

Wärme und Strom aus Brennstoffen – effizient und umweltschonend

Martin Zogg *)

Welches ist die effizienteste und umweltschonendste Lösung zur gleichzeitigen Wärme- und Stromerzeugung aus flüssigen und gasförmigen Brennstoffen? Zur Beantwortung dieser Frage werden vier Lösungsvarianten mit den Komponenten Heizkessel, Wärmepumpe, Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlage und Kombikraftwerk verglichen. Für eine effiziente Wärmeerzeugung erweisen sich Wärmepumpen auch beim Einsatz von Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlagen als unumgänglich. Zur Versorgung der Wärmepumpen mit elektrischem Strom sind Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen modernen Kombikraftwerken energetisch nur bei hohen elektrischen Wirkungsgraden ebenbürtig. Falls die Emissionsgrenzwerte der heute gültigen schweizerischen Luftreinhalteverordnung für stationäre Verbrennungsmotoren nicht deutlich unterschritten werden, liegen die Schadstoffemissionen der Varianten mit konventionellen Blockheizkraftwerken weit über den Werten der Varianten mit Kombikraftwerken.

Einleitung

Wärme erreicht in der Schweiz einen Anteil von rund 75% der gesamten Nutzenergie. Wir decken rund 90% des Bedarfs an Niedertemperaturwärme (Raumheizung, Warmwasserbereitung etc.) aus Brennstoffen¹. Im Bestreben, die Kohlendioxidproduktion wie auch die Schadstoffemissionen zu senken, ist der effizienten und emissionsarmen Erzeugung von Wärme aus flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen deshalb höchste Priorität einzuräumen. Wie in früheren Beiträgen [1], [2], [3] dargelegt wurde, lassen sich mit der Kombination einer Wärme-Kraft-Kopplungsanlage (künftig als WKK abgekürzt) - mit hohem elektrischem Wirkungsgrad - und Wärmepumpen wie auch mit der Kombination Kombikraftwerk-Wärmepumpen gegenüber der noch üblichen Kesselheizung mit heute verfügbaren technischen Lösungen bereits 30% bis 50% an Brennstoff einsparen. Damit wird auch die CO₂-Produktion entsprechend reduziert.

Nun wird aber immer häufiger argumentiert, dass auch die Erzeugung von elektrischem Strom mit WKK-Anlagen in die Überlegungen einbezogen werden müsse. Dabei wird von wirtschaftlichen Überlegungen im Zusammenhang mit Spitzenlastreduktion bis (mehr oder weniger offen) auch vom Ersatz der Kernkraftwerke durch WKK-Anlagen ausgegangen. Es geht dann nicht mehr nur um die Deckung des Wärmebedarfs, sondern auch um einen erheblichen Teil des Strombedarfs.

Das Problem

Es stellt sich also die Frage, mit welchen technischen Lösungen ein bestimmter Bedarf an elektrischem Strom und an Wärme während der Heizsaison am effizientesten und am

¹ Im Vordergrund stehen heute die fossilen Brennstoffe Erdgas und Heizöl – die Überlegungen gelten aber auch für Brennstoffe aus erneuerbaren Energien. In diesem Beitrag wird nicht zwischen den chemisch identischen Brenn- und Treibstoffen unterschieden.

umweltschonendsten aus Brennstoffen gedeckt werden kann: Bild 1. Die folgenden Überlegungen zur Beantwortung dieser Frage sollen die beste Realisierungsrichtung aufzeigen. Art und Geschwindigkeit der Zielerreichung werden ausgeblendet. Deshalb werden politische und wirtschaftliche Gesichtspunkte sowie die vorhandenen Infrastrukturen bewusst ausser Acht gelassen. Auch auf die schwer zu beantwortende Frage einer künftig bedeutenderen Stromproduktion aus alternativen Energien wie Photovoltaik oder Windenergie wird hier nicht eingegangen. Diese Einflüsse sind entscheidend für das Tempo der Realisierung – aber nicht für die langfristig einzuschlagende Richtung.

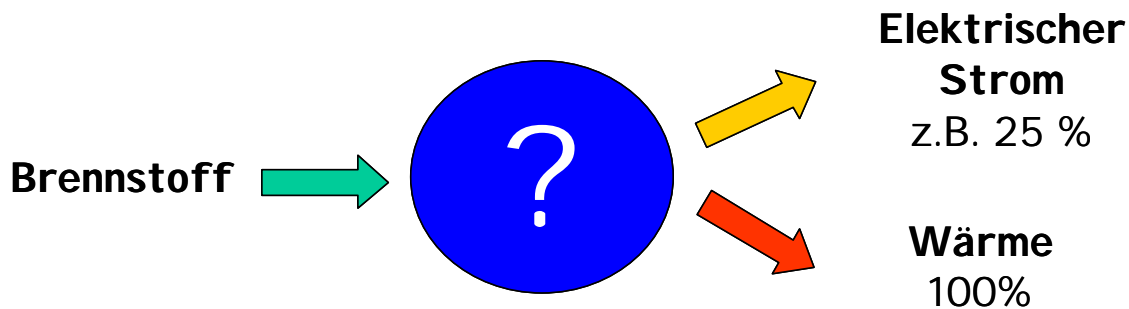


Bild 1: Welches ist das effizienteste System zur Erzeugung von Wärme und elektrischem Strom aus Brennstoffen?

