

HTW Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH)
Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik
Direktor: Prof. Dr.-Ing. habil Ernstwendelin Bach

**Durchführung theoretischer und experimenteller Untersuchungen
zu den Möglichkeiten der On-Board-Beeinflussung der
Verbrennungsluftzusammensetzung und/oder des Kraftstoffs für
Verbrennungsmotoren mit dem Ziel der Emissionsminderung**

Abschlussbericht über ein technisches Projekt,
gefördert unter dem Az: 17332 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Amin Velji
Dr. rer. nat. Uwe Hofmann

Dresden, im November 2001

Projektkennblatt
Der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	17332	Referat	24/0	Fördersumme	198.844,00 DM
Antragstitel		Durchführung theoretischer und experimenteller Untersuchungen zu den Möglichkeiten der On-Board-Beeinflussung der Verbrennungsluftzusammensetzung und/oder des Kraftstoffs für Verbrennungsmotoren mit dem Ziel der Emissionsminderung			
Stichworte		Energie, Motor, Verbrennung			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
1 Jahr	1.9.00	31.8.01	1		
Zwischenberichte					
Bewilligungsempfänger		HTW Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH) Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik Friedrich-List-Platz 1 01069 Dresden		Tel	0351/462-2781
				Fax	0351/462-3476
				Projektleitung Prof. Bach	
				Bearbeiter Dr.-Ing. A. Velji	
Kooperationspartner					
<p>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</p> <p>Der Dieselmotor ist die Verbrennungskraftmaschine mit dem höchsten Wirkungsgrad und der höchsten Flexibilität im mobilen Einsatz. Ein Hauptproblem der dieselmotorischen Verbrennung stellt die Emission der Schadstoffe Stickoxide (NO_x) und Partikel (PM) dar. Herkömmliche Maßnahmen zur Senkung der NO_x-Emission führen zu einem Anstieg der PM-Emission und des Kraftstoffverbrauches. Maßnahmen zur Reduzierung der Partikelemission führen wiederum zu einem Anstieg der NO_x-Emission. Eine Möglichkeit zur Reduzierung beider Emissionen besteht in der Änderung der Zusammensetzung der Verbrennungsluft. So kann z.B. durch eine Erhöhung des Inertgasanteiles der Verbrennungsluft die NO_x-Emission drastisch reduziert werden. Wird gleichzeitig der Sauerstoffgehalt genügend hoch gehalten, kann der Anstieg der Partikelemission unterbunden werden. Gegenstand und Ziel des Projektes ist die On-Board-Beeinflussung der Verbrennungsluftzusammensetzung und des Kraftstoffs zur Erfüllung zukünftiger Abgasemissionsgrenzwerte (EURO IV, EURO V) ohne Abgasnachbehandlung.</p> <p>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</p> <p>Der Lösungsweg beinhaltet zunächst in einem ersten Arbeitspaket eine theoretische Ermittlung des Zusammenhanges zwischen der Verbrennungsluftzusammensetzung und der NO_x- und PM-Emission. Grundlage zur Ermittlung dieses Zusammenhanges sind Daten über die Zusammensetzung der Verbrennungsluft und Emissionen, die aus Untersuchungen zur Abgasrückführung zur Verfügung stehen. Darauf basierend werden die theoretisch ermittelten Werte an einem 1-Zylinder-Dieselmotor überprüft und die optimale Verbrennungsluftzusammensetzung aus den experimentellen Daten abgeleitet. Im dritten Arbeitspaket wird eine Strategie zur Herstellung des optimalen Verbrennungsluftgemisches unter Berücksichtigung der realen Bedingungen in der Praxis (Fahrzeugeinsatz) erarbeitet, die Varianten experimentell getestet und bewertet. Im Vordergrund steht dabei die Untersuchung der Möglichkeit, bereits in anderen Gebieten im Einsatz befindliche Membranrennverfahren zur Herstellung der gewünschten Verbrennungsluftzusammensetzung zu verwenden.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190					

Ergebnisse und Diskussion

Die wichtigsten Ergebnisse dieses Projekts lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Das Hauptproblem beim Dieselmotor stellen die Abgasschadstoffe Stickoxide (NO_x) und Partikel (PM) dar.
- Herkömmliche Maßnahmen zur NO_x-Senkung führen zu einem Anstieg der PM-Emission und des Kraftstoffverbrauchs. Maßnahmen zur Senkung der PM-Emission führen wiederum zu einem Anstieg der NO_x-Emission.
- Die Abgasrückführung ist eine sehr effektive Möglichkeit, die NO_x-Emission zu senken. Dabei steigt die PM-Emission jedoch drastisch an. Ursache hierfür ist der verminderte Sauerstoffgehalt im Gasgemisch „Frischlufte + zurückgeführtes Abgas“.
- Eine Möglichkeit zur Reduzierung sowohl der NO_x- als auch der PM-Emission besteht in der gezielten Änderung der Zusammensetzung der Verbrennungsluft. So kann durch Erhöhung des Inertgasanteiles die NO_x-Emission drastisch reduziert werden. Wird dabei der Sauerstoffgehalt so hoch gehalten wie in atmosphärischer Luft, kann der Anstieg der PM-Emission unterbunden werden.
- Ausgehend von der Zusammensetzung der Verbrennungsluft bei der Abgasrückführung wurde eine optimale Zusammensetzung der Verbrennungsluft theoretisch abgeleitet.
- Experimentelle Untersuchungen an zwei unterschiedlichen Einzylinder-Dieselmotoren, bei denen N₂, CO₂ und O₂ der Verbrennungsluft beigemischt wurden, ergaben:
 - Die relative Senkung der NO_x-Emission ist eine Funktion des Sauerstoffgehalts und der Zusammensetzung des Trägergases. Im Falle reiner Luft ist das Trägergas Stickstoff.
 - CO₂ als Trägergas ist wirksamer als N₂. Der Grund hierfür liegt in der höheren Wärmekapazität von CO₂.
 - Die PM-Emission ist eine Funktion des Sauerstoffgehalts. Mit steigendem Sauerstoffgehalt nimmt die PM-Emission ab. Ab einem Sauerstoffgehalt > 20 % lässt sich der PM-Anstieg begrenzen.
 - Bei einem CO₂-Gehalt von 12 % und einem O₂-Gehalt von 20 % lässt sich eine NO_x-Reduktion um 80 % ohne nennenswerten Anstieg der PM-Emission realisieren.
- Die „optimale“ Verbrennungsluft muss einen Sauerstoffgehalt größer als 20 % und einen CO₂-Gehalt größer als 10 % aufweisen. Der Rest besteht im Wesentlichen aus Stickstoff.
- Zur Herstellung der optimal zusammengesetzten Luft kommen Membrane als Trennorgane zur Trennung bestimmter Gaskomponenten aus einem Gasgemisch in Betracht. So kann zum Einen die Luft durch Verringerung des Stickstoffgehalts mit Sauerstoff angereichert werden. Zum Anderen kann CO₂ gezielt aus dem Abgas getrennt und der Verbrennungsluft beigemischt werden, um den CO₂-Gehalt der Verbrennungsluft zu erhöhen.
- Eine Literaturstudie ergab, dass zur Anreicherung des Kraftstoffs mit Sauerstoff verschiedene sauerstoffhaltige Alkohole, Ether und Ester in Frage kommen. Dabei ist deren Einsatz sowohl in Reinform als Ersatz für Dieseldieselkraftstoff als auch als Beimischungen zum Dieseldieselkraftstoff denkbar. Die Unterschiede in den physikalischen und chemischen Eigenschaften zwischen Alkohole, Ether und Ester einerseits und Dieseldieselkraftstoff andererseits können eine völlige Neuanpassung des Dieseldieselmotorkonzepts erforderlich machen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Velji, A.; Hofmann, U.; Bach, E.: On-Board-Beeinflussung der Verbrennungsluft zur Schadstoffreduktion bei Dieselmotoren. V. Tagung „Motorische Verbrennung: Aktuelle Probleme und moderne Lösungsansätze“, Haus der Technik, Essen 13./14. März 2001

Fazit

Ausgehend von der Abgasrückführung wurde in theoretischen und experimentellen Untersuchungen die optimale Zusammensetzung der Verbrennungsluft zur gleichzeitigen Reduktion der NO_x- und Partikelemission ermittelt. Es konnte gezeigt werden, dass es mit dieser Verbrennungsluft möglich ist, eine ähnlich hohe NO_x-Reduktion wie bei der Abgasrückführung zu erzielen, ohne dass die Partikelemission drastisch ansteigt. Die „optimale“ Verbrennungsluft muss **einen Sauerstoffgehalt größer als 20 % und einen CO₂-Gehalt größer als 10 %** aufweisen. Der Rest besteht im Wesentlichen aus Stickstoff.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Titelblatt	1
Projektkennblatt	2
Inhaltsverzeichnis	4
Verzeichnis von Bildern und Tabellen	5
Symbolverzeichnis	9
Zusammenfassung	10
Einleitung	11
Hauptteil	13
1. Stand der Technik	13
2. Theoretische Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der Verbrennungsluft und der NO _x - und PM-Emission	15
2.1 Grundsätzliches zur Abgasrückführung	15
2.2 Modellvorstellung	15
2.3 Schlussfolgerungen für Verbrennungsluftzusammensetzung aus AGR-Ergebnissen	17
3. Experimentelle Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen der Verbrennungsluftzusammensetzung und der Schadstoffemission	17
3.1 Versuchsaufbau	17
3.2 Versuchsträger	18
3.3 Versuchsergebnisse	19
3.3.1 Versuchsträger 1	19
3.3.2 Versuchsträger 2	22
3.4 Schlussfolgerungen	24
4. Möglichkeiten zur Herstellung des optimalen Verbrennungsluftgemischs	27
4.1 Technologien zur On-Board-Anreicherung der Verbrennungsluft mit O ₂ bzw. CO ₂	27
4.2 Untersuchungen zum Einsatz eines Membranmoduls zur O ₂ -Anreicherung der Luft am Motorenprüfstand	29
4.2.1 Versuchsaufbau	29
4.2.2 Versuchsergebnisse	30
4.2.3 Betrachtungen zur Auslegung eines Moduls bei Einsatz definierter Membrane	31
4.3 Theoretische Untersuchungen zur Machbarkeit der CO ₂ -Anreicherung der Verbrennungsluft	32
5. Möglichkeiten zur Erhöhung des Sauerstoffanteils im Dieselkraftstoff durch Zugabe sauerstoffhaltiger Komponenten	34
6. Fazit	39
7. Literatur	40
Anhang	42

Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Bilder im Hauptteil

Bild 1: Zielkonflikt zwischen NO_x -, PM-Emission und Kraftstoffverbrauch

Bild 2: Abgrenzung des Projektes zum Stand der Technik

Bild 3: NO_x - und Partikelemission als Funktion der Abgasrückführtrate

Bild 4: Modell der thermischen NO-Bildung

Bild 5: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Bild 6: Relative Änderung der NO_x -Emission als Funktion des Sauerstoffgehalts

Bild 7: Relative Änderung der Partikelemission als Funktion des Sauerstoffgehalts

Bild 8: Änderung der CO-Emission als Funktion des Sauerstoffgehalts

Bild 9: Änderung der HC-Emission als Funktion des Sauerstoffgehalts

Bild 10: Relative Änderung der NO_x -Emission als Funktion des Sauerstoffgehalts im Motorbetriebspunkt 1

Bild 11: Relative Änderung der Partikelemission als Funktion des Sauerstoffgehalts im Motorbetriebspunkt 1

Bild 12: Änderung der CO-Emission und der Schwärzungszahl als Funktion des Sauerstoffgehalts

Bild 13: Hypothese zur NO_x - und PM-Senkung

Bild 14: PM-/ NO_x -Emission ohne und mit Abgasrückführung sowie unterschiedlicher Zusammensetzung der Verbrennungsluft

Bild 15: Schema zur Herstellung des optimalen Verbrennungsluftgemisches

Bild 16: Versuchsaufbau zur Testung eines Membranmoduls

Bild 17: Varianten des Membranmoduleinsatzes zur CO_2 -Abtrennung aus Abgas

Bild 18: Umesterung von Pflanzenöl zum Methyl ester

Bilder im Anhang

Bild A1: NO_x -Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor OM 501

Bild A2: SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor OM 501

Bild A3: NO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 1

- Bild A4: SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20
im Motorbetriebspunkt 1
- Bild A5: NO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20
im Motorbetriebspunkt 2
- Bild A6: Relative NO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz
1B20 im Motorbetriebspunkt 2
- Bild A7: SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20
im Motorbetriebspunkt 2
- Bild A8: Relative Änderung der SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor
Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 2
- Bild A9: CO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20
im Motorbetriebspunkt 2
- Bild A10: NO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20
im Motorbetriebspunkt 3
- Bild A11: Relative Änderung der NO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt
beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 3
- Bild A12: SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20
im Motorbetriebspunkt 3
- Bild A13: Relative Änderung der SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor
Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 3
- Bild A14: CO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20
im Motorbetriebspunkt 3
- Bild A15: NO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20
im Motorbetriebspunkt 4
- Bild A16: Relative Änderung der NO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt
beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 4
- Bild A17: SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20
im Motorbetriebspunkt 4
- Bild A18: Relative Änderung der SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim
Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 4
- Bild A19: CO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20
im Motorbetriebspunkt 4
- Bild A20: NO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20
im Motorbetriebspunkt 5

Bild A21: Relative Änderung der NO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 5

Bild A22: SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 5

Bild A23: Relative Änderung der SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 5

Bild A24: CO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 5

Bild A25: NO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 6

Bild A26: Relative Änderung der NO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 6

Bild A27: SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 6

Bild A28: Relative Änderung der SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 6

Bild A29: CO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 6

Tabellen im Hauptteil

Tabelle 1: Abgasgrenzwerte für Nutzfahrzeuge in Europa (ESC-Test)

Tabelle 2: Zusammensetzung der Verbrennungsluft mit und ohne Abgasrückführung

Tabelle 3: Motorspezifikation des Versuchsträgers 1

Tabelle 4: Motorspezifikation des Versuchsträgers 2

Tabelle 5: Motorbetriebspunkte bei Versuchsträger 2

Tabelle 6: Zusammensetzung der Verbrennungsluft, NO_x- und PM-Emission aus Bild 12

Tabelle 7: Trennmechanismen und Materialien von Membranen bei der Gastrennung

Tabelle 8: Einsatzgebiete der Gastrennung mittels Membrane

Tabelle 9: Untersuchungsergebnisse bei Einsatz des Membranmoduls

Tabelle 10: Membranflächen und Leistungsbedarf für unterschiedliche Membranen und Permeatdrücke

Tabelle 11: Betriebspunkte für die Berechnungen zur CO₂-Anreicherung

Tabelle 12: Ergebnisse der Berechnungen zum CO₂-Gehalt der Verbrennungsluft

Tabelle 13: Kohlenstoff-, Wasserstoff-, Schwefel- und Stickstoffgehalt von verschiedenen Dieselkraftstoffen

Tabelle 14: Kennwerte von Dieselkraftstoff, Methanol und Ethanol

Tabelle 15: Kennwerte von DME, Diglyme und Dieselkraftstoff

Tabelle 16: Ether als Dieselkraftstoff-Zusätze

Tabelle 17: Kennwerte von Mariendistel- und Rapsöl im Vergleich zu Dk und PME

Symbolverzeichnis

<u>Symbol</u>	<u>Beschreibung</u>	<u>Einheit</u>
AGR	Abgasrückführung	[-]
C	Kohlenstoff	[-]
CH ₄	Methan	[-]
CO	Kohlenmonoxid	[-]
CO ₂	Kohlendioxid	[-]
c	spezifische Wärmekapazität	[kJ/kg/K] [kJ/kmol/K]
Dk	Dieselmotorkraftstoff	[-]
H ₂	molekularer Wasserstoff	[-]
HC	Kohlenwasserstoffe	[-]
He	Helium	[-]
H ₂ O	Wasser	[-]
m	Masse	[kg]
M	Molmasse	[kg/kmol]
N ₂	molekularer Stickstoff	[-]
NO	Stickstoffmonoxid	[-]
NO _x	Stickoxide	[-]
O ₂	molekularer Sauerstoff	[-]
PM	Partikel	[-]
Q	Wärmemenge	[kJ]
SZ	Schwärzungszahl	[-]
ΔT	Temperaturdifferenz	[K]
λ	Verbrennungsluftverhältnis	[-]
ψ	Mol- bzw. Volumenanteil	[-]

Indizes

Ab	Abgas
Kr	Kraftstoff
m	molar
Tr.Gas	Trägertgas
V	bei konstantem Volumen bzw. Verbrennung

Zusammenfassung

Der Dieselmotor ist nach wie vor die Verbrennungskraftmaschine mit dem höchsten Wirkungsgrad und der höchsten Flexibilität im mobilen Einsatz. Ein Hauptproblem stellen dabei die Abgasschadstoffe Stickoxide (NO_x) und Partikel (PM) dar. Herkömmliche Maßnahmen zur NO_x -Senkung führen zu einem Anstieg der PM-Emission und des Kraftstoffverbrauchs. Maßnahmen zur Senkung der PM-Emission führen wiederum zu einem Anstieg der NO_x -Emission.

