

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Band:** 108 (1990)  
**Heft:** 43

**Artikel:** Wärmekraftkopplung: neue Chancen für eine bewährte Technologie  
**Autor:** Eicher, Hanspeter  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-77538>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 04.10.2024

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Wärme­kraft­kopplung

Neue Chancen für eine bewährte Technologie

**Blockheizkraftwerke und andere Wärme­kraft­kopplungsanlagen (WKK-Anlagen) bilden in Kombination mit elektrischen Wärmepumpen, elektrisch betriebenen Verkehrsmitteln oder durch den Ersatz fossilthermischer Kraftwerke eine hervorragende Möglichkeit zur Einsparung grosser Mengen fossiler Energieträger. Durch den weitgehenden Ausbau des Potentials für WKK-Anlagen könnten rund 15% der fossilen Energieträger (1985) sowie eine entsprechende Menge CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> eingespart werden. Dies zeigt, dass die WKK-Anlagen weder das Energie- noch das CO<sub>2</sub>-Problem allein lösen; sie könnten jedoch einen nicht vernachlässigbaren Beitrag dazu leisten.**

## Bedeutung der Wärme­kraft­kopplung

In der Industrie hat die Wärme­kraft­kopplung mittels Dampfturbinen lange Zeit die Aufgabe einer gleichzeitigen

VON HANSPETER EICHER,  
LIESTAL

Versorgung mit Dampf und Elektrizität übernommen. Im Vordergrund stand dabei die sichere und preisgünstige eigene Versorgung mit den benötigten Energieträgern. Mit dem Aufkommen der grossen thermischen und Wasserkraftwerke und dem Ausbau einer sicheren Elektrizitätsverteilung haben diese Aspekte und dementsprechend die Wärme­kraft­kopplung an Bedeutung verloren.

In den letzten zwanzig Jahren sind jedoch neben einer sicheren Energieversorgung zunehmend andere Faktoren in den Vordergrund getreten. Es ist heute ersichtlich, dass durch die Nutzung nicht erneuerbarer Energieträger folgende Probleme entstehen:

□ Wir verbrauchen die endlichen Ressourcen von fossilen Energieträgern und Uran ohne Rücksicht auf unsere Nachkommen.

□ Wir belasten die Umwelt durch zahlreiche toxische Stoffe, z.B. Stickoxide, Schwefeldioxide und Kohlenwasserstoffe; dabei bilden sich Sekundärschadstoffe wie z.B. Ozon, die unsere Lebensbedingungen ebenfalls verschlechtern.

□ Bei der Verbrennung fossiler Energieträger werden grosse Mengen CO<sub>2</sub> emittiert. Dadurch steigt die Gefahr einer globalen Erwärmung [1].

□ Wir riskieren eine grossflächige radioaktive Verstrahlung bei Unfällen in Kernkraftwerken oder bei Kriegshandlungen. Die Endlagerung radioaktiver Stoffe ist problematisch.

Diese noch unvollständige Liste zeigt, dass es dringend notwendig ist, den Verbrauch von fossilen Energieträgern und Uran möglichst gering zu halten. Dies kann durch Energieeinsparung, rationale Energieumwandlung, sowie durch den Einsatz erneuerbarer Energieträger erfolgen. Allein bei der Umwandlung von Primärenergie in Nutzenergie gehen in der Schweiz rund 60% des ursprünglichen Energieinhaltes durch geringe Wirkungsgrade verloren (Bild 1).

Eine Verbesserung dieser Umwandlungswirkungsgrade muss neben der Energieeinsparung und der Nutzung erneuerbarer Energieträger eines der vordringlichen Ziele einer Politik der rationellen und umweltfreundlichen Energienutzung sein. Leider ist in den letzten dreissig Jahren in der Schweiz das Gegenteil eingetreten (Bild 2).

Wärme­kraft­kopplung ist das Schlüsselwort für die Verbesserung der Umwandlungswirkungsgrade. Blockheizkraftwerke (BHKW) sind Anlagen für den dezentralen Einsatz der Wärme­kraft­kopplungs-Technologie. In diesem Beitrag wird gezeigt, wie damit, in Kombination mit anderen fortgeschrittenen Technologien der Energienutzung, Energie eingespart sowie CO<sub>2</sub>- und konventionelle Schadstoffemissionen stark reduziert werden können.

## Was ist ein Blockheizkraftwerk?

Erstens ist es ein Heizkraftwerk, das heisst ein Kraftwerk, dessen unvermeidliche Abwärme nicht an die Umgebung abgegeben wird (Kühltürme), sondern zu Heizzwecken verwendet wird. Gegenüber konventionellen Kraftwerken werden dabei bis zu 60% Primärenergie eingespart. Zweitens ist es kompakt (Block), benötigt wenig Platz für den Einbau und ist daher für kleinere dezentrale Anlagen mit einer elektrischen Leistung von 20 kW bis 10 MW geeignet.

Am häufigsten eingesetzt werden heute Gasmotor-Blockheizkraftwerke im Wohn- und Dienstleistungsbereich. Der Kanton Zürich hat das Ingenieurbüro des Schreibenden beauftragt, ein Standard-Blockheizkraftwerk zu entwickeln, das sehr kostengünstig hergestellt werden kann [2]. Bild 3 zeigt ein entsprechendes Modul mit einer elektrischen Leistung von 200 kWe. Für die Erzeugung von Prozesswärme in der Industrie werden Gasturbinen eingesetzt.

Der produzierte Strom wird entweder zur Deckung des Eigenbedarfs verwendet oder ins Netz des lokalen Elektrizitätswerkes zurückgespielen. Die Abwärme aus dem Kühlwasser des Motors und den Abgasen wird vollumfänglich zu Heizzwecken verwendet.

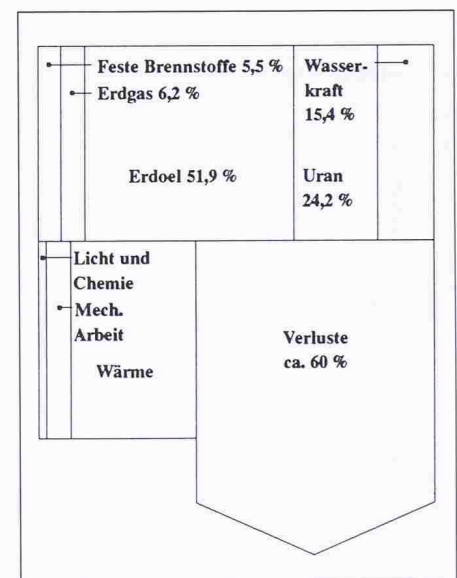


Bild 1. Energieverluste bei der Umwandlung von Primärenergie in Nutzenergie



Bild 2. Entwicklung des Umwandlungswirkungsgrades von Primärenergie in Nutzenergie

