

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 79 (1988)

Heft: 10

Artikel: Umweltaspekte von Blockheizkraftwerken

Autor: Bélaz, C. / Fischer, E.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-904031>

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: 30.01.2025

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

Umweltaspekte von Blockheizkraftwerken

Ch. Bélaz und E. Fischer

Schadstoffemissionen von Blockheizkraftwerken können mit bereits gut eingeführten Verfahren sehr stark reduziert werden. Eine globale Betrachtung der Umweltaspekte zeigt allerdings, dass bei einem vermehrten Einsatz von Blockheizkraftwerken gegenüber der heutigen Energieversorgungssituation in der Schweiz mit einer bedeutenden Erhöhung des Verbrauches an fossilen Brennstoffen und einer entsprechend höheren Umweltbelastung zu rechnen wäre.

Il est possible de réduire fortement des émissions polluantes provenant d'installations de couplage chaleur-force grâce à des procédés ayant déjà fait leurs preuves. Une approche globale des aspects écologiques montre toutefois que, par rapport à l'approvisionnement suisse actuel en énergie, un recours accru aux installations de couplage chaleur-force entraînerait une nette hausse des besoins en combustibles fossiles et une pollution de l'environnement relativement plus élevée.

Adresse der Autoren

Charles Bélaz und Ernst Fischer,
Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG,
5401 Baden.

Neben energetischen Bilanzen, Wirkungsgraden, Kosten und der Wirtschaftlichkeit nimmt die Beurteilung der Umweltaspekte des Einsatzes von Blockheizkraftwerken zur gekoppelten Produktion von Wärme und Strom einen immer höheren Stellenwert ein, nicht zuletzt in den emotionellen Diskussionen um den Ausstieg der Schweiz aus der Kernenergie.

Um die Umweltaspekte eines vermehrten Einsatzes von Blockheizkraftwerken in der Schweiz beurteilen zu können, werden nachfolgend

- die Möglichkeiten und der Stand der Technik zur Reduktion der Emissionen von Blockheizkraftwerken sowie die entsprechenden Emissionskennwerte dargestellt
- an verschiedenen Beispielen für die Wärme- und Stromerzeugung für schweizerische Verhältnisse der Bedarf an fossilen Brennstoffen und die entsprechenden Emissionen ermittelt und verglichen.

1. Verfahren zur Schadstoffreduzierung

Die wichtigsten Schadstoffe im Abgas von Verbrennungsmotoren sind die Stickstoffoxide (NO_x), das Kohlenmonoxid (CO) und die unverbrannten Kohlenwasserstoffe (C_xH_y) sowie Russ. Ohne besondere Massnahmen liegen zum Beispiel bei Gasmotoren die NO_x -Emissionen mit 3000 bis 6000 mg/m^3 weit über den Grenzwerten der Luftreinhalteverordnung (LRV) von 400 mg/m^3 (bei 5% O_2).

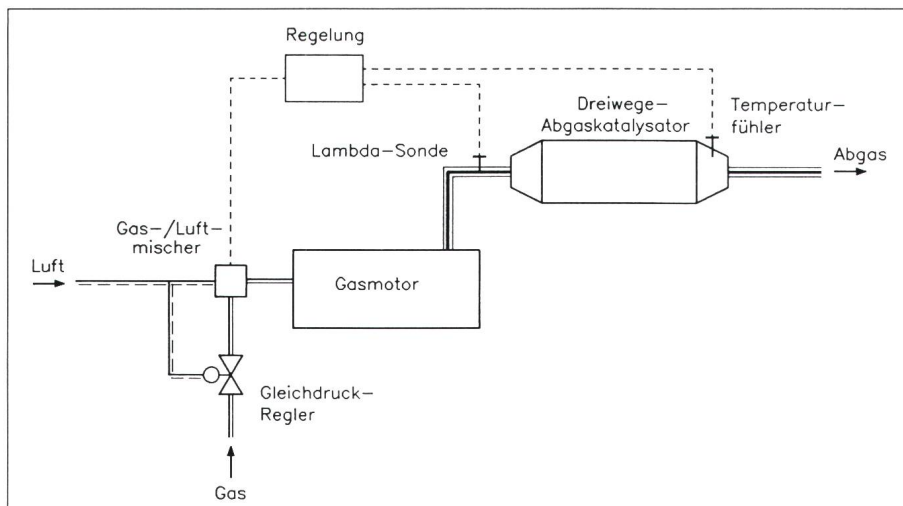
Die Entwicklung von Verfahren zur Schadstoffreduzierung ist in vollem Gange. Bis jetzt wurden die folgenden drei Konzepte im Bereich der primären und sekundären Schadstoffreduktionsverfahren verfolgt:

