

**Rainer Ohlenhard / Christian Fenn**

**Verbrennungstechnische Untersuchung  
einer Hausbrandfeuerung mit  
Öl-Blaubrenner**

**Diplomarbeit**

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Copyright © 1992 Diplomica Verlag GmbH  
ISBN: 9783832402426

**Rainer Ohlenhard, Christian Fenn**

# **Verbrennungstechnische Untersuchung einer Hausbrand- feuerung mit Öl-Blaubrenner**



---

Rainer Ohlenhard  
Christian Fenn

# **Verbrennungstechnische Untersuchung einer Hausbrandfeuerung mit Öl-Blaubrenner**

**Diplomarbeit  
an der Fachhochschule Köln  
April 1992 Abgabe**



***Diplomarbeiten Agentur***  
Dipl. Kfm. Dipl. Hdl. Björn Bedey  
Dipl. Wi.-Ing. Martin Haschke  
und Guido Meyer GbR

Hermannstal 119 k  
22119 Hamburg  
agentur@diplom.de  
www.diplom.de

ID 242

Ohlenhard, Rainer, Fenn, Christian: Verbrennungstechnische Untersuchung einer Hausbrandfeuerung mit Öl-Blaubrenner / Rainer Ohlenhard, Christian Fenn – Hamburg: Diplomarbeiten Agentur, 1997  
Zugl.: Köln, Fachhochschule, Diplom, 1992

---

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden, und die Diplomarbeiten Agentur, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Dipl. Kfm. Dipl. Hdl. Björn Bedey, Dipl. Wi.-Ing. Martin Haschke & Guido Meyer GbR  
Diplomarbeiten Agentur, <http://www.diplom.de>, Hamburg  
Printed in Germany



**Diplomarbeiten Agentur**

## **Wissensquellen gewinnbringend nutzen**

**Qualität, Praxisrelevanz und Aktualität** zeichnen unsere Studien aus. Wir bieten Ihnen im Auftrag unserer Autorinnen und Autoren Wirtschaftsstudien und wissenschaftliche Abschlussarbeiten – Dissertationen, Diplomarbeiten, Magisterarbeiten, Staatsexamensarbeiten und Studienarbeiten zum Kauf. Sie wurden an deutschen Universitäten, Fachhochschulen, Akademien oder vergleichbaren Institutionen der Europäischen Union geschrieben. Der Notendurchschnitt liegt bei 1,5.

**Wettbewerbsvorteile verschaffen** – Vergleichen Sie den Preis unserer Studien mit den Honoraren externer Berater. Um dieses Wissen selbst zusammenzutragen, müssten Sie viel Zeit und Geld aufbringen.

**<http://www.diplom.de>** bietet Ihnen unser vollständiges Lieferprogramm mit mehreren tausend Studien im Internet. Neben dem Online-Katalog und der Online-Suchmaschine für Ihre Recherche steht Ihnen auch eine Online-Bestellfunktion zur Verfügung. Inhaltliche Zusammenfassungen und Inhaltsverzeichnisse zu jeder Studie sind im Internet einsehbar.

**Individueller Service** – Gerne senden wir Ihnen auch unseren Papierkatalog zu. Bitte fordern Sie Ihr individuelles Exemplar bei uns an. Für Fragen, Anregungen und individuelle Anfragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung. Wir freuen uns auf eine gute Zusammenarbeit

### **Ihr Team der *Diplomarbeiten Agentur***

Dipl. Kfm. Dipl. Hdl. Björn Bedey –  
Dipl. Wi.-Ing. Martin Haschke —  
und Guido Meyer GbR —————

Hermannstal 119 k —————  
22119 Hamburg —————

Fon: 040 / 655 99 20 —————  
Fax: 040 / 655 99 222 —————

agentur@diplom.de —————  
www.diplom.de —————

# Vorwort

Die Beeinflussung unserer Umwelt durch Schadstoffe und das Verbrauchen von Rohstoffen ist zum größten Teil auf technische Verbrennungsvorgänge zurückzuführen.

Dabei sei z.B. an Verbrennungsmotoren, Kraftwerke und Hausbrandfeuerungen gedacht.

Auf allen diesen Gebieten wird intensiv an einer Verringerung der Emissionen gearbeitet, wobei einerseits Maßnahmen zur Abgasnachbehandlung getroffen werden, andererseits aber auch untersucht wird, inwieweit die Prozeßführung der Verbrennung die primäre Schadstoffentstehung beeinflussen kann.