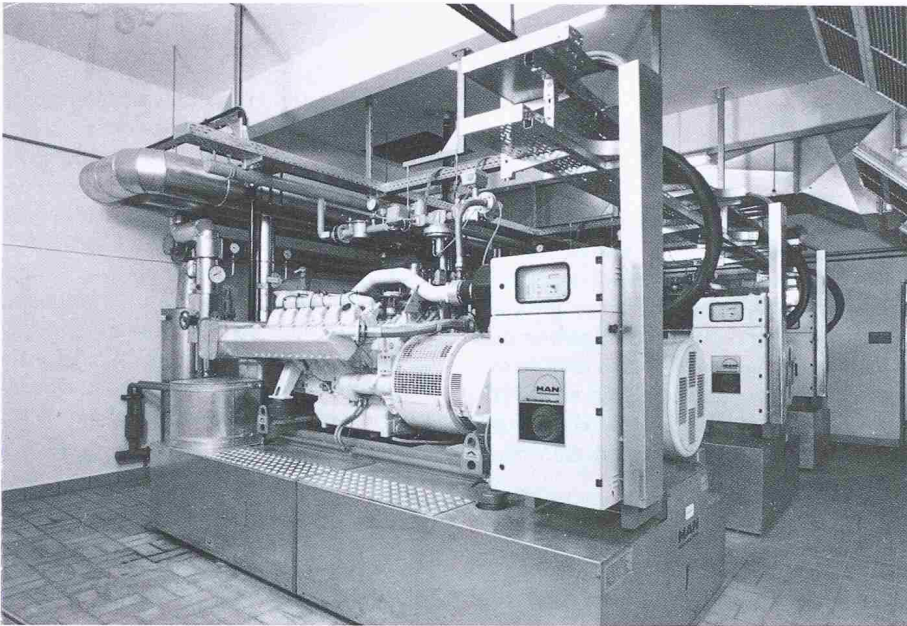


Bild 3. 3 MAN Standard BHKW Module von je 210 kW elektrischer Leistung (Photo MANTechnologie AG)

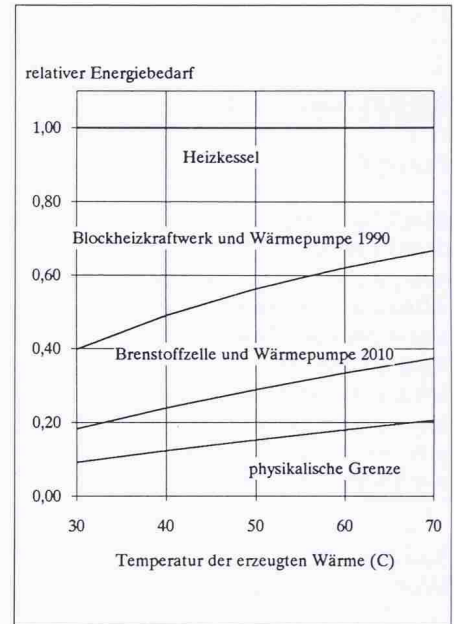


Bild 5. Energieverbrauch moderner Heizungstechnologien im Vergleich zum Heizkessel

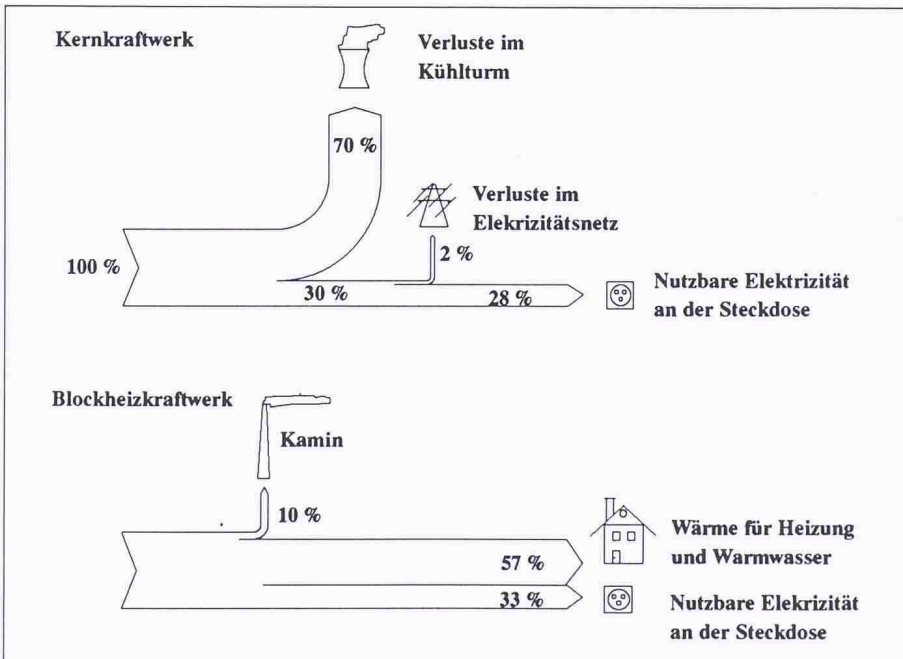


Bild 4. Der Wirkungsgrad einer WKK-Anlage beträgt bis zu 90% im Vergleich zu einem nuklearthermischen Kraftwerk, das etwa 28% erreicht

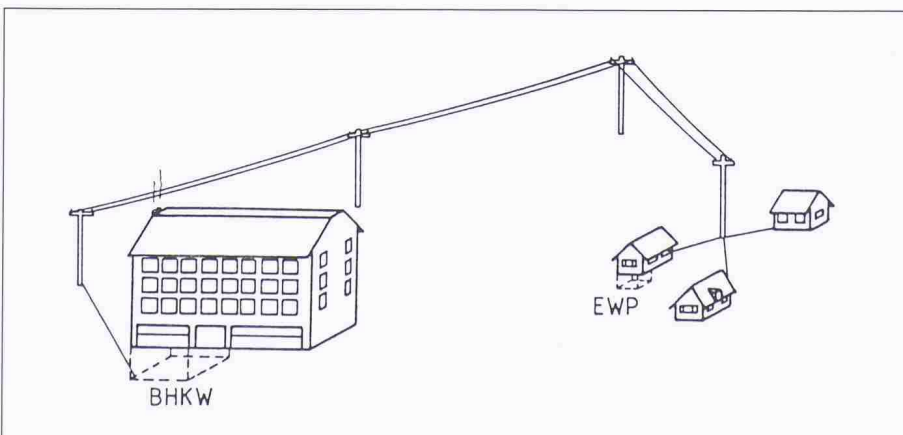


Bild 6. Koppelung von BHKWs und elektrischen Wärmepumpen über das elektrische Niederspannungsnetz

### Warum sind Blockheizkraftwerke sinnvoll?

#### Bessere Ausnutzung der Primärenergie bei der Stromproduktion

Im Gegensatz zu thermischen Kraftwerken wird bei Wärmekraftkopplungsanlagen die eingesetzte Primärenergie wesentlich besser ausgenutzt, weil die aus physikalischen Gründen unvermeidbare Abwärme zu Heizzwecken genutzt wird. Gegenüber konventionellen thermischen Kraftwerken lassen sich somit 40-60% Primärenergie einsparen (Bild 4).