Reduzierung durch Primärmassnahmen am Motor:

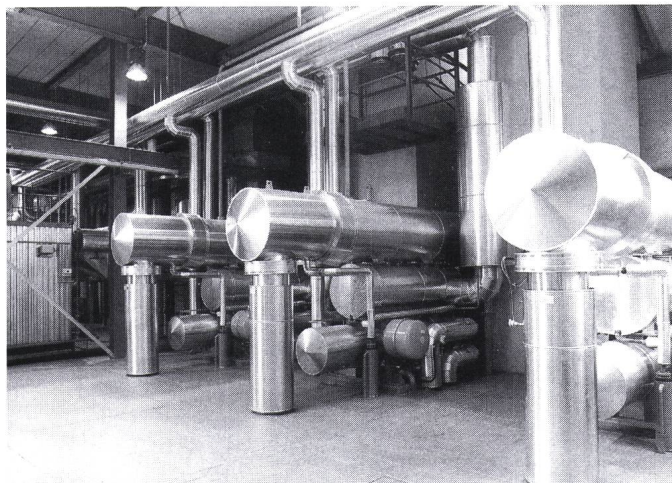
- Magermotorkonzept

Abgasnachbehandlung mit Sekundär-massnahmen:

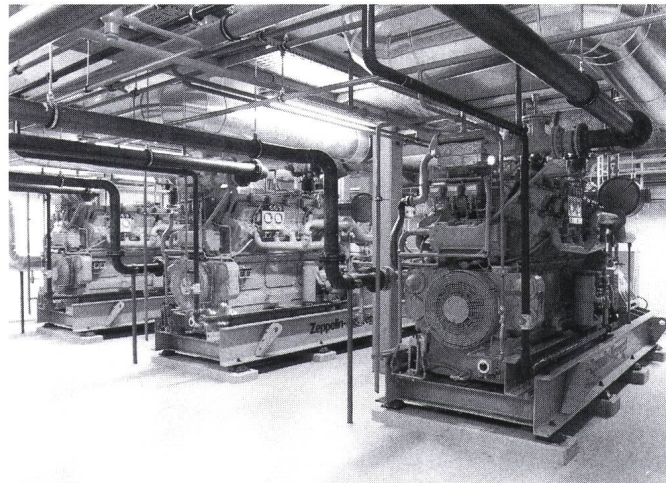
- nicht selektive Verfahren mit Drei-



Figur 1 Dreiweg-Abgaskatalysator
Prinzipschema



Figur 2 Dreiwege-Katalysator eines Blockheizkraftwerkes



Figur 3 Motoren eines Blockheizkraftwerkes

wege-Katalysatoren (NSCR-Verfahren)
 – selektive Verfahren mit Ammoniak-
 (NH₃-)Einspritzung und Oxidationskatalysatoren (SCR-Verfahren).