Eine Möglichkeit zur Reduzierung der NO_x -Emission ist die Abgasrückführung. Dabei steigt die PM-Emission jedoch drastisch an. Ursache hierfür ist der verminderte Sauerstoffgehalt im Gasgemisch „Frischlufte+zurückgeführtes Abgas“.

Eine Möglichkeit zur Reduzierung dieser Schadstoffemissionen besteht in der Änderung der Zusammensetzung der Verbrennungsluft. So kann z.B. durch eine Erhöhung des Inertgasanteils die NO_x -Emission drastisch reduziert werden. Wird dabei der Sauerstoffgehalt so hoch gehalten wie in atmosphärischer Luft, kann der Anstieg der PM-Emission unterbunden werden.

Experimentelle Untersuchungen an zwei unterschiedlichen 1-Zylinder-Dieselmotoren haben gezeigt, dass es eine „optimale“ Zusammensetzung der Verbrennungsluft gibt, bei der eine ähnlich hohe NO_x -Reduktion wie bei der Abgasrückführung erzielt werden kann, ohne dass die Partikelemission drastisch ansteigt. Die „optimale“ Verbrennungsluft muss **einen Sauerstoffgehalt größer als 20 % und einen CO_2 -Gehalt größer als 10 %** aufweisen. Der Rest besteht im Wesentlichen aus Stickstoff.

Zur Herstellung der optimal zusammengesetzten Verbrennungsluft kommen Membrane als Trennorgane bestimmter Komponenten aus einem Gasgemisch in Betracht. So kann zum Einen die Luft durch Verringerung des Stickstoffgehalts mit Sauerstoff angereichert werden. Zum Anderen kann CO_2 gezielt aus dem Abgas getrennt und der Verbrennungsluft beigemischt werden, um den CO_2 -Gehalt der Verbrennungsluft zu erhöhen.

Eine Literaturstudie ergab, dass zur Anreicherung des Kraftstoffs mit Sauerstoff verschiedene sauerstoffhaltige Alkohole, Ether und Ester in Frage kommen. Dabei ist deren Einsatz sowohl in Reinform als Ersatz für Dieselmotorkraftstoff als auch als Beimischungen zum Dieselmotorkraftstoff denkbar. Die Unterschiede in den physikalischen und chemischen Eigenschaften zwischen Alkohole, Ether und Ester einerseits und Dieselmotorkraftstoff andererseits können eine völlige Neuanpassung des Dieselmotorkonzepts erforderlich machen.

Einleitung

Seit dem Clean Air Act in den USA 1970 haben weltweit gesetzliche Initiativen zur Begrenzung der durch Kraftfahrzeuge verursachten Luftverunreinigung eingesetzt. In den nächsten Jahren erfolgt eine schrittweise Verschärfung der Emissionsgrenzwerte von Fahrzeugmotoren. In Europa werden z.B. für Nutzfahrzeugdieselmotoren die Grenzwerte für NO_x von 5 g/kWh und Partikel von 0,10 g/kWh im Jahr 2000 (EURO III) auf 3,5 g/kWh NO_x bzw. 0,02 g/kWh Partikel im Jahr 2005 (EURO IV) abgesenkt. Im Jahr 2008 wird der NO_x-Grenzwert auf 2,0 g/kWh weiter reduziert (**Tabelle 1**).

Tabelle 1: Abgasgrenzwerte für Nutzfahrzeuge in Europa (ESC-Test)

Stufe	Jahr	NO _x	Partikel	HC	CO
		g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
EURO III	2000	5,0	0,10	0,66	2,1
EURO IV	2005	3,5	0,02	0,46	1,5
EURO V	2008	2,0	0,02	0,46	1,5

Als Folge der Verschärfung der Abgasgesetzgebung werden die Schadstoffemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland trotz zunehmender Fahrleistungen in den kommenden Jahren erheblich reduziert. Nach Angaben des Umweltbundesamtes sinkt z.B. die NO_x-Emission im Vergleich zum Basisjahr 1998 auf 60 % im Jahr 2005 und auf 40 % im Jahr 2010. Die PM-Emission wird sich gegenüber 1998 auf 50 % im Jahr 2005 und auf 30 % im Jahr 2010 reduzieren.

Nach dem derzeitigen Wissensstand werden zum Erreichen der EURO IV-Grenzwerte neueste, derzeit sich noch in der Entwicklung befindliche Abgasnachbehandlungssysteme (CRT-, SCR-Systeme) erforderlich.

Sowohl das CRT- (Continuously Regenerating Trap) als auch das SCR- (Selective Catalytic Reduction) System basiert auf katalytischen Reaktionen, welche den Einsatz katalytisch aktiver Komponenten erfordern. So enthalten z.B. die Oxidationskatalysatoren beider Systeme Edelmetalle, die aufgrund ökonomischer (hohe Kosten) und ökologischer („Platinemission“) Gründe zunehmend kritisch betrachtet werden. Beim SCR-System sind zudem die On-Board-Mitführung einer „Ammoniak-Quelle“ (Harnstoff, Ammoniumcarbammat) und alle beim Umgang mit Ammoniak zu berücksichtigenden Sicherheitsrisiken (Giftigkeit) als problematisch einzuschätzen. Daher ist es erforderlich, nach Möglichkeiten zu suchen, die eine Reduktion der Schadstoffe ohne Abgasnachbehandlung erlauben. Dies ist gerade beim Dieselmotor bedeutsam, da der Dieselmotor die Verbrennungskraftmaschine mit dem höchsten Wirkungsgrad und der höchsten Flexibilität im mobilen Einsatz ist.

Ein Hauptproblem der dieselmotorischen Verbrennung stellt die Emission der Schadstoffe Stickoxide (NO_x) und Partikel (PM) dar. Herkömmliche Maßnahmen zur Senkung der NO_x-Emission führen zu einem Anstieg der PM-Emission und des Kraftstoffverbrauches. Maßnahmen zur Reduzierung der Partikelemission führen wiederum zu einem Anstieg der NO_x-Emission.

Eine Möglichkeit zur Reduzierung der NO_x-Emission ist die Abgasrückführung. Dabei steigt die PM-Emission jedoch drastisch an. Ursache hierfür ist der verminderte Sauerstoffgehalt im Gasgemisch „Frischluft+zurückgeführtes Abgas“.

Eine Möglichkeit zur Reduzierung beider Emissionen besteht in der Änderung der Zusammensetzung der Verbrennungsluft. So kann z.B. durch eine Erhöhung des Inertgasanteiles der Verbrennungsluft die NO_x -Emission drastisch reduziert werden. Wird gleichzeitig der Sauerstoffgehalt genügend hoch gehalten, kann der Anstieg der Partikelemission unterbunden werden.

Gegenstand und Ziel des Projektes war die On-Board-Beeinflussung der Verbrennungsluftzusammensetzung und des Kraftstoffs zur Erfüllung zukünftiger Abgasemissionsgrenzwerte (EURO IV, EURO V) ohne Abgasnachbehandlung.

In einem ersten Schritt wurde theoretisch, ausgehend von der Verbrennungsluftzusammensetzung ohne und mit Abgasrückführung, die Zusammensetzung eines Gasgemisches ermittelt, welches eine starke Reduzierung der NO_x -Emission ohne Anstieg der PM-Emission gewährleistet.

Im zweiten Schritt wurden die theoretisch ermittelten Werte an einem Motorenprüfstand überprüft und eine optimale Verbrennungsluftzusammensetzung aus den experimentellen Daten abgeleitet.

Im dritten Schwerpunkt wurde eine Strategie zur Herstellung des optimalen Luftgemisches unter Bedingungen des Motorbetriebes erarbeitet, experimentell getestet und bewertet.

Abschließend wurden Möglichkeiten zur Anreicherung der Luft und des Kraftstoffs mit Sauerstoff sowie zur Trennung bestimmter Komponenten (z. B. O_2 , CO_2) aus dem Abgas aufgezeigt und bewertet.

Hauptteil

1. Stand der Technik

Die kritischsten Schadstoffe im Dieselmotor sind die Stickoxide (NO_x) und die Partikel, die zum überwiegenden Teil aus Ruß bestehen. Eine Besonderheit hier ergibt sich daraus, dass sich diese beiden Schadstoffe gegenläufig verhalten, d.h. dass Verbrennungsbedingungen, die sich günstig auf die NO_x -Minderung auswirken, oft die Rußemission und den Kraftstoffverbrauch b_e erhöhen. Man spricht von einer NO_x -Ruß- bzw. NO_x - b_e -Schere, auch „trade-off“ genannt (**Bild 1**). Ziel von Maßnahmen zur Schadstoffreduktion muss es daher sein, sich nicht auf dieser Schere zu bewegen, sondern den Zielkonflikt zu entschärfen.

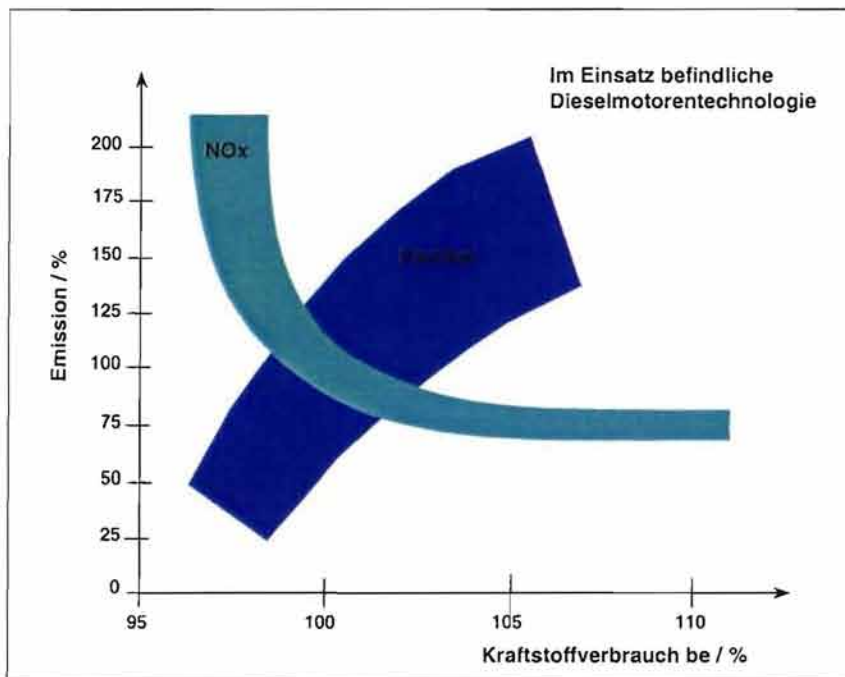


Bild 1: Zielkonflikt zwischen NO_x -, PM-Emission und Kraftstoffverbrauch

Die wichtigste Entstehungsursache von Stickoxiden ist die thermische NO-Bildung, die durch folgende Faktoren kontrolliert wird [1]:

- die lokalen Temperaturen
- das lokale Luftverhältnis
- die Verweilzeit unter den genannten Bedingungen

Durch die gezielte Beeinflussung des Brennverfahrens mittels konventioneller Maßnahmen wie Optimierung des Brennraums, der Luftführung, des Einspritzsystems, usw. ist es möglich, Bedingungen zu schaffen, die die NO_x -Entstehung verringern. Mit strenger werdender Emissionsgesetzgebung stoßen diese Maßnahmen jedoch an ihre Grenzen. Daher werden, neben Möglichkeiten der Abgasnachbehandlung, sogenannte unkonventionelle Maßnahmen [2, 3, 4] erprobt. Dazu gehören:

- die Wassereinspritzung und
- die Abgasrückführung (AGR).

Bei der AGR bewirkt das teilweise zurückgeführte Abgas, dass der Sauerstoffgehalt im Gemisch „Frischluf+Abgas“ stark abnimmt. Dies führt zu einer Erhöhung des Inertgasanteils des Gasgemischs mit der Folge, dass die lokalen Spitzentemperaturen im Brennraum und damit die thermische NO-Bildung abnehmen. Da NO an der Gesamt-NO_x-Emission über 90% beteiligt ist [2], nimmt auch die NO_x-Emission ab. Bei einer AGR-Rate von 20% beträgt die NO_x-Reduktion bis zu 80% [4]. Allerdings führt die Abnahme des Sauerstoffgehalts zu einem beträchtlichen Anstieg der Rußemission [4]. Hinzu kommen weitere Nachteile wie die Notwendigkeit aufwendiger Kühlerkonzepte und die Korrosionsgefahr durch Bildung von schwefliger und Schwefelsäure aus dem im Abgas vorhandenen Wasser, SO₂ und SO₃. Ausgehend von den Erkenntnissen aus der AGR-Erprobung werden in diesem Vorhaben Konzepte entwickelt und experimentell getestet, die die Nachteile der AGR aufheben. Grundgedanke dabei ist die Bereitstellung eines Gasgemischs, das bestimmten Anforderungen zur gleichzeitigen Minderung der NO_x- und Ruß- bzw. Partikelemission genügt (**Bild 2**).

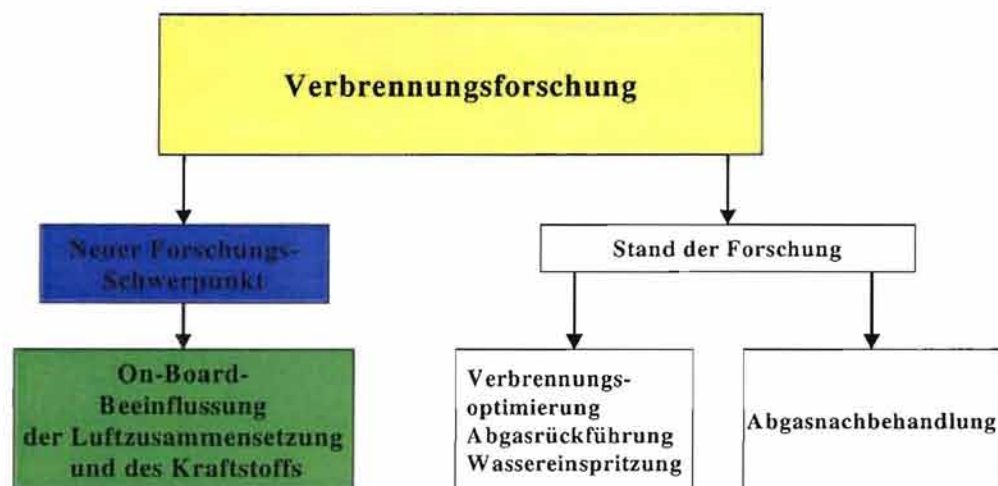


Bild 2: Abgrenzung des Projektes zum Stand der Technik

2. Theoretische Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der Verbrennungsluftzusammensetzung und der NO_x - und PM-Emission

2.1 Grundsätzliches zur Abgasrückführung

Bei der Abgasrückführung (AGR) wird ein Teilstrom des Abgases in den Brennraum zurückgeführt. **Bild 3** zeigt die relative Änderung der NO_x - und Partikel (PM)-Emission als Funktion der AGR-Rate.

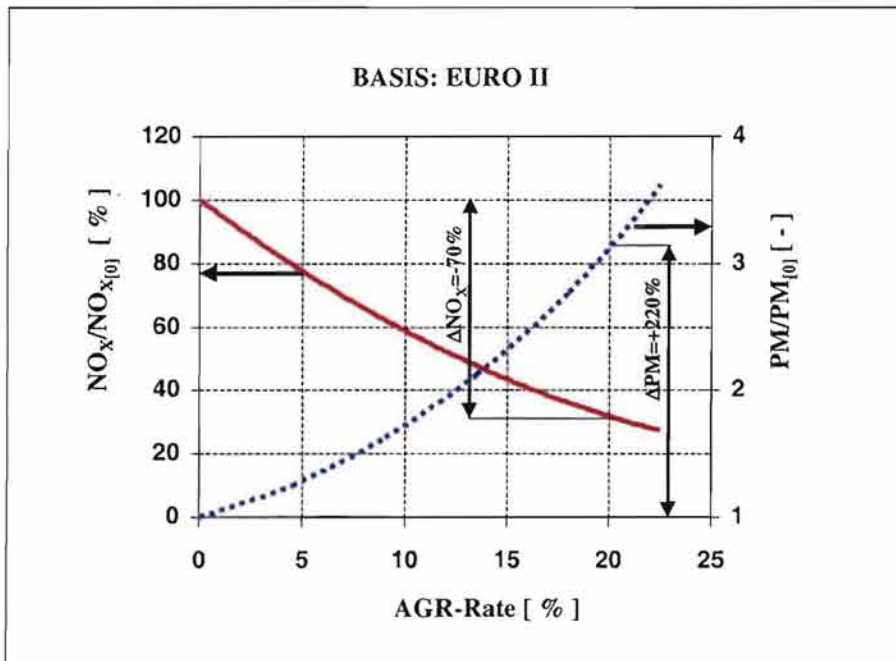


Bild 3: NO_x - und Partikelemission als Funktion der Abgasrückführrate [4]

Mit steigender AGR-Rate nimmt die NO_x -Emission kontinuierlich ab, während die PM-Emission kontinuierlich zunimmt. Bei einer AGR-Rate von 20 % beträgt die Abnahme der NO_x -Emission 70 % (Basis: EURO II). Gleichzeitig steigt die PM-Emission auf über das Dreifache. Im nächsten Abschnitt wird die Wirkung der AGR auf das Emissionsverhalten der zwei kritischen Komponenten NO_x und PM an Hand eines Modells erklärt.

