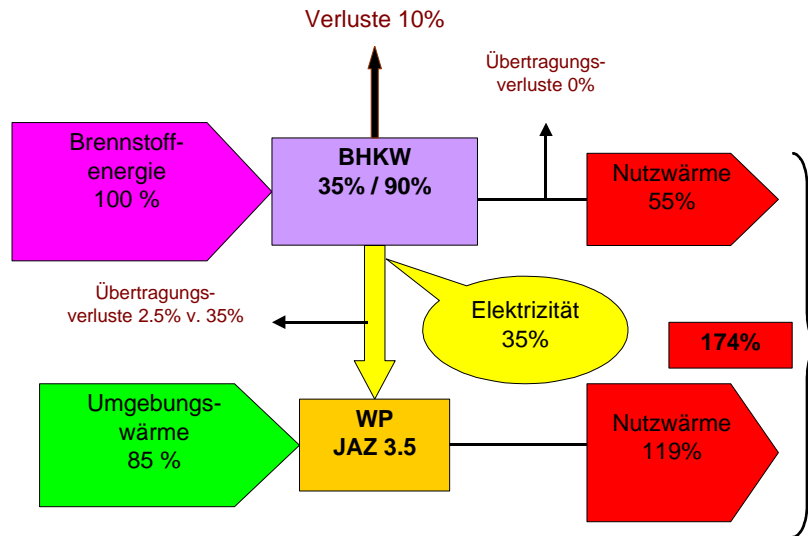


Bild 4: Kombination eines Blockheizkraftwerks mit einer Kompressionswärmepumpe. Gesamtwirkungsgrad des BHKWs 90%, elektrischer Wirkungsgrad 35%, Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe 3.5.

Falls man im System WKK-WP das Blockheizkraftwerk durch ein Kombi-Heizkraftwerk ersetzt, kann man aus 100% Brennstoffenergie sogar 186% Nutzwärme produzieren: Bild 5. Dies, obwohl der elektrische Wirkungsgrad des Kombi-Heizkraftwerks zu nur 45% angenommen wurde und die Übertragungsverluste für die Wärme in einem Fernwärmenetz zu 10% und jene für die elektrische Energie über das Hochspannungsnetz zu 7.5% berücksichtigt wurden. Das gezeigte Beispiel wird in [2], Anhang 2 ausführlich durchgerechnet.

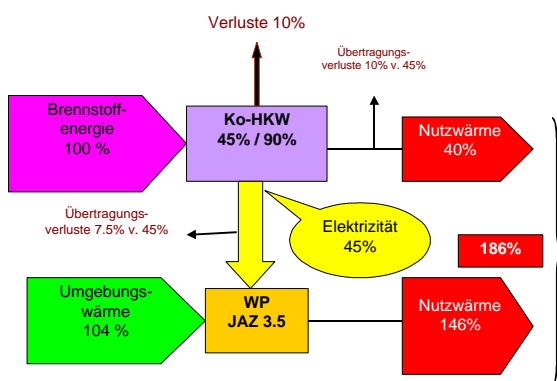


Bild 5: Heizsystem aus einem Kombi-Heizkraftwerk mit Wärmeverteilung durch ein Fernwärmenetz und Kompressionswärmepumpen. Gesamtwirkungsgrad 90%, elektrischer Wirkungsgrad 45%, Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe 3.5.

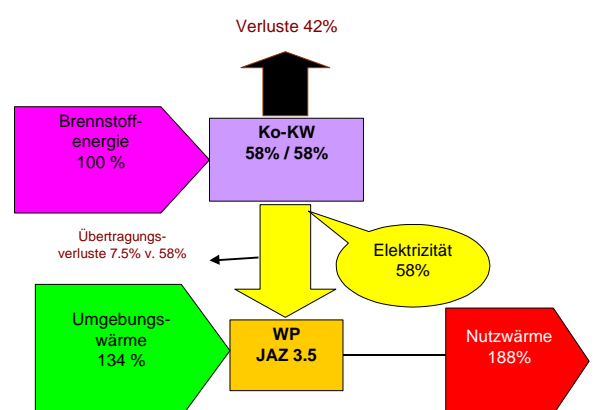


Bild 6: Heizsystem aus einem Kombi-Kraftwerk ohne Abwärmenutzung. Elektrischer Wirkungsgrad 58%, Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe 3.5.

