

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

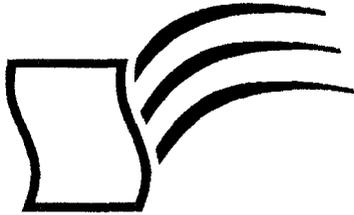
Ohlenhard, Rainer, Fenn, Christian: Verbrennungstechnische Untersuchung einer Hausbrandfeuerung mit Öl-Blaubrenner / Rainer Ohlenhard, Christian Fenn – Hamburg: Diplomarbeiten Agentur, 1997
Zugl.: Köln, Fachhochschule, Diplom, 1992

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_{N2}	spez. Wärmekapazität N_2	kJ/Kg K
cp_{H2O}	spez. Wärmekapazität H_2O (Dampf)	kJ/kg K
cp_{CO2}	spez. Wärmekapazität CO_2	kJ/kg K
cp_{O2}	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 -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_{CO2gem}	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}_{H2O}	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}_{CO2gem}	CO_2 -Anteil im Abgas, gemessen	kg/kg Abg
\dot{m}_{CO2gem}	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 ³
m_{CH}	CH-Emission bei Brennschluß pro Ausschaltvorgang	g
\dot{m}_{N_2}	Abgasteilstrom N ₂	kg/s
\dot{m}_{CO_2}	Abgasteilstrom CO ₂	kg/s
\dot{m}_{H_2O}	Abgasteilstrom H ₂ O (Dampf)	kg/s
\dot{m}_{O_2}	Abgasteilstrom O ₂	kg/s
n	Stickstoffgehalt im Brennstoff	kg/kg
NO_{gem}	gemessener NO-Wert	ppm
o	Sauerstoffgehalt im Brennstoff	kg/kg
O_2	gemessener O ₂ -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 ³ /kg Kr
V_L	stöchiometrisches Luftvolumen	m ³ /kg Kr
V_{Lmin}	feuchtes Abgasvolumen	m ³ /kg Kr
$V_{abgmin, f}$	bei stöchiometrischer Verbrennung	
$V_{abgmin, t}$	trockenes Abgasvolumen	m ³ /kg Kr
$V_{abg, t}$	bei stöchiometrischer Verbrennung	
V_{Abg}	wirkliches trockenes Abgasvolumen	m ³ /kg Kr
	Abgasvolumen während erhöhter Schadstoffkonzentration	m ³
δ_{H_2O}	Dichte des Wassers (flüssig)	kg/dm ³
δ_{Kr}	Dichte des Brennstoffes	kg/dm ³
δ_A	Dichte des Abgases	kg/dm ³
δ_o	Dichte bei Normzustand	kg/dm ³

Verwendete Formelzeichen:

Zeichen	Bedeutung	Einheit
η	Kesselwirkungsgrad	1 bzw. %
η_f	Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	1 bzw. %
η_n	Jahresnutzungsgrad	1
λ	Luftzahl (allgemein)	1
λ_{O_2}	über O_2 -Gehalt berechnet	1
λ_{CO_2}	über CO_2+CO Gehalt berechnet	1
λ_{VW}	nach VW ² berechnet	1
$\lambda_{TÜV}$	nach TÜV-Essen berechnet	1

Inhalt

1. Schadstoffe - Gesetze - Grenzwerte

- 1.1 Stickoxide NO_x
- 1.2 Kohlenmonoxid CO
- 1.3 Unverbrannte Kohlenwasserstoffe C_xH_y
- 1.4 Kohlendioxid 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 NO_x -Emission
 - 2.7.2 CO_2 -Emission
 - 2.7.3 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 CO₂-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 CO₂/20 Kohlendioxidmeßgerät
- 3.3.7 Beckman NO/NO_x 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_x

1.2 Kohlenmonoxid CO

1.3 Unverbrannte Kohlenwasserstoffe C_xH_y

1.4 Kohlendioxid CO_2

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 NO_x

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

NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
N ₂ O ₄	Distickstofftetraoxid (NO ₂ -Doppelbildung)
NO ₃	Stickstofftrioxid
N ₂ O	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
N ₂ O ₃	Distickstofftrioxid
N ₂ O ₅	Distickstoffpentoxid

Im Bereich der Luftreinhaltung sind jedoch nur NO und NO₂ von Bedeutung, die auch als 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 NO oxidiert jedoch über einen längeren Zeitraum (Stunden, Tage) in der Atmosphäre zu NO₂.