1.1 Magermotorkonzept

Dieses Konzept kann bei kleinen und mittleren Gasmotoren verwendet werden. Mit den sogenannten Magermotoren (Luftüberschuss, $\lambda \approx 1,5$) kann zum heutigen Zeitpunkt beispielsweise die TA-Luft in der BRD eingehalten werden (NO_x-Grenzwert: 500 mg/m³, 5% O₂), jedoch nicht oder nur knapp die LRV (NO_x-Grenzwert: 400 mg/m³, 5% O₂). Es ist anzunehmen, dass mit dem Magerkonzept in den nächsten Jahren Fortschritte gemacht werden, die eine sichere Einhaltung der LRV ermöglichen, jedoch kaum mit der relativ grossen Reserve, wie dies bei Motoren mit Dreiwege-Katalysator möglich ist.

Das Magermotorkonzept ist jedoch betriebssicherer und verursacht weniger Wartungs- und Unterhaltsaufwand. Magermotoren können ebenfalls mit Gasen, die sogenannte Katalysatorgifte wie Schwefel, Chlor, Fluor usw. beinhalten, eingesetzt werden.

1.2 NSCR-Verfahren

Das Konzept einer Verbrennung bei $\lambda \approx 1$ mit nachgeschaltetem Dreiwege-Katalysator gemäss dem Prinzipschema der Figur 1 kann nur bei Gasmotoren verwendet werden. Bei einer Verbrennung mit einer Luftzahl knapp unter 1 können im Katalysator die Emissionen der drei Schadstoffe Stick-

oxide, Kohlenmonoxid und unverbrannte Kohlenwasserstoffe wesentlich reduziert werden. Entsprechende Zahlen sind aus der Tabelle I ersichtlich.

Der sogenannte nicht selektive oder Dreiwege-Katalysator besteht in der Regel aus einem Keramikkörper, der mit einer katalytisch wirksamen Edelmetallbeschichtung ausgerüstet ist. Figur 2 stellt einen Dreiwege-Katalysator aus dem Blockheizkraftwerk Hindenburg in Ansbach, BRD, dar. Diese Anlage besteht u.a. aus drei Gas-Ottomotoren mit je 350 kW elektrischer Leistung. Die entsprechenden Motoren sind aus Figur 3 vor der Montagefertigstellung ersichtlich.

1.3 SCR-Verfahren

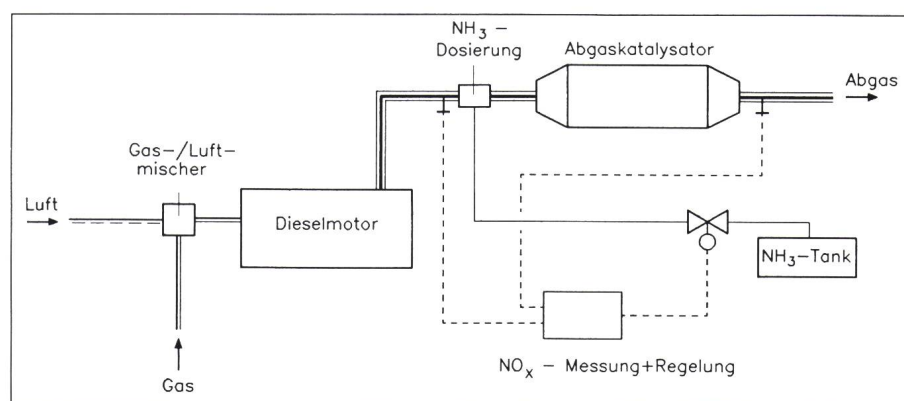
Die oben beschriebenen Verfahren mit Magermotoren oder mit Dreiwege-Katalysatoren können nicht für Dieselmotoren verwendet werden. Das Magerverfahren stösst an die Zünd-

grenze und das Lambda ≈ 1 -Konzept an die Klopfgrenze.

Die NO_x-Emissionen können beim SCR-Verfahren mit Ammoniak- (NH₃-)Einspritzung wesentlich reduziert werden. Das Prinzipschema einer solchen Anlage ist aus Figur 4 ersichtlich. Zur Senkung der Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoff-Emissionen ist zusätzlich ein Oxidationskatalysator anzuwenden.