Mit zunehmendem elektrischem Wirkungsgrad wird die Nutzung der Abwärme aus der WKK-Anlage immer unbedeutender. Dies entspricht der erstrangigen Bedeutung einer hohen Exergienutzung in der WKK-Anlage. Es vermag deshalb nicht zu verblüffen, dass man mit einem hocheffizienten Kombikraftwerk (Gas- und Dampfturbinenanlage GuD) ohne jede Abwärmenutzung ebenfalls auf sehr hohe Gesamtnutzungsgrade kommt: Bild 6.

Nutzungsgrad von Wärmepumpenheizsystemen

Die oben an einigen Beispielen verdeutlichten Aussagen werden im Bild 7 für die Fälle Blockheizkraftwerk-Wärmepumpen und Kombikraftwerk-Wärmepumpen verallgemeinert. Dieses Bild bestätigt, dass die zentrale Stromproduktion mit modernen Kombikraftwerken mit effizienten Wärmepumpen eine vergleichbare Ausnützung der Brennstoffenergie ergibt wie grosse Blockheizkraftwerke mit höchsten elektrischen Wirkungsgraden um 40%. Kleine Blockheizkraftwerke mit elektrischen Wirkungsgraden unter 30% schneiden dagegen deutlich schlechter ab.

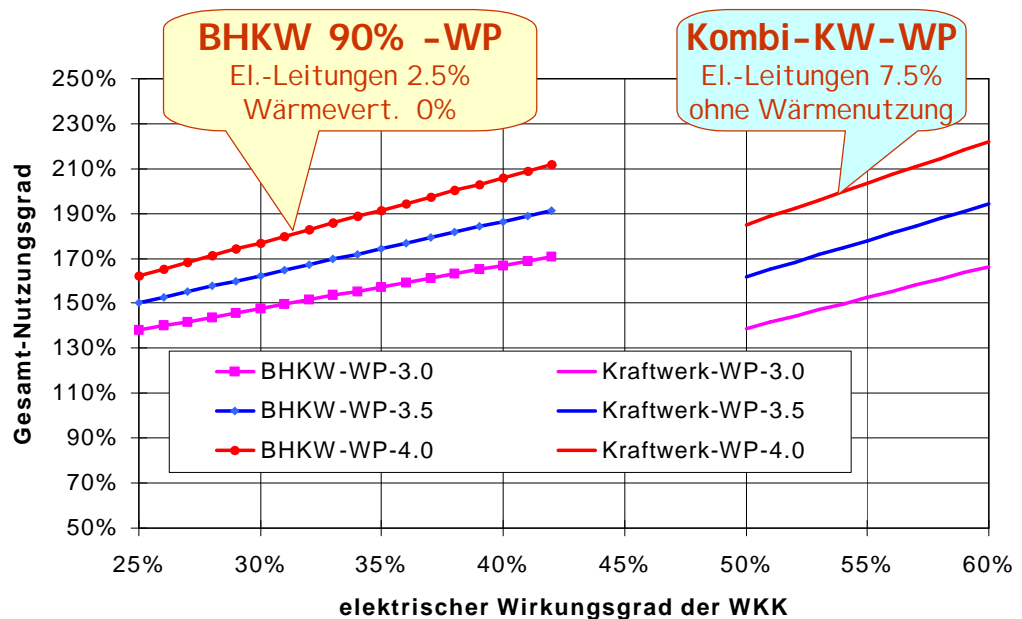


Bild 7: Gesamtnutzungsgrad von Wärmepumpenheizsystemen für dezentrale Stromproduktion in einem BHKW (linke Kurvenschar: Gesamtwirkungsgrad 90%, 2.5% Übertragungsverluste für die elektrische Energie, keine Verluste in der Wärmeverteilung) und für eine zentrale Stromproduktion in einem Kombi-Kraftwerk ohne Abwärmenutzung (rechte Kurvenschar, elektrische Übertragungsverluste 7.5%).

