

Reports

UBA-93-080

Emissionen stationärer Gas- und Dieselmotoren

Wien, August 1993

Bundesministerium für Umwelt,
Jugend und Familie



Impressum:

**Medieninhaber und Herausgeber: Umweltbundesamt, 1090 Wien, Spittelauer Lände 5
Druck: Riegltechnik, 1080 Wien.**

© Umweltbundesamt, Wien, August 1993

**Alle Rechte vorbehalten
ISBN 3-85457-126-7**

Emissionen stationärer Gas- und Dieselmotoren
Report UBA-93-080 – Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Studie beschreibt den heutigen Stand der Technik für gas- und dieselbetriebene Stationärmotoren hinsichtlich der Emissionen von NO_x, SO₂, CO, VOC und Partikeln, sowie des Nutzwirkungsgrades. Die zugrundeliegenden Daten stammen aus einer Industrieerhebung sowie Auswertung von Fachliteratur und Expertengesprächen.

Gasmotoren mit $\lambda=1$ – Konzept und 3-Weg-Katalysator bzw. Gas-Magermotoren mit Oxidationskatalysator, sowie Dieselmotoren mit nachgeschalteter SCR-DeNO_x-Anlage werden als moderne Stationärmotoren zur Erzeugung von Kraft, Strom und Wärme (z.B. als Blockheizkraftwerk) verwendet. Mit diesen Motorsystemen können die derzeit in Deutschland und in der Schweiz geltenden Emissionsgrenzwerte unterschritten werden.

Emissions from Stationary Gas- and Diesel-Engines
Report UBA-93-080 – Abstract

This study describes the best available technology for stationary gas- and diesel-engines with respect to emissions of NO_x, SO₂, CO, VOC and particles, as well as efficiency. The reported data are derived from questionnaires filled in by the industry, published literature and expert consultations.

Modern stationary engines are used for production of electricity, mechanical power and heat (e.g. as total energy modules). They are based on gas-engines with a 3-way-catalyst, lean-burn-engines and diesel engines with SCR-DeNO_x. They are able to meet current emission standards in Germany and Switzerland.

1 Einleitung

Ziel dieser Studie zu stationären Diesel- bzw. Gasmotoren ist die Feststellung des gegenwärtigen Standes der Technik bei der Emissionsminderung von NO_x , SO_2 , CO , VOC und Ruß sowie beim Wirkungsgrad der Anlagen. Weiters wird ein Vergleich mit öffentlichen Energieversorgern durchgeführt.

1.1 Problemstellung

Stationäre Gas- und Dieselmotoren kommen in vielen Anwendungsgebieten zum Einsatz, beispielsweise als Stromaggregate, Kompressoren oder Pumpen. In letzter Zeit werden verstärkt Stationärmotoren in Kraft- Wärme- Kopplungen (KWK) - bei gleichzeitiger Nutzung der mechanischen Leistung und der Abwärme - oder als Antrieb für Wärmepumpen eingesetzt. Stationärmotoren werden auch zur energetischen Nutzung von Deponie- oder Klärgas verwendet. Einige Betriebe verwenden Stationärmotoren zur Stromerzeugung, wenn dadurch Strom billiger als vom öffentlichen Netz bereitgestellt werden kann.

In Europa werden 74% der Blockheizkraftwerke mit Gasotomotoren ($\lambda=1$ bzw. Magerprinzip), 11% mit Gaszündstrahlmotoren - wenn mittlere und hohe Zylinderleistungen benötigt werden - und 15% mit Dieselmotoren betrieben /Jenbacher/. Letztere finden als Notstromaggregate und zur Spitzenstromabdeckung Verwendung.

Motoren, deren Abwärme genutzt wird (z.B. BHKW) haben einen energetischen Gesamtwirkungsgrad bis 90% (davon entfallen im Schnitt 40% auf mechanische Arbeit und 50% auf Wärme). Das ist zweifellos von großem Interesse im Hinblick auf einen verantwortlichen Umgang mit nicht erneuerbaren Ressourcen, hier Erdgas und Erdöl, und die Reduktion der CO_2 - Emissionen.

Umweltrelevante Emissionen, wie NO_x , SO_2 , Kohlenwasserstoffe und Ruß müssen ebenfalls betrachtet werden. In der gegenständli-

chen Arbeit werden vor allem Motoren zur Stromerzeugung- mit Nutzung der Abwärme - behandelt. Die Ergebnisse können aber leicht auf Motoren für andere Anwendungszwecke übertragen werden.

1.2 Methodik

Neben entsprechender Fachliteratur bildet eine Industrieerhebung die Grundlage dieser Studie. Etwa 30 in- und ausländische Hersteller von Motoren, Blockheizkraftwerken und Abgasreinigungsanlagen nahmen 1993 zu folgenden Fragen des Umweltbundesamtes Stellung:

- 1.) Welche schadstoffminimierenden Maßnahmen können gesetzt werden?
- 2.) Welche Methoden können als Stand der Technik angesehen werden?
- 3.) Welche zukünftigen Entwicklungen sind zu erwarten?
- 4.) Welche Grenzwerte werden mit diesen Methoden erreicht?
- 5.) Welche Kosten entstehen durch emissionsmindernde Maßnahmen?
- 6.) Inwiefern beeinflussen diese die Wirtschaftlichkeit der Anlage?
- 7.) Wie hoch ist der mechanische, thermische bzw. elektrische Wirkungsgrad einer stationären Anlage?
- 8.) In welchem Zusammenhang stehen der Wirkungsgrad der Anlage und die Effizienz der Schadstoffminderung?

Die Ergebnisse dieser Umfrage bilden den Kern der Studie. Sie ergeben ein recht konsistentes Bild der gegenwärtigen Situation.

Im folgenden werden die Emissionen verschiedener moderner Motorsysteme kurz beschrieben.

2 Technische Beschreibung

In diesem Kapitel werden die Funktionsprinzipien verschiedener Stationärmotoren beschrieben, die als Blockheizkraftwerke verwendet werden.

Ein Motor dient der Umwandlung von Verbrennungswärme in mechanische Energie. Das geschieht durch Verbrennung mit einem bestimmten Wirkungsgrad (thermodynamischer Wirkungsgrad), der prozeßbedingt ist und nicht überschritten werden kann. Der Rest der Energie des Brennstoffs wird als Wärme an die Umgebung abgegeben. In erster Näherung ist dieser thermodynamische Wirkungsgrad vom Druck- bzw. Temperaturunterschied während des ganzen Prozesses abhängig. Vereinfacht bedeutet das, daß bei höherer Verbrennungstemperatur und höherer Verdichtung ein höherer thermodynamischer Wirkungsgrad erreicht werden kann - abgesehen von den höheren Anforderungen an das Material. Zu beachten ist, daß allerdings, hauptsächlich wegen Reibungsverlusten im Motor, nur ein Teil dieser Energie mechanisch nutzbar gemacht werden kann. Kompression und Verbrennungstemperatur können nicht beliebig erhöht werden, weil dadurch diese inneren Verluste größer werden.

Bei der Kompression von Gasen erhöht sich deren Temperatur. Das wird beim Dieselmotor ausgenutzt: der Treibstoff wird in die heiße komprimierte Verbrennungsluft eingespritzt und entzündet sich von selbst, daher die Bezeichnung "Selbstzündungsmotor". Dieseldieselmotor ist der wichtigste Kraftstoff für Selbstzündungsmotoren. Beim Ottomotor dagegen wird bereits ein Brennstoff-Luftgemisch verdichtet, allerdings nicht bis zum Zündpunkt, und mit einem elektrischen Funken gezündet, daher die Bezeichnung "Fremdzündungsmotor". Als Treibstoff für den Ottomotor wird Benzin und verschiedene gasförmige Brennstoffe verwendet. Diese Vorgangsweise ist notwendig, um einen genauen Zündzeitpunkt zu gewährleisten, der ein wesentlicher Parameter für ein gutes Funktionieren des Mo-

tors ist. Daß übrigens beide Motoren in einer 2- und 4-Takt-Variante gebaut werden, soll nur am Rande erwähnt werden, da laut der Umfrage als Stationärmotoren nur 4-Taktmotoren verwendet werden.

Eine weitere Motorenvariante sind die Diesel-Gasmotoren: bei diesem Prinzip wird ein Gas-Luftgemisch wie beim Dieselmotor verdichtet und durch Einspritzen von Dieselöl gezündet (daher auch die Bezeichnung "Zündstrahlmotor"). Etwa 10 gew% des Treibstoffes werden durch Diesel bereitgestellt. Sowohl bezüglich des Wirkungsgrades als auch der Emissionen liegt dieser Motor zwischen Diesel- und Gas-Ottomotor. Der effektive Wirkungsgrad von Ottomotoren liegt bei 30-40%, der von Dieselmotoren bei 40-50%. Typische Emissionen von Motoren ohne spezielle Reduktionsmaßnahmen sind Tabelle 2.1 zu entnehmen /Jenbacher/:

Tabelle 2.1 Emissionen in mg/m³ -
Motoren ohne Reduktionsmaßnahmen

	Ottomotor	Dieselmotor
NO _x (5% O ₂)	4000 - 8000	3000 - 6000
CO (5% O ₂)	300 - 10000	300 - 800
VOC (5% O ₂)	300 - 2000	20 - 200
Ruß	0	10 - 100

3 Luftschadstoffe

In diesem Kapitel werden die Luftschadstoffe SO_2 , Partikel/Ruß, CO , flüchtige Kohlenwasserstoffe, NO_x und CO_2 betrachtet.

3.1 SO_2

SO_2 entsteht durch Oxidation von Schwefelverbindungen in Kraftstoffen bei der Verbrennung mit Luft, wobei ein Teil des SO_2 zu SO_3 oxidiert werden kann (besonders in oxidativ wirkenden Katalysatoren). Mit basischen Rauchgaskomponenten können sich dann Salze bilden, z.B. Ammoniumbisulfat in einer DeNOx Anlage mit Ammoniak-SCR (selektiver katalytischer Reduktion). Diese Salze lagern sich am Katalysator ab und verschlechtern dessen Effektivität.