Verhältnis von Strom- zu Wärmebedarf

Vor der Suche nach dem effizientesten System gemäss dem Bild 1 muss das maximal zu erwartende Verhältnis des durch Brennstoffe zu deckenden Strombedarfs zum Wärmebedarf abgeschätzt werden. Dieses erhält man zweifellos, wenn man vom hypothetischen Ersatz der Kernkraftwerke durch Kombikraftwerke² oder WKK-Anlagen ausgeht. Diese müssten dann die ganze heutige Stromproduktion der Kernkraftwerke übernehmen. Dazu eine kleine Abschätzung für die Bilanzgrenze Schweiz³:

Der schweizerische Endverbrauch an elektrischer Energie beträgt momentan rund 190 PJ [4]. Davon werden rund 40% oder 76 PJ durch Kernkraftwerke erzeugt. Auf die Heizsaison entfallen davon etwa 60% oder 46 PJ. Der gesamte Jahreswärmebedarf der Schweiz lässt sich mit dem Jahresendenergieverbrauch [4] an Erdölbrennstoffen (225 PJ) und Erdgas (95 PJ) sowie einem mittleren Kesselnutzungsgrad von 90% (auch ältere Kessel) grob zu 288 PJ schätzen. Unter der weiteren Annahme, dass 70% des Wärmebedarfs unter 60°C (Niedertemperaturwärme) anfallen, ergibt sich ein Bedarf an Niedertemperaturwärme von etwa 200 PJ. Dieser kann statt durch Kessel auch durch WKK- oder Wärmepumpenanlagen gedeckt werden. Bei der Hypothese eines vollständigen Kernkraftwerkersatzes durch WKK-Anlagen oder Kombikraftwerke steht also während der ganzen Heizsaison einem mittleren Niedertemperaturwärmebedarf von etwa 200 PJ ein Bedarf an elektrischer Energie von rund 46 PJ gegenüber. Dies ergibt ein mittleres Verhältnis des Bedarfs an elektrischer Energie zu Niedertemperaturwärme

$$\sigma = \frac{\text{elektrische_Energie}}{\text{Niedertemperaturwärme}}$$

² GuD-Kraftwerk mit Gasturbine und nachgeschalteter Dampfturbine.

³ Bei Massnahmen zur Reduktion des Brennstoffbedarfs bzw. der CO₂-Produktion legt man die Bilanzgrenze sinnvollerweise nicht weiter, als die entsprechenden Massnahmen auch beeinflusst und durchgesetzt werden können.

von 0.23. Aufgrund dieser groben Schätzungen werden die folgenden Berechnungen für Strom-Wärme-Verhältnisse σ von 0 (reine Wärmeproduktion), 0.125 und 0.25 (maximale zusätzliche Stromproduktion bei der Substitution aller Kernkraftwerke) durchgeführt.

Die Varianten

Die im Folgenden untersuchten Varianten zur Erzeugung von Wärme und elektrischem Strom sind in der Tabelle 1 und mit einem numerischen Beispiel im Bild 2 zusammengestellt.

Variante	Kombination	Wärme	elektrischer Strom
K+KK (Bezugsvariante)	Kessel + Kombikraftwerk	✓	✓
K+WKK	Kessel + Wärme-Kraft-Kopplung	✓ ✓	✓
WP+WKK	Wärmepumpe + Wärme-Kraft-Kopplung	✓	✓
WP+KK	Wärmepumpe + Kombikraftwerk	✓ ✓	✓

Tabelle 1: Untersuchte Varianten zur Erzeugung von Niedertemperaturwärme und elektrischem Strom.

Bei der Bezugsvariante **K+KK** sorgt ein Heizkessel für die erforderliche Wärme und ein Kombikraftwerk für den elektrischen Strom. Bei der Variante **K+WKK** wird der benötigte elektrische Strom durch WKK-Anlagen bereitgestellt. Dabei wird auch ein Teil der geforderten Wärme erzeugt. Die durch die WKK-Anlage nicht gedeckte Wärme wird durch einen Kessel produziert. In der Variante **WP+WKK** erzeugt eine WKK-Anlage die benötigte elektrische Energie. Dabei wird auch ein Wärmeanteil produziert. Die Restwärme wird durch die Wärmepumpe mit Strom aus der WKK unter Nutzung der Umgebungswärme erzeugt. Schliesslich werden in der Variante **WP+KK** der gesamte Strom durch das Kombikraftwerk und die gesamte Wärme durch die Wärmepumpe produziert.