Bild 1 zeigt die zeitliche Umwandlung von NO zu NO₂, weshalb Stickoxide aus Verbrennungsabgasen immer auf NO₂ bezogen werden:

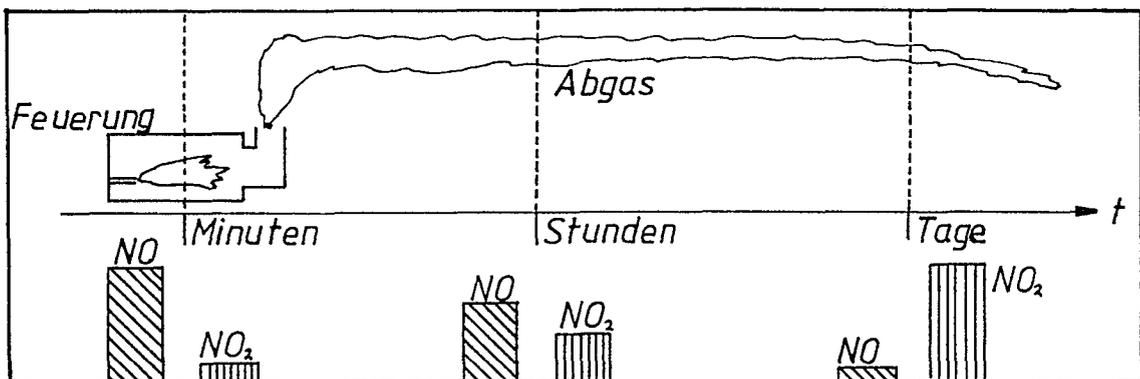
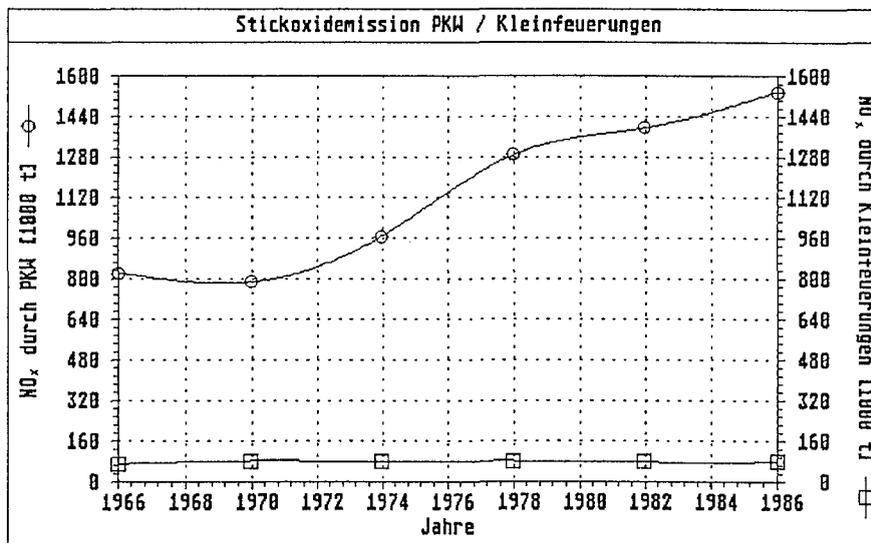


Bild 1) Umwandlung von NO zu NO₂

Stickstoffmonoxid NO ist ein farbloses, giftiges Gas, was jedoch wegen der schnellen Oxidation zu NO₂ geringere Bedeutung hat. Stickstoffdioxid ist ebenfalls ein giftiges Gas, allerdings hat es eine bräunliche Farbe.

Die schädlicheren Wirkungen gehen vom NO₂ aus. Es führt durch Bildung von Salpetersäure (HNO₃, HNO₄) 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 O₃ ist. Bild 2) zeigt die Emissionen von Stickoxiden (NOx angegeben als NO₂)



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_x
- NO_x durch Luftstickstoff

Bei NO_x-Bildung durch Luftsauerstoff wird nochmals unterschieden zwischen :

- thermischem NO_x (Hauptanteil)
- promptem NO_x

Brennstoff-NO_x

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_{KR}. 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_x im Vergleich zum NO_x aus Luftsauerstoff sein wird.