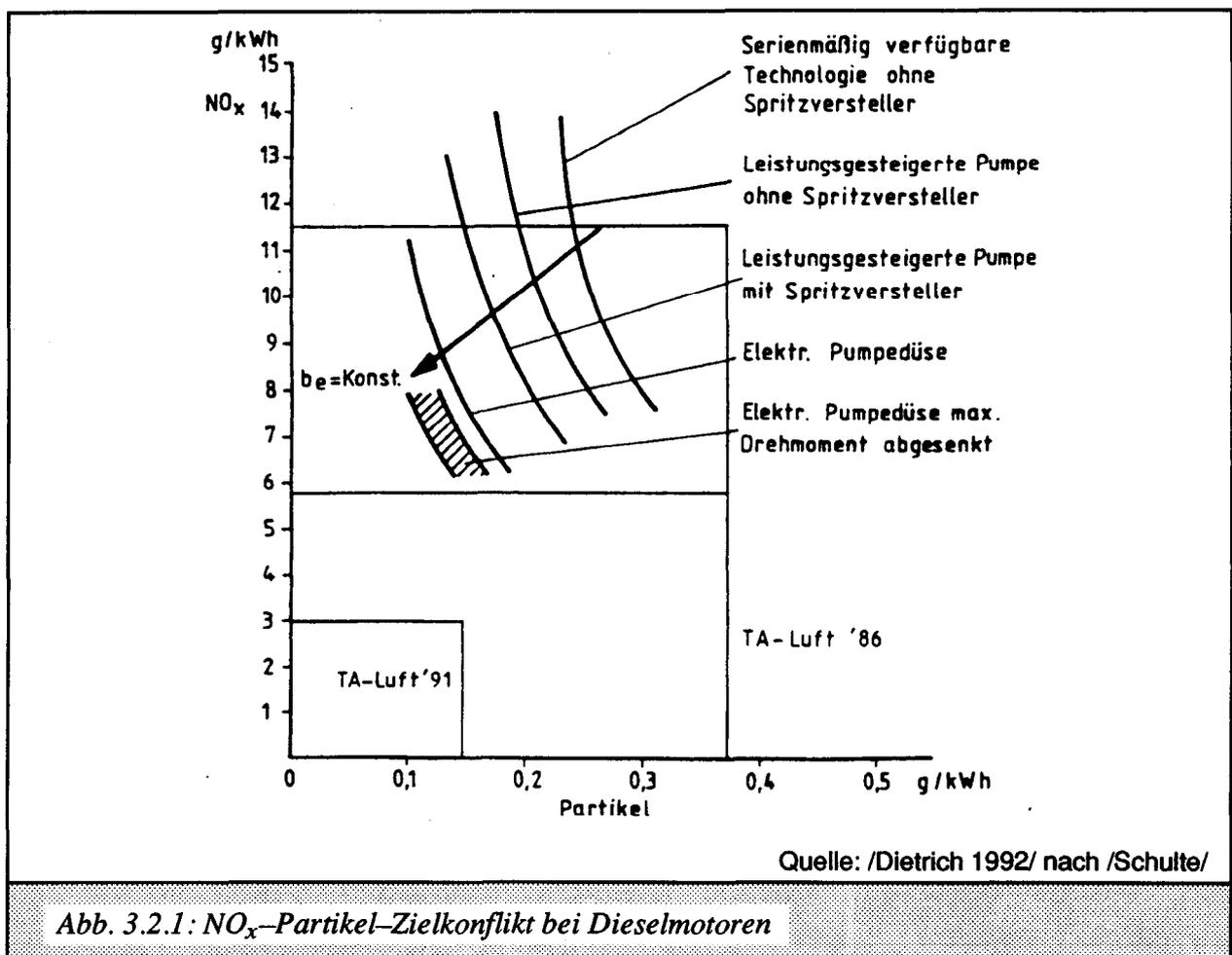
3.2 Partikel/Ruß

Ruß aus Dieselmotoren steht im Verdacht, krebserregend zu sein /Hug 1993/. Die Rußbildung tritt nach Bosnjakovic /Bosnjakovic 1956/ - abhängig vom jeweiligen Kohlenwasserstoff - unterhalb eines kritischen Luftverhältnisses ein. Die heterogene Gemischbildung im Dieselmotor führt trotz hohem Luftüberschuß ($1 < \lambda < 4$) zu lokalen Luftmangel ($\lambda < 0,6$) und daher zu Rußbildung, welche typisch für den Dieselmotor ist /Pischinger 1988a, 1989/. "Heterogen" bedeutet hier, daß neben gasförmigem Brennstoff auch Tröpfchen vorhanden sind. Nach Dietrich /Dietrich 1992/ wäre der optimale Bereich örtlicher Luftverhältnisse zur Vermeidung von Rußbildung (unter gleichzeitiger Minderung der NO_x -Emissionen) $0,6 < \lambda < 0,9$. Dieser wird aber von keinem heutigen Dieselmotor erreicht. Der entstandene Ruß kann im Lauf des Verbrennungszyklusses unter gewissen Bedingungen wieder verbrannt werden, allerdings entstehen bei diesen Bedingungen hohe Anteile an Stickoxiden.

Die homogene Gemischbildung bei Gasmotoren vermeidet örtliche Luftkegel weitgehend, sodaß Rußemissionen dort nicht das zentrale Problem darstellen.

Abb. 3.2.1 (nach /Schulte 1992/) beschreibt Verbesserungen bei der Gemischbildung von Dieselmotoren und die erreichten Ruß- und NO_x -Emissionen ohne abgasseitige Minderungsmaßnahmen. Man erkennt, daß es ohne Änderung wesentlicher Motorparameter nicht möglich ist, NO_x - und Rußemissionen gleichzeitig zu mindern, denn sie verhalten sich gegenläufig.

Neben Ruß sind Anteile an Sulfaten und angelagerte Kohlenwasserstoffe unter den Partikeln vorhanden.



3.3 CO

Kohlenmonoxid entsteht bei unterstöchiometrischer Verbrennung von Kohlenwasserstoffen und bei der Reduktion von CO_2 durch glühenden Kohlenstoff (Boudouard-Reaktion). In der Atmosphäre wird es zu CO_2 oxidiert. Ähnliches wie in Abb. 3.2.1 für das Verhältnis Ruß - NO_x gilt auch für CO- NO_x , nämlich daß die Bildung dieser beiden Stoffe gegenläufig ist.

3.4 VOC (auch Methan)

Flüchtige Kohlenwasserstoffe (VOC- volatile organic compounds) entstehen bei unvollständiger Verbrennung. Ebenso wie im Falle von Ruß und CO verhält sich deren Bildung gegenläufig zur NO_x -Bildung. Bei Erdgasmotoren muß vor allem mit Emissionen von Methan gerechnet werden, typisch mit 0,1 Vol% /Jenbacher/ (etwa 700 mg/m^3). Betrachtet man die Emissionen hinsichtlich der Treibhauswirkung, so wiegen die Methanemissionen eines Gasmotors in etwa dessen geringere spezifische CO_2 -Erzeugung (siehe auch Kap. 3.6) auf.

3.5 NO_x

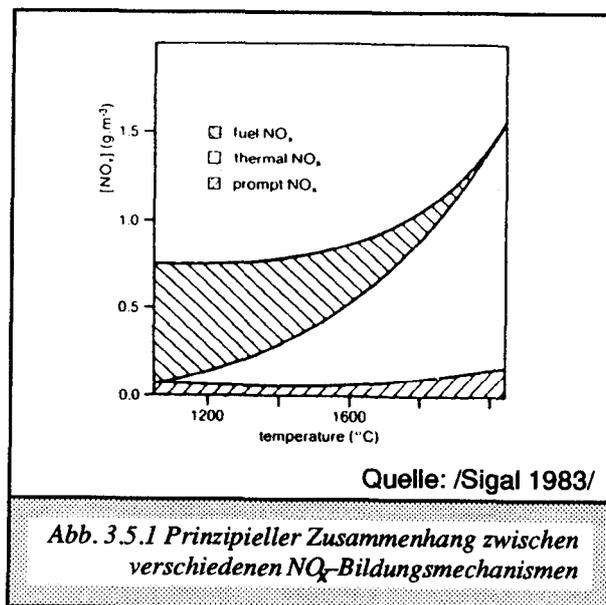
Unter NO_x werden die Stickoxide NO und NO_2 zusammengefaßt. Aus NO bildet sich NO_2 während der Verbrennung durch Oxidation in Anteilen bis 10%. Die Bildung von Stickoxiden bei Verbrennungsprozessen kann durch folgende drei Prozesse beschrieben werden:

- Thermische NO_x -Bildung
- Brennstoff- NO_x - Bildung
- Prompte NO_x -Bildung

Thermisches NO_x bildet sich nach dem Mechanismus von Zeldovich /Zeldovich 1946/ aus Luftstickstoff und Luftsauerstoff. Die Reak-

tion verläuft bei höherer Temperatur schneller, als Richtwert für eine beginnende Reaktion gilt 1300°C /Schöngruber 1989/. Brennstoff- NO_x bildet sich durch Gasphasenoxidation von Stickstoffverbindungen des Brennstoffes /Fenimore 1972/. Die Bildung ist von der Flammentemperatur weitgehend unabhängig, ebenso von der Beschaffenheit der Stickstoffkomponente. Promptes NO_x bildet sich über HCN als Zwischenprodukt aus NO-Radikalen und Kohlenwasserstoffen bei fetten Gemischen. Die Reaktion ist praktisch nicht temperaturabhängig /Fenimore 1970,1972/.

Abb. 3.5.1 zeigt die prinzipiellen Zusammenhänge bei der NO_x -Bildung /Sigal 1983/. Die angegebene Temperatur ist die Flammentemperatur. Obwohl die Abbildung nicht speziell für Motoren gilt, ist die Kernaussage übertragbar, nämlich daß der Hauptanteil der NO_x -Emissionen aus thermischem NO_x besteht.



Die Bildung von NO_x in Motoren zeigt Abb. 3.5.2 /Deutz 1992/ am Beispiel eines Otto- Gasmotors.

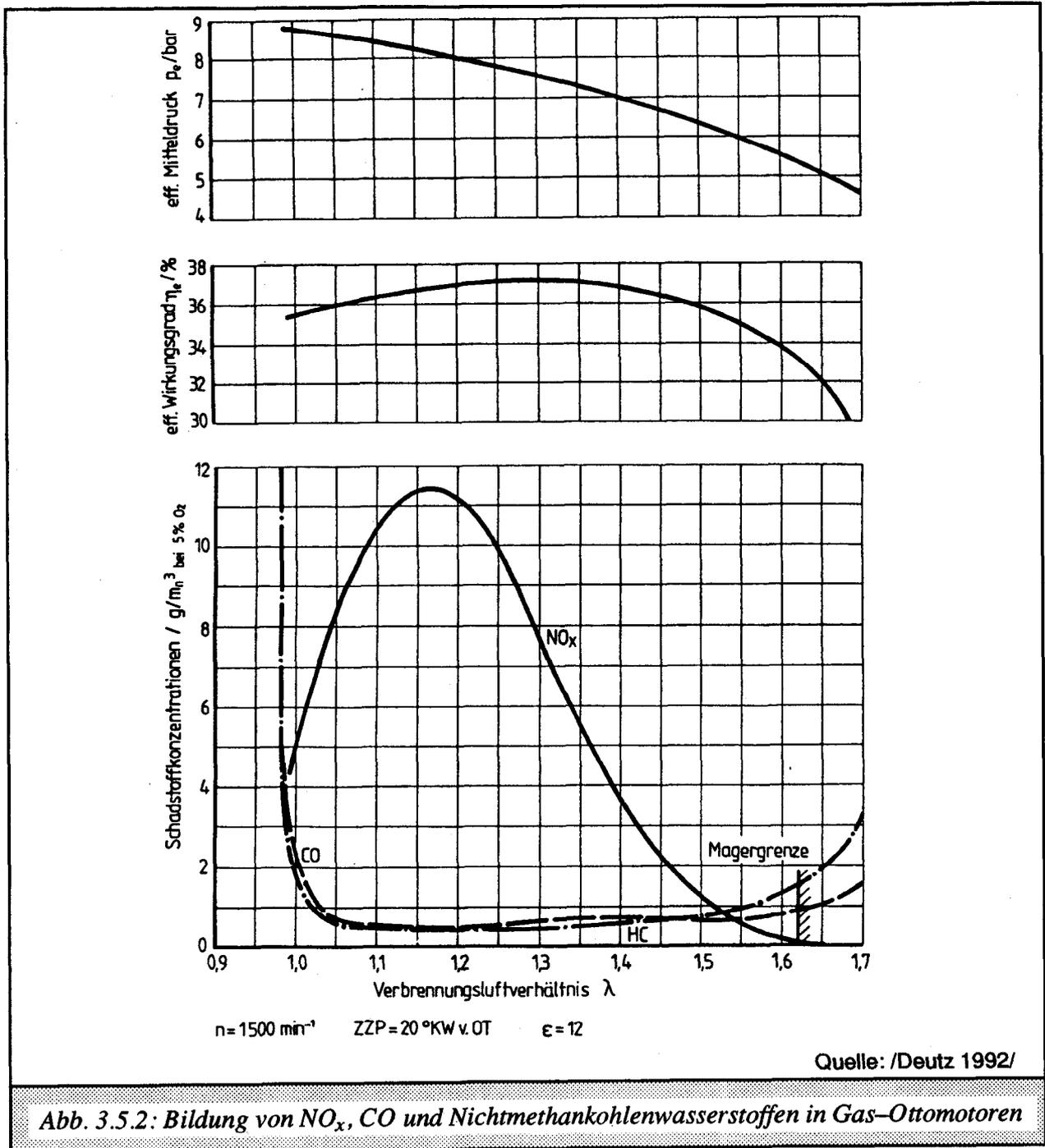


Abb. 3.5.2: Bildung von NO_x , CO und Nichtmethankohlenwasserstoffen in Gas-Ottomotoren

Die Höhe der NO_x -Emissionen im Bereich des Wirkungsgradoptimums beträgt 2000 bis 4000 ppm, das sind etwa 4000 bis 8000 mg/m^3 . Nach Amstutz /Amstutz 1991/ betragen die NO_x -Emissionen von PKW-Otto- und PKW-Dieselmotoren 2 bis 15 g/kWh , das sind bei einem angenommenen Treibstoffverbrauch von 210 g/kWh rund 700 bis 5000 mg/m^3 im Abgas.