Der Ablauf der Diplomarbeit ist in folgende Abschnitte unterteilt:

## Praktischer Teil

### Prüfstandentwurf

Der erste Abschnitt besteht darin, einen Heizungsprüfstand zu entwerfen, der den Anforderungen nach DIN 4702 entspricht.

### Prüfstandaufbau

Der Heizungsprüfstand ist entsprechend den vorliegenden Bedingungen (Labor) so aufzubauen, daß die erforderlichen Messungen DIN-gerecht durchgeführt werden können. Außerdem soll der Prüfstand über weitere Messtellen für spezielle Messreihen verfügen.

### Heizungsvermessung

Für die zu untersuchende Heizung werden Messungen nach DIN durchgeführt, um den stationären Heizungsbetrieb beurteilen zu können. Weitere Messungen werden durchgeführt, um auch instationäres Verhalten zu untersuchen.



### **Versuchsauswertung**

Der Kern der Arbeit liegt in der Versuchsauswertung. Die Schwerpunkte sind die Bestimmung verschiedener Wirkungsgrade sowie die Berechnung der Schadstoffemissionen unter verschiedenen Einstellungen und Lastzuständen. Die Untersuchung der Schaltvorgänge soll das Verhalten bei instationärem Betrieb zeigen. Eine anschließende Diskussion schließt den Hauptteil ab.

### **Verbesserungsvorschläge**

Auf den Versuchsergebnissen basierend werden Möglichkeiten zur Reduzierung der Abgasemissionen dargestellt und auf ihre Durchführbarkeit hin überprüft.

## Theoretischer Teil

### **Einleitung**

Die Einleitung soll dem Leser ausgehend vom Energieverbrauch in der BRD (alte Bundesländer) eine Übersicht über die jährlichen Emissionen verschaffen. Um das Verständnis zu erleichtern, werden die auftretenden Schadstoffe beschrieben.

Nach einer Zusammenfassung der geltenden Gesetze folgt eine Abschlußbetrachtung die nochmals die Notwendigkeit, die Schadstoffemissionen von Hausbrandfeuerungen zu verringern unterstreichen soll.

### **Berechnungsgrundlagen**

Nach einer Zusammenfassung der durchzuführenden Messungen und Berechnungen werden die theoretischen Grundlagen der Verbrennungslehre vermittelt.

Darauf aufbauend werden die später für die Computerprogrammierung erforderlichen Rechnungen hergeleitet.

Eine ausführliche Beschreibung der untersuchten Ölheizungseinheit (Unit) sowie des Prüfstandes liefert neben Erläuterungen zur Messtechnik die Grundlagen für die Versuchsdurchführung.

### **Erstellung eines Computerprogramms**

Auf den Berechnungsgrundlagen aufbauend wird ein Computerprogramm geschrieben, um die Vielzahl von Meßwerten verarbeiten zu können.

Verwendete Formelzeichen:

Zeichen	Bedeutung	Einheit
$A_{CO}$	Fläche erhöhter CO-Konzentration bei Brennschluß	ppmCO s
$A_{CH}$	Fläche erhöhter CH-Konzentration bei Brennschluß	ppmCH s
$b_F$	Feuerungslaufzeit	h bzw. Tage
$b_H$	Betriebsbereitschaftszeit	h bzw. Tage
$b_{VHK}$	Vollbenutzungszeit	h bzw. Tage
$c$	Kohlenstoffgehalt im Brennstoff	kg/kg
$c_{ph2o}$	spez. Wärmekapazität $H_2O$ (flüssig)	kJ/kg K
$cp_{N_2}$	spez. Wärmekapazität $N_2$	kJ/Kg K
$cp_{H_2O}$	spez. Wärmekapazität $H_2O$ (Dampf)	kJ/kg K
$cp_{CO_2}$	spez. Wärmekapazität $CO_2$	kJ/kg K
$cp_{O_2}$	spez. Wärmekapazität $O_2$	kJ/kg K
$cp_{CO}$	spez. Wärmekapazität $CO$	kJ/kg K
$CO_{2max}$	maximaler $CO_2$ -Wert	%
$CO_2$	gemessener $CO_2$ -Wert	%
$CO$	gemessener CO-Wert	%
CH	gemessener $C H_y$ -Wert	ppm
$E_{NOgem}$	NO-Emission, gemessen	mg NO/kWh
$E_{NOxgem}$	NOx-Emission, gemessen	mgNOx/kWh
$E_{NOx}$	NOx-Emission bei Bezugszustand	mgNOx/kWh
$E_{CO_2gem}$	$CO_2$ -Emission, gemessen	kg $CO_2$ /kWh
$E_{COgem}$	$CO$ -Emission, gemessen	kg $CO_2$ /kWh
$H_U$	unterer Heizwert des Brennstoffes	J/kg bzw.
$H_{el}$	elektrische Enthalpie	J/s
$H_L$	Enthalpie der Ansaugluft	J/s
$H_N$	nutzbare Enthalpie = $Q_N$	J/s
$H_{abg}$	Abgasenthalpie	J/s
$H_{abgmax}$	max. mögliche Abgasenthalpie	J/s
$H_{Krges}$	gesamte Brennstoffenthalpie	J/s
$H_{Kr}$	Brennstoffenthalpie Aufgrund Temp.	J/s
$h$	Wasserstoffgehalt im Brennstoff	kg/kg
$L_{rel}$	relative Luftfeuchte	%
$\dot{m}_{Kr}$	Brennstoffmassenstrom	kg/s bzw. kg/h
$\dot{m}_{H_2O}$	Kaltwassermassenstrom	kg/s bzw. kg/min
$m_{Lmin}$	stöchiometrische Luftmasse	kg/kg Kr
$\dot{m}_{abg, f}$	wirkliche feuchte Abgasmasse	kg/s
$\dot{m}_{abg, t}$	wirkliche trockene Abgasmasse	kg/s
$\dot{m}_{L, t}$	zugeführte trockene Luftmasse	kg/s
$\dot{m}_{NOgem}$	NO-Anteil im Abgas, gemessen	kg/kg Abg
$\dot{m}_{NOgem}$	NO-Massenstrom, gemessen	kg/s
$\dot{m}_{CO_2gem}$	$CO_2$ -Anteil im Abgas, gemessen	kg/kg Abg
$\dot{m}_{CO_2gem}$	$CO_2$ -Massenstrom, gemessen	kg/s
$\dot{m}_{COgem}$	CO-Anteil im Abgas, gemessen	kg/kg Abg
$\dot{m}_{COgem}$	CO-Massenstrom, gemessen	kg/s
$\dot{m}_{WD}$	Wasserdampfanteil der Luft	kg/ kg
$\dot{m}_{WD}^*$	Wasserdampfmassenstrom	kg/s
$\dot{m}_{abg, f}$	Abgasmassenstrom unter Berücksichtigung der Luftfeuchte	kg/s

Verwendete Formelzeichen:

Zeichen	Bedeutung	Einheit
$m_{CHgem}$	CH-Emission bei Brennschluß	kg/m <sup>3</sup>
$m_{CH}$	CH-Emission bei Brennschluß pro Ausschaltvorgang	g
$\dot{m}_{N_2}$	Abgasteilstrom N <sub>2</sub>	kg/s
$\dot{m}_{CO_2}$	Abgasteilstrom CO <sub>2</sub>	kg/s
$\dot{m}_{H_2O}$	Abgasteilstrom H <sub>2</sub> O (Dampf)	kg/s
$\dot{m}_{O_2}$	Abgasteilstrom O <sub>2</sub>	kg/s
$n$	Stickstoffgehalt <sup>2</sup> im Brennstoff	kg/kg
$NO_{gem}$	gemessener NO-Wert	ppm
$o$	Sauerstoffgehalt im Brennstoff	kg/kg
$O_2$	gemessener O <sub>2</sub> -Wert	%
$p^2$	Luftdruck bei Versuchsdurchführung	bar
$p_s$	Wasserdampfsättigungsdruck	bar
$p_{dyn}$	Dynamischer Druck im Abgasrohr	bar
$P_{el}$	elektr. Leistungsaufnahme von Gebläse, Kraftstoffpumpe, Umwälzpumpe, Regelung u. Vorwärmung	W bzw. kW
$\dot{Q}_N$	nutzbare Wärmeleistung	kW
$\dot{Q}_V$	Wärmestrahlungsverluste	kW
$\dot{Q}_{Kr}$	Wärmenergie des Brennstoffes	kW
$q_a$	Abgasverlust	1
$q_u$	Wärmeverlust durch unverb. Gase im Abgas	1
$q_F$	Wärmeverlust durch unverb. feste Substanzen im Abgas	1
$q_B$	Betriebsbereitschaftsverlust	1
$s$	Schwefelgehalt im Brennstoff	kg/kg
$t_{sv}$	Zeit erhöhter Schadstoffkonzentration bei Brennschluß	s
$T_V$	Vorlauftemperatur	°C
$T_R$	Rücklauftemperatur	°C
$T_K$	Kaltwassertemperatur	°C
$T_{Abg}$	Abgastemperatur	°C
$T_{Ad}$	Adiabate Verbrennungstemperatur	°C
$T_{L}$	Ansauglufttemperatur	°C
$T_{Kr}$	Zulauftemp. des Brennstoffes	°C
$T_o$	Temperatur bei Normzustand	°C
$v_r$	Strömungsgeschw. im Abgasrohr	m/s
$V_r$	zugeführtes Ansaugluftvolumen	m <sup>3</sup> /kg Kr
$V_L$	stöchiometrisches Luftvolumen	m <sup>3</sup> /kg Kr
$V_{Lmin}$	feuchtes Abgasvolumen	m <sup>3</sup> /kg Kr
$V_{abgmin, f}$	bei stöchiometrischer Verbrennung	
$V_{abgmin, t}$	trockenes Abgasvolumen	m <sup>3</sup> /kg Kr
$V_{abg, t}$	bei stöchiometrischer Verbrennung	
$V_{Abg}$	wirkliches trockenes Abgasvolumen	m <sup>3</sup> /kg Kr
	Abgasvolumen während erhöhter Schadstoffkonzentration	m <sup>3</sup>
$\delta_{H_2O}$	Dichte des Wassers (flüssig)	kg/dm <sup>3</sup>
$\delta_{Kr}$	Dichte des Brennstoffes	kg/dm <sup>3</sup>
$\delta_A$	Dichte des Abgases	kg/dm <sup>3</sup>
$\delta_o$	Dichte bei Normzustand	kg/dm <sup>3</sup>