2.2 Modellvorstellung

Über 90 % der NO_x -Emission besteht aus NO, das fast ausschließlich auf die thermische NO-Bildung nach dem Zeldovich-Mechanismus zurückzuführen ist [5]. Aus diesem Grunde wird nachfolgend ein Modell vorgestellt, das die Wirkung der AGR auf die thermische NO-Bildung erklärt (**Bild 4**).

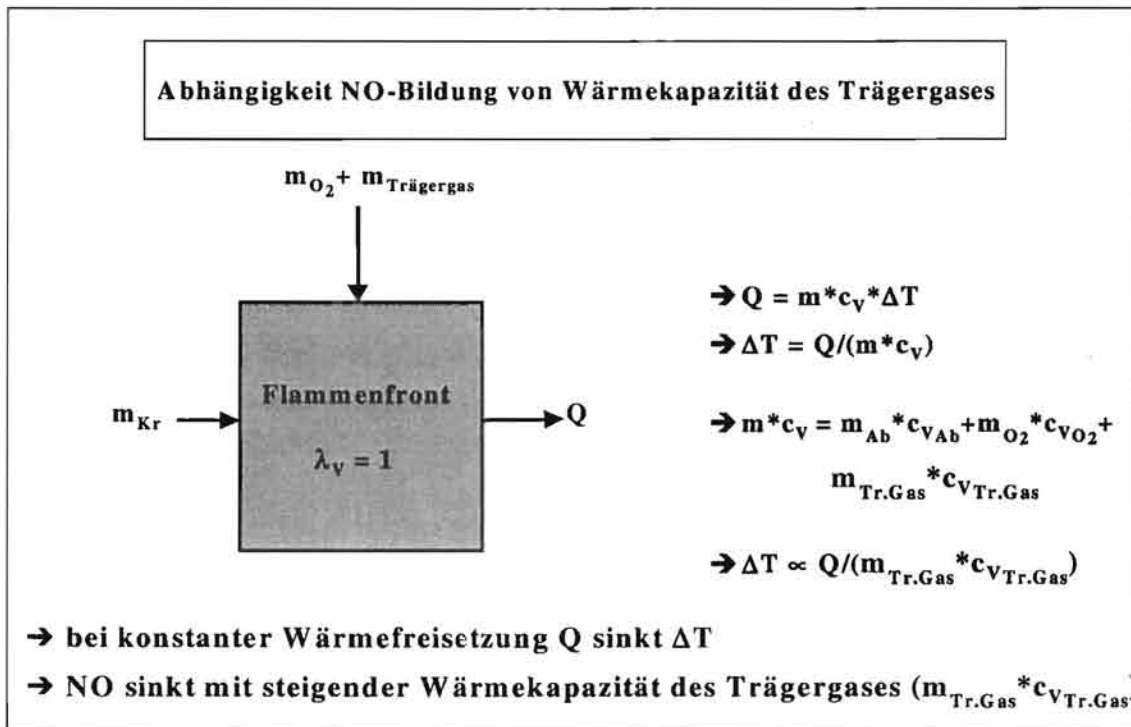


Bild 4: Modell der thermischen NO-Bildung

Um eine bestimmte Kraftstoffmenge m_{Kr} zu verbrennen, ist eine bestimmte Sauerstoffmenge erforderlich. Unter der Voraussetzung, dass in der gedachten Flammenfront ein Verbrennungsluftverhältnis $\lambda_v = 1$ herrscht, ist die freiwerdende Wärme Q ausschließlich vom Heizwert des Kraftstoffs abhängig. Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik für geschlossene Systeme trägt die Wärmemenge Q zu einer Temperaturerhöhung ΔT des Gasmisches mit der Masse m und der spezifischen Wärmekapazität c_v bei. Das Gasmisch besteht im Wesentlichen aus folgenden Komponenten:

- dem überschüssigen Sauerstoff m_{O_2}
- dem Trägergas $m_{Tr.Gas}$, mit dem der Sauerstoff zur Verfügung gestellt wird (im Falle von Luft ist dies Stickstoff)
- den Hauptverbrennungsprodukten CO_2 und H_2O (m_{Ab})

Da die notwendige Sauerstoffmenge und die Verbrennungsprodukte nur von der Kraftstoffart abhängen, lässt sich bei konstanter Wärmemenge Q postulieren, dass sich die Temperaturerhöhung ΔT sinnvollerweise über die Zusammensetzung des Trägergases beeinflussen lässt. Mit steigender Wärmekapazität des Trägergases $m_{Tr.Gas} \cdot c_{vTr.Gas}$ nimmt ΔT ab. Eine verminderte Temperaturerhöhung bedeutet wiederum eine Reduktion des thermischen NO.

An Hand der Zusammensetzung der Verbrennungsluft mit und ohne Abgasrückführung (**Tabelle 2**) lässt sich das eben beschriebene Modell überprüfen.

Tabelle 2: Zusammensetzung der Verbrennungsluft mit und ohne Abgasrückführung

	N ₂ [mol%]	O ₂ [mol%]	CO ₂ [mol%]	H ₂ O [mol%]	Rest [mol%]
Luft ($\lambda_v = 1,9$)	76,9	20,7	0	1,5	0,9
20%-AGR	76,0	17,8	1,8	3,5	0,9

Aus Tabelle 2 ist ersichtlich, dass der Sauerstoffgehalt gegenüber der Luft auf 17,8 % sinkt. Dabei ändert sich die Zusammensetzung der Verbrennungsluft dahingehend, dass jetzt mehr Inertgas benötigt wird, um die gleiche Sauerstoffmenge wie bei normaler Luft zur Verfügung zu stellen. Dadurch steigt die Masse des Inertgases und damit die Wärmekapazität an. Eine Berechnung des Temperaturverlaufs mit dem Zwei-Zonen-Modell ergab tatsächlich eine um ca. 200 K niedrigere Spitztemperatur, womit auch die 70%-ige NO_x-Reduktion erklärt werden kann [2]. Hiermit wird die Richtigkeit des Modells bestätigt.

2.3 Schlussfolgerung für Verbrennungsluftzusammensetzung aus AGR-Ergebnissen

Für die Verbrennungsluftzusammensetzung lassen sich anhand der Aussagen zur AGR folgende Schlussfolgerungen bezüglich der Schadstoffemission treffen:

- a) Partikel: Sauerstoffgehalt möglichst hoch. Jede Verringerung des O₂-Gehaltes der Verbrennungsluft gegenüber normaler Luft (trockene Luft: $\Psi_{O_2} = 20,95$ mol%) führt zu einem Anstieg der PM-Emission.
- b) NO_x: Eine Erhöhung des CO₂-Gehaltes und damit Absenkung des N₂-Gehaltes bei gleichbleibender O₂-Konzentration führt aufgrund der größeren Molmasse und spezifischen Wärmekapazität von CO₂ ($M_{CO_2} = 44,01$ g/mol, $c_{v,m} = 27,81$ kJ/K*kmol) im Vergleich zu N₂ ($M_{N_2} = 28,01$ g/mol, $c_{v,m} = 20,87$ kJ/K*kmol) zu einer höheren Wärmekapazität der Verbrennungsluft und damit zu einer Reduzierung der NO_x-Emission.
Der optimale CO₂-Gehalt muss in experimentellen Untersuchungen ermittelt werden.

Optimale Verbrennungsluftzusammensetzung: $\Psi_{O_2} \geq 20,9$ mol%
 Ψ_{CO_2} / Ψ_{N_2} möglichst hoch

3. Experimentelle Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen der Verbrennungsluftzusammensetzung und der Schadstoffemission

3.1 Versuchsaufbau

Bild 5 zeigt schematisch den Versuchsaufbau. Dabei wurden der normalen Luft wahlweise die Gase O₂, CO₂ und N₂ über Dosierventile beigemischt. Durch die Messung der Massenströme der Luft und der beigemischten Gase war es möglich, die genaue Zusammensetzung der Verbrennungsluft zu bestimmen.

Der Sauerstoffgehalt wurde auf folgende verschiedene Arten variiert:

- O₂-Eindüsung
- N₂-Eindüsung
- CO₂-Eindüsung

- CO₂ + O₂-Eindüsung; hierbei wurde bei zwei konstanten CO₂-Massenströmen der O₂-Massenstrom kontinuierlich erhöht

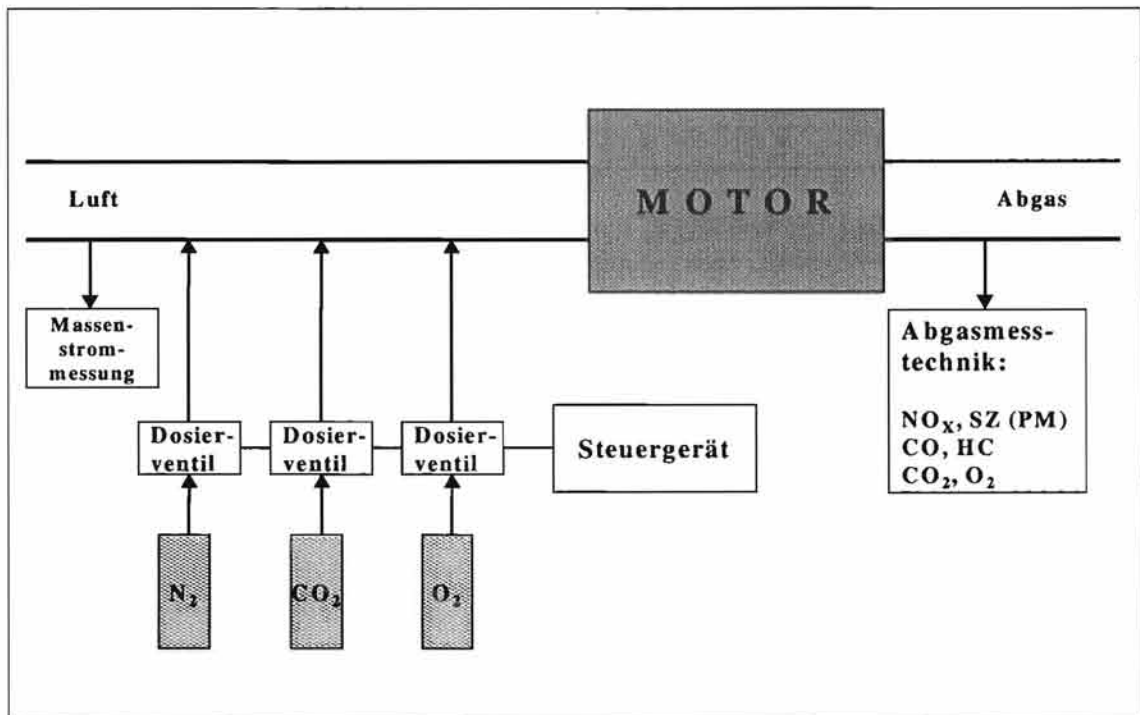


Bild 5: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

3.2 Versuchsträger

Die experimentellen Untersuchungen sind an 2 verschiedenen Motoren durchgeführt worden. Beim Versuchsträger 1 handelt sich um einen modernen 1-Zylinder-NFZ-Motor der Baureihe OM501 von DaimlerChrysler. Die technischen Spezifikationen sind in **Tabelle 3** aufgelistet.

Tabelle 3: Motorspezifikation des Versuchsträgers 1

Motor	1-Zylinder-Viertakt-Dieselmotor mit Hochdruckeinspritzung
Bohrung/Hub	130 mm/ 150 mm
Hubraum	1990 cm ³
Nenn Drehzahl	1800 min ⁻¹
Max. Drehmoment	380 Nm

Alle Versuche wurden bei konstantem Betriebspunkt mit:

Drehzahl $n = 1420 \text{ min}^{-1}$
 Last $p_{me} = 10,4 \text{ bar}$

durchgeführt.

Der Versuchsträger 2 war ein 1-Zylinder-Motor vom Typ 1B20 der Fa. Motorenfabrik Hatz. Die technischen Spezifikationen sind in **Tabelle 4** zu sehen.

Tabelle 4: Motorspezifikation des Versuchsträgers 2

Motor	1-Zylinder-Viertakt-Dieselmotor
Bohrung/Hub	69 mm/ 62 mm
Hubraum	232 cm ³
Drehzahlbereich	900 ... 3600 min ⁻¹
Max. Drehmoment	11 Nm (bei 2500 min ⁻¹)

Die Versuche wurden in 6 Betriebspunkten durchgeführt. In **Tabelle 5** sind diese Betriebspunkte aufgeführt.

Tabelle 5: Motorbetriebspunkte bei Versuchsträger 2

Motorbetriebspunkt	Drehzahl [min ⁻¹]	Last [%]
1	3000	95
2	3000	65
3	3000	33
4	2600	95
5	2600	65
6	2600	33

Neben der genauen Zusammensetzung der Verbrennungsluft wurden die Emissionen und relevante Motordaten gemessen. Im folgenden werden die Versuchsergebnisse dargestellt und diskutiert.

3.3 Versuchsergebnisse

3.3.1 Versuchsträger 1

In **Bild 6** ist die relative Änderung der NO_x-Emission als Funktion des Sauerstoffgehalts ψ_{O_2} der Verbrennungsluft dargestellt. Dem Basispunkt entspricht eine NO_x-Emission von 100 % und ein Sauerstoffgehalt von 20,7 %. Außerdem ist im Bild 6 die normale AGR mit einer AGR-Rate von 20 % eingetragen.

Aus den Ergebnissen im Bild 6 lassen sich folgende wichtige Aussagen ableiten:

- Die relative NO_x-Senkung ist eine Funktion des Sauerstoffgehalts ψ_{O_2} und der Zusammensetzung des Trägergases
- CO₂ als Trägergas ist wirksamer als N₂. So lässt sich z. B. bei einem Sauerstoffgehalt von $\psi_{O_2} = 20\%$ mit einer kombinierten CO₂- und O₂-Eindüsung (rote Kurve; ψ_{N_2} ca. 65%; $\psi_{CO_2} = 12\%$) eine 80 %-ige NO_x-Reduktion erreichen, während es bei einer reinen N₂-Eindüsung (blaue Kurve; ψ_{N_2} ca. 77%; $\psi_{CO_2} = 0\%$) lediglich 20 % sind.

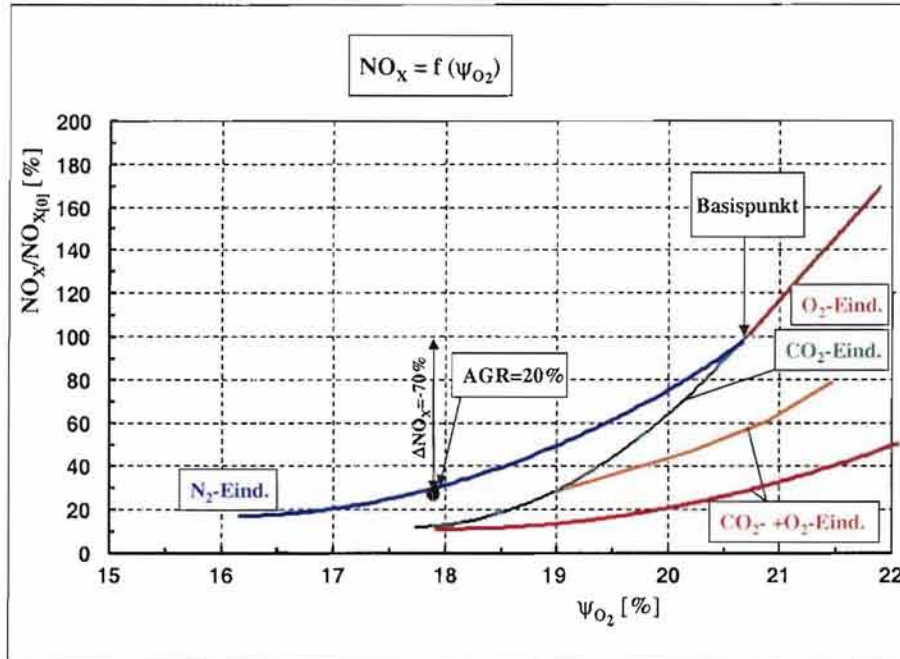


Bild 6: Relative Änderung der NO_x-Emission als Funktion des Sauerstoffgehalts

Bild 7 zeigt die relative Änderung der PM-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt ψ_{O_2} . Mit steigendem Sauerstoffgehalt nimmt die PM-Emission ab. Ab einem Sauerstoffgehalt von $\psi_{O_2} > 20\%$ lässt sich der PM-Anstieg begrenzen. Die Absolutwerte zu den Bildern 6 und 7 sind im Anhang (Bilder A1 und A2) dargestellt.