Neben NO und NO_2 emittieren Motoren mit SCR-DeNOx geringe Mengen an N_2O (Lachgas).

3.6 CO_2

CO_2 entsteht bei der vollständigen Verbrennung von Kohlenstoff oder Kohlenstoffhaltigen Verbindungen. CO_2 -Emissionen stehen also in direktem Zusammenhang mit dem Kohlenstoffgehalt des Treibstoffes und mit der verbrannten Treibstoffmenge. Für die spezifischen Emissionen der erzeugten Elektrizität oder Wärme ist daher einerseits der Wirkungsgrad entscheidend, andererseits die Art des Treibstoffes. Mit höherem Wirkungsgrad nehmen die spezifischen CO_2 -Emissionen ab, ebenso mit geringerem C-Gehalt des Treibstoffes. Methan erzeugt rund 50 $\text{g CO}_2/\text{MJ}$ Primärenergie und Diesel etwa 75 g/MJ . Wasserstoff als Energieträger hätte keine CO_2 -Emissionen, entsprechende Motoren werden jedoch derzeit nicht serienmäßig gefertigt.

4 Reduktionsmaßnahmen

4.1 SO₂

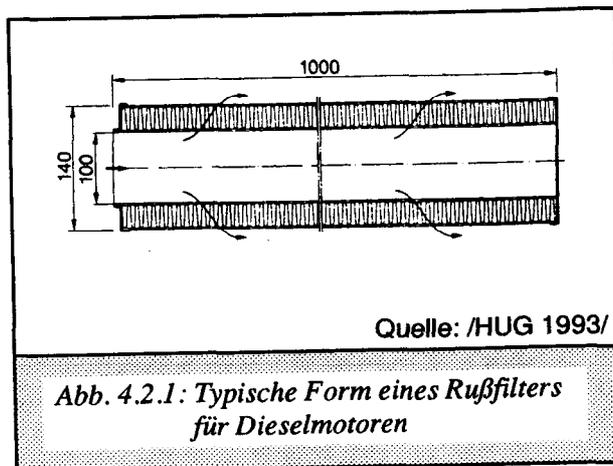
Eine Minderung der SO₂- Emissionen eines Dieselmotors kann nur über die Senkung des S- Gehalts in Kraftstoffen erfolgen. Ab 1.10.95 wird in Österreich der Schwefelgehalt in Diesel mit 0,05% limitiert /Kraftstoffverordnung 1992/. Dieser entspricht einer SO₂ Emission von etwa 75 mg/m³. Der heute gültige Grenzwert ist 0,15% (entsprechend 215 mg/m³ SO₂). EG-weit soll ab 1.10.96 der Schwefelgehalt in Dieselmotorkraftstoff von derzeit 0,2% auf 0,05% gesenkt werden.

Ein alternativer Kraftstoff für Stationärmotoren mit einem Schwefelgehalt von rund 0,006% wäre z.B. Rapsmethylester (RME), dessen prinzipielle Tauglichkeit nachgewiesen wurde /Dietrich 1991/. Detailprobleme bei der Anwendung, besonders in Stationäranlagen (Materialverträglichkeit, Lagestabilität), bedürfen der Lösung.

4.2 Ruß

Die Rußbildung beim Dieselmotor ist ein Problem der Gemischbildung /Pischinger 1989/. Eine verbesserte Gemischbildung gilt daher als wirkungsvollste Primärmaßnahme zur Rußminderung.

Als Sekundärmaßnahmen können Rußfilter angewendet werden, allerdings befinden sie sich größtenteils noch in der Erprobung /Lutz 1993/. Ein Beispiel für ein Rußfilter ist ein Tiefenfilter aus verstrickten keramischen Fasern /Hug 1993, Buck/ (siehe Abb. 4.2.1), das im Verbund mit Harnstoff-SCR verwendet wird.



Der Betrieb eines Rußfilters besteht aus einer Abscheidephase und anschließender Regenerationsphase. Eine Möglichkeit der Regeneration ist die Beimengung von Ferrocen ($\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$) zum Kraftstoff. Dabei wird der Ruß oxidiert und Ferrocen zu Fe_2O_3 oxidiert, welches zu 95% im Filter verbleibt. Der Druckanstieg im Abgassystem durch diese irreversible Ablagerung ist angeblich gering /Hug 1993/. Eine andere Möglichkeit besteht darin, bei erhöhter Abgastemperatur den Ruß auszubrennen. Eine katalytischen Beschichtung des Filtermaterials hilft, die dazu nötige Temperatur zu senken.

Der Einsatz von oxidativen Rußfiltern wird nach Tritthart /Tritthart 1991/ durch eine Verringerung des Schwefelgehaltes im Kraftstoff auf 0,05% begünstigt.

Weil eine schlechte Gemischbildung, bedingt durch Crackreaktionen bei der Verdampfung des Diesels, Ursache für die Rußbildung ist (Kap. 3.2.), wäre zu überprüfen, ob es möglich ist, durch Veränderung der Kraftstoffzusammensetzung, etwa der Reduktion des Anteils höher siedender Kohlenwasserstoffe, eine Verringerung der Rußbildung zu bewirken. Derartige Untersuchungen sind dem Autor nicht bekannt.

4.3 CO, VOC

CO und VOC entstehen durch unvollständige Verbrennung des Treibstoffes. Minderungen können motorintern durch höheren Luftüberschuß erzielt werden. Ab einem bestimmten Luftüberschuß (z.B. $\lambda \geq 1,7$ bei Gasmotoren) nehmen die CO- und VOC- Emissionen allerdings wieder zu.

Als Sekundärmaßnahmen sind 3-Wegkatalysatoren ($\lambda=1$ - Betrieb) oder bloße Oxidationskatalysatoren (in beiden Fällen Edelmetallkatalysatoren) in Anwendung.

4.4 NO_x

Von den prinzipiellen Minderungstechniken werden hier nur jene herausgegriffen, die für Verbrennungsmotoren Anwendung finden.

Es gibt drei Ansatzpunkte zur NO_x- Minderung: Verringerung des N-Gehaltes im Kraftstoff, motorinterne Maßnahmen - die im wesentlichen alle auf eine Verringerung der Flammentemperatur abzielen - und nachgeschaltete Verfahren.

Bei hoher Primärenergieausnutzung entstehen höhere NO_x- Emissionen/Hug 1993, MWM 1993, Ditrich 1988/, sofern nur innermotorische Maßnahmen zur Anwendung kommen. Abb. 3.5.2 verdeutlicht diese Zusammenhänge.

4.4.1 N- Reduktion im Kraftstoff

Die Reduktion des Stickstoffgehaltes im Treibstoff wäre nur für Diesel relevant. Beträgt der Stickstoffgehalt im Diesel 0,02% /Tauscher 1993/, trägt er zur gesamten NO_x- Emission eines Dieselmotors bei vollständiger Umsetzung maximal 60 mg NO₂/m³ bei, das sind etwa 1-6 % - je nach Motorbauart.

4.4.2 Konzept: Magermotor

Das Magermotorkonzept wird bei Gas-Ottomotoren angewendet und nützt das in Abb. 3.5.2 dargestellte prinzipielle Emissionsverhalten von Ottomotoren. Es versucht, NO_x -Emissionen dadurch zu mindern, daß der Motor bei hohen Luftüberschüssen ($\lambda > 1,5$) betrieben wird. Das Hauptproblem stellt die aussetzerfreie Zündung und die gleichmäßige vollständige Verbrennung solcher Magergemische dar /Dietrich 1988, Hirschbichler 1987/, was aber durch eine optimale Auslegung des Motors, guter innerer Gemischverteilung und Verwendung von Hochenergiezündsystemen gelöst werden kann.

Aus derselben Abbildung ist auch ein prinzipielles Problem des Magermotors ersichtlich: sinkender Wirkungsgrad, steigende CO und Kohlenwasserstoffemissionen. Der Wirkungsgradverlust kann durch Aufladung des Motors wettgemacht werden. Dietrich /Dietrich 1988/ beschreibt das Konzept einer homogenen Magergemischaufladung, also einer Aufladung nach dem Vermischen von Luft und Brennstoff. Um hier niedrige NO_x -Emissionen zu erreichen und klopfende Verbrennung zu vermeiden, muß das verdichtete Gemisch zwischengekühlt werden. Der erreichte effektive Wirkungsgrad von 37% ist mit dem höchsten Wirkungsgrad nicht aufgeladener konventioneller Motoren vergleichbar- allerdings mit den guten NO_x -Emissionswerten eines Magermotors (siehe auch Abb. 3.5.2).

Mit dem Magerkonzept können die derzeit gültigen Grenzwerte in Deutschland (TA-Luft, UMK-Beschluß 1991) ohne die Verwendung von Katalysatoren eingehalten werden. Das ist durchaus relevant für die Verwendung von Deponie- oder Klärgasen, welche Katalysatorgifte enthalten können (z.B. Schwermetalle, Cl- und S- Verbindungen).