Wie bereits in [5] vorgestellt, kann man den mit dem WKK-WP-Heizsystemen erreichbaren Nutzungsgrad noch in einer allgemeineren Art graphisch darstellen: Bild 9. Hier sind auf der Abszisse die elektrischen Wirkungsgrade der WKK-Einheiten und auf der Ordinate die Arbeitszahl der Wärmepumpe aufgetragen. Die Kurvenscharen zeigen den Gesamtnutzungsgrad des WKK-WP-Systems im Stromgleichgewicht.

Die Anwendung des Diagramms erkennt man am leichtesten an einem Beispiel. Der elektrische Wirkungsgrad einer WKK-Anlage sei 38% und die Jahresarbeitszahl der Kompressionswärmepumpe 3.2. Aus dem Bild 8 kann man dafür ohne Übertragungsverluste einen Gesamtnutzungsgrad des WKK-WP-Systems von 174% herauslesen. Bei einer zentralen Anlage mit Stromübertragungsverluste 7.5% und Wärmeübertragungsverluste 7.5% liefert die Interpolation zwischen den entsprechenden Kurvenscharen einen Gesamtnutzungsgrad von noch 161%.

Zielrichtung für unsere Bemühungen einer hohen Brennstoffenergienutzung ist die obere, rechte Ecke im Bild 9. Wir müssen also sowohl den elektrischen Wirkungsgrad der WKK-Anlagen wie auch die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpenheizungsanlagen erhöhen.

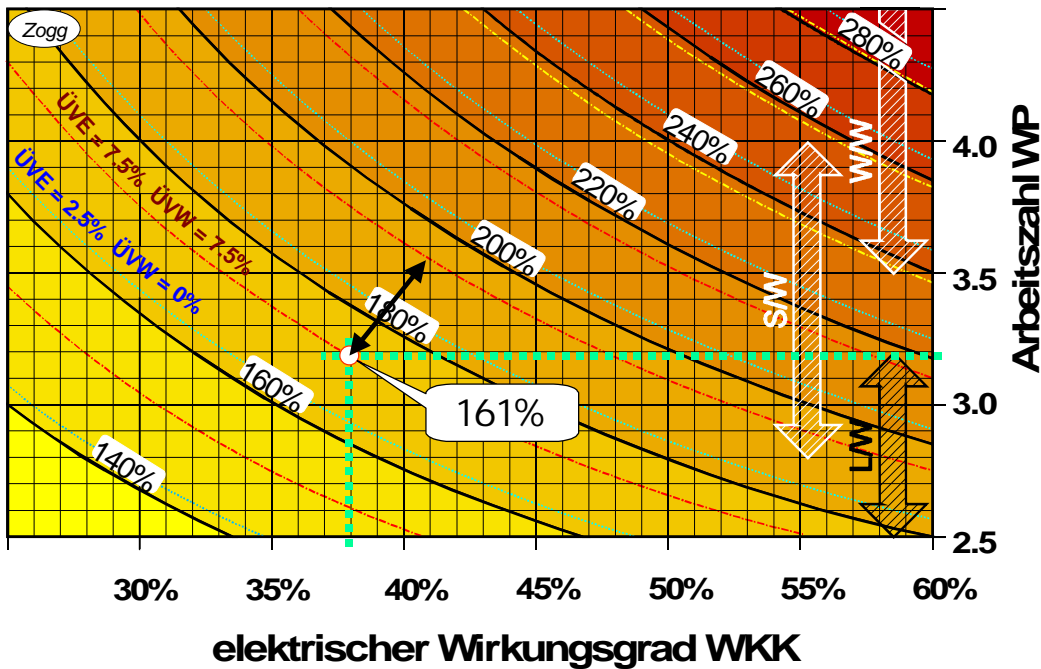


Bild 8: Beispiel zur Anwendung des Nutzungsgrad-Diagramms nach Bild 9.