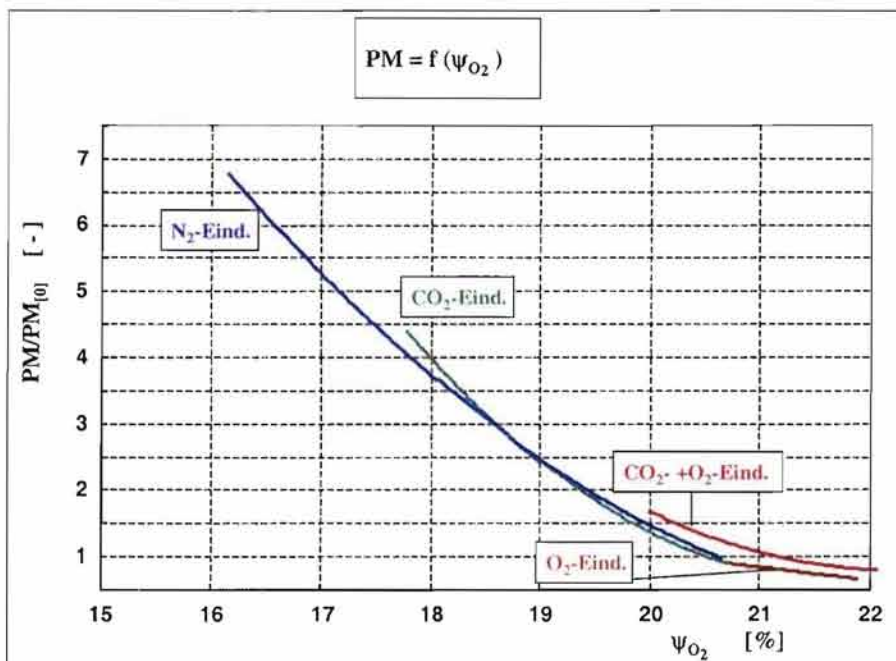


Bild 7: Relative Änderung der Partikelemission als Funktion des Sauerstoffgehalts

Die Änderung der CO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt ψ_{O_2} ist in **Bild 8** dargestellt. Mit abnehmendem Sauerstoffgehalt nimmt die CO-Emission tendenziell zu. Bei CO₂-haltiger Verbrennungsluft ist jedoch die Zunahme der CO-Emission größer als bei CO₂-freier Luft.

Ursache könnte sein, dass ein Teil der Partikel und der Kohlenwasserstoffe zu CO oxidiert wird. In **Bild 9** ist zu sehen, dass die HC-Emission bei Anwesenheit von CO₂ etwas geringer ist als ohne CO₂. Absolut gesehen ist aber der Einfluss der Trägergaszusammensetzung und des O₂-Gehaltes im Bereich zwischen 16 und 25 % auf die HC-Emission sehr klein. Die HC-Emission verändert sich nur um ca. 10 ppm.

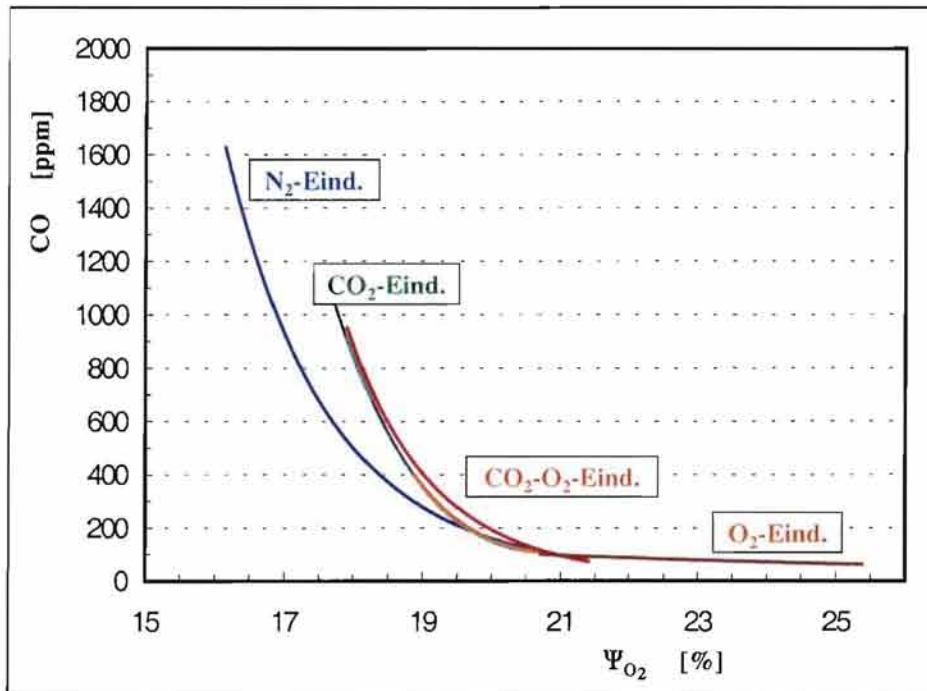


Bild 8: Änderung der CO-Emission als Funktion des Sauerstoffgehalts

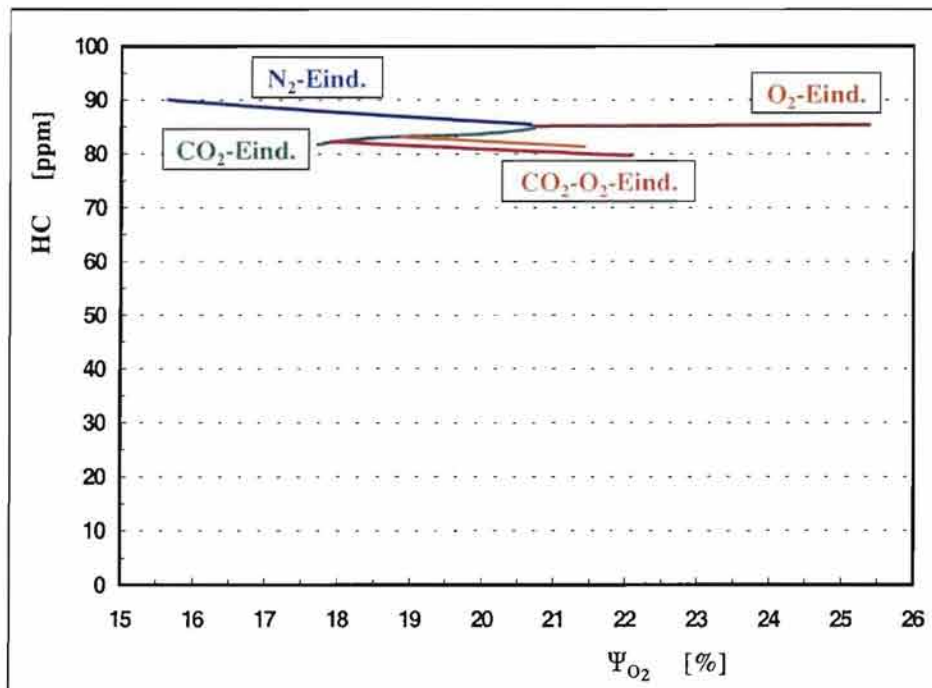


Bild 9: Änderung der HC-Emission als Funktion des Sauerstoffgehalts

3.3.2 Versuchsträger 2

In **Bild 10** ist die relative Änderung der NO_x -Emission als Funktion des Sauerstoffgehalts ψ_{O_2} der Verbrennungsluft beim Motor Hatz 1B20 im Betriebspunkt 1 dargestellt. Dem Basispunkt entspricht eine NO_x -Emission von 100 % und ein Sauerstoffgehalt von 20,7 %.

Die Ergebnisse in Bild 10 zeigen die gleichen Tendenzen wie beim Versuchsträger 1. Ein teilweise Ersatz von N_2 durch CO_2 als Trägergas führt zu einer verminderten NO_x -Emission bei konstantem O_2 -Gehalt. So ergibt sich z. B. bei einem Sauerstoffgehalt $\psi_{\text{O}_2} = 19\%$ mit einer kombinierten CO_2 - und O_2 -Eindüsung (rote Kurve; ψ_{N_2} ca. 67%; $\psi_{\text{CO}_2} = 12\%$) eine NO_x -Reduktion um 80%, während bei einer reinen N_2 -Eindüsung (blaue Kurve; ψ_{N_2} ca. 79%; $\psi_{\text{CO}_2} = 0\%$) lediglich eine Verminderung um 40 % erreicht wird.

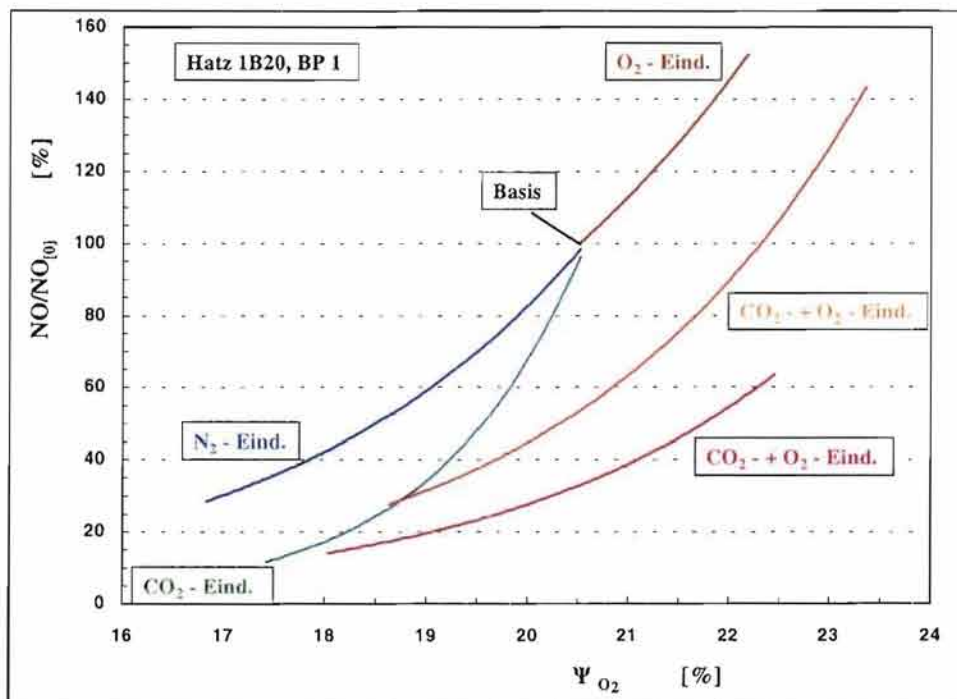


Bild 10: Relative Änderung der NO_x -Emission als Funktion des Sauerstoffgehalts im Motorbetriebspunkt 1

Bild 11 zeigt die relative Änderung der PM-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt ψ_{O_2} . Mit abnehmendem Sauerstoffgehalt nimmt die PM-Emission bei der N_2 -Eindüsung zu. Im Unterschied zu Versuchsträger 1 nimmt aber bei der CO_2 -Eindüsung die Schwärzungszahl im Vergleich zum Basispunkt nur gering um ca. 10 % zu und bleibt im untersuchten O_2 -Bereich annähernd konstant. Auch bei den kombinierten CO_2 - O_2 -Eindüösungen sind die Schwärzungszahlen im Vergleich zur N_2 - bzw. O_2 -Eindüsung bei gleichem O_2 -Gehalt der Verbrennungsluft kleiner.

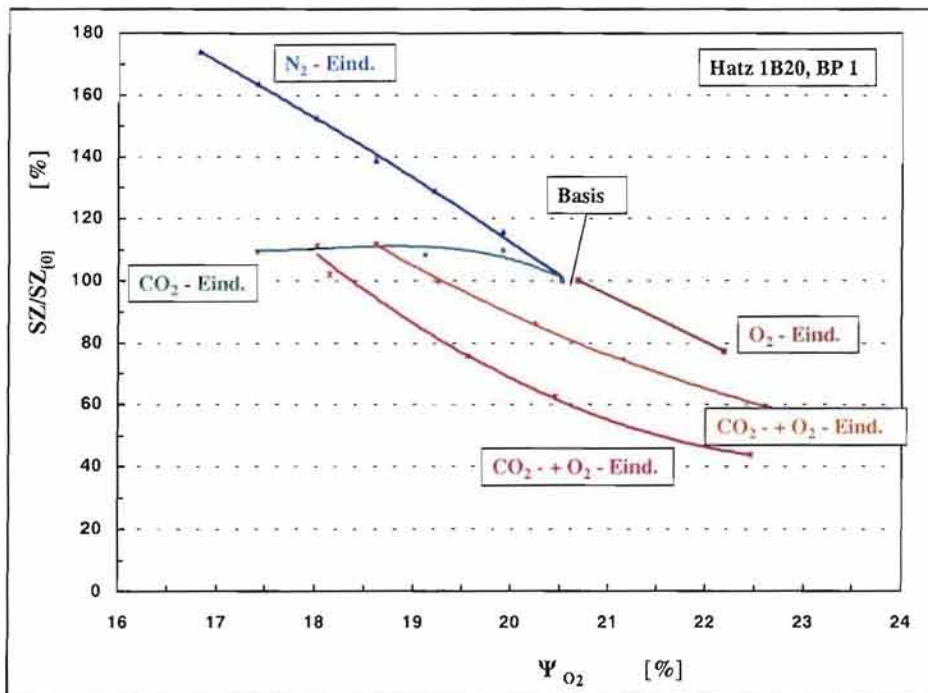


Bild 11: Relative Änderung der Partikelemission als Funktion des Sauerstoffgehalts im Motorbetriebspunkt 1

Die CO-Emission zeigt entgegengesetztes Verhalten wie die PM-Emission. Hier sind bei der CO₂- bzw. den CO₂- O₂-Eindüsen höhere Werte zu verzeichnen als bei der N₂- bzw. O₂-Eindüsen (**Bild 12**).

So beträgt z.B. die CO-Emission bei der N₂-Eindüsen bei einem O₂-Gehalt von 17,4 % ($\Psi_{N_2} = 80,3 \%$; $\Psi_{CO_2} = 0 \%$) 1200 ppm und die Schwärzungszahl ist 5,8. Bei gleichem O₂-Gehalt von 17,4 % und CO₂-Eindüsen ($\Psi_{N_2} = 64,9 \%$; $\Psi_{CO_2} = 15,4 \%$) liegt die CO-Emission bei 2100 ppm und die Schwärzungszahl bei 3,9.

Ursache für dieses Verhalten kann die unter den spezifischen Bedingungen des Motors Hatz 1B20 in Richtung CO verschobene Gleichgewichtsreaktion



(Boudouard-Gleichgewicht) sein.

Das bedeutet, ein Teil des bei der Verbrennung gebildeten Kohlenstoffs (Ruß) reagiert mit dem in der Verbrennungsluft vorhandenen CO₂ zu CO.

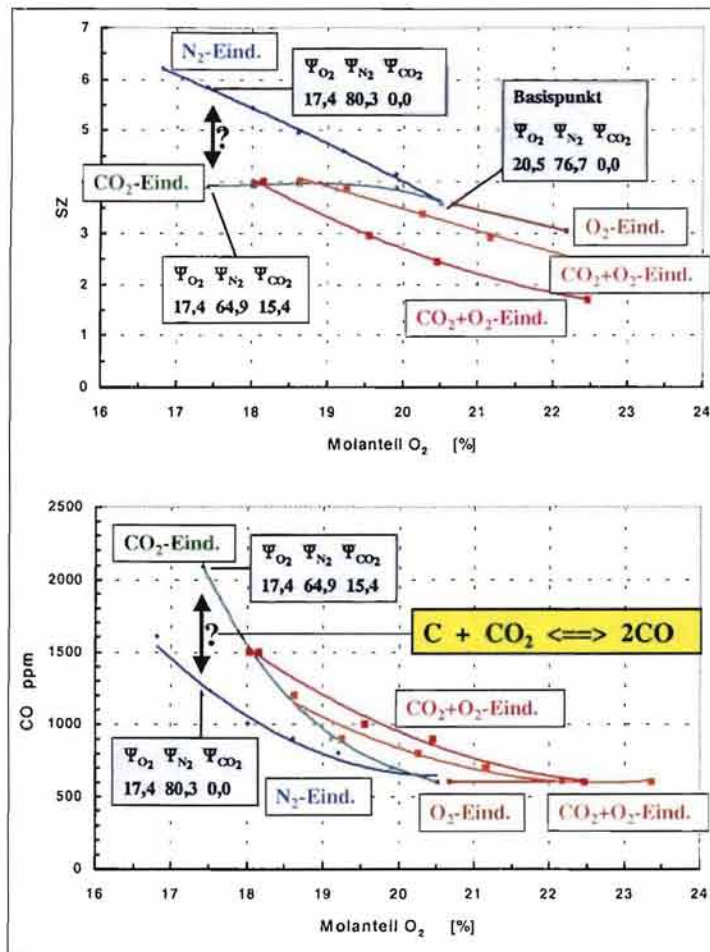


Bild 12: Änderung der CO-Emission und der Schwärzungszahl als Funktion des Sauerstoffgehalts

Das für den Versuchsträger 2 im Betriebspunkt 1 in den Bildern 10 bis 12 dargestellte Verhalten der Emissionen ist tendenziell in allen untersuchten Motorbetriebspunkten zu beobachten (siehe Anhang, Bilder A3 bis A29).