4.4.3 Konzept $\lambda=1$ - Motor mit NSCR

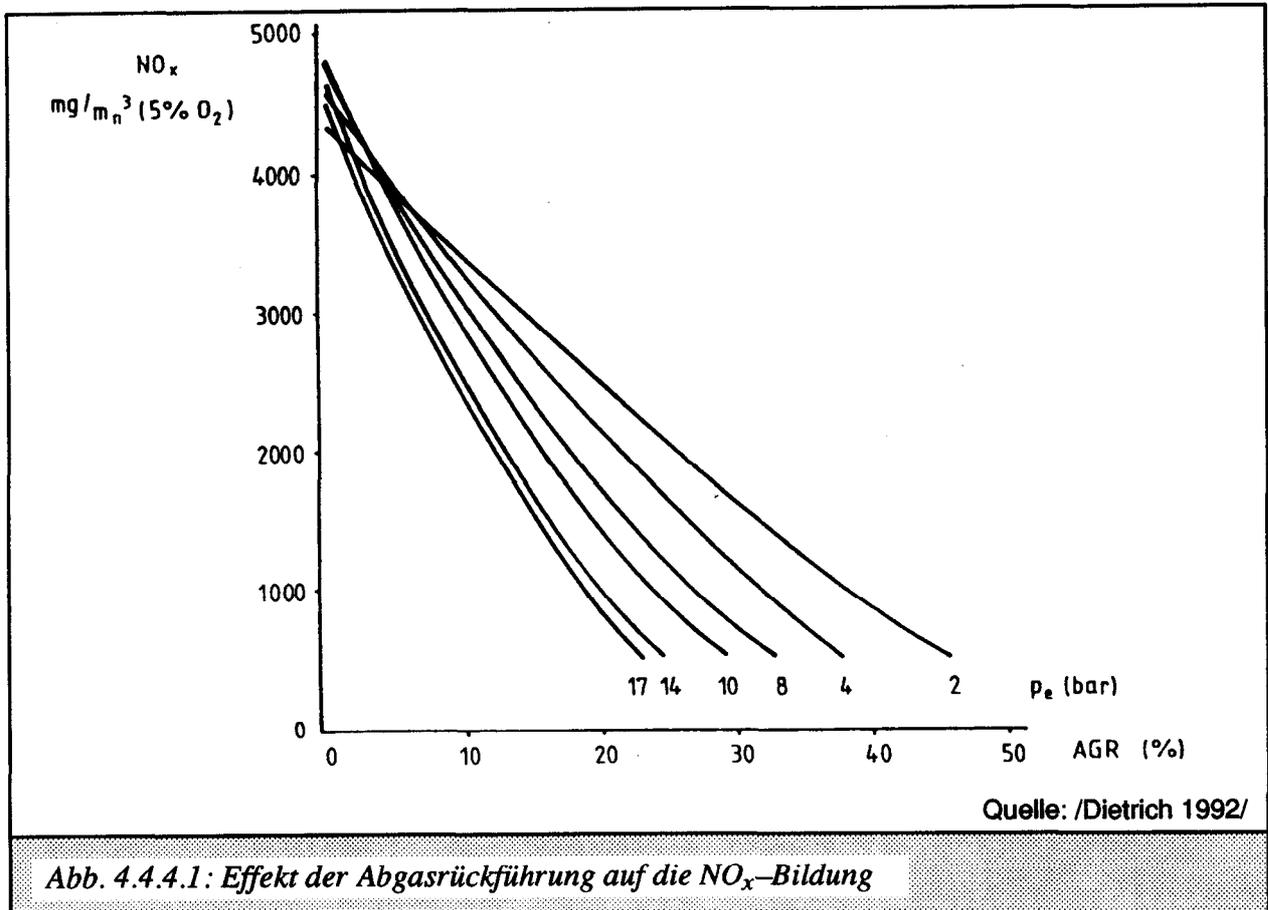
Mit Hilfe der nicht selektiven katalytischen Reaktion (NSCR) - besser bekannt als der 3-Weg-Katalysator von Automobilen - können simultan Luftschadstoffe wie NO_x , CO und VOC reduziert werden. Der Sauerstoffgehalt im Abgas muß dazu genau eingestellt werden. Aufgrund der steilen Kennkurve hat die NSCR nur in einem kleinen λ -Bereich von 0,986 bis 0,990 /Dietrich 1988/, also bei leicht fetter Gemischeinstellung, optimale Reduktionsraten. Diese Technologie kommt im Bereich Stationärmotoren nur für Gas-Otto-Motoren in Frage.

Grundbedingung dieser Technologie ist eine exakte Einhaltung des vorgegebenen λ - Bereichs (oder auch " λ -Fenster" genannt). Der Sauerstoffgehalt im Abgas vor dem Katalysator wird mit einer sogenannten λ -Sonde (üblicherweise aus Zirkonoxid- oder Titanoxid - Keramik) gemessen. Dementsprechend wird das Kraftstoff- Luftverhältnis geregelt.

Mit diesem Konzept können aufgrund der erhobenen Daten die niedrigsten Abgaswerte von Stationärmotoren erreicht werden (siehe Tabelle 5.1.1), allerdings sind die Motoren nicht für die Verbrennung von ungereinigtem Klär- und Deponiegas geeignet. Die Standzeit für Erdgasbetrieb beträgt 25.000 Betriebsstunden /Dietrich 1991/.

4.4.4 Abgasrückführung

Abb. 4.4.4.1 beschreibt den prinzipiellen Effekt von Abgasrückführung (AGR) auf den NO_x -Gehalt im Abgas.



Ein Beispiel dafür ist die AGR in einem Comprex-Motor. Amstutz beschreibt eine partielle Abgasrückführung über den Comprex-Lader /Amstutz 1991/. Im stationären Betrieb erfolgt eine Reduktion der Stickoxide bis 60%. Die Emissionswerte liegen für NO_x bei 50% der US-Norm FTP 75 (das bedeutet 310 mg/km oder etwa 110 mg/m³ bei 5% O_2).

4.4.5 Selektive katalytische Reduktion (SCR)

Die SCR- Technik weist ein sehr hohes Minderungspotential auf, weswegen bei großen Motoren folgendes Konzept angewendet wird: Ein Motor (meist ein Dieselmotor, wegen des höheren Wirkungsgrades) wird bei optimalem Wirkungsgrad betrieben. Bei diesem Betriebszustand entstehen die höchsten NO_x - Emissionen. Die Stickoxide werden mittels SCR unter Verwendung von Ammoniak /Schöngruber/ oder Harnstoff /Koebel 1992, Hug 1993/ und Metalloxidkatalysatoren (TiO_2 , V_2O_5 , MoO_3 , WO_3) gemindert. Bei diesem Verfahren sind der NH_3 - Schlupf und im Falle von Harnstoff als Reduktionsmittel die Bildung von N_2O zu beachten. Als Katalysatorgifte gelten Alkalien und Arsen. Bei Konversionsraten über 80% wird eventuell vorhandenes SO_2 zu SO_3 oxidiert, was in weiterer Folge zur Bildung von Ammoniumbisulfat und damit verbundener Verkrustung von Anlagenteilen und Erhöhung von Partikelemissionen führen kann.

Die Verwendung von Harnstoff anstelle von Ammoniak gilt als problemlos /Koebel 1991/ und zeichnet sich durch einfachere Handhabung und Lagerung aus. Die NO_x - Reduktionsraten sind vergleichbar.

Die beiden Reaktionen lassen sich durch folgende Summengleichungen darstellen:

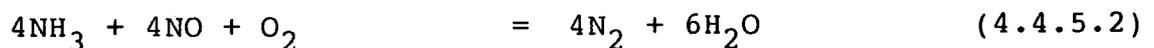
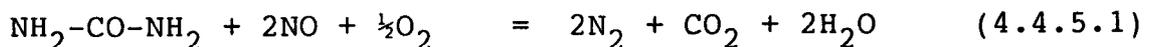


Abb. 4.4.5.1 /Hug 1993/ veranschaulicht ein System, bestehend aus Motor und katalytischer Abgasreinigung. In diesem Fall ist die SCR mit einem Oxidationskatalysator verbunden, um die CO- und VOC-Emissionen zu mindern.

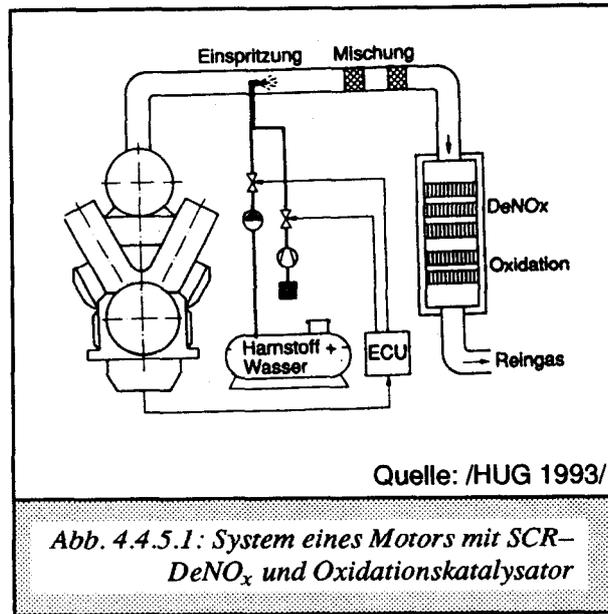


Abb. 4.4.5.1: System eines Motors mit SCR-DeNO_x und Oxidationskatalysator

Abb. 4.4.5.2 stellt den prinzipiellen Reaktionsverlauf in der oben erwähnten Katalysatorkette dar /Hug 1993/.

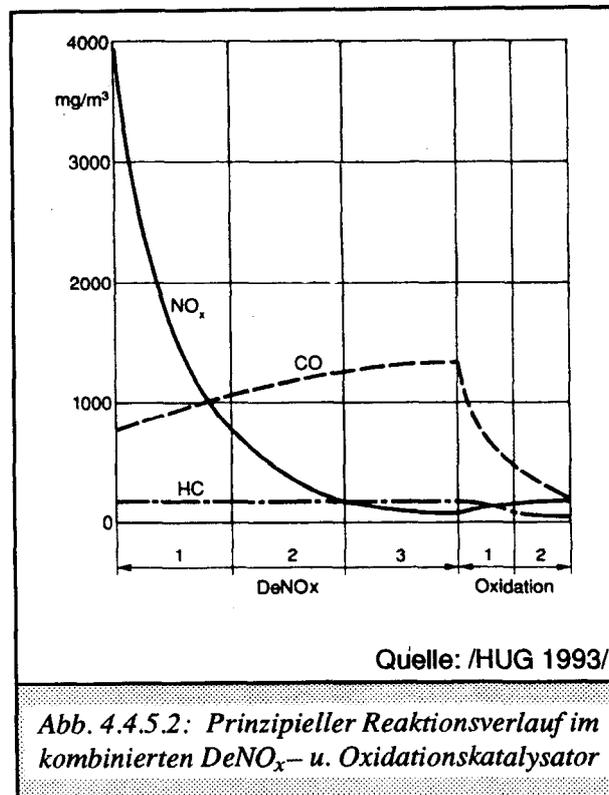


Abb. 4.4.5.2: Prinzipieller Reaktionsverlauf im kombinierten DeNO_x- u. Oxidationskatalysator

4.5 CO₂

CO₂- Emissionen stehen in direktem Zusammenhang mit dem Kraftstoffverbrauch. Minderungen lassen sich somit durch bessere Kraftstoffausnutzung (also höheren Gesamtwirkungsgrad) erzielen. Ein weiterer Punkt ist die Beschaffenheit des Kraftstoffes. Aufgrund des hohen Wasserstoffgehaltes erzeugt die vollständige Verbrennung von Methan etwa 50 g CO₂/MJ, die von Dieselöl rund 75 g/MJ.

Der effektive Wirkungsgrad (= der thermodynamische Wirkungsgrad abzüglich interner Verluste) eines Motors steigt mit steigendem Kompressionsverhältnis an. Verfahrensgemäß kann ein Dieselmotor mit höherer Verdichtung (1:18 /Pischinger 1988a/) betrieben werden als ein Gas- Ottomotor (1:10) und erzielt einen höheren effektiven Wirkungsgrad (bis 44% /Pischinger 1988a/ gegenüber 40% bei Gasmotoren /Jenbacher/). Das kommt einer Anlage zugute, die primär für die Erzeugung von Strom konzipiert ist. Bei konsequenter Abwärmenutzung ergeben sich keine deutlichen Vorteile hinsichtlich der Primärenergieausbeute. Eine Präferenz muß dann für den jeweiligen konkreten Anwendungsfall getroffen werden.

Syassen beschreibt in /Syassen 1989/ das Entwicklungspotential von Dieselmotoren und gibt einen erreichbaren Dieselverbrauch von 150 g/kWh an (derzeit wird mit 210 g/kWh gerechnet /Dietrich 1992/). 210 g/kWh entsprechen einem Wirkungsgrad von 41%, 150 g/kWh einem von 57%.