#### Heizen mit 200% Wirkungsgrad

Mehr als 80% der in der Schweiz verbrauchten Nutzenergie geht auf das Konto Wärme, aufgeteilt auf die Bereiche Prozesswärme, Raumwärme und Warmwasser. Der grösste Teil dieser Wärme wird mit öl- oder gasbefeuerten Heizkesseln erzeugt, die grundsätzlich nie einen Wirkungsgrad von mehr als 100% aufweisen können.

Bild 5 zeigt den Energieverbrauch verschiedener Heizungstechnologien bei der Bereitstellung von Raumwärme. Blockheizkraftwerke in Kombination mit elektrischen Wärmepumpen verbrauchen nur 40 bis 60% derjenigen Menge an Erdgas oder Erdöl, die ein konventioneller Heizkessel benötigt. In Zukunft wird es sogar möglich sein, durch den Einsatz von Brennstoffzellen und verbesserten Wärmepumpen nur 20-30% des Energieverbrauchs eines Heizkessels zu verbrauchen. Dies zeigt das grosse Sparpotential, das durch die geschickte Anwendung von Blockheiz-

kraftwerken und elektrischen Wärmepumpen realisiert werden kann.

Wie soll so ein System funktionieren? In allen Gebäuden mit einem genügend grossen Wärmeleistungsbedarf (heute ab rund 300 kW) können Gasmotor-Blockheizkraftwerke eingesetzt werden. Der Gasmotor treibt einen mit dem Niederspannungsnetz gekoppelten Generator an, und mit der anfallenden Abwärme wird das Gebäude beheizt. Der so erzeugte Strom wird für den Antrieb von kleinen bis mittleren elektrischen Wärmepumpen verwendet, die sich optimalerweise im gleichen Netzteil befinden. Diese kleineren Wärmepumpen verwenden grosse Mengen von Umweltwärme zur Beheizung des Hauses (Bild 6).

Dass diese Kombination von Wärmekraftkopplungsanlagen mit elektrischen Wärmepumpen grundsätzlich funktioniert, zeigt die Tatsache, dass zurzeit in der Schweiz pro Jahr rund 3500 elektrische Wärmepumpenanlagen installiert werden. Das heisst, dass pro Jahr rund 30 MW elektrische Leistung neu benötigt wird. Das einzige was fehlt, ist der Bau von jährlich 200 Standard-Blockheizkraftwerken, um den Stromverbrauch dieser Wärmepumpen zu decken.

**Elektroautos und öffentlicher Verkehr**

Wir verbrauchen einen wesentlichen Teil der fossilen Energieträger für unsere Mobilitätsbedürfnisse. Dabei gehen bis zu 85% der Energie in Form von nutzloser Abwärme an die Umgebung verloren. Dies können wir uns auf die Dauer nicht mehr leisten. Das Verkehrsmodell der Zukunft könnte vermehrt auf der Basis der Elektrizität aufgebaut werden. Für den Nahverkehr können Elektrofahrzeuge und für mittlere oder grössere Distanzen Hybridautos (Kombination von Elektro- und Benzinauto) sowie die Eisenbahn vermehrt eingesetzt werden. Blockheizkraftwerke liefern einen Teil der dazu benötigten Elektrizität und beheizen mit ihrer Abwärme gleichzeitig Gebäude im Wohn-, Dienstleistungs- und Energiebereich.

Zur Illustration der Wirkung dieser neuen kombinierten Heizungstechnologie und der Einsatzes von Elektroautos wird der Energieverbrauch einer typischen Schweizer Familie anhand von zwei Modellen erläutert. Bild 7 zeigt den Heizenergieverbrauch mit heutiger Heizkesseltechnologie, Bild 8 denjenigen bei einem kombinierten Einsatz von Blockheizkraftwerken, Wärmepumpen und einem Elektromobil. Die moderne energiegerechte Familie wird dabei nur noch rund 36% des Primärenergieverbrauches einer heutigen Durchschnittsfamilie benötigen.

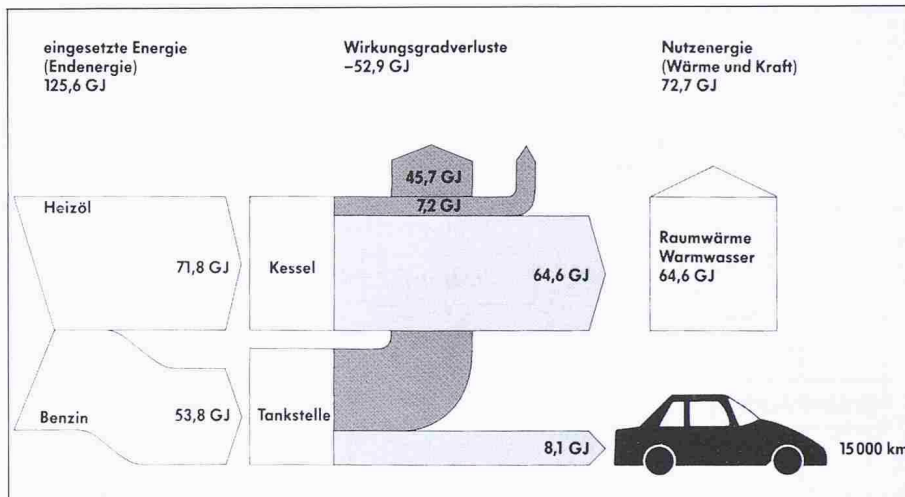


Bild 7. Energieverbrauch für die Raumheizung und das Auto einer Schweizer Familie im Jahre 1989

**Energieverbrauch und Schadstoffemissionen**

Das technische Potential für Blockheizkraftwerke in Form von Gasmotoren, Gasturbinen und Kombiheizkraftwerken beträgt in der Schweiz rund 2500 MW [3], [4]. Wird dieses Potential zu 80% ausgeschöpft, so können bei 4000 Betriebsstunden pro Jahr rund 8 TWh elektrische Energie produziert werden, was rund 20% des schweizerischen Elektrizitätsverbrauches bedeutet. Wird die so produzierte Elektrizität zu zwei Drittel für den Antrieb elektrischer Wärmepumpen (= 2,5) und ein Drittel für Elektro- oder Hybridautos verwendet (spez. Verbrauch 15 kWh/100 km), so ergibt sich eine Einsparung von rund 22 TWh oder rund 15% des schweizerischen Endverbrauches an fossilen Energieträgern. Die Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstosses wird aufgrund der verstärkten Erdgasnutzung sogar noch höher ausfallen. Eben-

falls eine starke Verringerung wird bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen erreicht (rund 15- bis 20% im Jahre 2000).

**Technologie der Blockheizkraftwerke**

**Allgemeines**

Im Gegensatz zu früher werden heute im Bereich der Wärmekraftkopplung praktisch ausschliesslich erdgasbetriebene Motoren oder Gasturbinen eingesetzt. Vermehrt stehen auch Kombiheizkraftwerke für grössere Anlagen zur Verfügung. Dieser Beitrag beschränkt sich jedoch im wesentlichen auf Gasmotoren und Gasturbinen-Blockheizkraftwerke.