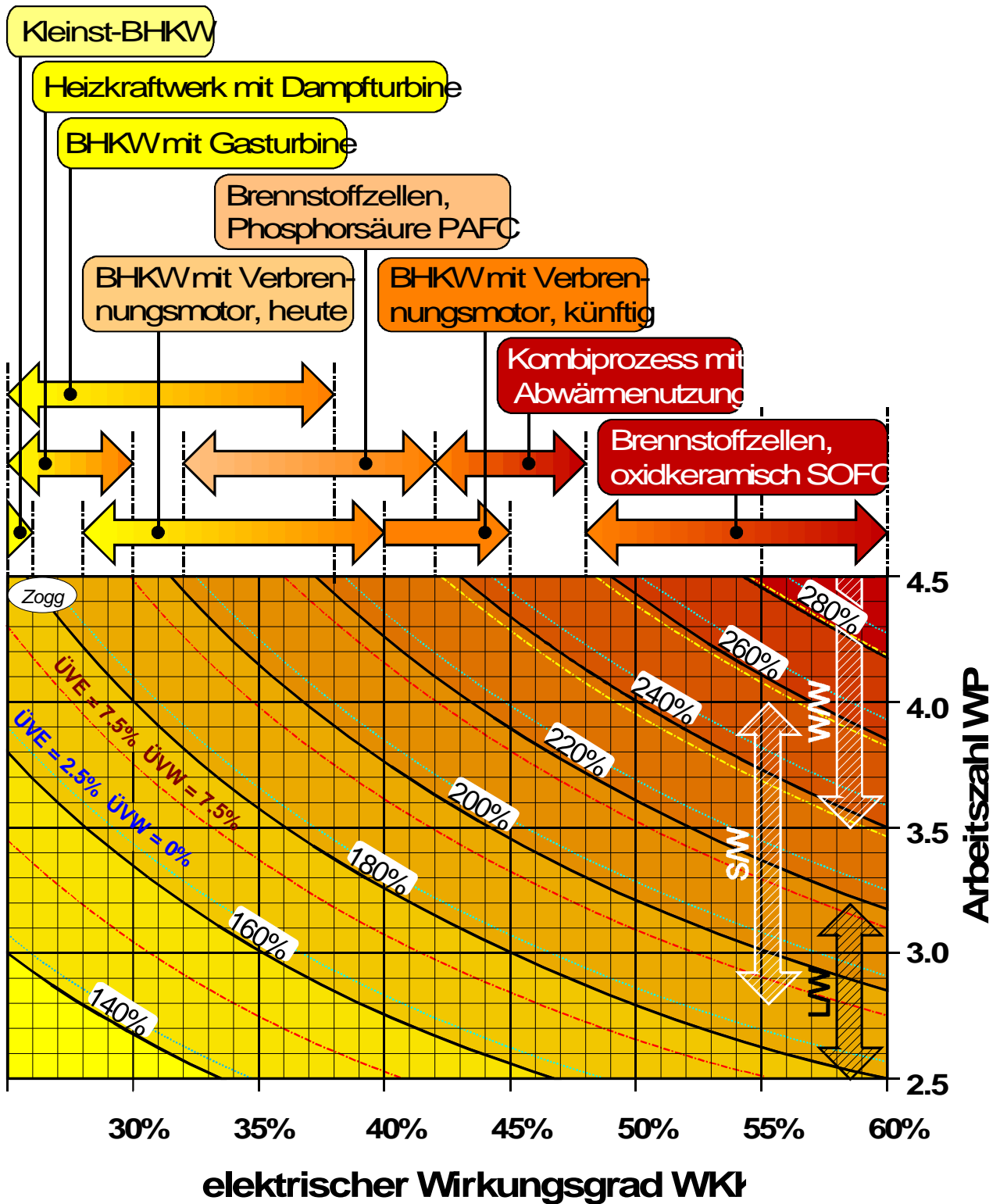


Bild 9: Nutzungsgrad von WKK-WP-Heizsysteme im Stromgleichgewicht. Gesamtwirkungsgrad der WKK-Anlagen 90%. Ausgezogene Linien: Ohne Übertragungsverluste. Die fein eingetragenen Kurvenscharen gelten für Blockheizkraftwerke beim Wärmeverbraucher (nur 2.5% elektrische Übertragungsverluste ÜVE an Wärmepumpen in der Umgebung) und für Kombi-Heizkraftwerken (7.5% elektrische Übertragungsverluste ÜVE über Hochspannungsnetz und 7.5% Wärmeübertragungsverluste ÜVW im Fernwärmenetz.).