1.4 Emissionswerte

Aus den Tabellen I und II sind typische Emissionswerte für BHKW-Module und reine Heizkesselanlagen ersichtlich. Die Angabe der Emissionswerte erfolgt mit den in der LRV verwendeten Einheiten (mg/m³_N) bei den LRV-spezifizierten Sauerstoffgehalten im Abgas von 5% für Verbrennungsmotoren und 3% für Heizkesselanlagen. In den HC-Werten ist der Methan-(CH₄-)Anteil enthalten. Die Angabe der Bandbreite erfolgt relativ



Figur 4 SCR-Abgaskatalysator
 Prinzipschema

eng, d.h. ohne Berücksichtigung extremer Best- und Ausreisserwerte, und lehnt sich zum Teil auch an die gesetzten LRV-Grenzwerte an. Dies ist beispielsweise beim SCR-Verfahren der Fall, mit dem grundsätzlich tiefere Abgaswerte erreicht werden könnten als in der Tabelle angegeben, jedoch um den Preis einer erhöhten Ammoniak-Konzentration im Abgas (NH₃-Schlupf).

Die angegebenen Werte verstehen sich generell als Richtwerte. Vor allem bezüglich der neueren Technologien (Katalysatortechnik, Low-NO_x-Brenner, SCR-Verfahren) werden erst in einigen Jahren verlässliche Mehrjahreswerte vorliegen. Zusätzlich muss darauf hingewiesen werden, dass Anstrengungen im Gange sind, die Emissionswerte weiter zu senken, beispielsweise bei Motoren, die nach dem Magerkonzept betrieben werden, oder im Bereich der Heizkessel, bei denen der Katalysatoreinsatz Gegenstand von Untersuchungen ist.

Als Emissionskomponenten, die in den Tabellen nicht aufgeführt, aber trotzdem umweltrelevant sind, wären zu nennen die Russ-Emission, die vor allem bei Dieselmotoren ein grosses Problem darstellen kann, und die Emission von Kohlendioxyd (CO₂), das wegen seines Einflusses auf den Treibhauseffekt von Bedeutung ist.

Im Quervergleich zwischen den Brennstoffen Erdgas und Dieseltreibstoff werden beim Einsatz von Erdgas zudem leicht tiefere CO₂-Emissionswerte erzielt. Bezüglich der in den Tabellen nicht aufgeführten Emissionskennwerte schneidet also der Erdgas-einsatz besser ab, nebenbei erwähnt auch bezüglich des erforderlichen Aufwandes zur Einhaltung der LRV, der beim SCR-Verfahren für kleine und mittlere Anlagen eher hoch ist.

2. Variantenvergleich

Um die Umweltaspekte sowie den zusätzlichen Bedarf an fossilen Brennstoffen von Blockheizkraftwerken beurteilen zu können, werden nachfolgend für verschiedene Energieversorgungsvarianten die Brennstoff- und Emissionsbilanzen dargestellt.

Als Beispiel wird für ein fiktives Versorgungsgebiet ein Wärmebedarf von 10 MW zugrunde gelegt. Die ermittelten Zahlen können praktisch ohne Einschränkung für kleinere und grössere Wärmebedarfsfälle in Funktion des Wärmebedarfs umgerechnet werden. Wesentlich für die nachfol-

BHKW-Technologie	Schadstoffemissionen [mg/m ³ N]			
	SO ₂	NO _x	CO	HC
Gas-Ottomotoren				
- ohne Abgasmassnahmen	~0	3000-6000	400-700	200-400
- mit Dreiwege-Katalysator	~0	50-150	200-400	150-400
- Magermotorkonzept	~0	300-400	400-600	200-500
Dieselmotoren				
- ohne Abgasmassnahmen	300	800-6000	200-1200	10-250
- mit SCR-Verfahren	300	400	650	10-250