Der überwiegende Teil der neuen Blockheizkraftwerke wird mit Erdgas als Brennstoff betrieben. Als Alternative steht heute jedoch auch Propan zur Verfügung. Dies ist insbesondere von

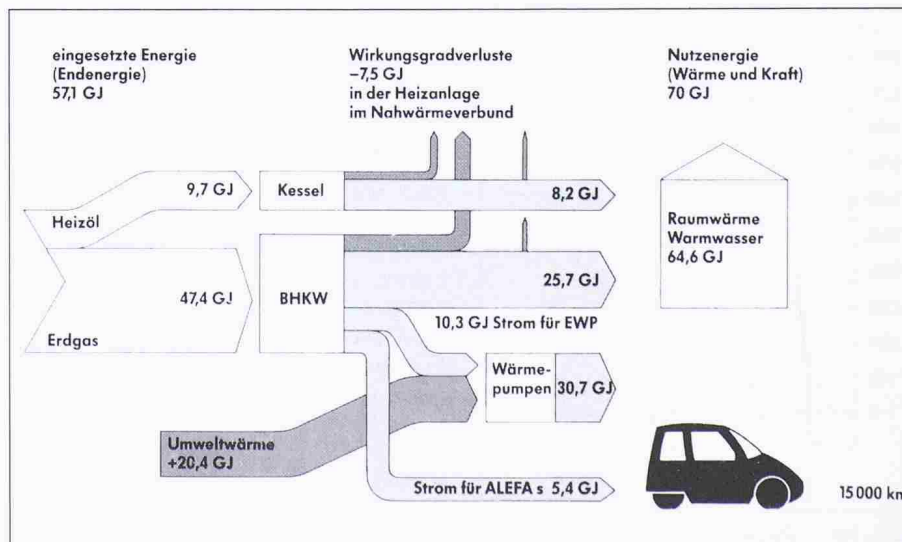


Bild 8. Zukünftiger Energieverbrauch einer Schweizer Familie beim Einsatz von Blockheizkraftwerken, Elektrowärmepumpen und Elektroautos

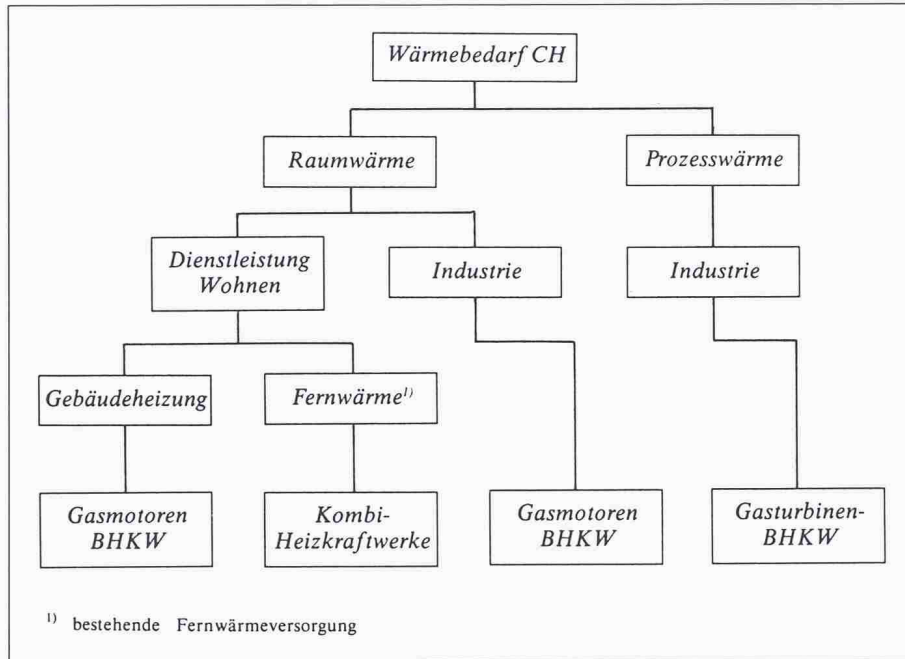


Bild 9. Einsatzgebiete für WKK-Anlagen in der Schweiz

Vorteil, falls die Anlagen gleichzeitig Notstrombedürfnisse abdecken müssen. Blockheizkraftwerke mit Dieselmotorantrieb werden zurzeit, vor allem wegen der hohen Schadstoffemissionen, nur in sehr geringem Umfang eingesetzt. Es sind aber Forschungsprojekte im Gange, die unter Umständen neue Aspekte ergeben werden [11], [12].

### Gasmotoren-Blockheizkraftwerke

Industrielle Gasmotoren, die eine Lebensdauer von mindestens 100 000 Betriebsstunden haben, stehen für den Leistungsbereich von 15 kWe bis 1000 kWe zur Verfügung. Motoren, die mit Dreiwegkatalysatoren ausrüstbar sind, gibt es jedoch nur bis rund 1000 kWe. Grössere Anlagen müssen aus mehreren Modulen zusammengesetzt wer-

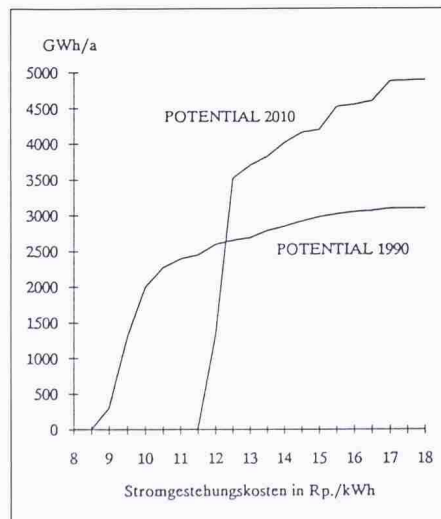


Bild 10. Elektrizitätserzeugungspotential in Funktion der Gestehungskosten für WKK-Anlagen im industriellen Bereich

den. Wenn immer möglich, sollten jedoch nicht mehr als drei Module verwendet werden.

In Zukunft ist die weitere Standardisierung der Anlagen und des Planungsvorganges wichtig. Ein bedeutender Schritt wurde mit dem für den Kanton Zürich entwickelten Standard-Blockheizkraftwerk gemacht.