Ökologischer Nutzen von Wärmepumpenheizsystemen

Niemand wird bei einem WKK-WP-System mit mechanischer Kopplung nach Bild 2 auf die Idee kommen, für die ökologische Beurteilung einen Strommix irgend welcher Art einzuführen. Beim WP-WKK-System im Stromgleichgewicht gemäss Bild 3 werden die ohnehin vorhandenen Leitungsdrähte des öffentlichen Stromnetzes nur zur indirekten Übertragung der mechanischen Leistung der Antriebsmaschine der WKK-Einheit auf die Wärmepumpen genutzt. Was von den WKK-Einheiten an Strom produziert wird, wird durch die WP-Anlagen wieder konsumiert. Das WKK-WP-System im Stromgleichgewicht ist „stromautonom“. Es ist deshalb bestimmt nicht sinnvoll, nur für den Ersatz der Welle durch ein elektrisches Übertragungssystem einen Strommix einzuführen. Auch weil wir zum Ersatz der Kesselheizungen ohnehin WKK-Einheiten wie auch WP-Einheiten neu bauen müssen, ist das in den Bildern 2 bis 3 gezeigte Bilanzgebiet gerechtfertigt. Ob das Bilanzgebiet dabei nur eine WKK-Einheit oder alle WKK-Einheiten mit den entsprechenden Wärmepumpen eines Aktionsgebiets (z.B. die ganze Schweiz) für die Verwirklichung des WKK-WP-Systems im Stromgleichgewicht umfasst, ist belanglos.

Im Folgenden soll keine umfassende Ökobilanz für das WKK-WP-System (vergl. [6]) aufgestellt werden. Sowohl bei WKK-Anlagen wie auch bei Wärmepumpen entsteht die mit Abstand grösste Umweltbelastung beim Betrieb der Anlagen. Nachstehend wird deshalb nur auf den CO₂-Ausstoss (globale Wirkung) und die Stickoxidemission (lokale Wirkung) eingegangen.

Selbstverständlich wirkt sich der gegenüber der Kesselheizung wesentlich höhere Nutzungsgrad des Heizsystems WKK-WP in einer entsprechenden Reduktion des Brennstoffbedarfs und damit der Kohlendioxid-Produktion auf bis zu 50% des Werts einer Kesselheizung aus: Bild 10. Der auf den Bedarf eines Heizkessels (mit einem auf den unteren Heizwert bezogenen Wirkungsgrad von 100%) bezogene Brennstoffverbrauch und damit der CO₂-Ausstoss ist bei gleicher Wärmeproduktion der Reziprokwert des Nutzungsgrads: [2], Anhang 2).