Verwendete Formelzeichen:

Zeichen	Bedeutung	Einheit
$\eta$	Kesselwirkungsgrad	1 bzw. %
$\eta_f$	Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	1 bzw. %
$\eta_n$	Jahresnutzungsgrad	1
$\lambda$	Luftzahl (allgemein)	1
$\lambda_{O_2}$	über $O_2$ -Gehalt berechnet	1
$\lambda_{CO_2}$	über $CO_2+CO$ Gehalt berechnet	1
$\lambda_{VW}$	nach VW <sup>2</sup> berechnet	1
$\lambda_{TÜV}$	nach TÜV-Essen berechnet	1

# Inhalt

## **1. Schadstoffe - Gesetze - Grenzwerte**

- 1.1 Stickoxide  $\text{NO}_x$
- 1.2 Kohlenmonoxid  $\text{CO}$
- 1.3 Unverbrannte Kohlenwasserstoffe  $\text{C}_x\text{H}_y$
- 1.4 Kohlendioxid  $\text{CO}_2$
- 1.5 Ruß
- 1.6 Gesetze und Verordnungen
- 1.7 Vergleich Emissionen PKW - Hausbrandfeuerungen
- 1.8 Über die Notwendigkeit weiterer Verbesserungen

## **2. Berechnungsgrundlagen und Computerprogramm**

- 2.1 Kesselwirkungsgrad (wasserseitig)
- 2.2 Der Verbrennungsvorgang
- 2.3 Verbrennungskennwerte und ihre Berechnung
  - 2.3.1 Luftzahl
  - 2.3.2 Sauerstoffbedarf / Luftbedarf
  - 2.3.3 Abgasmenge bei vollkommener Verbrennung (Mindestabgasmenge)
  - 2.3.4 Bestimmung der Luftzahl mit Hilfe der Abgasanalyse
  - 2.3.5 Tatsächliche Abgas- und Ansaugluftmassenströme
- 2.4 Kesselwirkungsgrad (Enthalpiebilanz)
- 2.5 Feuerungstechnischer Wirkungsgrad
- 2.6 Jahresnutzungsgrad
- 2.7 Schadstoffemissionen
  - 2.7.1  $\text{NO}_x$ -Emission
  - 2.7.2  $\text{CO}_2$ -Emission
  - 2.7.3  $\text{CO}$ -Emission
- 2.8 Adiabate Verbrennungstemperatur
- 2.9 Computerprogramm zur Auswertung der Messwerte

## **3. Prüfstand und Meßtechnik**

- 3.1 Prüfstandaufbau
- 3.2 Technische Beschreibung des Wärmeerzeugers

### **3.3 Meßtechnik**

- 3.3.1 Verwendete Meßtechnik und Auswertungshilfen
- 3.3.2 H & B Flammenionisationsdetektor FIDAS 2 T
- 3.3.3 CO<sub>2</sub>-Indikator Testoryt 0-20Vol.-%
- 3.3.4 Maihak OXYGOR 6N Sauerstoffmeßgerät
- 3.3.5 UNOR 4N 1-0/1/5 Kohlenmonoxidmeßgerät
- 3.3.6 Maihak UNOR 5N 1 CO<sub>2</sub>/20 Kohlendioxidmeßgerät
- 3.3.7 Beckman NO/NO<sub>x</sub> Analysator Modell 951
- 3.3.8 Bosch Rußtester