#### Das Standard-Blockheizkraftwerk

Im Auftrag des Kantons Zürich wurden Unterlagen für die Standardisierung von Blockheizkraftwerken mit elektrischen Leistungen von 150 bis 200 kW erarbeitet [2]. Die Unterlagen setzen sich aus folgenden Teilen zusammen:

- Planungsgrundlagen für den Ingenieur
- Pflichtenheft und Submissionsunterlagen
- Anleitung für die Abnahme und Betriebsüberwachung der Anlagen
- Richtlinien für den Abschluss von Serviceverträgen
- Einholen und Bewerten von Offerten bei BHKW-Herstellern

Das Standard-Blockheizkraftwerk ermöglicht es dem Hersteller, grössere Stückzahlen in gleicher Ausführung zu bauen. Der Ingenieur seinerseits spart einen Teil des Planungsaufwandes für die Durchführung der Submission, die Erstellung des Pflichtenheftes sowie die Formulierung von Garantiewerten. Die zusätzlich zur Verfügung stehende Zeit soll für eine sorgfältige Erfolgskontrolle und Betriebsoptimierung eingesetzt werden. Im Vergleich zu konventionellen Blockheizkraftwerken ergibt sich beim Standard-Blockheizkraftwerk eine Kostenreduktion von rund 30%.

### Gasturbinen-Blockheizkraftwerke

Für industrielle Einsatzgebiete oder für grössere Wärmeversorgungen mit Temperaturen von mehr als 120 °C stehen Gasturbinen im Vordergrund. Sinnvollerweise werden solche Anlagen erst ab einer elektrischen Leistung von 1 MW eingesetzt.

Die Standardisierung von Gasturbinen-Blockheizkraftwerken ist noch nicht so weit fortgeschritten wie diejenige von Gasmotoren. Die Firmen Turbomach und Dimag bieten jedoch anschlussfertige Anlagen in Containern für den schlüsselfertigen Einbau an.

### Einsatzgebiete

#### Allgemeines

Die massgebende Aufgabe von Blockheizkraftwerken ist die Erzeugung von Wärme, bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Deckung des Eigenstrombedarfes. Das Elektrizitätserzeugungspotential ist deshalb durch den Wärmebedarf der zu versorgenden Objekte bestimmt. Bild (9) zeigt eine Strukturierung der möglichen Einsatzgebiete für Wärmekraftkopplungsanlagen in der Schweiz. Dies zeigt, dass neben den Gasmotor-Blockheizkraftwerken weitere Technologien der Wärmekraftkopplung für andere Einsatzgebiete existieren.

Der wesentliche Wärmebedarf der Schweiz wird für Raum- und Prozesswärme benötigt. Die Raumwärme teilt sich in die Anwendungssektoren Wohnen, Dienstleistungen sowie Industrie und Gewerbe auf. Dort, wo in der Industrie Prozesswärme durch WKK bereitgestellt wird, lässt sich die Raumwärme mit den gleichen Anlagen erzeugen.

Gasmotoren können vorwiegend in grossen Heizzentralen z.B. in Überbautungen, Schulhäusern, Bürogebäuden usw. eingesetzt werden. Ein wesentlich grösseres Potential ergibt sich, wenn grössere benachbarte Gebäude durch kurze Verbindungsleitungen zusammengekoppelt werden. Diese Wärmeverteilnetze dürfen jedoch nicht zu umfangreich ausfallen, da sonst die Wirtschaftlichkeit der Anlagen im allgemeinen abnimmt. Die Zukunft der Wärmekraftkopplung im Wohn- und Dienstleistungsbereich wird daher eher kleineren Anlagen mit elektrischen Leistungen zwischen 100 kW und 1 MW gehören. Dies um so mehr, als sich dabei nur wenig Überschneidungen mit dem bereits gut ausgebauten Erdgasnetz ergeben.

### Blockheizkraftwerke in der Industrie

#### Potential und Wirtschaftlichkeit

Das Hauptpotential in der Industrie gehört den Gasturbinen für die Erzeugung von Prozesswärme. Es ergibt sich primär durch den Ersatz bestehender Dampfturbinen in den Branchen Papier und Chemie durch Gasturbinen sowie den zunehmenden Wärmebedarf dieser Branchen. Gerade in der Industrie sind durch die LRV und vermehrt noch durch die kantonalen Massnahmenpläne Sanierungen von bestehenden Dampferzeugungsanlagen zu erwarten. In diesem Zusammenhang ist es empfehlenswert, jeweils den Einsatz einer eigenen Gasturbine zu prüfen.

Bild 10 zeigt das Potential für Gasturbinen-Blockheizkraftwerke in der Schweizer Industrie gemäss [4] für die Jahre 1990 und 2010. Diese Werte wurden im Rahmen der EGES-Szenarien [9] ermittelt und gelten für das Moratoriumsszenario bei hohem Wirtschaftswachstum. Dieses Bild zeigt deutlich, dass das Potential in der Industrie von 1990 bis 2010 zunimmt. Die Stromgestehungskosten (real) liegen für den grössten Teil des Potentials zwischen 9 und 13 Rp./kWh trotz Erdgaspreisen von 6 Rp./kWh (real) ab dem Jahre 2000. Im Jahre 1990 beträgt das Potential etwa 2500 GWh, was einer elektrischen Leistung von 400 bis 500 MW entspricht. Im Jahre 2010 ergeben sich etwa 4000 GWh.

Neben dem Einsatz von Gasturbinen für die Erzeugung von Prozesswärme stehen im Bereich der Erzeugung von Raumwärme vor allem Gasmotoren im Vordergrund. Je nach Grösse der Anlage kann mit Stromgestehungskosten von 8 bis 12 Rp./kWh bei einer Amortisationszeit von 15 Jahren und den sonst üblichen momentan geltenden Randbedingungen gerechnet werden. Vergleicht man dies mit den von vielen Industriebetrieben bezahlten Elektrizitätstarifen, so sieht man, dass die betriebswirtschaftliche Attraktivität im Moment noch nicht allzu hoch ist. Verglichen mit den Stromgestehungskosten von anderen neuen thermischen Kraftwerken in der Schweiz ist die Wirtschaftlichkeit jedoch sehr gut, wenn man bedenkt, dass diese Anlagen vor allem Strom im Winterhalbjahr erzeugen.

### Blockheizkraftwerke im Wohn- und Dienstleistungsbereich

Im Dienstleistungsbereich können Blockheizkraftwerke in vielen Fällen bereits bei einem Wärmeleistungsbedarf ab 500 kW wirtschaftlich eingesetzt werden, da der Elektrizitätsver-

brauch und die Tarife meistens recht hoch liegen und somit eine günstige Voraussetzung für den Einsatz solcher Anlagen bilden. Besonders vorteilhaft ist es, wenn das BHKW gleichzeitig als Notstromgruppe eingesetzt werden kann. Wahlweise kann in diesem Fall auch Propan anstelle von Erdgas als Betriebsstoff verwendet werden. Typische Einsatzgebiete im Dienstleistungsbereich sind Schulhäuser, Verwaltungsgebäude aller Art, Spitäler, Heime, Hotels, Banken und Versicherungen. Bei Gebäuden mit hohen inneren Wärmelasten kann jedoch der Einsatz aufgrund ungenügender Laufzeiten unwirtschaftlich sein.