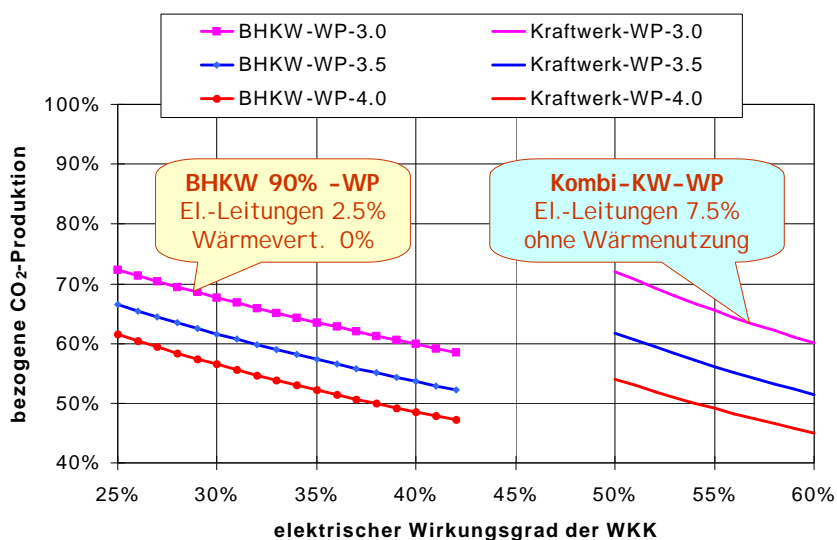


Bild 10: Kohlendioxid-Produktion von Wärmepumpenheizsystemen bezogen auf die Kohlendioxid-Produktion eines Heizkessels mit einem (auf den unteren Heizwert bezogenen) Wirkungsgrad von 100% für die Erzeugung der gleichen Nutzwärme. Parameter wie in Bild 7.

Anlass zu Bedenken gibt leider die tolerierte Stickoxidproduktion der Blockheizkraftwerke nach der neuen Luftreinhalteverordnung LRV 98 [4]: Bild 11. Sie liegt für gleiche Wärme-
produktion um das bis zu zweieinhalbfache über der Stickoxidproduktion eines Gaskessels
(Berechnungsbeispiel in [2], Anhang 3). Leider wurde hier aus wirtschaftlichen Gründen mit
der Verdreifachung des Werts nach der LRV 92 ein Schritt in die falsche Richtung unternom-
men. Der Schritt ist zwar zunächst begreiflich. Bei Magermotoren genügt zum Erreichen der
neuen Emissionsgrenzwerte ein einfacher Oxidationskatalysator zur Reduktion der Emis-
sionen an Kohlenmonoxid und unverbrannten Kohlenwasserstoffen. Entwicklungen für einen
völlig katalysatorfreien Betrieb nach der LRV 98 sind unterwegs. Man kann auch auf eine
Betriebsemissionsüberwachung verzichten, und wir haben damit im europäischen Vergleich
immer noch die strengste Regelung. Alles verständliche Argumente für den neuen NO_x -
Grenzwert von 250 mg/m_N^3 bei 5 Volumen-% O_2 . Nur muss man nun leider klar feststellen:
Die Variante eines effizienten Kombikraftwerks ohne Abwärmenutzung ist damit bei den
Stickoxidemissionen der BHKW-WP-Kombination klar überlegen! Bedenklich ist auch, dass
die LRV 98 die Emissionen stationärer Verbrennungsmotoren erst ab einer Wellenleistung
über 100 kW regelt. Wo kantonale Vorschriften nicht weitergehen, könnten Miniblockheiz-
kraftwerke nicht nur der Energieeffizienz, sondern auch der Umwelt einen Bärendienst erwei-
sen. So brachte es ein in der Schweiz angebotenes Miniblockheizkraftwerk bei einer Untersu-
chung im Auftrag des BFE auf gegenüber der LRV 98 fast die doppelte Stickoxidemission!
Die neuen Grenzwerte sind nur als Übergangsregelung akzeptabel. Auch im Rahmen der For-
schungsprojekte des Bundesamts für Energie wird intensiv nach neuen Lösungen für einen
katalysatorfreien Betrieb von Gasmotoren unterhalb der neuen Emissionsgrenzwerte gefor-
schert. Die Tabelle 1 zeigt die dem Bild 11 zugrunde liegenden Emissionswerte.