4.6 Sonstige Maßnahmen

Bei Klärgas und Faulgas wird vermehrt die Notwendigkeit einer Gasreinigung angesprochen /Delma 1993, Ebitec 1993/. Dadurch können einerseits direkt die Emissionen von Cl-Verbindungen, Schwermetallen und SO₂ vermindert werden, andererseits ist dann auch die Möglichkeit gegeben, auf alle katalytischen Reinigungsverfahren für Motorabgase zurückzugreifen.

4.7 Diskussion

Primärmaßnahmen zur NO_x-Reduktion bewirken prinzipiell geringere Wirkungsgrade /Schöngruber/ und Anstieg der CO und Rußemissionen. Durch Zusatzmaßnahmen können diese Effekte gemindert werden.

In Zukunft sollte bei Gasmotoren die Weiterentwicklung des aufgeladenen Magermotors mit Oxidationskatalysator, beziehungsweise des $\lambda=1$ -Motors mit 3-Wegkatalysator forciert werden.

Der Einsatz der SCR-Technik wird von der Industrie nur für größere Dieselmotoren befürwortet. Lutz /Lutz 1993/ nennt die Wirtschaftlichkeitsgrenze mit 1 MW Leistung, andere /MAN 1993/ sind der Ansicht, daß katalytische Nachreinigungsverfahren für Dieselmotoren unter 3 MW nicht als Stand der Technik anzusehen sind.

Dringender Entwicklungsbedarf besteht für Rußfilter und SCR-Systeme für kleinere Motoren.

5 Zahlenmaterial

5.1 Emissionswerte Wirkungsgrad

Die folgende Tabelle 5.1.1 enthält Herstellerangaben über Wirkungsgrade und Emissionswerte verschiedener Motoraggregate.

Folgende Abkürzungen werden verwendet:

G.....Gas-Ottomotor	L..... $\lambda=1$ -Motor	S.....SCR-DeNOx
D.....Dieselmotor	3.....3-Weg Kat	A.....Ammoniak
GD....Gas- Dieselmotor	M.....Magermotor	H.....Harnstoff
DG....Diesel- Gasmotor	O.....Oxidationskat	R.....Rußfilter
NMVOC.Kohlenwasserstoffe außer Methan		

Pe....elektr. Leistung

Pm....mech. Leistung

Wirkungsgrade:

t.....thermisch (Abwärmenutzung)

e.....effektiv (Motorleistung)

g.....gesamt (Nutzleistung des Generators)

Tabelle 5.1.1: Daten aus der Industrieerhebung

Type	Leistung (kW)	Wirkungsgrad (%)	NO ₂ (mg/m ³ , 5%O ₂)	CO	CH ₄ --- (mg/m ³)	NMVOOC -- (mg/m ³ , 5%O ₂)	Ruß	Quelle	
GL3			<120	<190	k.A.	<90	k.A.	MWM 1993	#1
GL3	Pe= 18		10	250	180	2	k.A.	Vogel 1988	
GL3	Pm= 60		120	490	140	4	k.A.	Vogel 1988	#2
GL3	Pe=115		8	60	750	60	k.A.	Vogel 1988	
GL3	Pe=215	g=40	6	125	k.A.	k.A.	k.A.	Eicher&Pauli 1991	
GL3	Pe=500	g=35/t=54	100	300	500	150	0	Jenbacher 1993	#3
GL3	Pe=125		-250	24	-2000				
GL3	Pe=48		10	272	27	k.A.	k.A.	Eicher&Pauli 1993a	
GL3	Pe=480		100	206	253	k.A.	k.A.	Eicher&Pauli 1993a	
GL3	Pe=480		92	184	68	k.A.	k.A.	Eicher&Pauli 1993a	
GL3	Pe=480		49	188	55	k.A.	k.A.	Eicher&Pauli 1993a	
GL3	Pe=480		37	197	49	k.A.	k.A.	Eicher&Pauli 1993a	
GL3	Pe=480		28	447	37	k.A.	k.A.	Eicher&Pauli 1993a	
GL3	Pe=136		83	61	186	k.A.	k.A.	Eicher&Pauli 1993a	
GL3	Pe=187		26	104	150	k.A.	k.A.	Eicher&Pauli 1993a	
GL3	Pe=187		36	156	195	k.A.	k.A.	Eicher&Pauli 1993a	
GL3	Pe=93		80	212	51	k.A.	k.A.	Eicher&Pauli 1993a	
GL3	Pe=125		70	<650	177	k.A.	k.A.	Eicher&Pauli 1993a	#4
GM	Pe=70-300	g≤33/t=50	<250	k.A.	k.A.	<150	k.A.	MWM 1993	
GM			500	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	MAN-Dez.En. 1993	

(#1-#4: siehe Tabelle 6.4.1)

Tabelle 5.1.1 (Fortsetzung)

Type	Leistung (kW)	Wirkungsgrad (%)	NO ₂ (mg/m ³ , 5%O ₂)	CO (mg/m ³ , 5%O ₂)	CH ₄ --- (mg/m ³)	NM VOC --- (mg/m ³)	Ruß (mg/m ³ , 5%O ₂)	Quelle	#
GMO		g≤39/t=49	250 -400	50 -650	500 -200	150	0	Jenbacher 1993	#5
GMOS		g=40/t=49	50 -100	60 -650	500 -2000	150	0	Jenbacher 1993	
GMS	Pe=224		40	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Eicher&Pauli 1992	
GD	Pe= 5000	g=43/t=46	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	N.N. 1993b	
D		e=40	2000	500	k.A.	k.A.	80 1)	Jenbacher 1993	
DS		e=42	500	250	k.A.	k.A.	80 1)	Jenbacher 1993	
DSH	Pe= 42		164	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Eicher&Pauli 1991	
DSH	Pe= 4000		175	135	gesamt: 8	8	75 2)	HUG 1993	#6
DSH	Pe= 2200		60	70	gesamt: 10	10	80 2)	HUG 1993	
DSRO		e=40	500	50	k.A.	k.A.	40 1)	Jenbacher 1993	
DSO	Pe= 2000		175	162	gesamt: 27	27	k.A.	Inspektorat 1990	
DSO	Pe= 6000		216	72	k.A.	k.A.	k.A.	Hug 1992	
DGS			<500	<650	k.A.	<150	k.A.	MWM 1993	

1) SO₂: 200 mg/m³ (für durchschnittlich 0,13% S im Brennstoff)

2) NH₃: 2 mg/m³, N₂O: 3 mg/m³, typisch für DeNOx

(#5-#6: siehe Tabelle 6.4.1)

Aus der Befragung ergab sich, daß der optimale Einsatz von Abgasreinigungsanlagen von der Motorgröße abhängt. So wird SCR üblicherweise nur bei größeren Diesel- und Gas-Dieselmotoren (über 500 kW) eingesetzt. Das $\lambda=1$ - Konzept mit 3-Weg-Katalysator wird dagegen bei kleineren und mittleren Gas-Ottomotoren (80 kW bis 500 kW) verwendet.

5.2. Gesetzliche Regelungen

Stationärmotoren werden derzeit in Österreich nicht bundeseinheitlich geregelt. Für Motoren, die Abhitzerkessel zur Dampferzeugung verwenden wird, ist zur Zeit die 2. Verordnung zum LRG-K in Vorbereitung.

Die Regelung der deutschen TA-Luft (1986) unter Berücksichtigung der Dynamisierungsklauseln, sowie der Schweizer Luftreinhalte Verordnung (SLRV), Stand 1992, gibt Tabelle 5.2.1 wieder:

Für den Kanton Zürich gelten ab 1. Juli 1992 NO_x - Grenzwerte für stationäre Verbrennungsmotoren bei Verwendung von Dieselöl von 120 mg/m^3 (5% O_2) und bei Verwendung von Gas 80 mg/m^3 (5% O_2).

In den Niederlanden werden NO_x - Grenzwerte an den Wirkungsgrad gebunden. Auf TA- Luft- Bedingungen umgerechnet gilt ab 31.12.89 ein Emissionsgrenzwert von NO_x von 870 mg/m^3 für stationäre Gasmotoren bis 50 kW und $\eta_{\text{gesamt}}/0,3 * 870 \text{ mg/m}^3$ darüber /Hirschbichler 1987/. Ab 1994 werden 440 mg/m^3 als NO_x - Grenzwert vorgeschrieben, ab 1995 ist eine Regelung mit etwa 250 mg/m^3 für NO_x und dann auch für CO und Kohlenwasserstoffe in Diskussion /Deutz 1992/.

Tabelle 5.2.1: Grenzwerte für Stationärmotoren (5% O₂)

	TA Luft	SLRV
SO ₂	500 mg/m ³	250 mg/m ³
CO	650 mg/m ³	650 mg/m ³
Staub/Ruß	130 mg/m ³ 1)	130 mg/m ³
NO _x	500 mg/m ³ 2)	400 mg/m ³

1) 4-Takt Gasmotoren: 50 mg/m³, Dieselmotoren < 1 MW: Zielwert 80 gm/m³, alle anderen: Zielwert 50 mg/m³, der Einsatz von Rußfiltern ist anzustreben.

2) Dieselmotoren > 3 MW: 2000 mg/m³, andere Dieselmotoren 4000 mg/m³; Zielwert: 1000 mg/m³ (durch Verwendung einer DeNOx- Anlage).

6 Vergleich mit Emissionen kalorischer Kraftwerke in Österreich

Im folgenden werden die nutzenergiebezogenen Emissionen von Stationärmotoren mit denen der EVU's verglichen. Fragen der Versorgungssicherheit, Investitionskosten oder strukturpolitische Überlegungen werden nicht behandelt.

Für die österreichischen EVU's wird der Stand von 1991 herangezogen. Das zur Verfügung stehende Datenmaterial erlaubt die Zuordnung des Brennstoffeinsatzes getrennt für Strom- und Wärmeerzeugung, wobei hier nur die Stromerzeugung berücksichtigt wird. Der Strom aus Wasserkraft wird als "nicht emissionsbehaftet" angenommen.

Bei Stationärmotoren müssen die energiespezifischen Emissionen aus den vorhandenen Daten berechnet werden. Genutzte Abwärme wird in Form einer Brennstoffgutschrift für die Stromerzeugung berücksichtigt (vgl. /Jarass 1993/). Aus dem so berechneten Gesamtwirkungsgrad der Motoren ergeben sich deren spezifische Emissionen.

6.1. Spezifische Emissionen der EVU's

Die folgenden Berechnungen stützen sich auf die Daten der Brennstoffstatistik 1991 des Bundeslastverteilers. Etwa 32% des gesamten Stromverbrauches in Österreich wird mit Wärmekraftwerken erzeugt. Im Winter steigt der Anteil auf 50%, im Sommer sinkt er bisweilen bis 2%. Der Netto-Gesamtwirkungsgrad der Wärmekraftwerke - inklusive Abwärmenutzung- beträgt 46% (das ist wesentlich für die Betrachtung der CO₂- Bilanz).

Im Energiebericht 1990 der Bundesregierung sind Emissionsfaktoren der Wärmekraftwerke, gegliedert nach Brennstoffen, angegeben, deren aktualisierte Werte für 1991 im folgenden verwendet werden

(Tabelle 6.1.1 /Verbundkraft 1992/). Für die in der Brennstoffstatistik angegebenen "sonstigen Brennstoffe" finden sich keine Faktoren. Da jene aber nur 0,4% des Gesamtenergieverbrauchs ausmachen, ist der Fehler gering, der dadurch entsteht, daß die Emissionsfaktoren für Gas angewendet werden. Es ist weiters zu vermerken, daß die Industrieinspeisung ins Netz (unter 0,7%) und die dadurch hervorgerufenen Emissionen unberücksichtigt bleiben. Tabelle 6.1.2. listet die berechneten Gesamtemissionen gegliedert nach Brennstoffkategorien auf und enthält die daraus berechneten strombezogenen spezifischen Emissionen.