Im Wohnbereich stehen vor allem grössere Einzelüberbauungen, benachbarte Mehrfamilienhäuser oder grössere Einfamilienhäusersiedlungen im Vordergrund. In Einfamilienhäusersiedlungen können bereits Anlagen mit einer elektrischen Leistung von 40 kWe wirtschaftlich sein, während in grösseren Überbauungen im allgemeinen Anlagen unter 100 kWe nicht rentabel betrieben werden können. Optimal scheint uns eine Grösse von 150 bis 200 kWe. Dies bedingt einen Wärmeleistungsbedarf der Gebäude von rund 700 kW bis 1 MW. Die Erfahrung zeigt, dass solche Anlagen meistens in den bestehenden Heizzentralen ohne grossen baulichen Aufwand untergebracht werden können. Benachbarte Gebäude lassen sich oft mit kurzen Wärmeverteilungen an die Hauptzentrale anschliessen. Solche «dezentralisierte» Anlagen haben gegenüber ganzen Quartierheizungen mit mehreren MW Leistung den Vorteil, dass sie wesentlich kostengünstiger sind, da im allgemeinen die baulichen Aufwendungen und die Kosten für die Wärmeverteilung wesentlich geringer ausfallen.

#### Das Potential

Die Prognos AG in Basel hat im Rahmen einer nationalen Studie [3] das Po-

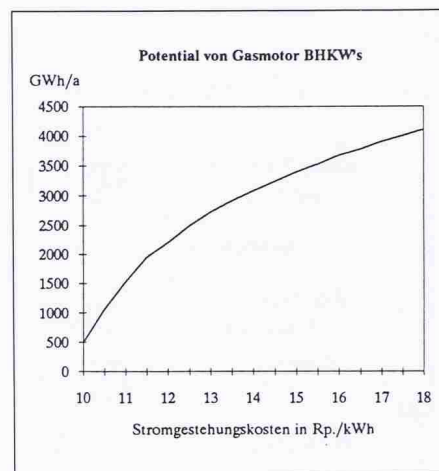


Bild 11. Potential der jährlichen Stromerzeugung von Gasmotor-BHKW's in der Schweiz in Funktion der Stromgestehungskosten

tential von Gasmotor-BHKW's in der Schweiz mit etwa 1000 MW angegeben. Anhand einer Heizanlagenstatistik der öffentlichen Gebäude der Stadt Zürich haben wir die Grössenverteilung potentieller BHKW-Anlagen ermittelt. Jeder Anlagengrösse wurden spezifische Stromgestehungskosten aufgrund konkreter Projekte aus der Ingenieurpraxis zugrundegelegt.

Verrechnet man die spezifischen Stromgestehungskosten in Funktion der Anlagengrösse mit dem Potential, so ergibt sich das Potential in Abhängigkeit der Elektrizitätsgestehungskosten, wie es in Bild (11) dargestellt ist. Diese Graphik zeigt, dass etwa die Hälfte des schweizerischen Potentials für BHKW's (550 MW Leistung, 2200 GWh/a) mit Stromgestehungskosten bis zu 12 Rp./kWh erzeugt werden könnte. Basis dieser Berechnungen bilden ein Gaspreis von 3 Rp./kWh (Ho), eine Kapitalverzinsung von 5%, Wartungskosten von 2,5 Rp./kWh plus 1% der gesamten Investitionskosten sowie eine jährliche Laufzeit von 4000 h.

Anlagentyp	Brennstoff	NO <sub>x</sub> [g/GJ]	CO [g/GJ]	CH <sup>2</sup> [g/GJ]	CO <sub>2</sub> [kg/GJ]	SO <sub>2</sub> [g/GJ]	Fst <sup>4)</sup> [g/GJ]
Gasmotor <sup>1)</sup>	Erdgas	10	30	8 <sup>5)</sup>	60	0	6)
Kessel	Erdgas	45	30	2 <sup>5)</sup>	60	0	0
Kessel	Heizöl EL	55	50	15 <sup>3)</sup>	74	94	4
Kessel Low-NO <sub>x</sub> <sup>7)</sup>	Erdgas	20	30	2 <sup>5)</sup>	60	0	0
Kessel Low-NO <sub>x</sub> <sup>7)</sup>	Heizöl EL	30	50	15 <sup>3)</sup>	74	94	4
Gasturbine	Erdgas	30	50	5 <sup>5)</sup>	60	0	0

Tabelle 1. Emissionsfaktoren moderner Feuerungsanlagen

<sup>1)</sup> mit Dreiwegkatalysator im Stationärbetrieb nach 3000 bis 4000 Betriebsstunden  
<sup>2)</sup> ohne Methan  
<sup>3)</sup> auch höhere Kohlenwasserstoffe mit höherem Gefährdungspotential  
<sup>4)</sup> Feststoffe, Gefährlichkeit je nach Brennstoff verschieden  
<sup>5)</sup> nur Kohlenwasserstoff bis C<sub>4</sub>H<sub>x</sub>  
<sup>6)</sup> verbrannte Schmierölanteile  
<sup>7)</sup> keine Langzeiterfahrungen

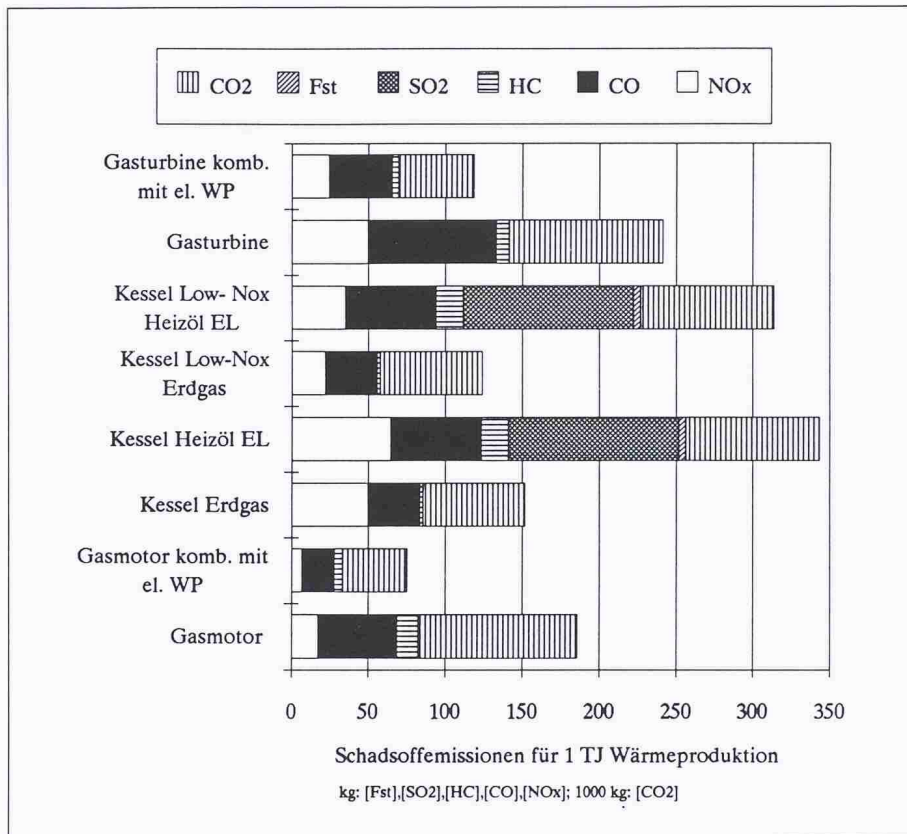


Bild 12. Schadstoffemissionen verschiedener Feuerungssysteme

**Umweltverträglichkeit**

In erster Linie erfolgt ein Vergleich der Emissionen von Heizkesselanlagen mit den Schadstoffemissionen aus Gasmotoren mit Dreiwegkatalysatoren und