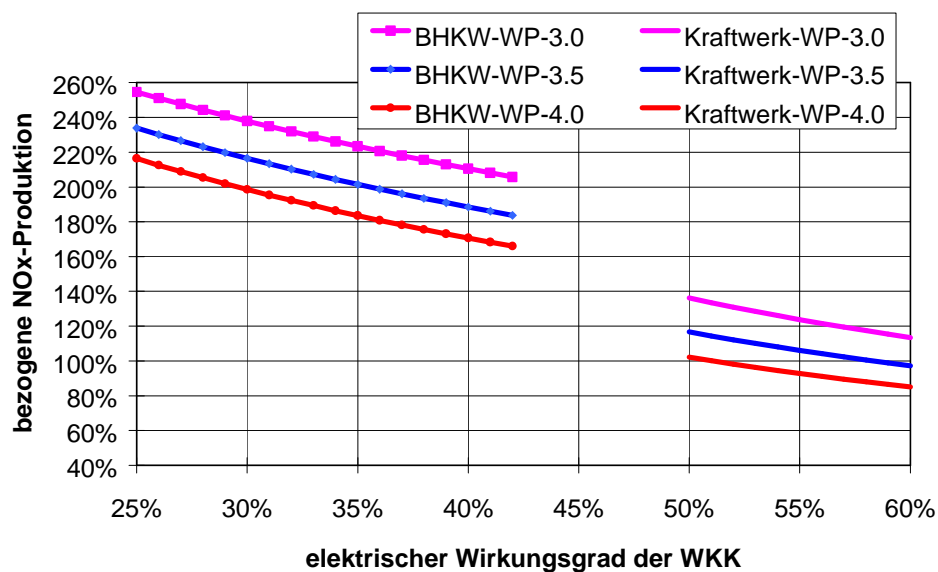


Bild 11: Maximale Stickoxid-Produktion von Wärmepumpenheizsystemen bezogen auf die Stickoxid-Produktion eines Gasheizkessels mit einem (auf den unteren Heizwert bezogenen) Wirkungsgrad von 100% für die Erzeugung der gleichen Nutzwärme. Basis: Emissionsgrenzwerte nach der LRV 98 aus der Tabelle 1. Übrige Parameter wie in Bild 7.

Tabelle 1: Maximale Stickoxid-Emissionen nach der LRV 98 [4] für Erdgas als Brennstoff. Die auf die Feuerungswärmeleistung bezogenen Werte wurden gemäss [2], Anhang 3 näherungsweise für Methan berechnet.

Verbrennungsmotor keine Vorschrift bei Feuerungswärmeleistung < 100 kW! Bezug auf die Feuerungswärmeleistung (Näherung für Methan)	250 mg/m _N ³ bei 5 vol% O ₂ (entspricht ½ TA-Luft) 282 mg/kWh
Gasturbine > 40 MW Bezug auf die Feuerungswärmeleistung (Näherung für Methan)	50 mg/m _N ³ bei 15 vol% O ₂ 151 mg/kWh
Heizkessel ≤ 350 kW Bezug auf die Feuerungswärmeleistung (Näherung für Methan)	80 mg/m _N ³ bei 3 vol% O ₂ 80.3 mg/kWh

Grosses Verbesserungspotential

Auch der beste Kessel kann nicht mehr Wärme liefern, als Brennstoffenergie in diesen gesteckt wurde. Da Verluste nicht ganz zu vermeiden sind, ist sein Nutzungsgrad also immer unter 1. Ganz anders beim WKK-WP-Heizsystem. Dieses nutzt die bei der Verbrennung bei hohen Temperaturen frei werdende Exergie [3] in einer thermischen Maschine und treibt damit Wärmepumpen an. Diese „pumpen“ Umgebungswärme auf das benötigte Temperaturniveau und ermöglichen damit Nutzungsgrade über 1.

Das [Bild 12](#) zeigt, was man mit einer Kombination einer idealen Wärme-Kraft-Kopplungsanlage (Carnot-Arbeitsmaschine) mit einer idealen Wärmepumpe (Carnot-Wärmepumpe) und idealen Wärmeübertragungsvorgängen erreichen würde. Bei einer Temperatur der Wärmequelle um 1000 °C, einer Raumtemperatur von 20°C und einer Umgebungstemperatur von 0°C ergäben verlustfreie Idealmaschinen Nutzungsgrade über 1100%. Das heisst, dass man mit diesem idealen WKK-WP-System gegenüber einer idealen Kesselheizung den Brennstoffbedarf für die gleiche produzierte Wärme wie auch den CO₂-Ausstoss um über 90% reduzieren könnte! In [2], Anhang 1 wird das Beispiel ausführlich durchgerechnet. Das Bild verdeutlicht auch, dass die Wärmepumpe den Löwenanteil an dieser enormen Aufwertung der mit dem Brennstoff zugeführten Wärme beiträgt und dass die Abwärme der idealen WKK-Anlage demgegenüber fast vernachlässigbar ist. Eine Tatsache, der wir auch bei der oben besprochenen realen Kombination von WKK-Anlagen mit Wärmepumpen in der Tendenz wieder begegnen. Die Exergienutzung ermöglicht erst die Verwendung von Umgebungswärme für die Raumheizung. Entscheidend ist deshalb eine hohe Exergienutzung der Wärme-Kraft-Kopplung (=hoher elektrischer Wirkungsgrad).