## **4. Verbrennungstechnische Untersuchung**

- 4.1 Festlegung der Kraftstoffkennwerte
- 4.2 Bestimmung der elektrischen Leistung
- 4.3 Bestimmung des Kesselwirkungsgrades nach DIN 4702 Teil 2
- 4.4 Stationäre Abgasmessungen bei verschiedenen Übertemperaturen
- 4.5 Einfluß der Luftzahl auf die Verbrennung
- 4.6 Einfluß der Schaltvorgänge auf die Gesamtemission

## **5. Schadstoffreduzierende Maßnahmen**

- 5.1 Sekundärmaßnahmen
- 5.2 Primärmaßnahmen
  - 5.2.1 Abgasrückführung
  - 5.2.2 Wasser-in-Öl-Emulsion und Einsatz von Additiven
  - 5.2.3 Brennerbetrieb bei "großer" Luftzahl
  - 5.2.4 Kontrollierte Verbrennung
  - 5.2.5 Luft-/Kraftstoffvorwärmung
  - 5.2.6 Punktuelle Wärmeabfuhr
  - 5.2.7 Schadstoffreduzierung bei Schaltvorgängen
  - 5.2.8 Regenerative Brennstoffe
  - 5.2.9 Zweistufenverbrennung durch Luftstufung

# **1. Schadstoffe - Gesetze - Grenzwerte**

1.1 Stickoxide NO<sub>x</sub>

1.2 Kohlenmonoxid CO

1.3 Unverbrannte Kohlenwasserstoffe C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>

1.4 Kohlendioxid CO<sub>2</sub>

1.5 Ruß

1.6 Gesetze und Verordnungen

1.7 Vergleich Emissionen PKW - Hausbrandfeuerungen

1.8 Über die Notwendigkeit weiterer Verbesserungen



# 1. Schadstoffe - Gesetze - Grenzwerte

## 1.1 Stickoxide $\text{NO}_x$

Stickoxide sind Verbindungen der Elemente Stickstoff "N" und Sauerstoff "O". Bekannt sind im wesentlichen :

$\text{NO}$	Stickstoffmonoxid
$\text{NO}_2$	Stickstoffdioxid
$\text{N}_2\text{O}_4$	Distickstofftetraoxid ( $\text{NO}_2$ -Doppelbildung)
$\text{NO}_3$	Stickstofftrioxid
$\text{N}_2\text{O}$	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
$\text{N}_2\text{O}_3$	Distickstofftrioxid
$\text{N}_2\text{O}_5$	Distickstoffpentoxid

Im Bereich der Luftreinhaltung sind jedoch nur  $\text{NO}$  und  $\text{NO}_2$  von Bedeutung, die auch als  $\text{NO}_x$  zusammengefaßt werden. Bei konventionellen Feuerungen entsteht Stickstoffmonoxid mit einem Anteil von 95% - 98% und Stickstoffdioxid mit etwa 2% - 5%. Der größte Teil des  $\text{NO}$  oxidiert jedoch über einen längeren Zeitraum (Stunden, Tage) in der Atmosphäre zu  $\text{NO}_2$ .

Bild 1 zeigt die zeitliche Umwandlung von  $\text{NO}$  zu  $\text{NO}_2$ , weshalb Stickoxide aus Verbrennungsabgasen immer auf  $\text{NO}_2$  bezogen werden:

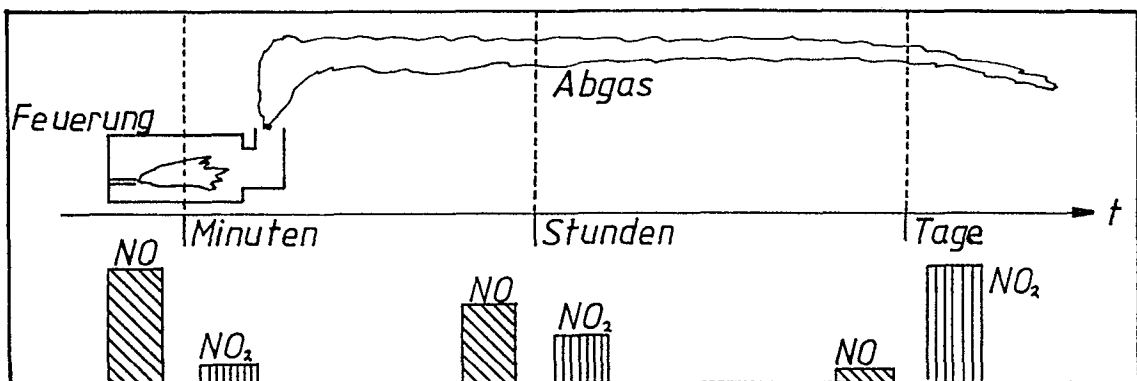
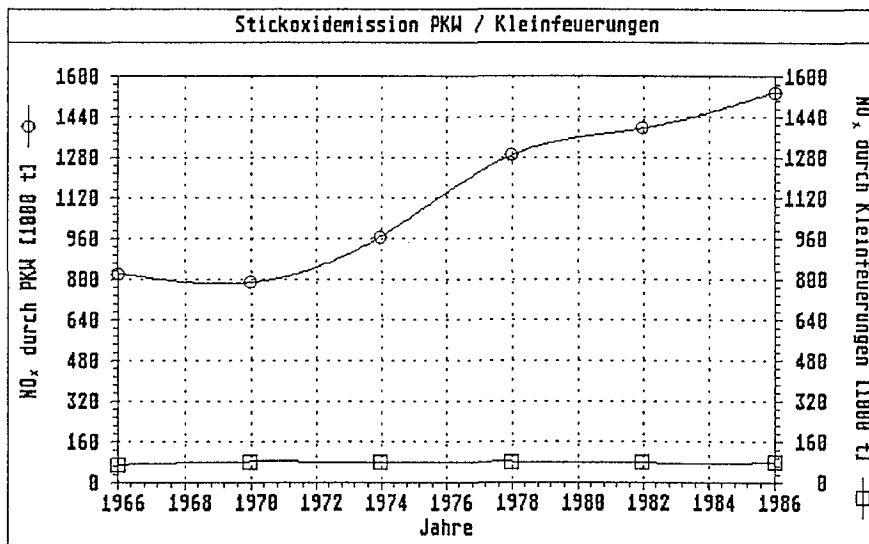


Bild 1) Umwandlung von  $\text{NO}$  zu  $\text{NO}_2$

Stickstoffmonoxid NO ist ein farbloses, giftiges Gas, was jedoch wegen der schnellen Oxidation zu NO<sub>2</sub> geringere Bedeutung hat. Stickstoffdioxid ist ebenfalls ein giftiges Gas, allerdings hat es eine bräunliche Farbe.

Die schädlicheren Wirkungen gehen vom NO<sub>2</sub> aus. Es führt durch Bildung von Salpetersäure (HNO<sub>3</sub>, HNO<sub>4</sub>) zu Schleimhautreizungen, Bronchial- und Lungenkrankheiten.

Neben der Mitverursachung von saurem Regen trägt es bei Vorhandensein von Kohlenwasserstoffen und UV-Licht (Sonnenstrahlung) zum photochemischen Smog bei, dessen Hauptbestandteil Ozon O<sub>3</sub> ist. Bild 2) zeigt die Emissionen von Stickoxiden (NOx angegeben als NO<sub>2</sub>)



Der Kurvenverlauf läßt weder eine deutliche Steigerung noch eine stärkere Reduzierung in der Zukunft der durch Kleinverbraucher emittierten Stickoxide erkennen.

Beim Straßenverkehr dagegen ist ein deutlicher Anstieg zu verzeichnen, der neben Zunahme des Fahrzeugbestandes auch durch erhebliche Steigerung der Verkehrsleistungen (1965 : 364 Mrd. Personenkilometer, 1987 : 649 Mrd. Personenkilometer) und auch durch verbrennungstechnische Gründe bedingt ist. Für die Zukunft ist durch verbesserte Prozeßführung bei Feuerungsanlagen sowie durch Katalysatortechnik bei Fahrzeugmotoren mit einer Reduzierung der Stickoxide zu rechnen.

Stickoxide entstehen fast ausschließlich bei Verbrennungsvorgängen in Motoren und Anlagen durch Oxidation des im Kraftstoff enthaltenen Stickstoffs sowie des Luftstickstoffs.