Berechnungsannahmen und Zahlenbeispiel

Für die folgenden Überlegungen werden die in der Tabelle 2 aufgeführten Grössen als konstant angenommen. Die Berechnung der bei den vier Varianten zuzuführenden Verbrennungswärme wird in [5] ausführlich gezeigt. Die Resultate wurden für ein Strom-Wärme-Verhältnis σ von 0.25 und einen elektrischen Wirkungsgrad der WKK-Anlage von 35% in die Skizzen im Bild 2 eingetragen. Bezugsgrösse (100%) ist stets die Nutzwärme-Produktion. Der Brennstoffbedarf ist als Verbrennungswärme (Feuerungswärme) bzw. Verbrennungswärmeleistung (Feuerungsleistung)⁴ zu verstehen.

⁴ Bei der Verbrennung des betreffenden Brennstoffs frei werdende Wärme bzw. Wärmeleistung. Basis ist der untere Heizwert der Brennstoffe.

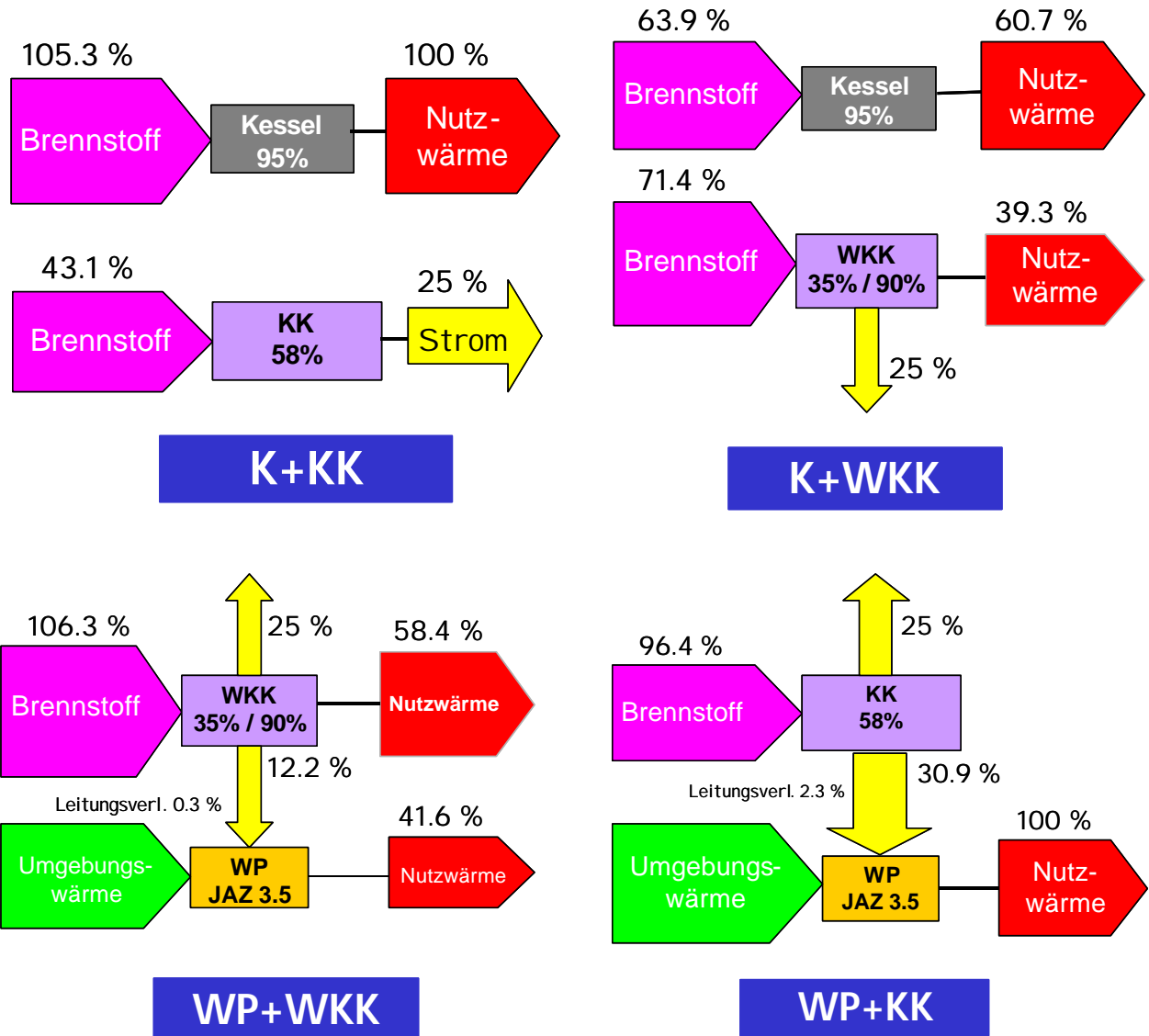


Bild 2: Untersuchte Varianten zur Produktion von Niedertemperaturwärme und elektrischem Strom. Zahlenbeispiele für ein Strom-Wärme-Verhältnis σ von 0.25 und einen elektrischen Wirkungsgrad der WKK von 35%. Restliche Daten gemäss der Tabelle 2. Brennstoffbedarf als benötigte Verbrennungswärme (Feuerungswärme).