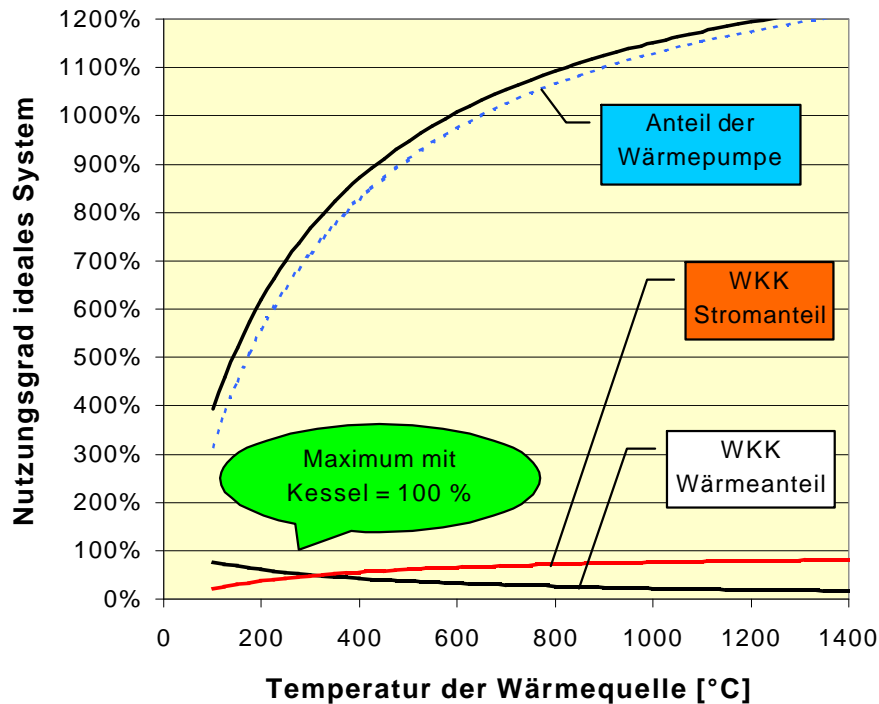


Bild 12: Nutzungsgrad bei einer Kombination einer idealen WKK-Anlage mit einer idealen Wärmepumpe für eine Raumtemperatur 20°C und eine Umgebungstemperatur von 0°C.

Literatur

- [1] Rognon,F.: Bereichsplan 96-99, Umgebungwärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Bundesamt für Energie 1997, ENET-Nr. 610005/9.
- [2] Zogg, M.: Wärme-Kraft-Kopplung in Kombination mit Kompressionswärmepumpen, Tagungsband zur 5.UAW-Tagung „Wärme-Kraft-Kopplung - heute und morgen“, Bundesamt für Energie 1998, ENET-Artikelnummer 30743 .
- [3] Baer, H.-D.: Thermodynamik, 8.Aufl., Springer-Verlag, Berlin u.a.O. 1992.
- [4] LRV 98: Schweizerische Luftreinhalteverordnung vom 16.Dezember 1985 mit der Änderung vom 15.Dezember 1997.
- [5] Zogg, M.: Kleinsysteme für die Raumheizung - Nutzungsgrad über 150%?, Gas-Wasser-Abwasser, 76(96)3, 230/237.
- [6] Rognon, F.: Ökobilanzen von Wärmepumpen, Bundesamt für Energie 1998, <http://www.waermepumpe.ch/oek.html>