Das Modell berechnet die Gesamtemissionen einer Kilowattstunde Strom, die durch österreichische Wärmekraftwerke erzeugt wird. Die CO₂- Emissionen sind in den folgenden Tabellen deshalb nicht enthalten, weil sie weder von feuerungstechnischen Maßnahmen noch von Reinigungsverfahren beeinflußt werden, sondern ausschließlich durch den Gesamtwirkungsgrad.

Die Emissionsfaktoren f aus Tabelle 6.1.1 haben die Einheit kg/TJ und beziehen sich auf den Primärenergieeinsatz. Wenn von "Wärme" gesprochen wird, ist der Primärenergieeinsatz gemeint. Der spezifische Wärmeverbrauch bezieht sich nur auf die Stromerzeugung, die Abwärmenutzung ist bereits berücksichtigt. Die Stromerzeugung selbst ist die Nettostromerzeugung, also abzüglich des Eigenverbrauchs der Anlagen.

Tabelle 6.1.1.: Spezifische Emissionen der österreichischen Wärmekraftwerke bezogen auf den Primärenergieeinsatz (kg/TJ) für 1991 /Verbundkraft 1992/.

Brennstoff	CO	VOC	NOx	SO2	Staub
Steinkohle	2	1	57	54	4
Braunkohle	4	1	110	120	9
Heizöl	8	3	120	400	20
Erdgas	10	0,24	40	-	-

Tabelle 6.1.2.: Berechnung der Gesamtemissionen und strombezogenen spezifischen Emissionen der EVU's für 1991 /Verbundkraft 1992, Bundeslastverteiler/

Brennstoff	Strom	spez. Wärme	ges. Wärme	CO	VOC	NO _x	SO ₂	Staub
	MWh	kJ/kWh	TJ	t	t	t	t	t
Steinkohle	4.084.681	9.085	37.109	74,2	37,1	2.115	2.004	148
Braunkohle	2.302.686	10.086	23.225	92,9	23,2	2.555	2.787	209
Heizöl	1.405.469	9.513	13.370	107,0	40,1	1.604	5.348	267
Gas	5.396.940	9.215	49.733	497,3	11,9	1.989	0	0
Sonstige	45.556	10.504	479	4,8	0,1	19	0	0
Summe	13.235.332	9.362	123.909	776,2	112,5	8.283	10.139	625
Spez. Emissionen aus Wärmekraft (mg/kWh Strom):				59	8	626	766	47
Spez. Emissionen aus Wärmekraft (mg/MJ Strom):				16,4	2,2	174	213	10

6.2 Spezifische Emissionen von Stationärmotoren

Die Emissionen von Motoren werden in $\text{g/MJ}_{\text{primär}}$ oder mg/m^3 angegeben. In diesem Fall müssen die Daten auf g/MJ umgerechnet werden, um in weiterer Folge die nutzenergiespezifischen Emissionen gemäß Formel 6.2.1 berechnen zu können.

$$m_{\text{nutz}} = m_{\text{prim}} / \eta_{\text{ges}} \quad (6.2.1)$$

m_{nutz} ...nutzenergiespez. Emissionen (mg/MJ)
 m_{prim} ...primärenergiespez. Emissionen (mg/MJ)
 η_{ges}Gesamtwirkungsgrad

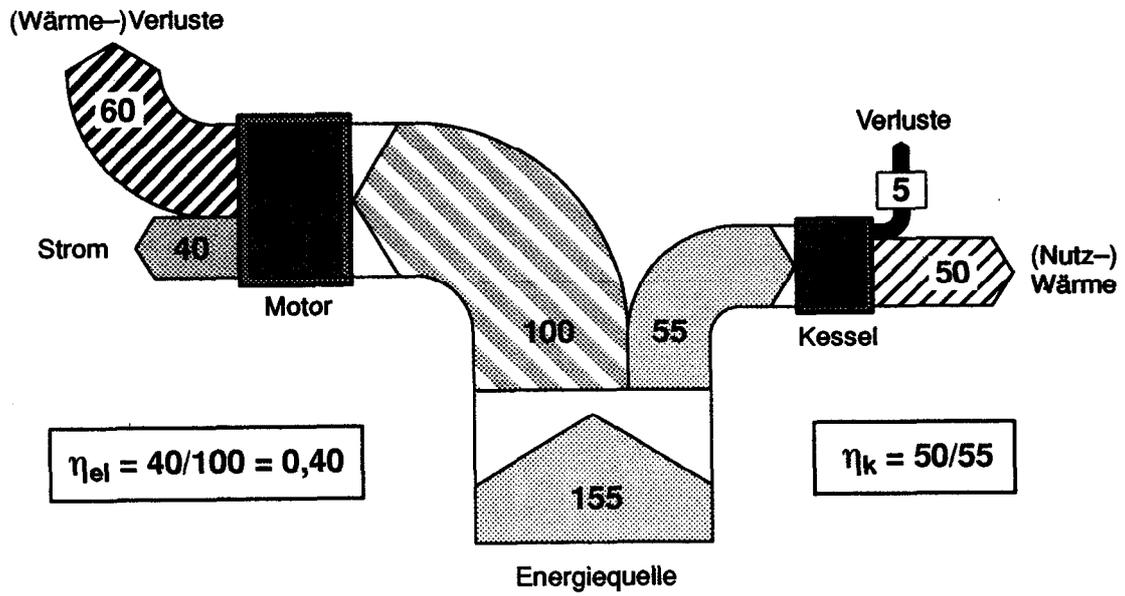
Der Gesamtwirkungsgrad η_{ges} versteht sich als der elektrische Wirkungsgrad η_{el} unter Berücksichtigung der genutzten Abwärme. Das erfolgt durch eine sogenannte "Brennstoffgutschrift" /Jarass 1993/ und geht davon aus, daß durch die Abwärmenutzung ein Kessel zur Wärmeerzeugung eingespart wird, der dieselbe Wärmemenge wie die genutzte Abwärme bereitstellen würde. Die dazu nötige Brennstoffmenge (Gas oder Diesel) wird vom Verbrauch des Motors abgezogen. Dadurch erscheint es so, als ob der Strom mit einer geringeren Brennstoffmenge erzeugt worden wäre und daher der elektrische Wirkungsgrad steigt (siehe Abb. 6.2.1). Die Umrechnung auf Strom als Bezugsgröße ist einerseits dadurch gerechtfertigt, daß Strom eine sehr hochwertige Energieform darstellt, andererseits ist so der Vergleich mit Strom aus dem Netz leichter.

$$\eta_{\text{ges}} = \eta_{\text{el}} / (1 - \eta_{\text{th}} / \eta_{\text{K}}) \quad (6.2.2)$$

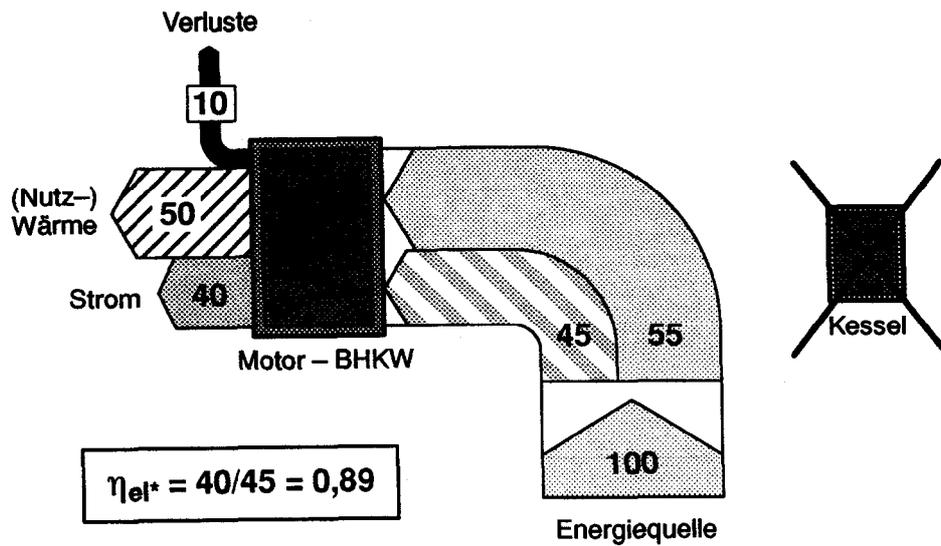
η_{th} thermischer Wirkungsgrad
 η_{K} Wirkungsgrad des Ersatzkessels

η_{K} wird in dieser Studie mit 90% angenommen.

MOTOR OHNE ABWÄRMENUTZUNG



MOTOR MIT ABWÄRMENUTZUNG



Graphik: UBA, nach /Jarass 1993/

Abb. 6.2.1: Modell der "Brennstoffgutschrift" bei Kraft-Wärme-Kopplung

Sind die Emissionen eines Motors in mg/m^3 angegeben, kann eine Umrechnung wie folgt geschehen. Die Emissionen sind auf 5% Sauerstoff im Abgas bezogen, daher wird zunächst das Abgasvolumen für einen Sauerstoffgehalt von 5% im Abgas aus den korrespondierenden Luftüberschußzahlen λ berechnet (siehe Tabelle 6.2.1), das bei einer vollständigen Verbrennung von 1 MJ Primärenergie entsteht. Die nötigen Daten und Formeln finden sich in /Recknagel 1990/.

$$\lambda = L/L_{\min} \quad (6.2.3)$$

$$V_{\text{ges}} = V_{\min} + (\lambda-1)*L_{\min} \quad (6.2.4)$$

$$V_{\text{prim}} = V_{\text{ges}}/H_u \quad (6.2.5)$$

- L_{\min} theor. Luftbedarf (m^3/kg bzw. m^3/m^3)
- L tatsächlicher Luftbedarf (wie oben)
- V_{\min} theor. trockene Rauchgasmenge (wie oben)
- V_{ges} tatsächliche Rauchgasmenge (wie oben)
- V_{prim} Rauchgasmenge in m^3/MJ
- H_u unterer Heizwert (MJ/kg bzw. MJ/m^3)

Für Diesel und Gas ergeben sich leicht unterschiedliche Werte (siehe Tabelle 6.2.1).

Tabelle 6.2.1: Berechnung der spezifischen Abgasmenge
von Motoren

	Diesel	Gas
λ (5%O ₂):	1,29	1,28
L_{\min} :	11,2 m ³ /kg	9,8 m ³ /m ³
V_{tr} :	10,4 m ³ /kg	8,9 m ³ /m ³
H_u :	41,8 MJ/kg	37,5 MJ/m ³
V_{ges} :	13,7 m ³ /kg	11,6 m ³ /m ³
v_{prim} :	1,175 m ³ /kWh	1,117 m ³ /kWh

λLuftüberschußzahl

L_{\min} ...theor. Verbrennungsluftvolumen

V_{tr} ...minimale trockene Abgasvolumen

H_uunterer Heizwert

V_{ges} ...gesamtes Abgasvolumen

v_{prim} ..primärenergiebezogenes Abgasvolumen

Aus den einzelnen Emissionswerten können die spezifischen Emissionswerte durch folgende Formel berechnet werden:

$$m_{i,prim} = c_i * V_{prim} \quad (6.2.6)$$

m_iprimärenergiespez. Emissionen mg/MJ

c_iEmissionen in mg/m³

Die berechneten spezifischen Emissionen für Stationärmotoren finden sich in Tabelle 6.4.1.