Gesamtwirkungsgrad WKK	90%
Elektrischer Übertragungswirkungsgrad elektrisches Ortsnetz für WKK-WP	97.5% (Leitungsverluste 2.5%)
Elektrischer Wirkungsgrad Kombikraftwerk	58%
Elektrischer Übertragungswirkungsgrad elektrisches Fernnetz KK-WP	92.5% (Leitungsverluste 7.5%)
Kesselwirkungsgrad	95%
Mittlere Leistungszahl der Wärmepumpe	3.5

Tabelle 2: Annahmen für die energetischen Berechnungen. Wirkungsgrade von Kessel, WKK-Anlage und Kombikraftwerk auf den unteren Heizwert der Brennstoffe bezogen und als Mittelwerte im Betrieb verstanden (Nutzungsgrade).

Vergleich des Brennstoffbedarfs für die vier Varianten

Aus dem Bild 2 ergibt sich der in der Tabelle 3 zusammengestellte Brennstoffbedarf für die vier Varianten. Man erkennt daraus, dass die Stromerzeugung durch WKK (Variante K+KK, elektrischer Wirkungsgrad 35%) gegenüber der Stromerzeugung durch ein Kombikraftwerk eine Brennstoffeinsparung von 8.78% bringt. Wesentlich deutlichere Brennstoffeinsparungen lassen sich durch einen möglichst weit gehenden Ersatz der Kessel durch Wärmepumpen erzielen. Dann wird der höhere elektrische Wirkungsgrad des Kombikraftwerks entscheidend. Die Variante WP+KK schneidet mit einer Brennstoffeinsparung von 35.1% deutlich besser ab als die Variante K+WKK!

Variante	Brennstoffbedarf in % der Wärmeproduktion	bezogener Brennstoffbedarf	Brennstoff- einsparung
K+KK	148.4%	100%	Bezugsvariante
K+WKK	135.3%	91.2%	8.78%
WP+WKK	106.3%	71.6%	28.4%
WP+KK	96.4%	64.9%	35.1%

Tabelle 3: Brennstoffeinsparung gegenüber der Bezugsvariante K+KK für ein Strom-Wärme-Verhältnis σ von 0.25 und einem elektrischen Wirkungsgrad der Wärme-Kraft-Kopplung von 35%.

Dies ist nicht verwunderlich. Bei der Verbrennung entsteht Wärme bei über 1000 °C. Ein Kessel zur Erzeugung von Niedertemperaturwärme nutzt diese hohe Qualität der Wärme überhaupt nicht. Er ist mit den Worten des Thermodynamikers ein fast hundertprozentiger Exergievernichter. Überall, wo der Kessel durch thermodynamisch sinnvollere Einrichtungen ersetzt wird, fallen hohe Einsparungen an Brennstoffen und eine entsprechende Reduktion des CO₂-Ausstosses an. Thermodynamisch sinnvoller sind für die Wärmeerzeugung Wärmepumpen und WKK-Anlagen mit hohem elektrischem Wirkungsgrad. Um dies für die WKK zu verdeutlichen, wird im Bild 3 die Abhängigkeit der Brennstoffeinsparung gegenüber der Bezugsvariante K+KK vom elektrischen Wirkungsgrad der WKK-Anlagen aufgezeigt. Die Berechnung der Diagrammkurven verläuft analog dem oben gezeigten Beispiel. Um den Zugang zum Diagramm zu erleichtern, sind darin die Beispiele der Tabelle 3 als Punkte hervorgehoben.

Die Produktion an Kohlendioxid ist dem Brennstoffverbrauch proportional. Das Bild 3 veranschaulicht deshalb auch die mit den untersuchten Varianten erreichbare Reduktion der CO₂-Produktion. Es illustriert die beim Beispiel der Tabelle 3 bereits erwähnte klare Überlegenheit der Kombinationen mit Wärmepumpen. Die Stromerzeugung mit WKK-Anlagen (Kombination WP+WKK) ist der Stromerzeugung durch moderne Kombikraftwerke (Kombination WP+KK) bei reiner Wärmeproduktion ($\sigma = 0$) erst ab elektrischen Wirkungsgraden von 41% energetisch überlegen. Bei einer zusätzlichen Produktion von 25% elektrischer Energie ($\sigma = 0.25$) erreicht eine WKK-Anlage erst ab elektrischen Wirkungsgraden über 43% einen energetisch effizienteren Betrieb als die Variante WP+KK. Die Varianten ohne Wärmepumpe scheiden deutlich schlechter ab. Die Lösung mit WKK-Anlagen (Variante K+WKK) ist bei zusätzlicher Stromproduktion als Folge des teilweisen Kesslersatzes bereits ab kleinen elektrischen Wirkungsgraden besser als die Bezugsvariante mit Kombikraftwerken und ausschliesslicher Wärmeproduktion durch Kessel (K+KK). Bei einem Strom-Wärme-Verhältnis σ von 0.25 wird mit der Variante K+WKK eine Brennstoffeinsparung bis 10% erreicht.