3.4 Schlussfolgerungen

Ausgehend von den dargestellten Ergebnissen lassen sich nun Schlussfolgerungen für die gezielte Beeinflussung der Verbrennungsluft zur Senkung der NO_x-Emission bei gleichbleibender bzw. nur mäßig ansteigender PM-Emission ableiten (**Bild 13**).

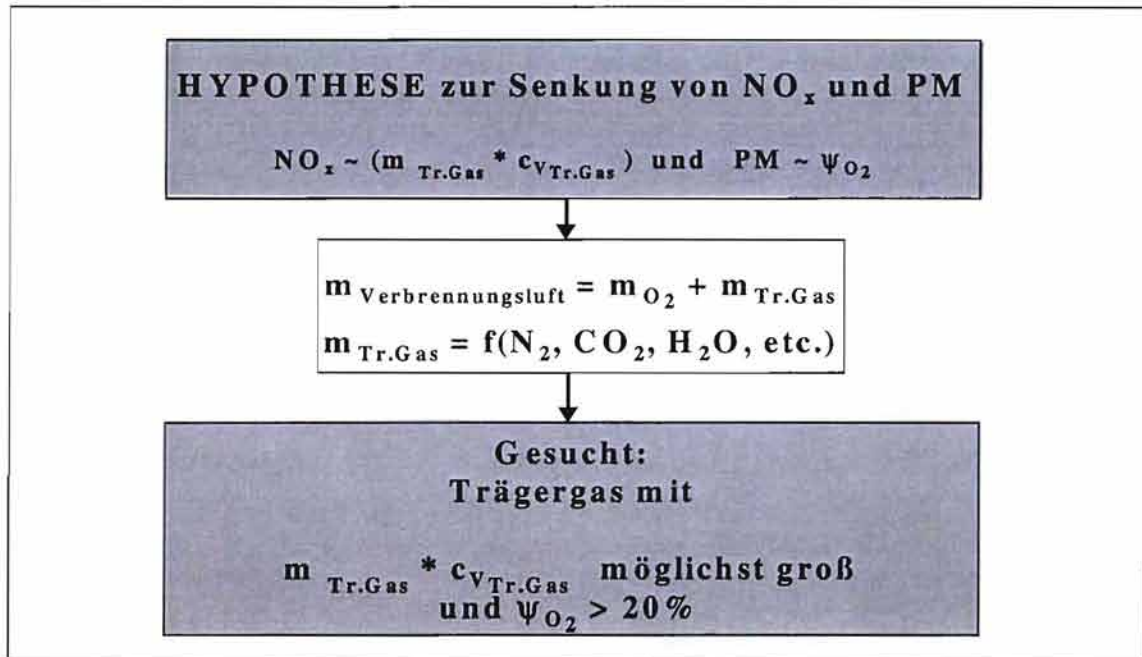


Bild 13: Hypothese zur NO_x- und PM-Senkung

Die Ergebnisse aus den Bildern 6 und 7 lassen die Hypothese zu, dass die NO_x-Senkung proportional der Wärmekapazität des Trägergases ($m_{Tr.Gas} * c_{VTr.Gas}$) ist, während die PM-Emission dem Sauerstoffgehalt der Verbrennungsluft ψ_{O_2} proportional ist. Hieraus kann abgeleitet werden, dass ein Trägergas mit möglichst hoher Wärmekapazität und hohem Sauerstoffgehalt zur NO_x-Senkung ohne Anstieg der PM-Emission erforderlich ist.

Basierend auf dieser Erkenntnis wurden verschiedene Zusammensetzungen der Verbrennungsluft experimentell untersucht. Das Ergebnis ist in **Bild 14** dargestellt.

Ausgehend von der Basis wurde zunächst eine 20 %-ige Abgasrückführung simuliert. Dabei sinkt die NO_x-Emission, wie erwartet, um über 70 %. Die PM-Emission dagegen nimmt um das mehr als Zehnfache zu.

Jetzt wurden unterschiedliche Varianten der kombinierten CO₂- und O₂-Eindüsung untersucht. Die drei besten Varianten sind ebenfalls im Bild 14 eingetragen. Man erkennt, dass hier eine ähnlich hohe NO_x-Senkung wie bei der AGR möglich ist, ohne dass die PM-Emission sehr stark ansteigt.

Die genaue Zusammensetzung der Verbrennungsluft sowie die NO_x- und PM-Emission für den Basispunkt, für die 20 %-ige AGR und die Punkte 1 bis 3 ist in **Tabelle 6** aufgeführt.

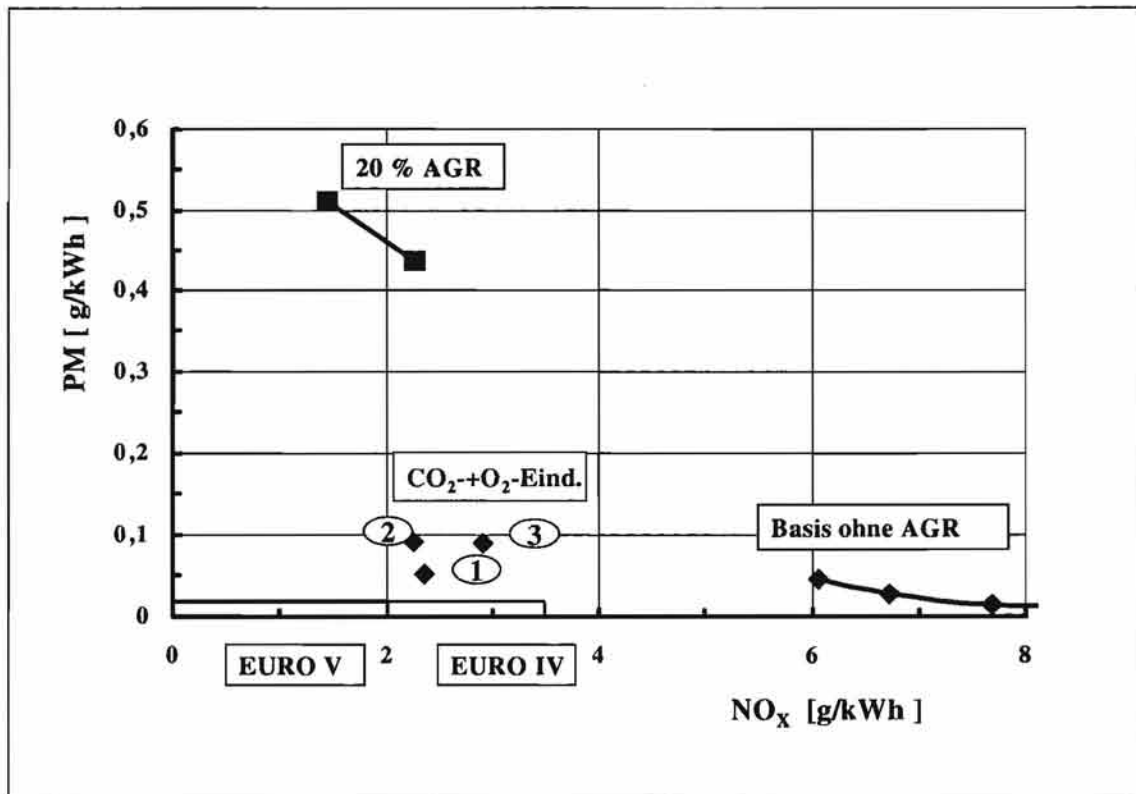


Bild 14: PM-/NO_x-Emission ohne und mit Abgasrückführung sowie unterschiedlicher Zusammensetzung der Verbrennungsluft

Tabelle 6: Zusammensetzung der Verbrennungsluft, NO_x- und PM-Emission aus Bild 14

	N ₂ [mol%]	O ₂ [mol%]	CO ₂ [mol%]	H ₂ O [mol%]	Rest [mol%]	NO _x [g/kWh]	PM [g/kWh]
<i>Basis</i> Luft ($\lambda_v=1,9$)	76,9	20,7	0,0	1,5	0,9	6,73	0,03
20%-AGR	76,0	17,8	1,8	3,5	0,9	2,27	0,44
<i>Punkt 1</i> Luft+CO ₂ +O ₂	64,9	20,9	12,0	1,4	0,8	2,37	0,05
<i>Punkt 2</i> Luft+CO ₂ +O ₂	65,5	20,2	12,1	1,4	0,8	2,26	0,09
<i>Punkt 3</i> Luft+CO ₂ +O ₂	67,7	20,0	9,8	1,6	0,9	2,91	0,09

Ableitend aus diesen Ergebnissen ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die Verbrennungsluft wie folgt zusammengesetzt sein sollte:

- CO₂-Gehalt > 10 Vol% und
- O₂-Gehalt > 20 Vol%

Der erforderliche CO₂-Gehalt kann nur durch Rückführung des im Abgas vorhandenen CO₂ erfolgen. Eine Gewinnung aus Umgebungsluft ist aufgrund der niedrigen Konzentration von 0,03 Vol% nicht sinnvoll. Bei der Verbrennung von Dieselkraftstoff entstehen je kg Kraftstoff 3,2 kg CO₂, so dass im Abgas bis zu 13 Vol% CO₂ enthalten sind. Da Dieselmotoren meist mit Luftüberschuss arbeiten, ist im Abgas ein gewisser Anteil an O₂ enthalten, so dass es sich anbietet, bei Möglichkeit neben dem CO₂ auch den O₂ aus dem Abgas abzutrennen und der Ansaugluft des Motors zuzuführen.

4. Möglichkeiten zur Herstellung des optimalen Verbrennungsluftgemischs

4.1 Technologien zur On-board-Anreicherung der Verbrennungsluft mit O₂ bzw. CO₂

Möglichkeiten zur Anreicherung der Verbrennungsluft mit O₂ und CO₂, die für eine Anwendung am Motor in Betracht kommen, sind:

- die Elektrolyse von Wasser zur Erzeugung von O₂
- die Anreicherung der Verbrennungsluft mit O₂ durch O₂-Freisetzung aus Stoffen, welche unter bestimmten Bedingungen leicht Sauerstoff abgeben, z.B. Ceriumoxide
- die Druckwechseladsorption zur Trennung von Luft in O₂/N₂
- Membrantrennverfahren zur Abtrennung von O₂ bzw. CO₂ aus Gasgemischen
- die katalytische Verbrennung von Dieselkraftstoff zur Erzeugung von CO₂

Da die Elektrolyse einen hohen Energiebedarf hat, die Freisetzung von Sauerstoff aus „chemischen Speichern“ bzw. die Druckwechseladsorption nur eine diskontinuierliche Arbeitsweise erlauben und die katalytische Dieselverbrennung mit erhöhtem Kraftstoffverbrauch verbunden ist, werden Membrantrennverfahren favorisiert.

Membranverfahren sind grundsätzlich dazu geeignet, Stoffe hinsichtlich ihrer Größe und ihres Diffusionsverhaltens selektiv aus verschiedenen Medien abzutrennen.

Bei der Gastrennung kommen mikroporöse, poröse und porenfreie Membrane zum Einsatz (**Tabelle 7**) [6].

Bei porösen Membranen wird die unterschiedliche Diffusionsgeschwindigkeit verschiedener Komponenten in der Membran zur Auftrennung eines Gasgemisches genutzt. Triebkraft ist dabei eine Druckdifferenz. Bei porenfreien Membranen beruht die Trennung auf unterschiedlichen Löslichkeiten und Diffusionsgeschwindigkeiten in der Membran.

Bei Gasseparationsmodulen wird ein großes Verhältnis von installierter Membranfläche zu Modulvolumen angestrebt. Deshalb werden gegenwärtig vorwiegend Hohlfaser-Kapillarmodule sowie Wickel- und Kissenmodule verwendet.

Die Gastrennung mittels Membrane wird mit Erfolg bei technischen Anwendungen wie der Luftzerlegung, der Wasserstoffabtrennung aus chemischen Prozessgasen, der Erdgaskonditionierung, der Biogas- und Atemluftaufbereitung sowie der Abtrennung von organischen Dämpfen aus Abluft- bzw. Prozessgasströmen angewendet (**Tabelle 8**) [7].

Tabelle 7: Trennmechanismen und Materialien von Membranen bei der Gastrennung

Membran	Trennmechanismus	Materialien
Porenfreie Membran	Lösungs-Diffusions-Mechanismus (basiert auf unterschiedlichen Lösungs- und Diffusionspotentialen)	Polymere (Polysulfon, Polyetherimid, Dimethylsiloxan)
Mikroporöse Membran	Molsiebtrennung (beruht auf unterschiedlicher Diffusion verschieden großer Moleküle sowie Adsorptionseffekten)	Keramik, Zeolithe
Porenmembran	Knudseneffekt (basiert auf der Dominanz von Gas/Wandstößen)	Keramik

Tabelle 8: Einsatzgebiete der Gastrennung mittels Membrane

Gaskomponenten	Einsatzgebiet
O ₂ /N ₂	Inertgasherstellung für laborative und medizinische Zwecke
H ₂ /CH ₄	H ₂ -Rückgewinnung bei Raffinierprozessen
H ₂ /NH ₃	H ₂ -Rückgewinnung bei der NH ₃ -Synthese
CO ₂ /CH ₄	Biogasaufbereitung
CO/H ₂	CO-Anreicherung in Synthesegasen
He/CH ₄	He-Anreicherung aus Erdgas
He/N ₂	He-Rückgewinnung aus Tauchluftgemisch
Kohlenwasserstoffe/Luft	Lösemittelrückgewinnung aus Abluft

Aus den im Abschnitt 3.4 erhaltenen Resultaten lässt sich für die On-Board-Herstellung der optimalen Verbrennungsluft ($\Psi_{\text{CO}_2} > 10 \text{ Vol\%}$ und $\Psi_{\text{O}_2} > 20 \text{ Vol\%}$) die in **Bild 15** skizzierte Verfahrensweise ableiten.

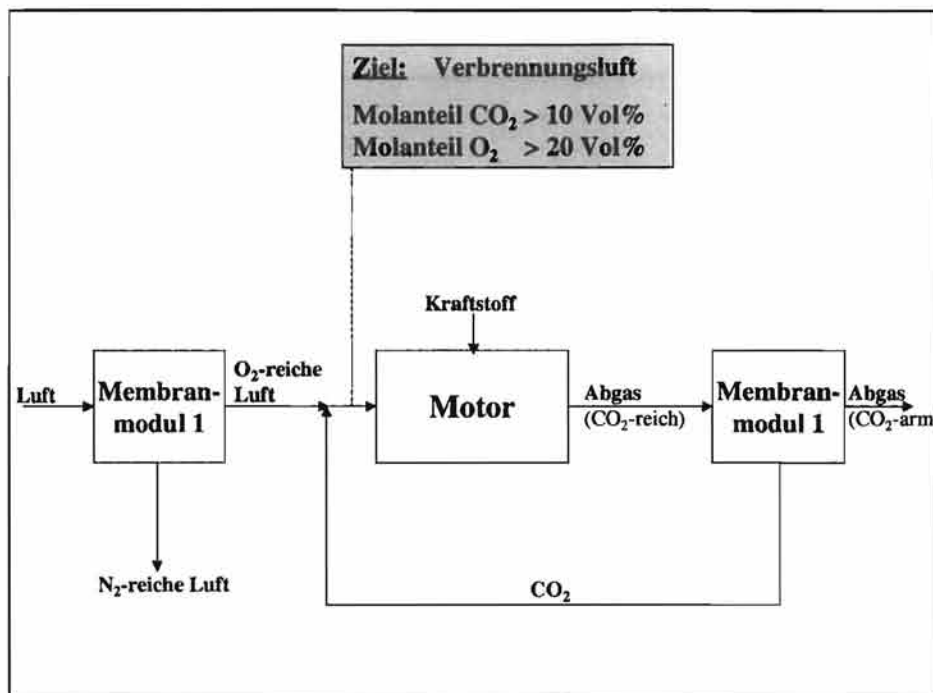


Bild 15: Schema zur Herstellung des optimalen Verbrennungsluftgemisches

Neben der dargestellten Variante, bei dem die gesamte Luftmenge bzw. der gesamte Abgasstrom durch die Membranmodule geführt wird, ist denkbar, dass bei entsprechender Trennleistung der Membranmodule die Möglichkeit besteht, nur aus Teilströmen von Luft und Abgas O_2 bzw. CO_2 abzutrennen, um die gewünschte Verbrennungsluftzusammensetzung zu erreichen.

Im folgenden werden experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Machbarkeit eines Einsatzes der Membrantrennverfahren am Motor durchgeführt.