NO_x aus Luftstickstoff

Thermische NO_x-Bildung

Thermisches NO_x 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 O₂-Überschuß: Aus N₂ und O entsteht NO und N.

Durch weiterhin vorhandenen freien Sauerstoff kommt es zu einer Reaktion aus N und O₂ zu NO und O.

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

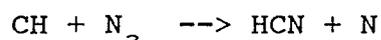
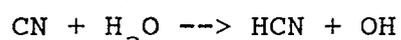
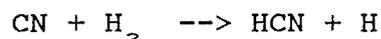
Auch hier entsteht hauptsächlich Stickstoffmonoxid, welches erst später zu NO₂ oxidiert.

Die Entstehung von thermischem NO_x ist abhängig von:

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

Promptes NO_x

Das prompte NO_x (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 NO₂ 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 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 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.

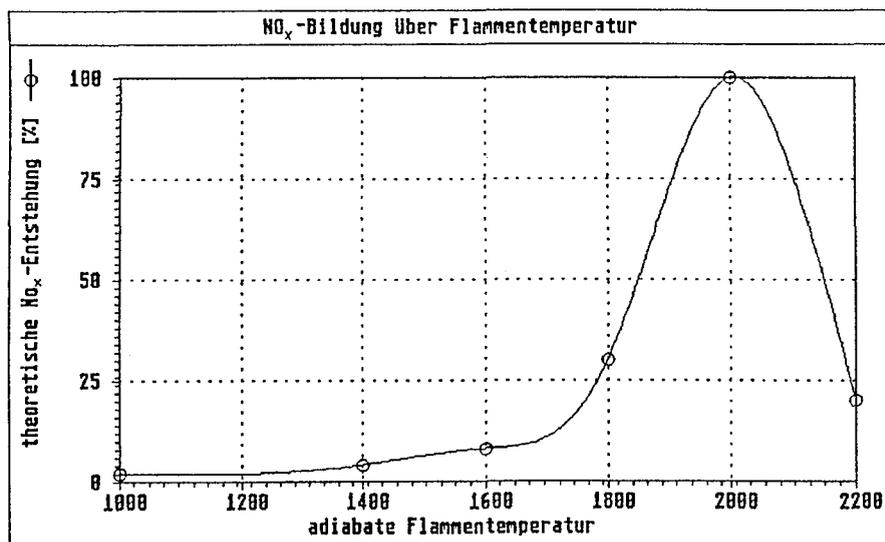


Bild 3) Einflüsse der theoretischen Flammentemperatur

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 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.

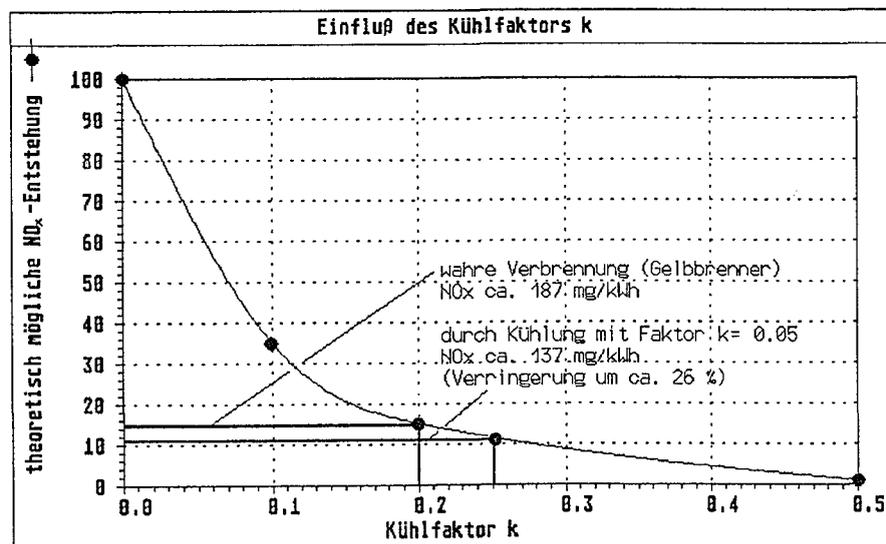


Bild 4) Einfluß des Kühlfaktors k