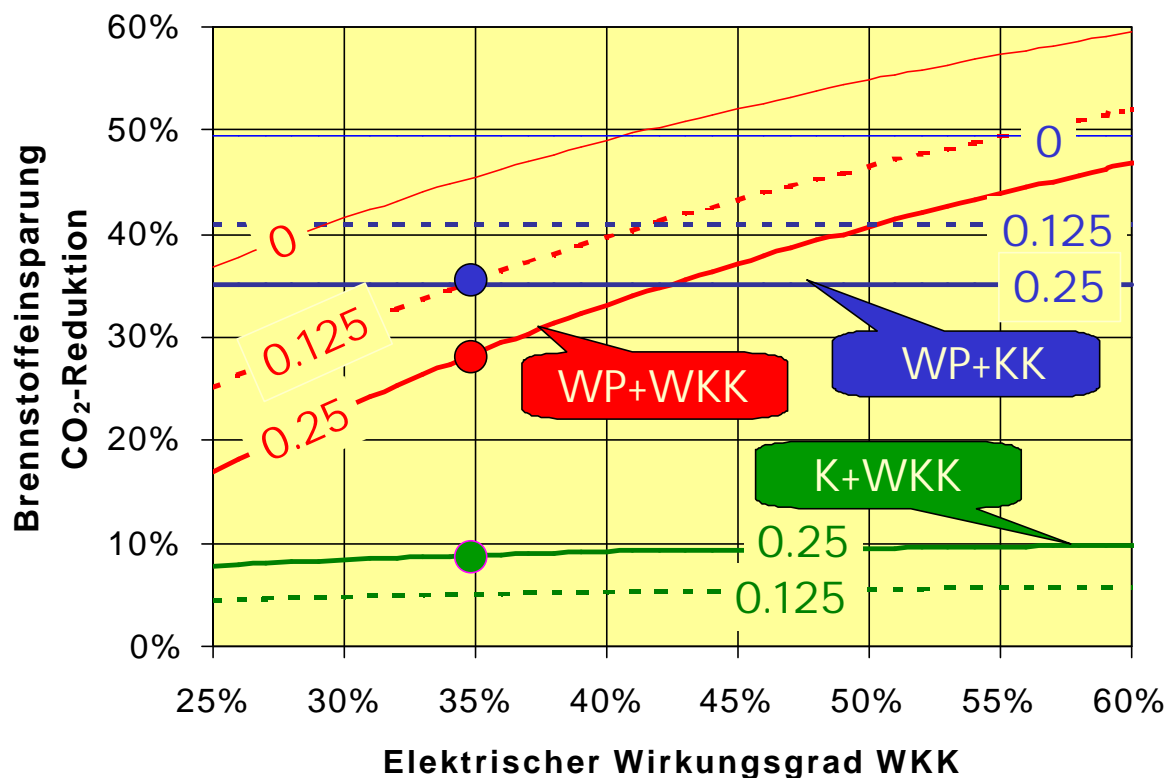


Bild 3: Brennstoffeinsparungen und CO₂-Reduktion mit den Varianten K+WKK, WP+WKK und WP+KK gegenüber der Bezugsvariante K+KK. Kurvenparameter: Strom-Wärme-Verhältnisse $\sigma = 0$ (reine Wärmeproduktion), 0.125 und 0.25.

Schadstoffemissionen

Der Ausstoss von Kohlendioxid mit dem damit verbundenen Treibhauseffekt ist nicht das einzige Umweltproblem. Für die Umweltbelastung der Strom- und Wärmeerzeugungsanlagen sind insbesondere auch die Emissionen an Stickoxid und an Kohlenmonoxid von Bedeutung. Auch hier ergeben die untersuchten Varianten grosse Unterschiede. Dies soll am Beispiel von Erdgas als Brennstoff mit den geringsten Schadstoffemissionen aufgezeigt werden. Dabei wird von den in der Tabelle 4 aufgeführten Grenzwerten der gültigen schweizerischen Luftreinhalteverordnung [6] ausgegangen. Als technische Anlagen werden die heute üblichen Lösungen (Kessel, BHKW mit Verbrennungsmotor und Kombikraftwerk mit Gas- und Dampfturbine) betrachtet. Die auf die Verbrennungswärme bezogenen Werte wurden aus den Angaben der Luftreinhalteverordnung in mg/m_N^3 gemäss [8] mit Bezug auf den unteren Heizwert berechnet. Die Ergebnisse weichen je nach Zusammensetzung des Erdgases unbedeutend ($\pm 2.5\%$) von den für die Verbrennung von Methan berechneten Werten ab⁵.