Tabelle I Emissionswerte von BHKW-Anlagen
(Einheiten und O₂-Gehalt gemäss LRV)

Brenner/ Kessel-Technologie	Schadstoffemissionen [mg/m ³ N]			
	SO ₂	NO _x	CO	HC
Erdgas				
- konventionelle Technologie	~0	120-200	20-100	10-50
- Low-NO _x -Konzept	~0	60-120	20-100	10-50
- mit Katalysator	~0	50	20-100	10-50
Heizöl EL				
- konventionelle Technologie	340	125-250	30-170	40-60
- Low-NO _x -Konzept	340	80-140	30-170	40-60

Tabelle II Emissionswerte von Kessel-Anlagen
(Einheiten und O₂-Gehalt gemäss LRV)

Varianten	Brennstoff	Leistungsanteil Heizkessel	Wirkungsgrade		
			Heizkessel	WP	Gasmotor
Variante A Gaseinzelheizung					
- A 1	Erdgas	100%	85%	-	-
- A 2	Erdgas	100%	90%	-	-
Variante B Heizkessel + WP					
- B 1	Erdgas	70%	85%	3*	-
- B 2	Erdgas	70%	85%	130%	-
- B 3	Erdgas	70%	85%	160%	-
Variante C BHKW	Erdgas	70%	90%		η _{el} = 32% η _{th} = 53%

* Leistungsziffer

Tabelle III Hauptdaten der verschiedenen Varianten

gende Beurteilung ist vor allem die Relation zwischen den verschiedenen Systemen.

Folgende Varianten wurden betrachtet:

- Variante A:
Gaseinzelheizungen
- Variante A 1: bestehende Gaseinzelheizungen

- Variante A 2: neue bzw. sanierte Gaseinzelheizungen mit Low-NO_x-Brenner gemäss Stand der Technik

- Variante B:
Heizkessel, kombiniert mit Wärmepumpen
- Variante B 1: bestehende Einzelheizungen bzw. gemeinsame Heizzentrale mit elektrisch angetriebener

Wärmepumpe (Kompressionswärmepumpe)

- Variante B 2: bestehende Einzelheizungen bzw. gemeinsame Heizzentrale mit Absorptionswärmepumpe
- Variante B 3: gemeinsame Heizzentrale mit Gasmotorwärmepumpe

● Variante C:
Blockheizkraftwerk mit Gasmotoren

In Tabelle III sind die zugrundegelegten Hauptauslegungsdaten für die verschiedenen Varianten zusammengestellt.

Varianten	Wärmeerzeugung		Elektrizitätserzeugung (+) bzw. -bezug (-)		Bedarf an fossilem Brennstoff	
	[MW]	[GWh/a]	[MW]	[GWh/a]	[GWh/a]	
Variante A Gaseinzelheizung						
- A 1	10	20	-	-	23,5	100%
- A 2	10	20	-	-	22,2	94%
Variante B Heizkessel + WP						
- B 1	10	20	-1	-4,4	8,0	34%
- B 2	10	20	-	-	18,2	77%
- B 3	10	20	-	-	16,3	69%
Variante C BHKW	10	20	+1,8	+8	32,5	138%

Tabelle IV Energiebilanz - Bedarf an fossilem Brennstoff

2.1 Bedarf an fossilem Brennstoff

In Tabelle IV sind die Energiebilanzen für die berücksichtigten Varianten zusammengestellt. Dabei ist zu bemerken, dass bei der Variante B 1 gegenüber den anderen Varianten ein zusätzlicher Bedarf an Elektrizität entsteht. Bei der Variante C wird mit fossilem Brennstoff Elektrizität produziert.