Gasturbinen mit sekundärer Entstickung. Tabelle (1) zeigt die spezifischen Emissionen entsprechender Anlagen. Die angegebenen Werte stammen aus den Publikationen [10] und [4]. Die Angaben gelten für den stationären Betriebszustand. Gasmotoren und Gastur-

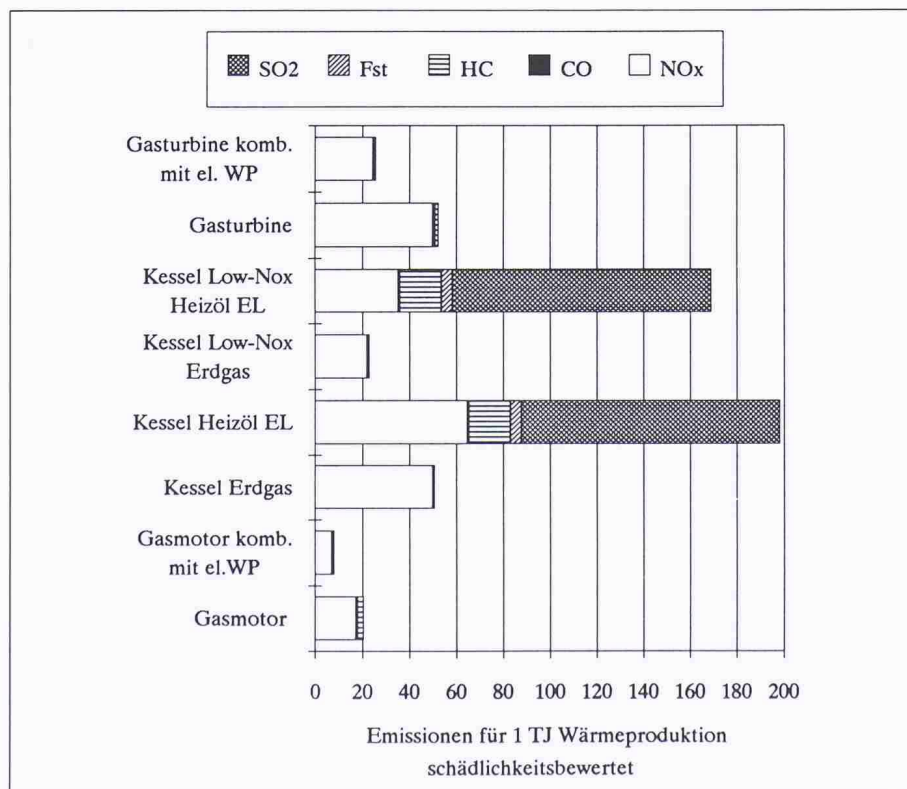


Bild 13. Schädlichkeitsbewertete Schadstoffbilanz verschiedener Wärmeerzeugungstechnologien

binen weisen im Anfahrbetrieb zurzeit noch erhöhte NO<sub>x</sub> und Kesselanlagen erhöhte CH-Emissionen auf. Über Alterungseffekte ist bei Low-NO<sub>x</sub>-Brennern, Gasturbinen und Gasmotoren mit Dreiwegkatalysatoren noch zu wenig bekannt. Eine Anlage in Deutschland wies nach mehr als 15 000 Betriebsstunden immer noch Konversionsraten von über 95% für NO<sub>x</sub> auf. In der Schweiz läuft zurzeit ein Forschungsprojekt das dieser Fragestellung im Detail nachgeht.

In einer abschliessenden Betrachtung sollen nun verschiedene Technologien bezüglich ihrer Umweltverträglichkeit einander gegenübergestellt werden. Es werden folgende Systeme miteinander verglichen:

- Kondensationskessel mit Erdgas mit einem Jahresnutzungsgrad von 90%, mit konventionellem bzw. Low-NO<sub>x</sub>-Brenner.
- Kessel mit Heizöl EL einmal mit konventionellem Brenner, einmal mit Low-NO<sub>x</sub>-Brenner; Jahresnutzungsgrad 85%.
- Industrielle Feuerung zur Dampferzeugung mit Heizöl EL (Dampfkessel); Jahresnutzungsgrad 85%.
- Gasmotor (Erdgas oder Propan) mit Dreiwegkatalysator und nachgeschaltetem Kondensator oder Wärmepumpe zur Rückgewinnung der Strahlungswärme des Motors; Jahresnutzungsgrad 90%.
- Gasturbine mit Erdgas oder Propan und sekundärer Entstickung mit Ammoniak; Jahresnutzungsgrad 85%.

Ausgehend von diesen Grundlagedaten haben wir die Schadstoffemissionen berechnet, die für die Erzeugung einer GWh (Gigawattstunde) Wärmeenergie emittiert werden. Bei der Gasturbine und dem Gasmotor wird die erzeugte Elektrizität einmal zum Antrieb von Elektrowärmepumpen mit einer Jahresarbeitszahl von 2,5 verwendet, das andere Mal in der Schadstoffbilanz nicht berücksichtigt, d.h. als schadstofffrei angenommen. Unter diesen Voraussetzungen ergeben sich Bilanzen gemäss Bild 12.

Dies zeigt, dass der Gasmotor allein höhere spezifische Emissionen aufweist, als der Low-NO<sub>x</sub>-Gaskessel, da die Emissionen nur auf die Wärmeenergie bezogen sind, d.h., dass der Gasmotor «schadstofffreie» Elektrizität produziert. Wird diese elektrische Energie für den Antrieb von Elektrowärmepumpen (Gasmotor, kombiniert mit el. WP) benutzt, so zeigt sich, dass dieses System nicht nur wesentlich weniger Stickoxide, sondern auch deutlich weniger CO<sub>2</sub> als der Low-NO<sub>x</sub>-Gaskessel produziert. Wie schon im ersten Teil dieses Beitrags

Schadstoff	Bewertungsfaktor
NO <sub>x</sub> (95% NO)	1
CO	0,0125
CH (ohne Methan)	
- Brennstoff Öl	1
- Brennstoff Gas	0,2
SO <sub>2</sub>	1
Feststoffe	1

Tabelle 2. Bewertungsfaktoren für Schadstoffe aus Öl- und Gasfeuerungen

ges ausgeführt, ergeben sich dadurch bedeutende Möglichkeiten zur rationalen, umweltfreundlichen Energienutzung und ein nicht vernachlässigbaren Beitrag zur Verringerung des CO<sub>2</sub>-Problems.