Mit den auf die Verbrennungswärme bezogenen Werten lassen sich die Stickoxid- und die Kohlenmonoxidemissionen der vier Varianten leicht berechnen. In [5] findet man dazu

⁵ Den Herren Dr. Rolf Frischknecht (ESU-Services, Uster) und Andreas Liechti (BUWAL, Bern) sei für die Überprüfung der Ergebnisse bestens gedankt.

je ein ausführlich durchgerechnetes Zahlenbeispiel. Das Bild 4 zeigt einen Vergleich der Stickoxidemission der vier untersuchten Varianten. Man erkennt daraus, dass die Varianten mit Blockheizkraftwerken (WP+WKK und K+WKK) bedeutend schlechter abschneiden als die Varianten mit Kombikraftwerken (Bezugsvariante K+KK und WP+KK). Hier wirkt sich die Lockerung der Emissionsgrenzwerte für stationäre Verbrennungsmotoren im Jahr 1998 bedenklich aus. Es ist zu hoffen, dass die vom Bundesamt für Energie und vom Forschungsfonds der Gasindustrie unterstützte Entwicklung des *SwissMotors* [9] zum industriellen Durchbruch gelangt und neue Standards setzt. Dieser Motor mit Abgasrückführung erreicht bei sehr hohen mechanischen Wirkungsgraden nur einen Bruchteil des nach der Luftreinhalteverordnung zugelassenen Stickoxid-Emissionsgrenzwerts. Auch die Brennstoffzellentechnik wird in hoffentlich absehbarer Zukunft eine wesentliche Entlastung bringen!

	Stickoxid NO _x	Kohlenmonoxid CO
Heizkessel Heizmediumtemperatur < 110 °C Bezug auf die Verbrennungswärme	80 mg/m _N ³ bei 3 vol% O ₂ 80.3 mg/kWh	100 mg/m _N ³ bei 3 vol% O ₂ 100.4 mg/kWh
stationärer Verbrennungsmotor >= 100 kW bei Verbrennungswärmeleistung < 100 kW gilt der angegebener Grenzwert nur noch als Empfehlung [7]! Bezug auf die Verbrennungswärme	250 mg/m _N ³ bei 5 vol% O ₂ 282 mg/kWh	650 mg/m _N ³ bei 5 vol% O ₂ 734 mg/kWh
Gasturbine > 40 MW Bezug auf die Verbrennungswärme	50 mg/m _N ³ bei 15 vol% O ₂ 151 mg/kWh	120 mg/m _N ³ bei 15 vol% O ₂ 363 mg/kWh

Tabelle 4: Maximale Stickoxid- und Kohlenmonoxid-Emissionen nach der schweizerischen Luftreinhalteverordnung [6] für Erdgas als Brennstoff und daraus nach [8] für Methan auf die Verbrennungswärme umgerechnete bezogene Grenzwerte.

Noch schlechter schneiden die nach den Emissionsgrenzwerten der Tabelle 4 arbeitenden Blockheizkraftwerke bei der Emission von Kohlenmonoxiden ab: Bild 5. Sie erreichen bei der Variante WP+WKK gut das Doppelte der Variante WP+KK. Am besten ist hier der Heizkessel mit Strom aus Kombikraftwerken (Basisvariante K+KK). Dies illustrieren die ausgezeichneten Emissionswerte heutiger Kessel. Blockheizkraftwerke mit Verbrennungsmotoren müssen hier noch tüchtig aufholen!