6.3 Spezifische Emissionen des Kraftwerks Simmering 3

Exemplarisch seien hier die Emissionen eines modernen Gas- und Dampfturbinenkraftwerkes angeführt. Das Kraftwerk Simmering 3 ist mit einer Rauchgasentschwefelungsanlage und einer SCR- DeNOx ausgerüstet. Die im folgenden genannten Zahlen beruhen auf Werksangaben und eigenen Berechnungen.

Das Kraftwerk hat einen Brennstoffeinsatz von 1.060 MW, einen elektrischen Wirkungsgrad von 42% und einen thermischen Wirkungsgrad bei der Abwärmenutzung von 28%. Die Berechnung der Brennstoffgutschrift ergibt einen Gesamtwirkungsgrad von 61%.

Unter Berücksichtigung eines Abgasstromes von 1.125.000 m³/h (=312,5 m³/s) und den entsprechenden Emissionskonzentrationen ergeben sich die spezifischen Emissionen gemäß Tabelle 6.3.1.

Tabelle 6.3.1: Emissionen des Kraftwerks Simmering 3

	CO	NO _x	SO ₂	staub	NH ₃
Emissionskonzentrationen (mg/m ³)	100	100	150	35	1,5
spez. Emissionen primär (mg/MJ)	29,5	29,5	44,2	10,3	0,4
nutzenergiespez. Emiss. (mg/MJ)	48,4	48,4	72,5	16,9	0,7

6.4 Vergleich, Diskussion

In Tabelle 6.4.1 werden die spezifischen Emissionen der EVU's, des Kraftwerks Simmering 3 und einige Beispiele für Gas- und Dieselmotoren angegeben (Siehe Tab. 5.1.1), deren Wirkungsgrade plausibel angenommen wurden, wo sie nicht in den Datenblättern aufgeführt waren. Der Gesamtwirkungsgrad η_{ges} wurde durch Brennstoffgutschrift errechnet.

Da Österreich einen vergleichsweise hohen Anteil an Wasserkraft bei der Stromerzeugung hat, wurden drei Szenarien berechnet: nur Wärmekraft, 50% Wasserkraft, das entspricht dem Anteil an Wasserkraft im Winter 1991, und 70% Wasserkraft, das entspricht dem Jahresmittel 1991. Es wird angenommen, daß die Stromerzeugung durch Wasserkraft zu keinen Emissionen führt. Übertragungs- und Umspannungsverluste (etwa in der Höhe von 2%) werden vernachlässigt.

Für die beispielhafte Berechnung der spezifischen Motoremissionen (Tabelle 6.4.1) wurden Herstellerangaben für die entsprechenden Motoren der jeweiligen Bauart herangezogen (vgl. Motor #1 bis Motor #6 in Tabelle 5.1.1). Bei den Motoren #5 und #6 wurden exemplarisch die spezifischen Emissionen berechnet, die sich ohne Nutzung von Abwärme ergeben ($\eta_{th}=0$). Dies geschah mit der Absicht, den Einfluß der Abwärmenutzung auf die Höhe der spezifischen Emissionen zu verdeutlichen.

Die hohen Wirkungsgrade bei EVU's unter Berücksichtigung der Wasserkraft sind rechnerisch bedingt und beziehen sich auf den fossilen Primärenergieeinsatz.

Läßt man Wasserkraft außer Acht, erreichen Stationärmotoren einen höheren Gesamtwirkungsgrad als EVU's. Dies liegt am hohen Potential für eine Abwärmenutzung. Tabelle 6.4.1 zeigt, daß die für die Berechnung herangezogenen Stationärmotoren höhere spezifische CO und NMVOC- Emissionen aufweisen als die Wärmekraftwerke. NO_x -Emissionen sind vergleichbar, die Gasmotoren mit 3-Wegkatalysator

erreichen annähernd so niedrige Emissionswerte wie das moderne Kraftwerk Simmering 3.

Tabelle 6.4.1: Vergleichende Emissionen von EVU's und Motoren
Erklärung im Text, Werte in mg/MJ (gerundet), Beispielrechnung

Emissionsquelle	η_{el}	η_{th}	η_{ges}	CO	VOC	NO _x	SO ₂	Staub	
EVU	38%	8%	42%	16	2	174	213	10	
EVU 50% Wasserkkr.	76%	8%	83%	8	1	87	107	5	
EVU 70% Wasserkkr.	127%	8%	139%	5	1	52	64	3	
Simmering 3	42%	28%	61%	48	k.A.	48	73	17	
Gas $\lambda=1$ 3-Weg-Kat	35%	54%	88%	85	40	54	0	0	#1
Gas $\lambda=1$ 3-Weg-Kat	35%	54%	88%	112	2	54	0	0	#2
Gas $\lambda=1$ 3-Weg-Kat	35%	54%	88%	135	67	45	0	0	#3
Gas Mager	35%	54%	88%	292	67	112	0	0	#4
Gas Mager Oxikat	39%	49%	86%	23	69	115	0	0	#5
Gas Mager Oxikat	39%	0%	39%	50	151	252	0	0	#5
Diesel, SCR	40%	45%	80%	55	3	72	82	31	#6
Diesel, SCR	40%	0%	40%	111	7	144	164	62	#6

(#1-#6 beziehen sich auf Motordaten aus Tabelle 5.1.1)

Weiters zeigt die Tabelle, daß der Betrieb von Gasmotoren praktisch keine Staub- und Rußemissionen verursacht, wogegen Dieselmotoren höhere spezifische Staub- und Rußemissionen haben als Wärmekraftwerke. Die Weiterentwicklung von Rußfiltern für Dieselmotoren wird hier Abhilfe schaffen.

Für Motoren sind keine abgasseitigen SO₂- Minderungsverfahren bekannt, sodaß sich die Emissionen nur aufgrund des Schwefelgehaltes des - entschwefelten - Kraftstoffes ergeben. Der höchste Schwefelgehalt bei Dieselkraftstoffen darf 0,15 % (bzw. 0,05 % ab 1.10.1995) nicht überschreiten. Ein direkter Vergleich der SO₂-

Emissionen zwischen schwerölbefeuerten Wärmekraftwerken und Stationärmotoren ist aber nicht möglich, da Schweröl einen hohen Schwefelgehalt hat und diese Kraftwerke mit einer abgasseitigen Entschwefelungsanlage ausgerüstet werden müssen.

Es muß betont werden, daß die angeführten Zahlen nur den Zweck einer ersten Einordnung bezüglich der Emissionssituation erlauben. Die Frage, bei welchem Einsatzzweck die Bereitstellung von Energie durch Stationärmotoren oder Wärmekraftwerke ökologisch und ökonomisch bessere Ergebnisse liefert kann nicht nur aufgrund der Emissionen beantwortet werden. Es würde aber den Rahmen der Arbeit sprengen, Fragen der Versorgungssicherheit und Verfügbarkeit zu beantworten oder eine Lebenszyklusanalyse für die diskutierten Verfahren durchzuführen.

Der Parameter, der am stärksten die Höhe der spezifischen Emissionen beeinflusst, ist der Gesamtwirkungsgrad, respektive der Grad der Abwärmenutzung. Es muß entschieden werden, wie, in welcher Form, mit welchen finanziellen Mitteln bei welchem System eine solche zielführender verwirklicht werden kann.

7 Zusammenfassung, Ausblick

Stationärmotoren werden zur Erzeugung von Kraft (Kompressoren, Wärmepumpen) oder Strom im Motorleistungsbereich von etwa 50 kW bis 5 MW (125 kW bis 12,5 MW Brennstoffwärmeleistung) sowie im Verbund mit mehreren Motoren als Blockheizkraftwerke verwendet. Bei solchen modernen Motorsystemen wird die Verlustwärme genützt, wodurch sich der Gesamtwirkungsgrad erhöht.

Um einen Anhaltspunkt für die Beurteilung der Schadstoffemissionen aus Stationärmotoren zu geben, wurden die spezifischen Emissionen von derzeit am Markt befindlichen Stationärmotoren mit denen bestehender österreichischer kalorischer Kraftwerke verglichen, wobei natürlich völlig unterschiedliche Leistungsbereiche vorliegen.

Emissionen von SO_2 und NO_x sind - auf die Nutzleistung inklusive Abwärmenutzung bezogen - bei modernen Motoren gleich oder niedriger als beim heutigen Wärmekraftwerkspark, dagegen sind VOC- und CO- Emissionen höher. Gasmotoren haben im Vergleich mit dem heutigen kalorischen Kraftwerkspark niedrigere, Dieselmotoren höhere spezifische Staubemissionen.

Derzeit gebräuchliche Motoren für den Stationärbetrieb sind Gasmotoren mit $\lambda=1$ - Konzept und 3-Weg-Katalysator, Magermotoren mit Oxidationskatalysator, sowie Gas- und Dieselmotoren mit SCR-DeNOx. Rußfilter sind teilweise noch in Entwicklung.

Die im Rahmen der Erhebung von den einzelnen Firmen bekanntgegebenen Emissionswerte verschiedener Motoren werden in Tabelle 7.1. jeweils mit Angabe der Minderungstechniken zusammengefaßt. Daraus ist ersichtlich, daß Gasmotoren mit 3-Weg-Katalysator niedrigere NO_x - Emissionswerte aufweisen als Gas-Magermotoren. Voraussetzung dafür ist ein intakter Katalysator mit einer exakt funktionierenden Regelung.

Tab. 7.1: Emissionsdaten von Stationärmotoren (mg/m ³ , trocken, 0 °C, 1013 mbar, 5 % O ₂)					
Motortype	NO ₂	CO	NMVOC	Ruß	NH ₃
Diesel	2000-7000	300-1100	50-700	20-350	-
Diesel, DeNO _x	40-500	70-450	10-80	40-80	2
Diesel, DeNO _x , OxiKat	500	50	-	40	2
Erdgas, λ=1, 3-Weg Kat	10-250	300	10-150	-	-
Gas - mager, OxiKat	250-400	50-650	150	-	-
Gas - mager, DeNO _x , OxiKat	40-100	50-650	150	-	2
Gas - Diesel, DeNO _x	< 500	< 650	< 300	-	2

Das günstigste Kosten- Nutzen- Verhältnis bei Stationärmotoren bezüglich NO_x- Emissionen haben nach /Jenbacher/ Gas-Magermotoren. Der spezifische Mehraufwand sei mit diesem System etwa 10% der Stromgestehungskosten (bei 90% NO_x- Minderung).

Die niedrigsten NO_x- Emissionen von derzeit erhältlichen Dieselmotoren ohne Abgasreinigung liegen bei 2000 mg NO_x/m³ und können bis zu 7000 mg NO_x/m³ betragen. Bei Dieselmotoren mit DeNO_x-Anlage werden Emissionen unter 350 mg/m³ erreicht.

Bei größeren Gas- und Diesel-Motoren (ab 3 MW Wellenleistung) können durch einen entsprechend dimensionierten DeNO_x-Katalysator und nachgeschalteten Oxidationskatalysator Emissionswerte im Dauerbetrieb von unter 100 mg NO_x/m³ und 100 mg CO/m³ erreicht werden.

Für eine effektive Abgasreinigung durch DeNO_x-Katalysatoren sind gleichmäßige Betriebsbedingungen Voraussetzung. Bei Dieselmotoren, die nur kurzzeitig (maximal 200 Stunden pro Jahr) betrieben

werden (Notstromaggregate, Motoren zur Spitzenstromabdeckung) wäre im Einzelfall zu prüfen, ob eine DeNOx- Anlage notwendig ist.