Nicht alle Emissionen sind gleich schädlich; es drängt sich daher eine Bewertung auf. Als Mass für die Schädlichkeit der verschiedenen Schadstoffe können die Immissionsgrenzwerte gemäss Luftreinhalteverordnung (LRV) betrachtet werden: Je höher die Schädlichkeit des Schadstoffes ist, desto kleiner ist der Immissionsgrenzwert gemäss LRV. In der LRV sind Immissionsgrenzwerte für Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Kohlenmonoxid (CO) und Feststoffe vorhanden. Die Bewertungsfaktoren gemäss Tabelle 2 sind proportional zu den Immissionsgrenzwerten der LRV. Mit diesen Bewertungsfaktoren kann die schädlichkeitsbewertete Schadstoffbilanz erstellt werden (Bild 13).

Insgesamt kann daraus gefolgert werden, dass sich Gasmotoren mit Dreiwegkatalysatoren mindestens ebenso umweltfreundlich wie moderne Low-NO<sub>x</sub>-Heizungen betreiben lassen. Beim Energieverbrauch und bei der CO<sub>2</sub>-Emission können durch die Kombination von Blockheizkraftwerken mit Elektrowärmepumpen wesentliche Verbesserungen gegenüber konventionellen Heizkesseln erreicht werden.

### Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit von Blockheizkraftwerken hängt stark vom Wert der erzeugten Elektrizität ab. In der heutigen Praxis ergeben sich dabei grosse Unterschiede. Die Bedingungen sind überall dort vorteilhaft, wo der Betreiber selbst grosse Mengen Elektrizität benötigt und mehr als etwa 10 bis 14 Rp./ kWh dafür bezahlen muss. In diesem Fall kann er die erzeugte Elektrizität zur Deckung des Eigenverbrauchs

benutzen und einen entsprechenden Gewinn verbuchen.

Muss die erzeugte Elektrizität ins Netz zurückgegeben werden, so geht die Rechnung nicht immer auf, weil die Vergütung in vielen Fällen geringer ist als die Kosten für die Eigenerzeugung. Seit Jahren wird eine Diskussion über den Wert der Elektrizität aus Blockheizkraftwerken und ähnlichen Anlagen geführt. Das Eidgenössische Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement hat kürzlich empfohlen, so viel zu vergüten, wie die Erzeugung in einem neuen inländischen Kraftwerk und die entsprechende Verteilung kosten [5]. In einer Studie der Elektrowatt werden konkrete Zahlen genannt [6]. Diese liegen bei rund 18 Rp. im Winter-Hochtarif und bei etwa 13 Rp. im Niedertarif. Die Elektrizitätswerke der Stadt Zürich sind in bezug auf die Rücklieferartef am fortschrittlichsten, sie vergüten im Winter-Hochtarif 15 Rp./kWh und im Niedertarif 11 Rp./kWh.

Auch volkswirtschaftlich gesehen ist eine Elektrizitätsproduktion in Wärmekraftkopplungsanlagen sinnvoll, da andere neue Kraftwerke für die Erzeugung von Winterelektrizität im Mittelbereich meistens höhere Stromgestehungs- und Transportkosten aufweisen. Für die momentan diskutierte Erweiterung der Grimselkraftwerke ergeben sich Winterstromgestehungskosten von 20 bis 30 Rp./kWh. Aus neuen Kernkraftwerken in der Schweiz dürfte Winterstrom auch um 15 Rp./kWh kosten (ohne Verteilungskosten).

### Folgerungen

Blockheizkraftwerke bilden eine wichtige Grundlage für den Einsatz von Heizsystemen mit sehr hohen Wirkungsgraden. Bereits heute können in Kombination mit elektrischen Wärmepumpen Jahreswirkungsgrade von 150 bis 200% erreicht werden. Zukünftig dürften mit Brennstoffzellen anstelle von Blockheizkraftwerken sogar Nutzungsgrade bis 500% erreichbar sein. Demgegenüber können Heizkessel keinen höheren Wirkungsgrad als 100% erreichen. Dadurch können grosse Mengen an fossilen Energieträgern und CO<sub>2</sub> eingespart werden. Auch die Emissionen von Stickoxiden liegen durch den Einsatz von Katalysatoren sehr tief.

Blockheizkraftwerke heutiger Bauart sind technologisch ausgereift. Die Wirtschaftlichkeit muss durch die Vergütung angemessener Rücklieferartef

### Literatur

- [1] Deutscher Bundestag, Schutz der Erdatmosphäre, Zwischenbericht der Enquete-Kommission des 11. Deutschen Bundestages, ISBN 3-924521-27-1
- [2] H. Pauli et al, Standard-Blockheizkraft 150-200 kWe für den Kanton Zürich, Dr. Eicher & Pauli AG, Liestal (zu beziehen bei der Energiefachstelle des Kantons Zürich)
- [3] M. Sättler, Prognos AG, Basel; Hp. Eicher, Dr. Eicher & Pauli AG, Liestal, Potentiale der Wärmekraftkopplung, EGES-Schriftenreihe Nr. 6
- [4] F. Stahel et al., Sulzer Energieconsulting, Winterthur, Potential der Wärmekraftkopplung in der Industrie, EGES-Schriftenreihe 8
- [5] Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Empfehlungen für Tarife von leitungsgebundenen Energien sowie für Anschlussbedingungen von Eigenerzeugern, EDMZ, Mai 1989
- [6] Elektrowatt Ingenieure und Berater, Zweiter Energiebericht des Kantons Bern, Elektrizität-Tarifpolitik, 7. Juli 1989
- [7] H.R. Gabathuler, Wärmekraftkopplung, Impulsprogramm Haustechnik 1989
- [8] Hp. Eicher, Industrielles und gewerbliches WKK-Potential im Kanton Bern, Dr. Eicher & Pauli AG, Liestal
- [9] Expertengruppe Energieszenarien (EGES), Möglichkeiten, Voraussetzungen und Konsequenzen eines Ausstieges aus der Kernenergie
- [10] Hp. Eicher, Schadstoffemissionen von Gasmotoren mit Dreiwegkatalysatoren, Schlussbericht Juni 1989, erhältlich bei Eicher & Pauli AG in Liestal
- [11] Hp. Eicher, Eicher & Pauli AG, Abgasreinigung bei Dieselmotoren mit Harnstoff, Jahresbericht 1989 z.H. des Bundesamtes für Energiewirtschaft
- [12] M. Koebel, M. Elsener, Erste Versuche zur Entstickung mit Harnstoff auf der SCR-Pilotanlage in Liestal, Paul Scherrer Institut, TM-51-90-07, 30. März 1990

noch verbessert werden. Ein wesentlich verstärkter Einsatz dieser sinnvollen Technologien sollte daher angestrebt werden.

Adresse des Verfassers: Dr. Hp. Eicher, Dr. Eicher & Pauli AG, Oristalstrasse 85, 4410 Liestal.