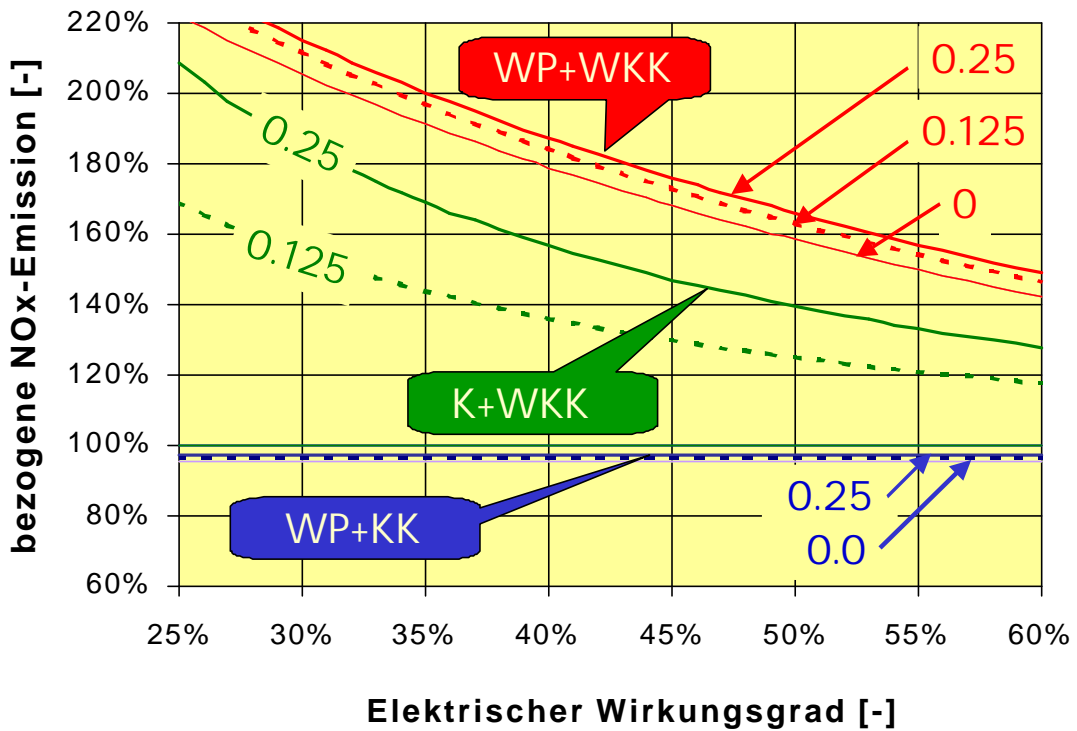


Bild 4: Auf die Variante K+KK bezogene relative Stickoxidemission der Varianten K+WKK, WP+WKK und WP+KK bei Erreichen der Emissionsgrenzwerte gemäss der Tabelle 4 für Strom-Wärme-Verhältnisse σ von 0 (reine Wärmeproduktion), 0.125 und 0.25. Brennstoff: Erdgas.

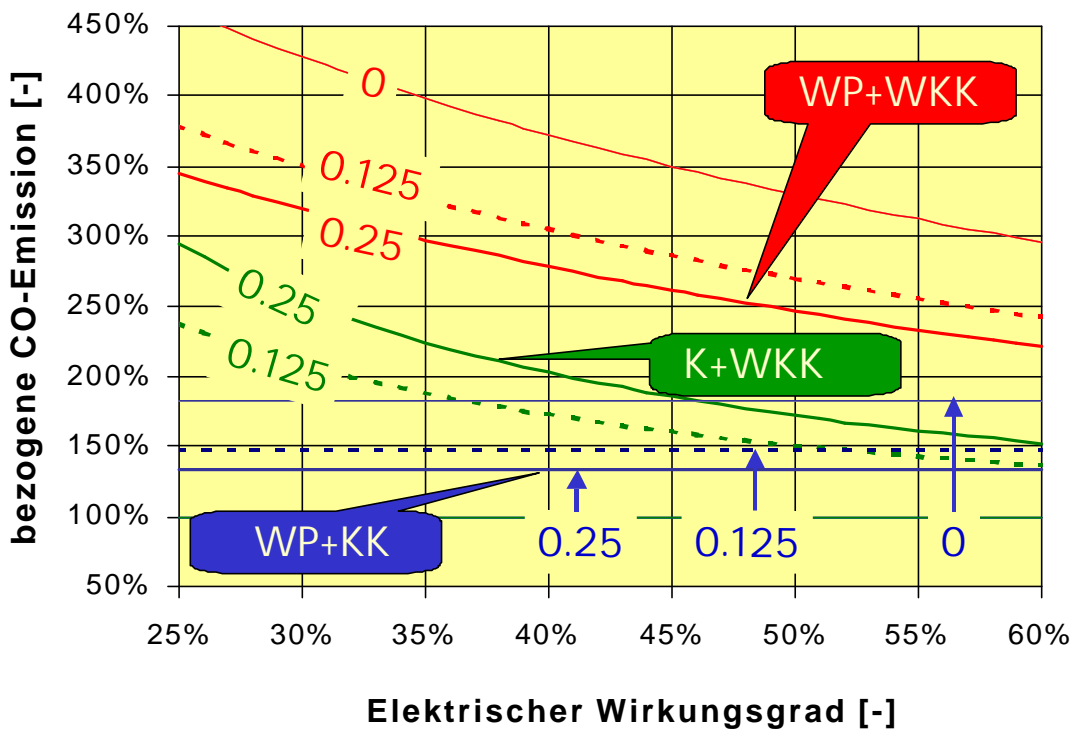


Bild 5: Auf die Variante K+KK bezogene relative Kohlenmonoxidemission der Varianten K+WKK, WP+WKK und WP+KK bei Erreichen der Emissionsgrenzwerte gemäss der Tabelle 4 für Strom-Wärme-Verhältnisse σ von 0 (reine Wärmeproduktion), 0.125 und 0.25. Brennstoff: Erdgas.