4.2 Untersuchungen zum Einsatz eines Membranmoduls zur O_2 -Anreicherung der Luft am Motorenprüfstand

4.2.1 Versuchsaufbau

In **Bild 16** ist der Versuchsaufbau für die Testung eines Membranmoduls zur O_2 -Anreicherung der Verbrennungsluft am Motor schematisch dargestellt. Die für den Betrieb des Membranmoduls notwendige Druckdifferenz wurde durch die Vorschaltung eines Kompressors ($p_{Komp} < 8 \text{ bar}$) gewährleistet, d.h. das Membranmodul wurde mit Überdruck betrieben. Als Parameter am Modul sind Feeddruck und -volumenstrom am Moduleingang sowie die Volumenströme und Sauerstoffkonzentrationen von Permeat und Retentat gemessen worden. Mittels des Membranmoduls wurde nur ein Teilstrom der Verbrennungsluft mit Sauerstoff angereichert und dieses Permeat anschließend mit Umgebungsluft vermischt. Nach der Vermischung ist vor Motoreinlass der Sauerstoffgehalt gemessen worden. Das Ziel war zu testen, ob es mittels dieses Moduls generell möglich ist, den Sauerstoffgehalt der Verbrennungsluft im Vergleich zu unbehandelter Umgebungsluft zu erhöhen.

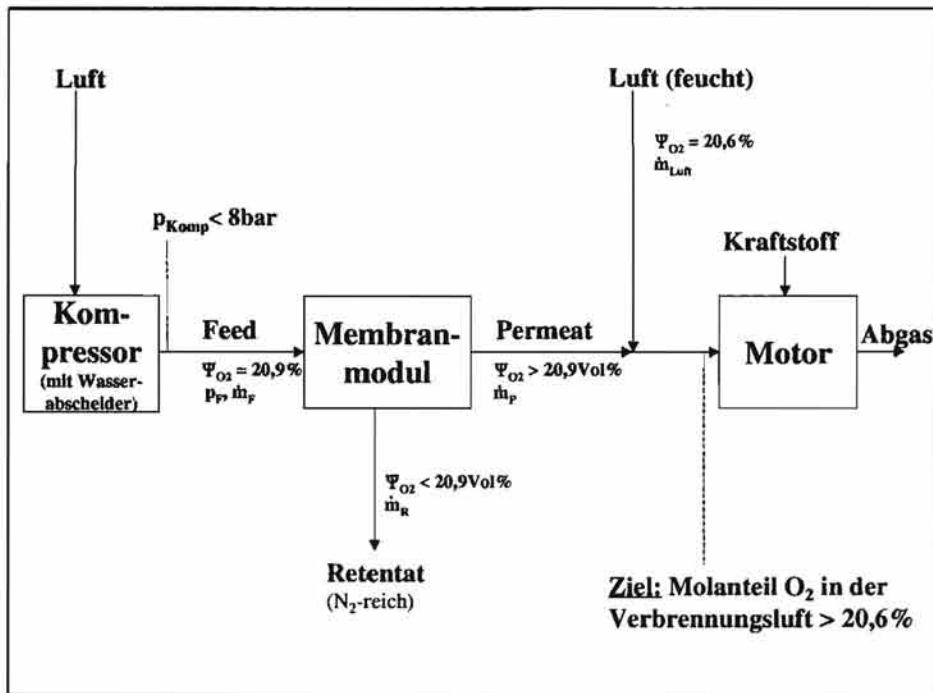


Bild 16: Versuchsaufbau zur Testung eines Membranmoduls

Für die Untersuchungen wurde von der Fa. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH ein Membranmodul zur Verfügung gestellt. Dieses Modul vom Typ PN16 ist für einen Einsatz in der chemischen Verfahrenstechnik entwickelt worden und ist nicht für einen Einsatz im Fahrzeugbereich optimiert. Das betrifft insbesondere die Anforderungen an Masse und Platzbedarf. So beträgt das Gewicht dieses Moduls ca. 90 kg, die Abmessungen sind 80x45x45 cm.

Die Untersuchungen sind am Motor Hatz 1B20 im Betriebspunkt 2 (siehe Abschnitt 3.2) durchgeführt worden.

Der Verbrennungsluftmassenstrom betrug 25 kg/h und setzt sich bei Membranmoduleinsatz aus Permeat und Umgebungsluft zusammen. Durch Variation des Feeddrucks und des Retentatvolumenstroms sind unterschiedliche Permeatvolumenströme und Sauerstoffkonzentrationen im Permeat eingestellt und dadurch die Konzentration von Sauerstoff in der Verbrennungsluft verändert worden.

Der Sauerstoffgehalt der Umgebungsluft betrug 20,6 Vol%. Durch einen am Kompressor angebrachten Wasserabscheider war der Wassergehalt im Feedstrom kleiner als in der Umgebungsluft, der Sauerstoffgehalt dementsprechend größer ca. 20,9 Vol%.

4.2.2 Versuchsergebnisse

In **Tabelle 9** sind beispielhaft einige Untersuchungsergebnisse aufgeführt. Prinzipiell ist erkennbar, dass mit der gewählten Versuchsanordnung eine Erhöhung des O₂-Gehaltes der Verbrennungsluft möglich ist. Die maximal erreichte Konzentration betrug 21,6 Vol%. Ursache für diesen relativ niedrigen Wert war, dass Feeddruck und -strom aufgrund des eingesetzten Kompressors nicht über 5 bar bzw. 12,1 kg/h erhöht werden konnten.

Tabelle 9: Untersuchungsergebnisse bei Einsatz des Membranmoduls

Messpunkt	Feeddruck [bar]	Feedmassenstrom [kg/h]	Retentatmassenstrom [kg/h]	O ₂ -Gehalt im Retentat [Vol%]	Permeatmassenstrom [kg/h]	O ₂ -Gehalt im Permeat [Vol%]	O ₂ -Gehalt der Verbrennungsluft [Vol%]
1	1	0,9	0,1	20,9	0,9	20,9	20,6
2	2	1,6	0,1	20,9	1,5	21,7	20,7
3	3	2,3	0,1	20,9	2,2	21,8	20,7
4	4	2,7	0,1	20,9	2,6	22,6	20,8
5	5	3,6	0,1	20,9	3,5	22,8	20,9
6	1	1,0	0,1	20,6	0,9	22,4	20,7
7	2	1,8	0,2	19,2	1,5	23,2	20,8
8	3	2,6	0,5	18,2	2,1	23,5	20,9
9	4	3,8	0,7	15,6	3,1	23,7	21,0
10	5	4,5	0,9	13,6	3,5	24,1	21,1
11	1	8,0	7,1	20,6	0,9	27,0	20,8
12	2	12,1	10,6	20,2	1,4	26,5	20,9
13	3	6,7	4,7	16,9	2,0	31,5	21,5
14	4	7,7	5,6	17,3	2,1	32,2	21,6

4.2.3 Betrachtungen zur Auslegung eines Moduls bei Einsatz definierter Membrane

Für den in Abschnitt 4.2.1 ausgewählten Betriebspunkt (Verbrennungsluftmassenstrom 25 kg/h) ist für 3 Membrane mit unterschiedlicher Selektivität untersucht worden, welche Membranfläche und welcher Leistungsbedarf notwendig sind, um in der Verbrennungsluft einen Sauerstoffgehalt von 24 Vol% zu erzeugen. Dabei wurde prinzipiell vom Versuchsaufbau in Bild 16 ausgegangen, allerdings wurde hier der energiemäßig günstigere Vakuumbetrieb (2 Permeatdruckvarianten: 0,25 und 0,10 bar) des Moduls betrachtet.

Bei den Membranen handelt es sich um Produkte der Fa. GKSS, die ebenfalls die Berechnungen zu den erforderlichen Membranflächen und Leistungen durchführte.

In Tabelle 10 sind die Ergebnisse dargestellt. Es ist zu sehen, dass bei konstantem Permeatdruck mit zunehmender Selektivität der Membrane die erforderliche Membranfläche größer wird, während der Leistungsbedarf sinkt.

Bei konstanter Selektivität führt ein erhöhter Vakuumbetrieb zu einer Zunahme des Leistungsbedarfs, aber die benötigte Membranfläche wird reduziert.

Aus diesen Zusammenhängen wird deutlich, dass für die Optimierung der Membranmodule bezüglich eines Fahrzeugeinsatzes eine Vielzahl an Möglichkeiten vorhanden sind.

Tabelle 10: Membranflächen und Leistungsbedarf für unterschiedliche Membranen und Permeatdrücke

Membrane Nr.	Selektivität	Membranfläche [m ²]	Permeatvolumenstrom [m ³ /h]	O ₂ -Permeatkonzentration [Vol%]	Leistungsbedarf [kW]
Permeatdruck 0,25 bar					
1	2,25	10,9	5,93	31,0	0,600
2	3,0	32,2	4,20	35,1	0,426
3	6,0	206	2,47	45,0	0,251
Permeatdruck 0,10 bar					
1	2,25	6,8	4,51	34,1	0,759
2	3,0	19,3	3,16	39,9	0,531
3	6,0	109	1,79	54,3	0,302

4.3 Theoretische Untersuchungen zur Machbarkeit der CO₂-Anreicherung der Verbrennungsluft

Im folgenden sind für die Motoren OM 501 und Hatz 1B20 (siehe Abschnitt 3.2) für jeweils einen Betriebspunkt (Tabelle 11) Betrachtungen zum erreichbaren CO₂-Gehalt der Verbrennungsluft bei Abtrennung einer bestimmten Menge CO₂ aus dem Abgas und Rückführung in die Ansaugluft durchgeführt worden.

Tabelle 11: Betriebspunkte für die Berechnungen zur CO₂-Anreicherung

Motor	OM 501	Hatz 1B20
Drehzahl [min ⁻¹]	1420	3000
Last [bar]	10,4	96% von Volllast
Ansaugluftmassenstrom [kg/h]	146,0	25,0
Kraftstoffverbrauch [kg/h]	5,0	0,7
Ψ _{CO₂} im Abgas (ohne Rückführung) [Vol%]	7,0	5,6
Massenstrom CO ₂ im Abgas (ohne Rückführung) [kg/h]	16,0	2,2

Dabei sind in Bezug auf einen Membranmoduleinsatz folgende 2 Varianten betrachtet worden (Bild 17):

1. Adaption des Moduls im Gesamtabgasstrom
2. Der Abgasstrom wird geteilt, durch das Modul werden 50% des Gesamtabgases geleitet

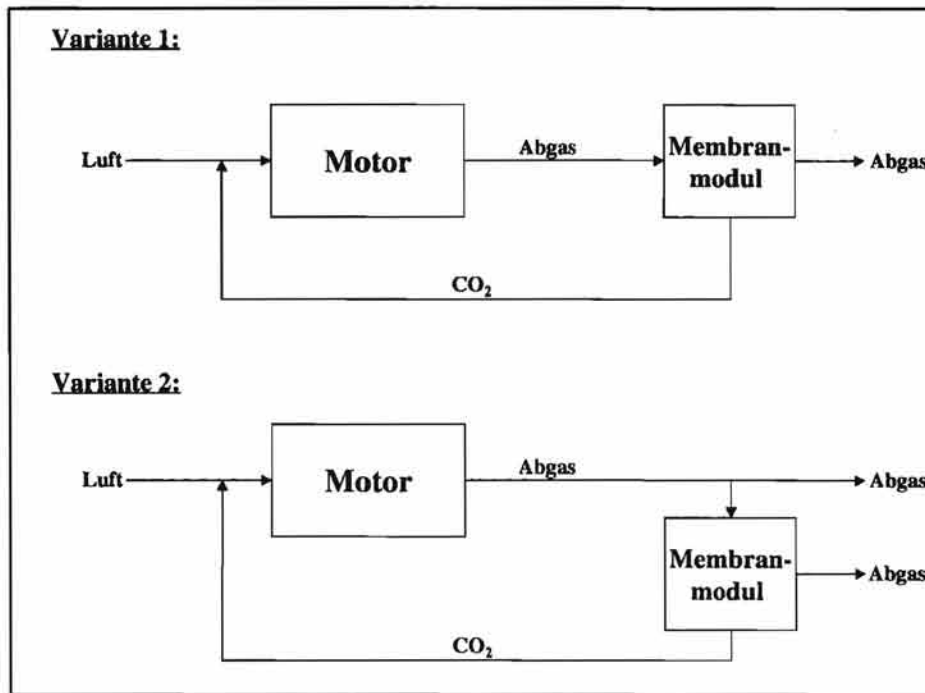


Bild 17: Varianten des Membranmoduleinsatzes zur CO₂-Abtrennung aus Abgas

Die Berechnungen wurden für 3 verschiedene Abtrennraten von CO₂ aus dem Abgas (50, 60 und 75%) vorgenommen. Eine Abtrennrate von 60% bedeutet, dass mittels des Membranmoduls 60% des im Feed enthaltenen CO₂ abgetrennt und der Verbrennungsluft zugeführt werden, während die restlichen 40% im Abgas verbleiben.

In **Tabelle 12** sind die Ergebnisse zu sehen. Es ist erkennbar, dass zum Erreichen von 10 Vol% CO₂ in der Verbrennungsluft bei Einsatz des Membranmoduls im Gesamtabgasstrom beim Motor OM 501 ca. 60% des darin enthaltenen CO₂ abgetrennt und der Ansaugluft zugeführt werden müssen. Beim Motor Hatz 1B20 wird bei Rückführung von 60 % des im Abgas enthaltenen CO₂ in der Verbrennungsluft ein Molanteil von 8,2 Vol% erreicht.

Bei Betrachtung eines Einsatzes im Abgasteilstrom (50% vom Gesamtabgas) wird selbst bei einer vollständigen Entfernung des CO₂ nur ein Molanteil von 7,2 (OM 501) bzw. 5,6 % (Hatz 1B20) in der Verbrennungsluft erzielt.

Tabelle 12: Ergebnisse der Berechnungen zum CO₂-Gehalt der Verbrennungsluft

Abtrennungsrate CO ₂ aus Abgas [%]	Ψ_{CO_2} der Verbrennungsluft [Vol%]			
	Variante 1: Abtrennung aus Gesamtabgasstrom		Variante 2: Abtrennung aus Abgasteilstrom (50% vom Gesamtabgas)	
	OM 501	Hatz 1B20	OM 501	Hatz 1B20
50	7,1	5,6	2,4	1,9
60	10,6	8,2	3,1	2,4
75	21,3	16,5	4,3	3,4
100	-	-	7,2	5,6

Aus diesen Resultaten kann folgende Schlussfolgerung abgeleitet werden:

Zur Realisierung von 10 Vol% CO₂ in der Verbrennungsluft muss selbst bei Membranen mit hoher Trennleistung der gesamte Abgasstrom dem Trennverfahren zugeführt werden. Dabei besteht die Möglichkeit, das gesamte Abgas durch ein Modul zu führen oder den Abgasstrom in zwei oder mehrere Teilströme zu trennen und eine entsprechende Anzahl Module

einzusetzen. Hier besteht die Aufgabe, die günstigste Lösung bezüglich Platz- und Leistungsbedarf zu finden.

5. Möglichkeiten zur Erhöhung des Sauerstoffanteils im Dieseldieselkraftstoff durch Zugabe sauerstoffhaltiger Komponenten

Dieseldieselkraftstoff besteht hauptsächlich aus den Elementen Kohlenstoff und Wasserstoff. In geringen Mengen sind Schwefel und Stickstoff sowie weitere, im wesentlichen durch die Additivierung hineingetragene Elemente (Kalzium, Magnesium, Zink usw.) enthalten. Sauerstoff ist nur in Spuren vorhanden. **Tabelle 13** zeigt die Ergebnisse der Elementaranalyse von drei handelsüblichen Dieseldieselkraftstoffen.

Tabelle 13: Kohlenstoff-, Wasserstoff-, Schwefel- und Stickstoffgehalt von verschiedenen Dieseldieselkraftstoffen

	Dieseldieselkraftstoff 1	Dieseldieselkraftstoff 2	Dieseldieselkraftstoff 3
C-Gehalt [Ma%]	86,60	86,01	86,35
H-Gehalt [Ma%]	13,30	13,84	13,60
S-Gehalt [ppm]	270	22	10
N-Gehalt [ppm]	100	<50	<1000

In der Literatur werden als sauerstoffhaltige Substanzklassen, die für einen Einsatz in Dieseldieselmotoren geeignet sind, Alkohole, Ether und Ester beschrieben. Die Einsatzbreite dieser Komponenten reicht dabei von der Zumischung zum Dieseldieselkraftstoff in wenigen Volumenprozenten bis hin zur Verwendung des reinen Stoffes, d.h. des vollständigen Ersatzes des herkömmlichen Dieseldieselkraftstoffs. Im letzteren Fall sind aufgrund der teilweise erheblichen Unterschiede zwischen den Kennzahlen der Ersatzkomponenten und Dieseldieselkraftstoff Modifikationen am Motor notwendig.