Das Verhältnis von Bedarf an fossilem Brennstoff ist in Figur 5 graphisch dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass die gleichzeitig Wärme- und Elektrizitätsproduktion mit Blockheizkraftwerken gegenüber der konventionellen Wärmeversorgung mit Heizkesseln und Stromversorgung gemäss schweizerischen Verhältnissen auf der Basis von Wasser- bzw. Kernkraft eine Erhöhung des Verbrauches an fossilen Brennstoffen von etwa 38 bis 44% verursacht (Vergleich mit den A-Varianten). Der Vergleich mit den B-Varianten fällt noch wesentlich schlechter zuungunsten der Blockheizkraftwerke aus.

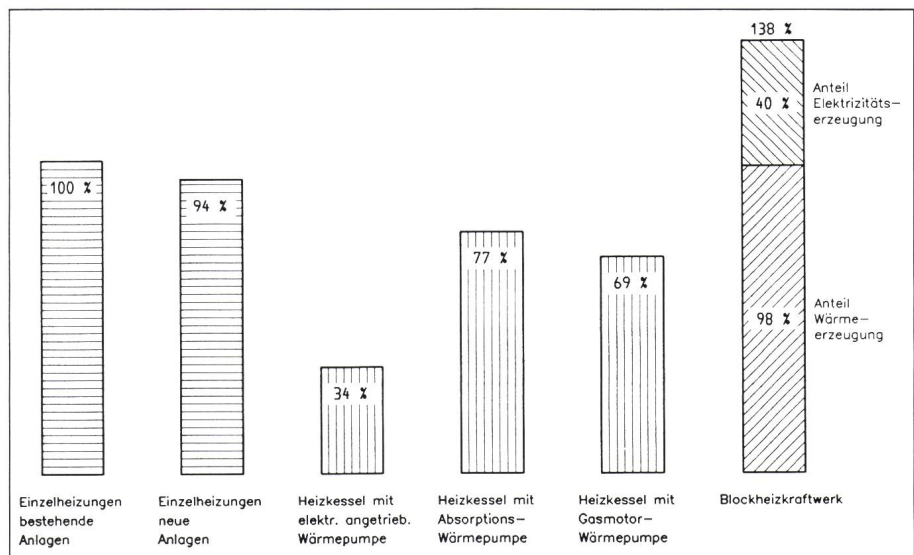
2.2 Emissionsvergleich

Für den folgenden Emissionsvergleich werden gemäss Tabelle III für die verschiedenen Varianten nur Erdgasanlagen betrachtet. Die in der Tabelle V aufgeführten Rechnungswerte stellen aus den vorhergehenden Tabellen I und II ermittelte, gerundete Kennwerte dar (NO_x-Werte angegeben als NO₂, HC-Werte angegeben als CH₄ und enthaltend den CH₄-Anteil). Dabei wurde nicht von Spitzenwerten, die bei optimal eingestellten neuen Anlagen erreichbar sind, sondern bewusst von durchschnittlichen Werten, wie sie über die Lebensdauer der Anlagen zu erwarten sind, ausgegangen.

Der Emissionsvergleich gemäss den

Technologie	Schadstoffemissionen [g/GJ]		
	NO _x	CO	HC
Gas-Ottomotor (mit Dreiwege-Katalysator)	30	90	80
Gasheizkessel (konventioneller Brenner)	45	20	10
Gasheizkessel (Low-NO _x -Technologie)	25	20	10

Tabelle V Emissionsfaktoren, bezogen auf Endenergie



Figur 5 Bedarf an fossilen Brennstoffen

Figuren 6 bis 8 beschränkt sich auf die Komponenten NO_x, CO, HC. Dabei ist zu bemerken, dass der HC-Anteil zum überwiegenden Teil aus Methan (CH₄) besteht, das auch in bedeutendem Ausmass durch nichttechnische Quellen freigesetzt wird. Auf eine Darstellung der CO₂-Emissionswerte wurde verzichtet, da sich die gleichen Ver-

hältnisse wie beim Brennstoffverbrauch ergeben (Proportionalität, siehe Fig. 6). Vereinfachend wurde zudem angenommen, dass Blockheizkraftwerk- und Gasmotorwärmepumpenanlagen gleiche spezifische Emissionswerte aufweisen.