Schlussfolgerungen

Für die gleichzeitige Erzeugung von Niedertemperaturwärme und elektrischen Strom mit den untersuchten Strom-Wärme-Verhältnissen σ von 0 (reine Wärmeproduktion) bis 0.25 ergeben sich nachstehende Schlussfolgerungen:

1. Wärmepumpen sind für eine effiziente Erzeugung von Niedertemperaturwärme unumgänglich. Die Varianten ohne Wärmepumpen schneiden bedeutend schlechter ab.
2. Wärmekraftkopplungsanlagen müssen für eine effiziente Produktion von Wärme und Strom hohe elektrische Wirkungsgrade erreichen. Bei den effizienten Lösungen in Kombination mit Wärmepumpen können sie energetisch erst ab elektrischen Wirkungsgraden von 40% mit modernen Kombikraftwerken konkurrieren.
3. Blockheizkraftwerke mit gegenüber der geltenden Luftreinhalteverordnung deutlich geringerem Schadstoffausstoss sind ein Muss!

Das bei den Kesseln Erreichte soll auch für die Blockheizkraftwerke die Richtung weisen. Die Emissionen der Varianten mit LRV-konformen Blockheizkraftwerken liegen beim Stickoxid bis zum Doppelten über den Varianten mit Kombikraftwerken. Bei den Kohlenmonoxiden wird sogar bis über das Vierfache der Emissionen der Varianten mit Kombikraftwerken erreicht. Um bei grösserer Verbreitung von Blockheizkraftwerken nicht mit erheblichen Umweltproblemen konfrontiert zu werden, müssen die Grenzwerte der Emissionen für stationäre Motoren (wieder) deutlich gesenkt werden.

Ein wesentlicher Schritt zu Lösung dieses Problems ist von den Brennstoffzellen zu erwarten. Aber auch bei den Verbrennungsmotoren sind - wie beispielsweise beim *SwissMotor* [9] - bedeutende Entwicklungen im Gang. Ihre Umsetzung darf nicht am etwas höheren Preis scheitern – eine intakte Umwelt ist unersetzlich.

4. Besonders kritisch werden die Emissionen von Blockheizkraftwerken bei kleinem elektrischem Wirkungsgrad. Die Forderung nach einer Reduktion der Emissionswerte gegenüber der Luftreinhalteverordnung gilt deshalb insbesondere für die Blockheizkraftwerke mit bescheidenem elektrischem Wirkungsgrad. Dazu gehören die Mini-Blockheizkraftwerke mit Verbrennungsmotor. Für diese gelten bedauerlicherweise erst Empfehlungen [7]. Das darin für Kleindieselmotoren ein Stickoxidgrenzwert von sage und schreibe 2'500 mg/m_N³ zugelassen wird, ist gewiss kein Dienst an einer intakten Umwelt!

Referenzen

- [1] Zogg,M.: Wann sind Kleinstblockheizkraftwerke energetisch sinnvoll? Gas, Wasser, Abwasser 78(1998)12, 959/966.
- [2] Zogg,M.: Umgebungswärmenutzung, Wärme-Kraft-Kopplung, Schweizer Ingenieur und Architekt, 117(99)47, 14/16.
- [3] Zogg,M: Maximale Primärenergienutzung und CO₂-Reduktion mit Wärmepumpenheizsystemen, Bundesamt für Energie 1998, ENET-Art.30876; in [www.waermepumpe.ch/fe_als Download verfügbar](http://www.waermepumpe.ch/fe_als_download_verfuegbar).

- [4] Schweizerische Gesamtenergiestatistik, Bulletin SEV/VSE 92(2001)16, 15/53.
- [5] Zogg,M.: Varianten der Wärme- und Stromproduktion aus Brennstoffen, *Download aus www.waermepumpe.ch/fe Rubrik „Publikationen“ verfügbar.*
- [6] Schweizerische Luftreinhalte-Verordnung, Stand 28. März 2000, EDMZ 814.318.142.1
- [7] Cercl'Air-Empfehlung Nr. 19 der Schweizerischen Gesellschaft der Lufthygiene-Fachleute vom 7. Dezember 1999.
- [8] Zogg,M: Verbrennungsrechnungen mit Emissionen, *Download aus www.waermepumpe.ch/fe Rubrik „Publikationen“ verfügbar.*
- [9] Ch.Nellen. K.Boulouchos, Ch.Schaer, Ch.Onder: Regelung des SwissMotors für den Einsatz in der Praxis, Schlussbericht, Bundesamt für Energie 2000, ENET-Nr. 200146; *Download aus www.waermepumpe.ch/fe Rubrik „Berichte“ verfügbar.*

*)

*Dr. Martin Zogg, Dipl. Masch.-Ing. ETHZ, Kirchstutz 3, 3414 Oberburg
Forschungsprogrammleiter Umgebungswärme, Abwärme, WKK des Bundesamts für Energie*