Nach Ansicht des Umweltbundesamtes, gestützt auf die Auswertung der Industrieerhebung und Expertengespräche, entsprechen folgende Emissionsgrenzwerte für gas- bzw. dieselbetriebene Stationärmotoren dem Stand der Technik (Tab. 7.2):

<i>Tab. 7.2: Vorschlag für Emissionsgrenzwerte entsprechend dem derzeitigen Stand der Technik für Stationärmotoranlagen (mg/m³, trocken, 0 °C, 1013 mbar, 5 % O₂)</i>		
<i>Wellenleistung</i>	<i>≤ 3 MW</i>	<i>> 3 MW</i>
<i>Brennstoffwärmeleistung</i>	<i>≤ 7,5 MW</i>	<i>> 7,5 MW</i>
<i>CO</i>	<i>500</i>	<i>100</i>
<i>Staub (Diesel)</i>	<i>80</i>	<i>80</i>
<i>Staub (Gas, Rechenwert)</i>	<i>5</i>	<i>5</i>
<i>NO_x</i>	<i>350</i>	<i>100</i>

Aus der Sicht des Umweltbundesamtes müßte bei Dieselmotoren der Einsatz von Rußfiltern forciert und damit mittelfristig eine deutliche Unterschreitung des vorgeschlagenen Wertes von 80 mg/m³ erreicht werden. Der Vorschlag für die niedrigeren Grenzwerte für Motoren über 7,5 MW Brennstoffwärmeleistung begründet sich durch die kombinierte Verwendung von DeNOx- und Oxidationskatalysatoren, die in diesem Leistungsbereich zum Stand der Technik zählen.

8 Anhang

8.1 Literatur

- Amstutz, A.: "Geregelte Abgasrückführung zur Senkung der Stickoxid- und Partikelemissionen beim Dieselmotor mit Comprex- Aufladung", Dissertation (ETH- Zürich: 1991)
- Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch: "Umwelt Chance Erdgas", (Hamburg: 1991)
- Baehr, H.D.: "Die energiebezogene CO₂- Erzeugung der Brennstoffe", BWK 44 (7/8) (1992) 337-339
- Bosnjakovic, F.: "Wärmediagramme für Vergasung, Verbrennung und Rußbildung" (Springer: 1956), zitiert nach /Dietrich 1992/
- Buck, A.; Mayer, A.: "Knitted Ceramic Fibers - A New Concept for Particulate Traps", SAE 920146
- Bundeslastverteiler: Brennstoffstatistik 1991
- Catalysis Today, 2 (Elsevier: 1988) 369-531
- Delma Industriesysteme: "Block-Heiz-Kraft-Werk", Firmenpublikation (1993)
- Delma Industriesysteme, briefliche Information (1993)
- Deutz MWM: "Information Gasmotoren", Firmenschrift (Mannheim: 1992)
- Dietrich, W.: "Kriterien zukünftiger Kraftstoffe für stationäre gas- und dieselmotorische Antriebe", AVL- Proceedings, Grazer Congress (1991) 221-235
- Dietrich, W.; Anisits, F.; Hiemesch, O.: "Investigations and Results with MWM Pilot- Ignition Ethanol Combustion System", Proceedings of the 4th International Symposium on Alcohol Fuel Technology, Guaruja Brasil (1980), 457-463
- Dietrich, W.R.: "Die konkretisierte Dynamisierungsklausel der TA-Luft 1991 in ihrer Auswirkung auf stationär eingesetzte Dieselmotoren", 13.Int. Wiener Motorensymp. 1992, Hg.: Lenz, H.P. et al., Fortschrittberichte VDI Reihe 12 Nr. 167 (Düsseldorf:1992)Bd.2, S.352-80

- Dietrich, W.R.: "NO_x- und Rußminderung bei stationär eingesetzten Verbrennungskraftmaschinen", Tagungsband: Umweltschutz- Seminar Berlin 1987 (194-214)
- Dietrich, W.R.; Grundmann, W.: "Schadstoffoptimierte Gasmotorenantriebe für Blockheizkraftwerke und Wärmepumpen mit der homogenen Magergemischaufladung von Deutz MWM", Fortschr.-Ber. VDI Reihe 6 Nr 225 (VDI Verlag, Düsseldorf: 1988)
- Eberle, M.K.: "Der Dieselmotor zwischen NO_x und CO₂- eine Skizze", Tagung "Motor und Umwelt, AVL-List GmbH, Graz. 1./2.8.89, zitiert bei /Amstutz 1991/
- Ebitec-Possehl, briefliche Information (1993)
- Dr.Eicher+Pauli AG: "Entstickung von Dieselmotoren mit Harnstoff" (1991)
- Dr.Eicher+Pauli AG: "Entstickung von stationären Magermotoren", Jahresbericht (1992)
- Dr.Eicher+Pauli AG: "Langzeit- Betriebsverhalten von Gasmotoren mit Katalysator", Jahresbericht (1992)
- Fa. Sokratherm: "Wirkungssteigerung in Blockheizkraftwerken", BWK 44(6) (1992) 266
- Fenimore, C.P.: "Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames", 13th Int. Symp. on Combustion (1970), The Combustion Institute, Pittsburgh, 1971, S. 373, zitiert nach /Catalysis Today 1988/
- Fenimore, C.P.: "Formation of Nitrogen Oxide from Fuel Nitrogen in Ethylene Flames", Combust. Flame 19 (1972) 289
- Groth, K.: "Das Entwicklungspotential mittelschnellaufender Dieselmotoren", IFKO Symposion Hannover 1989
- Hartenstein, A.; Hug, T.: "Katalysatoren in Abgasen von Verbrennungsmotoren", HUG-Bulletin 5.92 D (1992)
- Hayhurst, A.N.; McLean, H.A.G.: "Mechanism for Producing NO from Nitrogen in Flames", Nature, 251 (1974) 303
- Hirschbichler, F.; Mötz, K.: "Schadstoffarme Gasmotoren von MAN", MTZ 48, 7/8 (1987) 273-7
- Hug Engineering AG, Abgasmeßprotokoll Spitzendeckungsanlage Kempten (1992)

- Hug, H.Th.; Hartenstein, A.H.; Morsbach: "Katalytische Schadstoffminderung in Abgasen aus stationären Verbrennungsmotoren und Industriekesseln", ohne Zitat (1993), 23 Seiten
- Inspektorat VFWL: Untersuchungsbericht EW Schaffhausen (1990)
- Jarass, L.: "Bewertungshilfen für Kraft- Wärme- Kopplung", BWK, 45(1/2) (1993) 45-48
- Jenbacher Energiesysteme: "Stand der Emissionsminderungstechniken bei Gas- und Dieselmotoren", Firmenschrift (k.A.)
- Jenbacher Energiesysteme, briefliche Information 1993
- Juran, H.: "Preisfrage: Erdöl oder Erdgas feuern?", Produktion, 6.8.92, Nr.32, 3
- Kent, J.H.; Wagner, H.Gg.: "Warum rußen Diffusionsflammen", Erdöl-Kohle-Erdgas 38(12) (1985) 543-549
- Koebel, M.; Elsener, M.: "Stickoxidminderung in Abgasen", Schweizer Ingenieur und Architekt 38 (17.9.1992)693-700
- Koebel, M.; Elsener, M.;Eicher, H. : "Stickoxidminderungen bei Dieselmotoren", Schweizer Ingenieur und Architekt, 9 (28.2.91) 187-192
- Kraftstoffverordnung 1992, BGBl. 123 (1992)
- Leijendeckers, P.: "Fehlauslegungen gefährden BHKW-Einsatz", BWK 44 (11) (1992) 496
- Lutz, A.: "Öl oder Gas?", Energie 44(10) (1992) 18-22
- Lutz Energietechnik, briefliche Information (1993)
- MAN Dezentrale Energiesysteme, briefliche Information (1993)
- Österreichischer Energiebericht 1990, aktualisierte Daten von April 1992
- Pischinger, F. et al.: "Einfluß des Hub- Bohrungsverhältnisses auf den Prozeßverlauf im Ottomotor", Arbeitsbericht Projekt A4, Sonderforschungsbereich "Motorische Verbrennung" der RWTH Aachen (1988) 67-95
- Pischinger, F.; Schulte, H.; Jansen, J: "Grundlagen und Entwicklungslinien der dieselmotorischen Brennverfahren", VDI Berichte 714 (1988) 61-93
- Pischinger, R; Reuter, W.: "Gemischbildung und Verbrennung im Dieselmotor aus neuer Sicht", Der Arbeitsprozeß des Verbrennungsmotors (TU Graz: 1989) 41-62

- Recknagel, Sprenger, Hönnmann: "Taschenbuch f. Heizung und Klimatechnik" (München: 1990)
- Schöngruber, W.; Marr, R.J.; Bart, H.J.: "Stickoxide aus Feuerungsanlagen: Bildung sowie Maßnahmen zur Emissionsminderung", ÖChemZ 7-8 (1989) 220-226
- Schulte, H.: "Brennverfahrensentwicklung für direkteinspritzende Dieselmotoren", Techn. Akad. Wuppertal, Sem. 8 111 50050, zitiert nach /Dietrich 1992/
- Sigal, I.Ya.: "The Development and Aims of Investigations to Study the Conditions of Formation of Nitrogen Oxides in Furnace Processes", Thermal Engineering, 30 (1983) 499; aus dem Russischen übersetzt.
- de Soete, G.G.: Physico-Chemical Mechanisms in the Formation of Nitrogen Oxides in Industrial Flames", Gas Wärme Int. 30 (1981) 15, zitiert nach /Catalysis Today 1988/
- Syassen, O.: "Der Dieselmotor- Für alle Zeiten die sparsamste Wärmekraftmaschine?", IFKO Symposion Hannover 1989
- Tauscher, W.: "Entwicklung und Stand der Brennstofftechnologie", in: Entwicklung und fortschrittlicher Stand der Technik zur Emissionsminderung von Stickoxiden und Schwefeloxiden aus Feuerungsanlagen im Leistungsbereich von 3 bis 50 MW, Umweltbundesamt (Wien: 1993)
- Tritthart, P.: "Anforderungen an Otto- und Dieselkraftstoffe", AVL Proceedings, Grazer Congress (1991) 125-135
- Verbundkraft, briefliche Mitteilung (1992)
- Vogel, U.: "Emissionen von stationären Gasmotoren mit Katalysatoren", HeizungKlima, 4 (1988) 32-33
- Wojik: "Welche Zukunft haben Otto- und Dieselmotoren?", AVL Proceedings "Motor und Umwelt", Grazer Congress (1991) 69-83
- Zeldovich, J.: "Oxidation of Nitrogen in Combustion and Explosion", Compt. Rend. Acad. Sci. USSR 51 (1946) 217, zitiert nach /Catalysis Today 1988/

8.2 Firmenanschriften

Im folgenden sind - in alphabetischer Reihenfolge - die Anschriften jener Firmen angegeben, deren technische Informationen in dieser Arbeit berücksichtigt wurden.

Delma Industriesysteme, Ignaz-Mayer-Str. 13, A-4020 Linz

Ebitec Possehl, Beckergrube 38-53, D-W-2400 Lübeck 1

Dr. Eicher + Pauli AG, Oristalstraße 85, CH-4410 Liestal

Hug Engineering, Gewerbezentrum Moos, Pf. 31, CH- 8484 Weisslingen

Jenbacher Energiesysteme AG, A-6200 Jenbach

Lutz Energietechnik, Marktplatz 53, A-4680 Haag/H.

MAN Dezentrale Energiesysteme GmbH, Pf. 50 04 26, Bauschingerstr.
20, D-W-800 München 50

MAN Nutzfahrzeuge AG, Pf. 44 01 00, Frankenstr. 150, D-W-8500
Nürnberg 44

MWM Diesel und Gastechnik GmbH, Carl-Benz-Str. 5, D-W-6800 Mann-
heim 1