Alkohole

Alkohole würden sich zum Zweck der Sauerstoffanreicherung des Dieseldieselkraftstoffs aufgrund des hohen Sauerstoffanteils sehr eignen.

Unter dem Gesichtspunkt guter Verfügbarkeit kommen besonders Methanol und Ethanol in Betracht. **Tabelle 14** zeigt die wichtigsten Kennwerte dieser beiden Alkohole im Vergleich zu Dieseldieselkraftstoff.

Tabelle 14: Kennwerte von Dieseldieselkraftstoff, Methanol und Ethanol [8]

Kennwert	Dieseldieselkraftstoff	Methanol	Ethanol
Formel	-	CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH
O-Gehalt [Ma%]	-	50	35
Cetanzahl [-]	51 – 55	5	8
Dichte [kg/m ³]	820 – 845	795	789
Siedetemperatur [°C]	170 – 360	65	78
Heizwert [MJ/kg]	42 – 43	19,7	26,8
Stöch. Luftbedarf [kg/kg]	14,5	6,5	9,0

Von Nachteil ist die sehr schlechte Zündwilligkeit und der niedrige Heizwert. Ein Problem stellt weiterhin das schlechte Lösungsverhalten von Methanol und Ethanol in Dieseldieselkraftstoff

und die Stabilität von Alkohol-Dieselmischungen dar. Hier hat sich zumindest für Methanol eine Lösung in Form eines neuartigen Verfahrens (Methanex) zur Herstellung eines langzeitstabilen Mischkraftstoffes ergeben. In Untersuchungen dazu wurde der volumetrische Methanolanteil zwischen 10 und 15 % variiert [9].

In anderen Untersuchungen ist Ethanol auf seine Eignung als Beimischung zu Dieselmischungen getestet worden [10, 30, 31]. Dabei wurden bis zu 25 Vol% zugemischt, wobei 2-Butanol als Lösungsvermittler verwendet worden ist.

Ether

Als Einsatzstoff für Dieselmotoren werden vor allem Dimethylether (DME) und Diethylenglycoldimethylether (Diglyme) beschrieben. **Tabelle 15** zeigt die Kennwerte von DME, Diglyme und Dieselmischungen.

Tabelle 15: Kennwerte von DME, Diglyme und Dieselmischungen [11, 12]

Kennwert	Dk	DME	Diglyme
Formel	-	CH ₃ OCH ₃	CH ₃ O(C ₂ H ₄) ₂ CH ₃
O-Gehalt [Ma%]	-	35	36
Cetanzahl [-]	51 – 55	> 55	112
Dichte [kg/m ³]	820 – 845	668	940
Siedetemperatur [°C]	170 – 360	-25	162
Heizwert [MJ/kg]	42 – 43	28,8	32,2

Die Cetanzahl von DME liegt im Bereich von Dieselmischungen. Nachteile sind der geringere Heizwert und der niedrige Siedepunkt. Um DME bei Raumtemperatur zu verflüssigen muss er auf ca. 5 bar komprimiert werden. Damit ist DME bei Einsatz eines Ein-Tanksystems als Zusatz für Dieselmischungen nicht geeignet. Allerdings lässt er sich bei einer modifizierten Tankanlage und einer angepassten Einspritzpumpe erfolgreich einsetzen, wie Versuche gezeigt haben [13, 14, 15].

Von Vorteil ist seine einfache und kostengünstige Herstellung aus Methanol. Bereits heute werden mehr als 100.000 t/Jahr produziert.

Eine von seinen chemischen und physikalischen Eigenschaften her geeignetere Substanz für die Sauerstoffanreicherung von Dieselmischungen ist Diethylenglycoldimethylether (Diglyme). Neben Sauerstoffgehalt und Siedepunkt spricht vor allem die Cetanzahl von 112 für einen Einsatz. Verschiedene Untersuchungen haben seine Tauglichkeit als Dieselmischungen-Zusatz bei Mischungsverhältnissen von 4 bis 30 Vol% bestätigt [16, 17].

Andere Ether sind ebenfalls auf ihre Tauglichkeit als emissionsverbessernde Zusätze hin untersucht worden. **Tabelle 16** zeigt eine Übersicht dieser Verbindungen.

Tabelle 16: Ether als Dieselkraftstoff-Zusätze

Name	Chem. Formel	Abkürzung	O-Gehalt [Ma%]	Quelle
Diethylether	C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅	DEE	22	[18]
Dimethoxymethan	CH ₂ (OCH ₃) ₂	DMM	42	[17], [18]
1,2-Dimethoxyethan	CH ₃ O(C ₂ H ₄)OCH ₃	Glyme	36	[17]
Triethylenglycol-dimethylether	CH ₃ O(C ₂ H ₄ O) ₃ CH ₃	Triglyme	36	[17]
Tetraethylenglycol-dimethylether	CH ₃ O(C ₂ H ₄ O) ₄ CH ₃	Tetraglyme	36	[17]
Diethylenglycol-methylether	CH ₃ O(C ₂ H ₄ O) ₂ H	DGME	40	[17]

Ester

Ester auf Pflanzenölbasis werden seit vielen Jahren als Alternative zu herkömmlichen Dieselkraftstoff getestet. Dabei sind zwei Möglichkeiten zu unterscheiden:

1. Einsatz von naturbelassenen Pflanzenöl in modifizierten Dieselmotoren, bei denen die Verbrennungstechnik auf die Eigenschaften von Pflanzenöl abgestimmt worden ist. Die Anforderungen an die Pflanzenöle sind in einem Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff festgelegt [19]
2. Einsatz in konventionellen Dieselmotoren. Dazu werden die Pflanzenöle durch Umesterung mit Methanol in Pflanzenölmethylester (PME) umgewandelt (**Bild 18**). Die Kennwerte und dazugehörige Prüfverfahren für PME sind in DIN 52606 festgelegt.

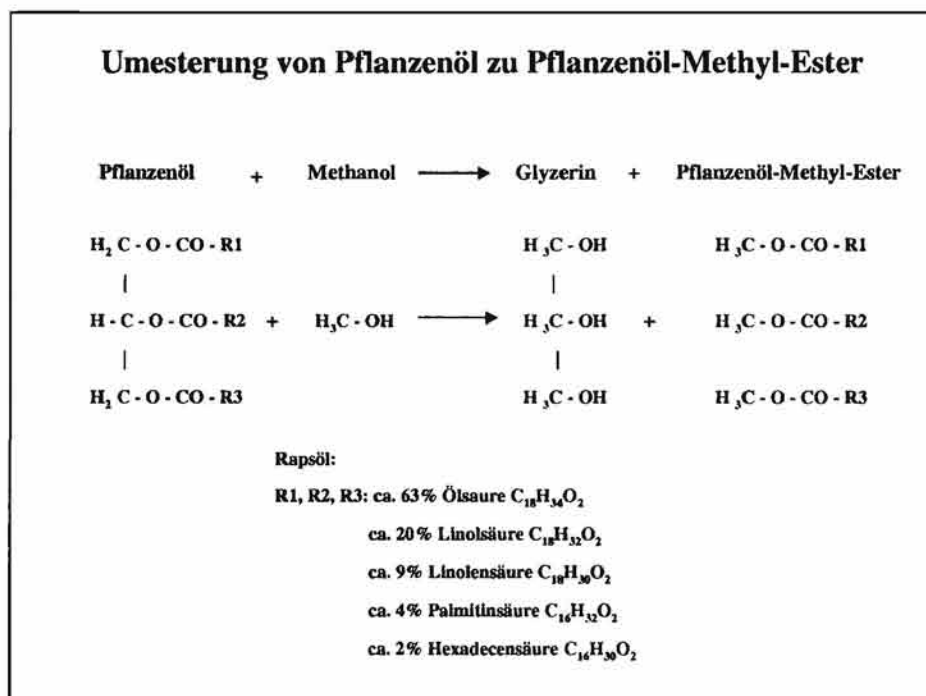


Bild 18: Umesterung von Pflanzenöl zum Methylester

Das Spektrum der untersuchten Pflanzenöle ist vielfältig und umfasst u.a. Öle aus Raps, Soja, Lein, Sonnenblumen und Disteln [24, 25, 26, 27, 28, 29]. In **Tabelle 17** sind die wichtigsten

Eigenschaften von Mariendistel- und Rapsöl den Kennwerten von Dieselkraftstoff bzw. Pflanzenölmethylester gegenüber gestellt.

Tabelle 17: Kennwerte von Mariendistel- und Rapsöl im Vergleich zu Dk und PME [20, 21, 22]

	Mariendistelöl	Rapsöl	Dk	PME
Dichte (15 °) [g/ml]	0,94	0,92	0,82 - 0,86	0,875 - 0,900
kin. Viskosität (40 °C) [mm ² /s]	79,2	34,4	2,0 - 4,5	3,5 - 5,0
Cloudpoint [°C]	13	> 0	3	- 9
Pourpoint [°C]	-1,5	-6	-	-
Jodzahl [g _{Jod} /100g]	94,3	109	-	max. 115
Heizwert [MJ/kg]	36,4	37,5	42,4	37,9
Elementare Zusammensetzung C:H:O [Ma%]	76:12:12	77:12:11	87:13:0	77:12:11
Stöchiometrischer Luftbedarf [kg/kg]	12,3	12,4	14,4	12,4

Der Sauerstoffgehalt von Pflanzenöl und -methylester beträgt etwa 11 Ma%. Problematisch bei Verwendung der Öle in herkömmlichen Motoren sind die hohe Viskosität und Dichte.

Eine Studie des Umweltbundesamtes bezüglich des Einsatzes von Rapsmethylester kommt zu folgenden Schlussfolgerungen [23]:

1. Bezogen auf die gesamte Energiekette liegt der spezifische CO₂-Vorteil von RME gegenüber Dieselkraftstoff bei 30 bis 80 % pro Kilogramm Brennstoff. Jedoch wird eingeschätzt, dass in Deutschland lediglich 0,5 % des Dieselbedarfs mit RME gedeckt werden könnte und somit das CO₂-Minderungspotential sehr gering ist.

2. Bezüglich Ressourcenverbrauch und Schadstoffausstoß ist durch den hohen Flächenverbrauch und den intensiven Einsatz von Düng- und Pflanzenschutzmitteln beim Rapsanbau gegenüber Dieselkraftstoff kein Vorteil zu verzeichnen. Aus Sicht der Schadstoffe geraten die bis vor einiger Zeit positiv bewerteten Emissionen zunehmend in Kritik, insbesondere bezüglich der Giftigkeit bestimmter Partikelbestandteile.

Positiv ist aber unbedingt zu erwähnen, dass aufgrund der Schwefelfreiheit von RME keine SO₂-, SO₃- und Sulfatemissionen auftreten. Besonders in Zusammenhang mit der Einführung neuartiger Abgasnachbehandlungssysteme, die zur Erfüllung zukünftiger Emissionsgrenzwerte notwendig sind, aber deren ordnungsgemäße Funktion schwefelfreien Kraftstoff erfordert, gewinnt die Schwefelfreiheit von RME an Bedeutung.

3. Nach Angaben des Umweltbundesamtes ist aus ökonomischer Sicht der flächendeckende Einsatz von RME als Kraftstoff nicht sinnvoll, da dieser nur durch Subventionen überhaupt marktfähig ist.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich die Stoffgruppen Alkohole, Ether und Ester prinzipiell dazu eignen, den Sauerstoffanteil im Kraftstoff zu erhöhen. Bei vielen Komponenten treten aber wegen ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften, die zum

Teil erheblich von denen des konventionellen Dieselkraftstoffs abweichen, Probleme z.B. beim Mischungsverhalten auf.

Auf Grund des erhöhten Sauerstoffanteiles wird insbesondere die Partikelemission reduziert.

6. Fazit

Der Dieselmotor ist nach wie vor die Verbrennungskraftmaschine mit dem höchsten Wirkungsgrad und der höchsten Flexibilität im mobilen Einsatz. Ein Hauptproblem stellen dabei die Abgasschadstoffe Stickoxide (NO_x) und Partikel (PM) dar. Herkömmliche Maßnahmen zur NO_x -Senkung führen zu einem Anstieg der PM-Emission und des Kraftstoffverbrauchs. Maßnahmen zur Senkung der PM-Emission führen wiederum zu einem Anstieg der NO_x -Emission.

Eine Möglichkeit zur Reduzierung dieser Schadstoffemissionen besteht in der Änderung der Zusammensetzung der Verbrennungsluft. So kann z.B. durch eine Erhöhung des Inertgasanteils die NO_x -Emission drastisch reduziert werden. Wird dabei der Sauerstoffgehalt so hoch gehalten wie in atmosphärischer Luft, kann der Anstieg der PM-Emission unterbunden werden.

Ausgehend von der Abgasrückführung wurde in theoretischen und experimentellen Untersuchungen die optimale Zusammensetzung der Verbrennungsluft zur gleichzeitigen Reduktion der NO_x - und Partikelemission ermittelt. Es konnte gezeigt werden, dass es mit dieser Verbrennungsluft möglich ist, eine ähnlich hohe NO_x -Reduktion wie bei der Abgasrückführung zu erzielen, ohne dass die Partikelemission drastisch ansteigt. Die „optimale“ Verbrennungsluft muss **einen Sauerstoffgehalt größer als 20 % und einen CO_2 -Gehalt größer als 10 %** aufweisen. Der Rest besteht im Wesentlichen aus Stickstoff.

Ferner wurden technische Möglichkeiten zur Anreicherung der Verbrennungsluft mit Sauerstoff und Kohlendioxid aufgezeigt. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um Membrane. Es besteht nun die Aufgabe, die bekannten Trenntechnologien dahin gehend zu entwickeln, dass sie den Erfordernissen der Anwendung im Fahrzeugbereich genügen.

7. Literatur

- [1] Velji, A.; Bach, E. et al: Verringerung der Schadstoffemissionen bei Schnelllaufenden Dieselmotoren. Abschlussbericht zum gleichnamigen BMBF Verbundvorhaben, 1996
- [2] Velji; A. et al: Dieselmotoren erfüllen mit Wassereinspritzung zukünftige NO_x- und Rußgrenzwerte. MTZ Motortechnische Zeitschrift 57 (1996) 7/8
- [3] Velji et al: Water to reduce NO_x-Emissions in Diesel Engines, A basic Study. CIMAC (D46), 1995
- [4] Remmels, W.; Velji, A.: Grundsatzstudie: Einfluss der Abgasrückführung auf Emission und Wirkungsgrad. 2. Dresdener Motorkolloquium, Mai 1997
- [5] Zeldovich, Y. B.: The Oxidation of Nitrogen in Combustion and Explosions Acta Physicochimica, USSR, Vol. 21 (1946), pp. 577-628
- [6] Welsch, K.: Gaspermeation – Membranwerkstoffe, Stofftransport und Anwendungsbeispiele. Dissertation, RWTH Aachen, 1992
- [7] Rautenbach, R.: Membranverfahren, Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung. Springer-Verlag 1997
- [8] Mollenhauer, K.: Handbuch Dieselmotoren. Springer-Verlag Berlin, 1997
- [9] Bartz, W.: Fuels 1999. Tagungsband Technische Akademie Esslingen
- [10] Zilmans, R.; Rauschmair, E.: Einfluss der Zumischung von Ethanol zu Dieselkraftstoff auf das Emissions- und Betriebsverhalten von Nutzfahrzeugen, insbesondere auf die Freisetzung von derzeit als krebserregend geltenden Stoffen. Abschlussbericht, Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 1990
- [11] Stoner, M. u.a.: Effects of structure and Boilling Point of Oxygenated Blending Compounds in Reducing Diesel Emissions. SAE Technical Paper 1999-01-1475
- [12] Kapus, P.E. u.a.: Development of Fuel Injection Equipment and Combustion System for DI Diesel Operated on Dimethyl Ether. SAE Technical Paper 950062, 1995, 1999
- [13] Fleisch, T. u.a.: A New Clean Diesel Technology: Demonstration of ULEV Emission on a Navistar Diesel Engine Fueled with Dimethyl Ether. SAE Technical Paper 950061, 1995
- [14] Kapus, P.E. u.a.: ULEV Potential of a DI/TCI Diesel Passenger Car Engine Operated on Dimethyl Ether. SAE Technical Paper 952754, 1995
- [15] Andrew, J.: Real Success with Synthetic Diesel Fuels. Future Drive, Bd. 5, H. 1, 1999
- [16] Beatrice, C. u.a.: Potentiality of Oxygenated Synthetic Fuel and Reformulated Fuel on Emission from a Modern DI Diesel Engine. SAE Technical Paper 1999-01-3595, 1999