Der folgende Vergleich gilt streng nur für Wärmeversorgungsgebiete mit

Elektrizitätsbezug aus nichtfossilen Kraftwerken, wie dies beispielsweise für die Schweiz zutrifft, nicht jedoch für die Bundesrepublik Deutschland. Wie aus Figur 6 ersichtlich ist, gibt der Vergleich bezüglich NO_x praktisch gleiche Emissionswerte für die Variante A 1 (konventioneller Kessel) und die Variante C (Blockheizkraftwerk).

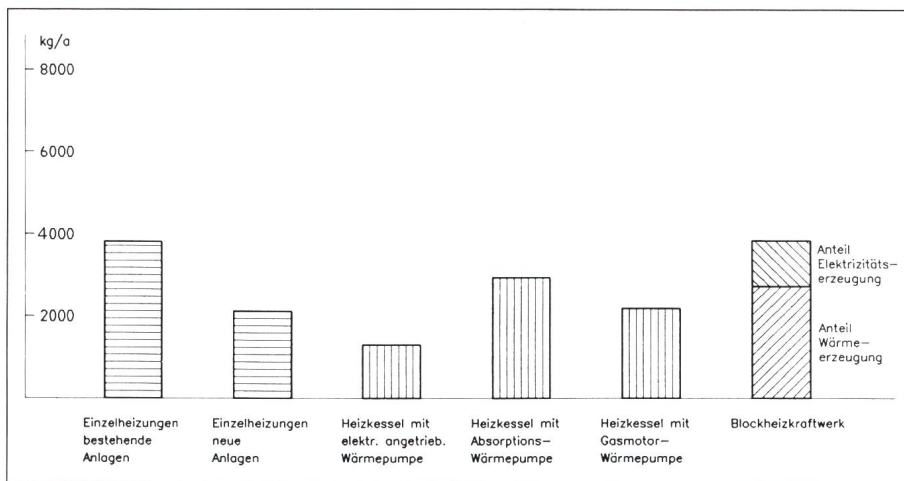
Beim Einsatz fortgeschrittener Brenner-/Kesseltechnologien resultiert jedoch eine Verschiebung zuungunsten der Variante Blockheizkraftwerk. Tiefere Jahresemissionswerte innerhalb des Versorgungsgebiets an NO_x werden vor allem durch die Wärmepumpenanwendungen erreichbar, vornehmlich durch die Elektromotor-Wärmepumpe.

Bezüglich der Komponenten CO und HC (Fig. 7 und 8) ergeben sich die schlechteren Verhältnisse für Verbrennungsmotoranlagen (Gasmotorwärmepumpe und Blockheizkraftwerk), die tiefsten Werte liefert wiederum die Variante B 1 mit elektromotorisch angetriebener Wärmepumpe.