Die verschiedenen Bildungsmechanismen werden nach der Herkunft des Stickstoffs unterschieden:

- Brennstoff - NO<sub>x</sub>
- NO<sub>x</sub> durch Luftstickstoff

Bei NO<sub>x</sub>-Bildung durch Luftsauerstoff wird nochmals unterschieden zwischen :

- thermischem NO<sub>x</sub> (Hauptanteil)
- promptem NO<sub>x</sub>

#### Brennstoff-NO<sub>x</sub>

Aus organisch gebundenem Stickstoff bildet sich durch Oxidation mit molekularem Sauerstoff (O) hauptsächlich Stickstoffmonoxid. Bei Heizöl EL (HEL) liegt der atomar gebundene Stickstoff bei ca. 150 mg/kg<sub>KR</sub>. Es müssen Temperaturen von über 1000°C vorliegen. In Heizöl EL sind zwischen 0.1 und 0.6 % organischer Stickstoff vorhanden, im Vergleich zur Luft, in der ca. 75% Stickstoff enthalten ist.

Das zeigt auch, wie gering der Anteil des Brennstoff-NO<sub>x</sub> im Vergleich zum NO<sub>x</sub> aus Luftsauerstoff sein wird.

#### NO<sub>x</sub> aus Luftstickstoff

##### Thermische NO<sub>x</sub>-Bildung

Thermisches NO<sub>x</sub> bildet sich in Brennraumbereichen mit Temperaturen oberhalb 1300 °C durch Oxidation des in der Luft enthaltenen "Luftstickstoffs" und des Luftsauerstoffs.

Die Entstehung verläuft nach dem sog. "Zeldovic-Mechanismus" sowohl bei magerer, als auch bei fetter Verbrennung bei hohen Temperaturen. Bei magerer Verbrennung herrscht O<sub>2</sub>-Überschuß: Aus N<sub>2</sub> und O entsteht NO und N.

Durch weiterhin vorhandenen freien Sauerstoff kommt es zu einer Reaktion aus N und O<sub>2</sub> zu NO und O.

Bei fetter Verbrennung, also Brennstoffüberschuß, reagiert N und HO zu NO und H.

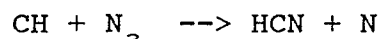
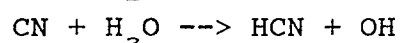
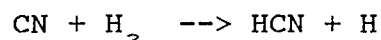
Auch hier entsteht hauptsächlich Stickstoffmonoxid, welches erst später zu NO<sub>2</sub> oxidiert.

Die Entstehung von thermischem NO<sub>x</sub> ist abhängig von:

- Flammentemperatur,
- Sauerstoffpartialdruck und der
- Verweilzeit der Verbrennungsgase im Brennraum.

#### Promptes NO<sub>x</sub>

Das prompte NO<sub>x</sub> (auch hier hauptsächlich NO) entsteht durch Verbindung von Luftstickstoff mit freiem Sauerstoff bei Luftüberschuß während des Verbrennungsprozesses. Die Bildung von Stickstoffmonoxid erfolgt über kurzlebige Zwischenprodukte, sogenannte Radikale (unvollkommene Atomgruppen). Und zwar reagieren nach "Fenimore" Kohlenwasserstoffe des Kraftstoffes mit dem Luftstickstoff, wodurch atomarer Stickstoff abgespalten wird:



Erst jetzt oxidiert der atomare Stickstoff N mit O zu NO. Die weitere Oxidation zu NO<sub>2</sub> findet bei Temperaturen unter 650 °C sowie später in der Atmosphäre statt.

## Einflußfaktoren auf die thermische Stickoxidbildung

Da der größte Teil der Stickoxide thermisch entsteht, werden die drei Haupteinflußfaktoren gesondert betrachtet:

### Verbrennungstemperatur

Der Einfluß der Flammentemperatur auf die Bildung von Stickoxiden wurde erstmals von Zeldovic beschrieben und später wissenschaftlich bestätigt. Bild 3) zeigt den Verlauf der  $\text{NO}_x$ -Bildung in Abhängigkeit von der Flammentemperatur. Die Kurve steigt mit zunehmender Temperatur und erreicht bei 2000 °C ihr Maximum von 100%. Das ist die mögliche  $\text{NO}_x$ -Emission, die bei adiabater Verbrennung erreichbar wäre.

Für das steile Abfallen der Stickoxidkonzentration ist thermische Zersetzung infolge hoher Temperaturen verantwortlich.

Der Kurvenverlauf zeigt unter Berücksichtigung, daß wahre Verbrennungstemperaturen von über 1200°C auftreten können, wie groß der Einfluß hoher Flammentemperaturen auf die Stickoxidentstehung sein kann.