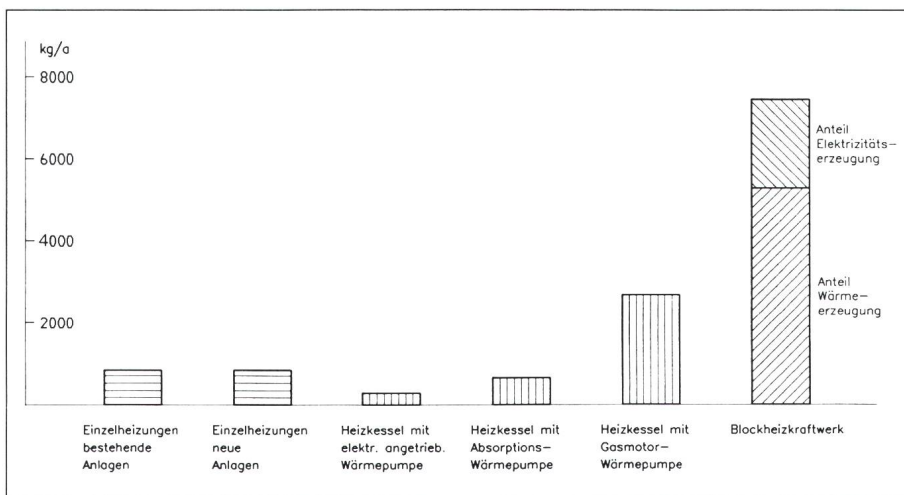
Bei gleichem Stand der Technik, d.h. vor allem bei gleichem Aufwand seitens der Emissionsminderung, wie beispielsweise durch Katalysatortechnik für Verbrennungsmotoren und Heizkesselanlagen, ergeben sich Vorteile für Anlagen mit tiefen Roh-Emissionen. Dies sind betreffend Stickoxiden sicher die reinen Wärmeerzeuger. Der Preis für die thermodynamisch effizientere Umwandlung des Brennstoffes über Anlagen mit Wärme-Kraft-Kopplung liegt darin, dass bei Ausschöpfung des Schadstoffreduktionspotentials durch Primär- und Sekundärmaßnahmen der effizientere Umwandler im allgemeinen höhere Emissionswerte verursacht. Dies ist vor allem für Versorgungsgebiete von Bedeutung, die Elektrizität aus nichtfossilen Kraftwerken beziehen (Fall Schweiz). Auch nur für diesen Fall ergeben sich bei Erweiterung der Untersuchung über das Wärmeversorgungsgebiet hinaus eindeutige ökologische Vorteile des Einsatzes von Elektrowärmepumpen gegenüber den anderen Versorgungsmöglichkeiten.

Literatur

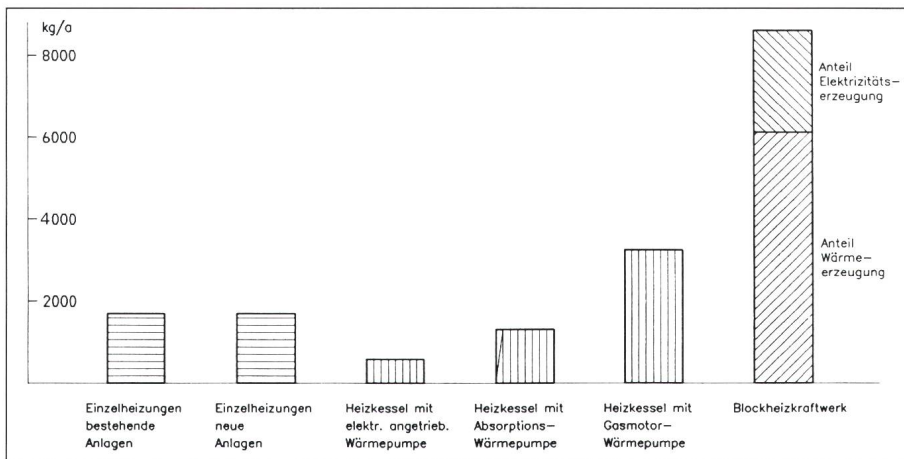
- [1] VDI: Blockheizkraftwerke, Stand der Technik und Umweltaspekte, VDI-Berichte 630, Tagung Essen 23. und 24. Juni 1987.
- [2] Von Horst A. Rostek, Dorsten: Emissionsminderungsmaßnahmen an Gasmotoren und Gasturbinen, Oktober 1987.
- [3] EGES: Expertengruppe Energieszenarien, Schriftenreihe Nr. 9, Wärme-Kraft-Kopplung, MC ING 1987.



Figur 6 Emissionsvergleich - NO_x (kg/a)



Figur 7 Emissionsvergleich - HC (kg/a)



Figur 8 Emissionsvergleich - CO (kg/a)