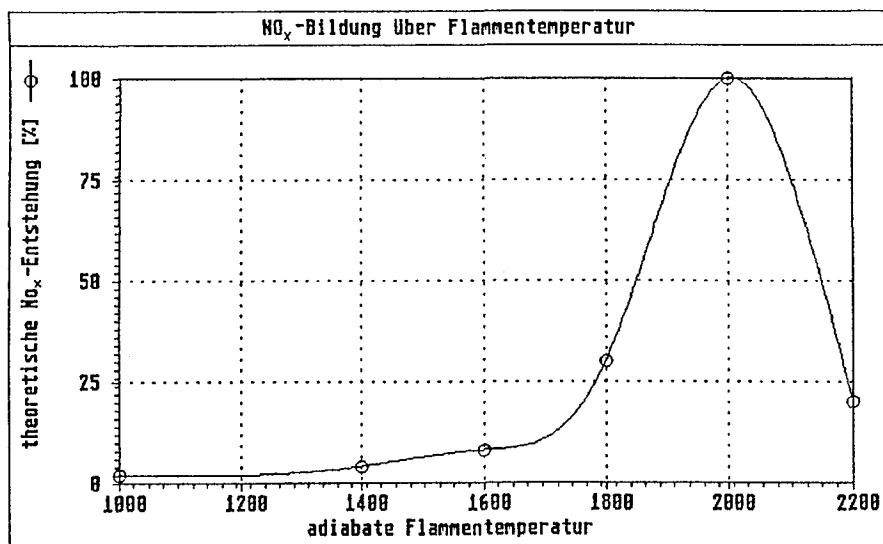


Bild 3) Einflüsse der theoretischen Flammentemperatur

Den Zusammenhang zwischen theoretischer und wahrer Verbrennungstemperatur bildet der Kühlfaktor, welcher das Verhältnis der beiden Temperaturen darstellt:

$$\text{Kühlfaktor } k = \frac{\text{adiabate Flammentemperatur}}{\text{wahre Flammentemperatur}} - 1$$

Der Kühlfaktor  $k$  gibt das Verhältnis an, wieviel Wärme der Flamme gegenüber adiabater Verbrennung entzogen wurde.

In Bild 4) wird die bei ungekühlter, adiabater Verbrennung mögliche Emission mit 100 % angegeben. Reaktionsthermodynamisch ist die Entstehung von ca. 1250 mg/kWh möglich. Bei einem Kühlfaktor von 0,2 würde die auftretende Emission nur noch 15% der möglichen Maximalemission betragen.

Für eine wahre Verbrennung ohne zusätzliche Vorrichtungen zur Flammenabkühlung (Annahme für einen konventionellen Gelbbrenner) sei  $k = 0,20$ . Wird durch Veränderungen am Brennraum eine weitere Temperaturverringerung bewirkt, würde sich der Kühlfaktor vergrößern. Im eingezeichneten Fall soll die Veränderung des Kühlfaktors 0,05 betragen, wodurch eine mögliche  $\text{NO}_x$ -Reduzierung auf ca. 11% bzw. ca. 137 mg/kWh gegenüber Ursprungswerten zu erwarten wäre. Durch diesen Zusammenhang ist für mögliche Änderungen am Feuerungssystem schon im Voraus eine Abschätzung der Verbesserungen möglich.

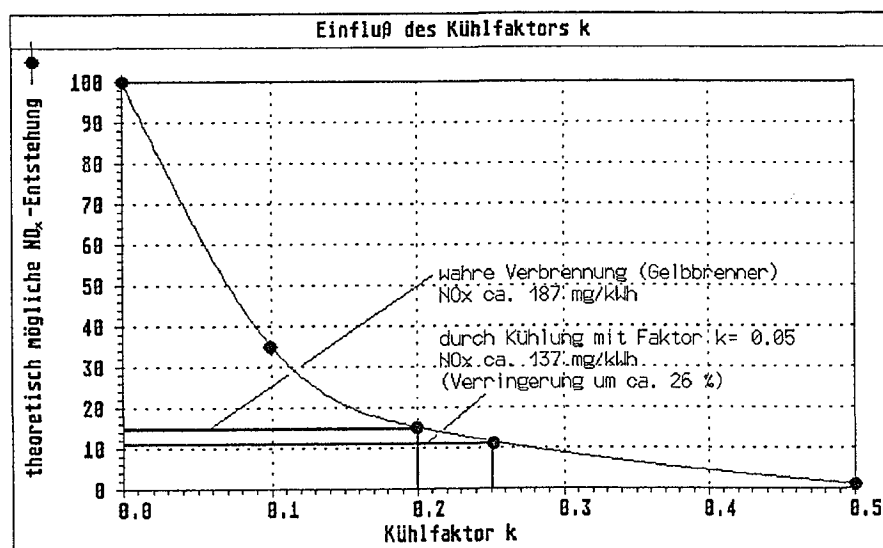


Bild 4) Einfluß des Kühlfaktors  $k$