- [17] Hess, H.: Effect of Oxygenated Cetane Improver on Diesel Engine Combustion and Emissions. Internet: <http://www.energyinstitute.psu.edu.cl/altfuels.html>
- [18] Diesel Fuels Research. Internet: <http://www.me.berkeley.edu/cal/diesel>
- [19] Abschlussbericht „Begleitforschung zur Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff für pflanzenöлтаugliche Dieselmotoren in Fahrzeugen und BHKW“. TU München, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, 2000
- [20] Bouche, T. u.a.: Einfluss verschiedener Pflanzenöleigenschaften auf Verbrennung und Schadstoffbildung in einem direkteinspritzenden Dieselmotor. MTZ 58 (1997) Nr. 3, S. 148-154
- [21] Weidemann, K.: Anwendung von Rapsöl in Fahrzeug-Dieselmotoren. ATZ 97 (1995) Nr. 5, S. 288-292
- [22] Burggraf, J.; Ullrich, K.: Die neuen ölgekühlten ECO-Pflanzenölmotoren MF-RTA von DMS. MTZ 56 (1995) Nr. 2, S. 101-103
- [23] Aktuelle Bewertung des Einsatzes von Rapsöl/RME im Vergleich zu Dieselmotoren. Umweltbundesamt, Reihe Texte, Nr. 79/99
- [24] Breuer, C.: Beitrag zur Verbrennung von Rapsöl und Rapsmethylester in direkteinspritzenden Dieselmotoren. Fortschritt-Berichte VDI-Reihe 12, Nr. 219, Düsseldorf 1994
- [25] Pflanzenöle als Kraftstoffe für Fahrzeugmotoren und Blockheizkraftwerke. VDI-Berichte 1126, Düsseldorf 1994
- [26] Klee, P.-H.: Charakterisierung verschiedener Pflanzenölkraftstoffe hinsichtlich ihrer Eignung als Dieselmotorensubstitute unter besonderer Berücksichtigung ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften. Fortschritt-Berichte VDI-Reihe 12, Nr. 375, Düsseldorf 1999
- [27] Poulton, M.L.: Alternative Fuels for Road Vehicles. Computational Mechanics Publications, Southamton 1994
- [28] Stelzer, T.: Biokraftstoffe im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen. Forschungsbericht, Stuttgart IER, 1999
- [29] Wang, W.G. u.a.: Emissions from Nine Heavy Trucks Fueled by Diesel and Biodiesel Blend without Engine Modifikation. Environmental Science Technology (2000) Band 6, S.933-939
- [30] Oxygenated Diesel Emissions Results. Internet: gec.org/winter99/win9913.html
- [31] Alternative Fuel Biomass – Oxygenated Diesel. Pure Energy Corporation, Internet: <http://www.pure-energy.com/products/oxydiesel.html>

Anhang

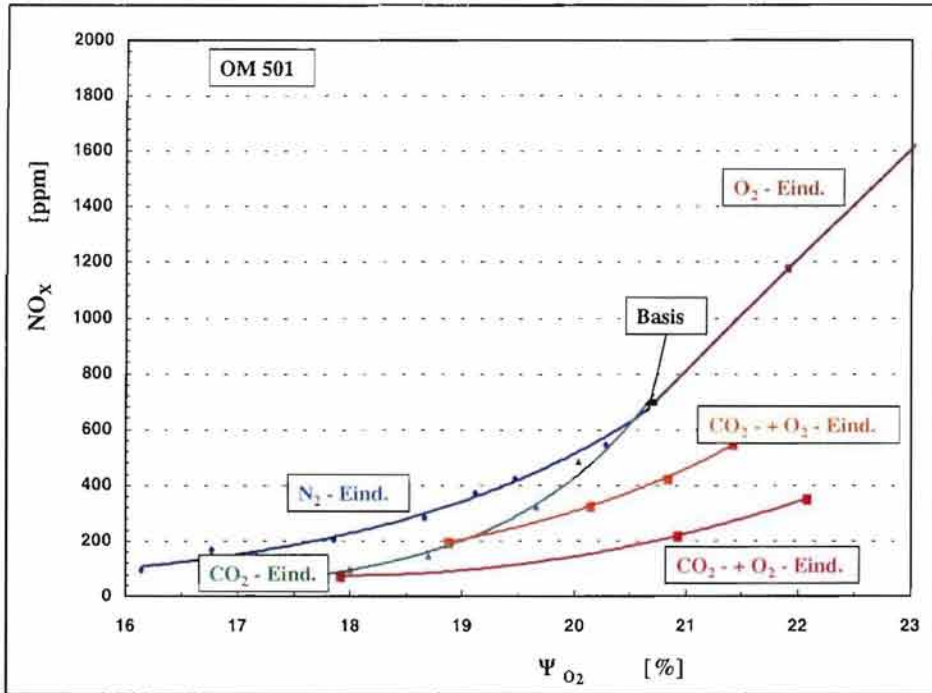


Bild A1: NO_x-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor OM 501

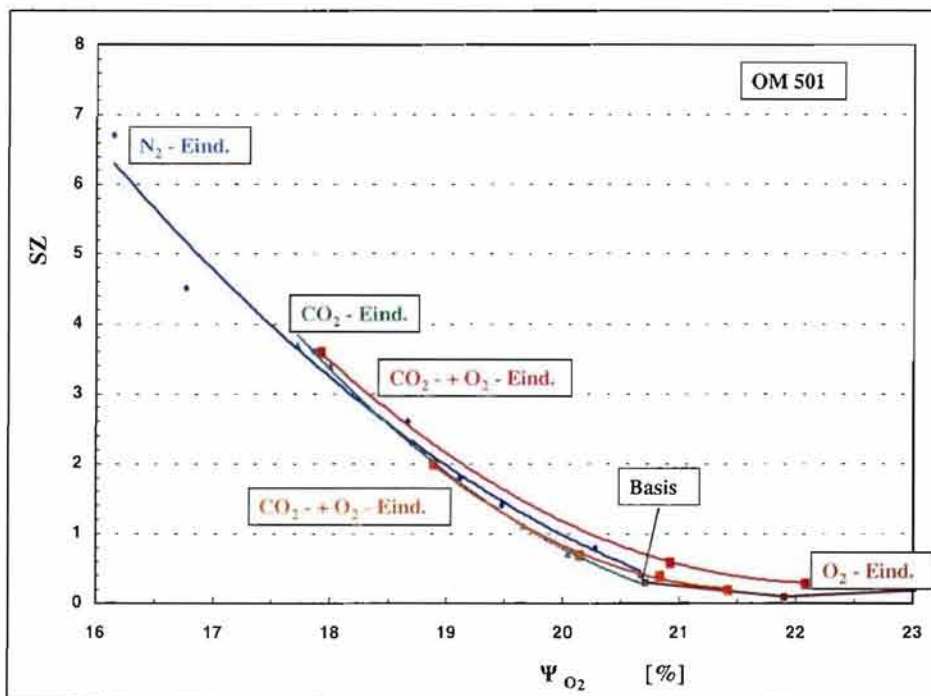


Bild A2: SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor OM 501

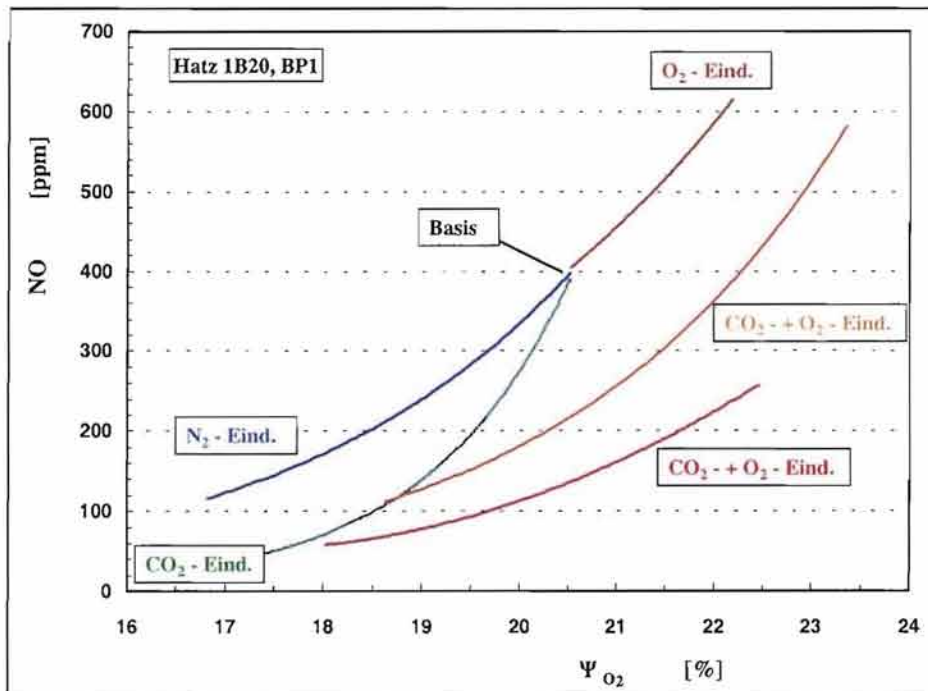


Bild A3: NO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 1

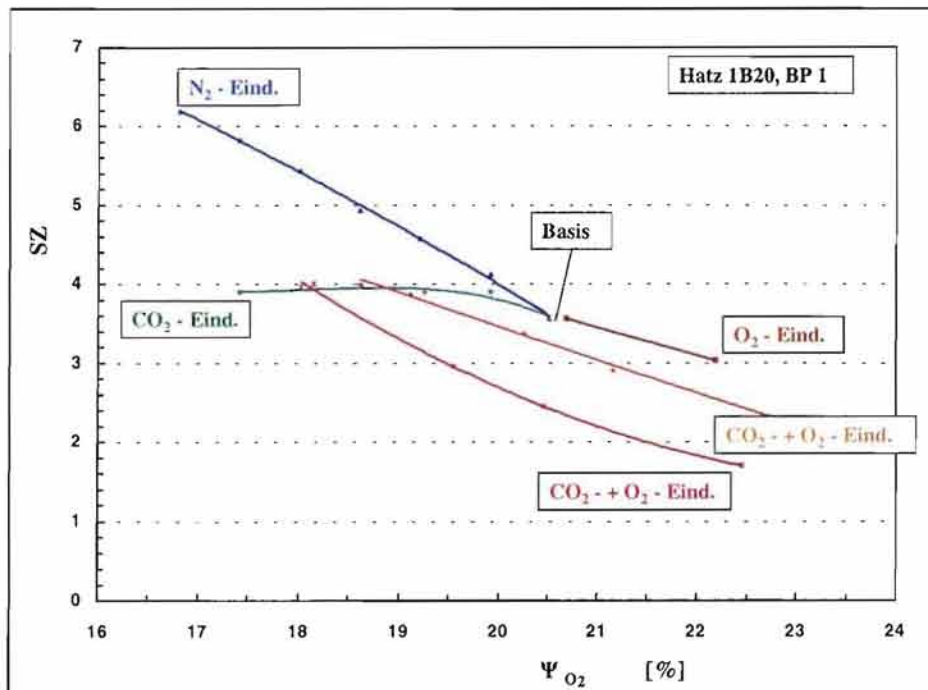


Bild A4: SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 1

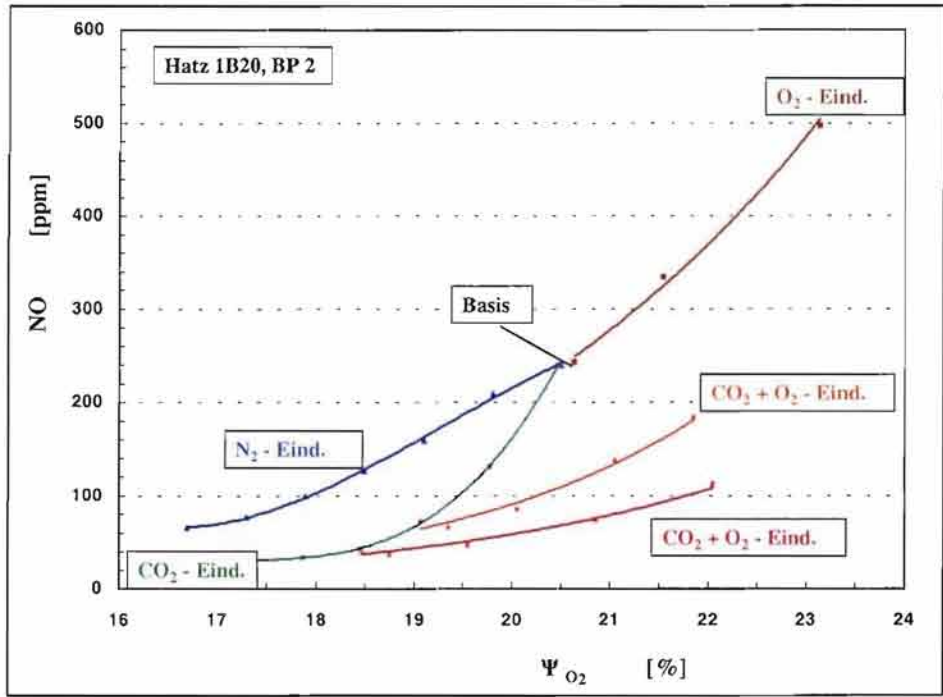


Bild A5: NO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 2

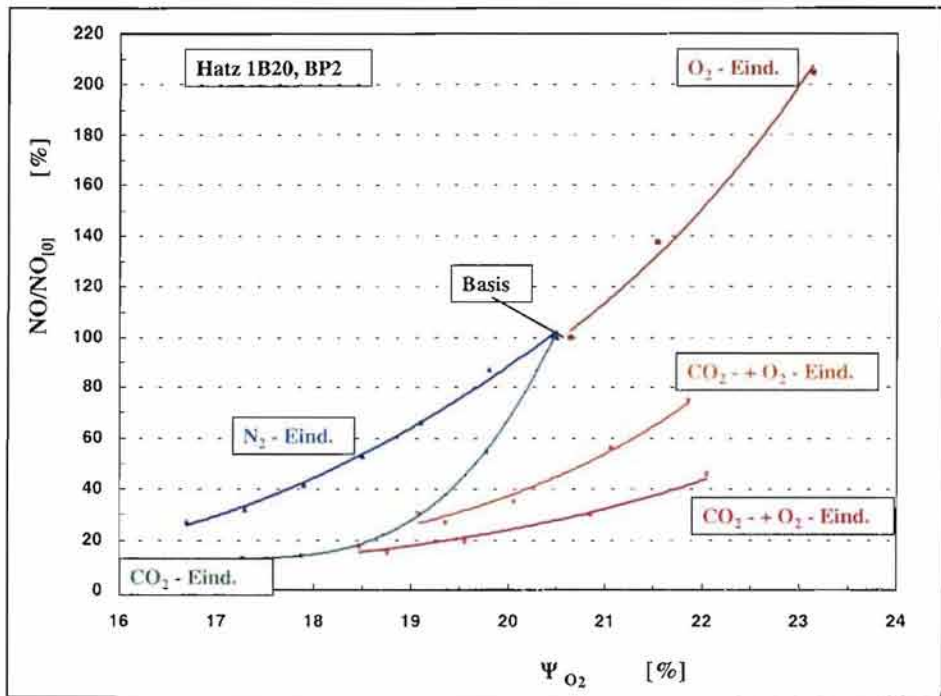


Bild A6: Relative NO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 2

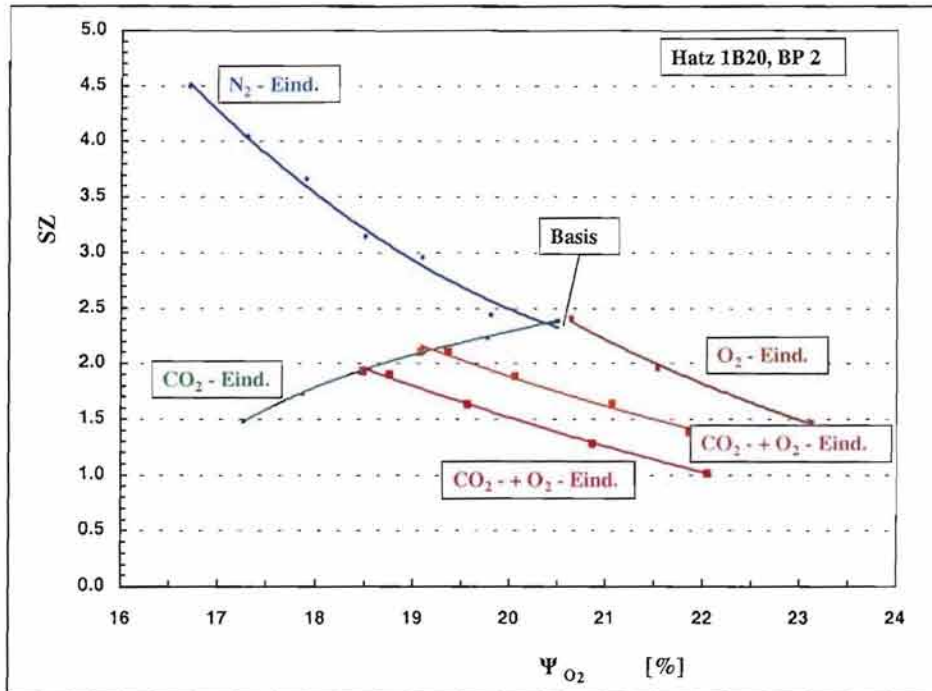


Bild A7: SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 2

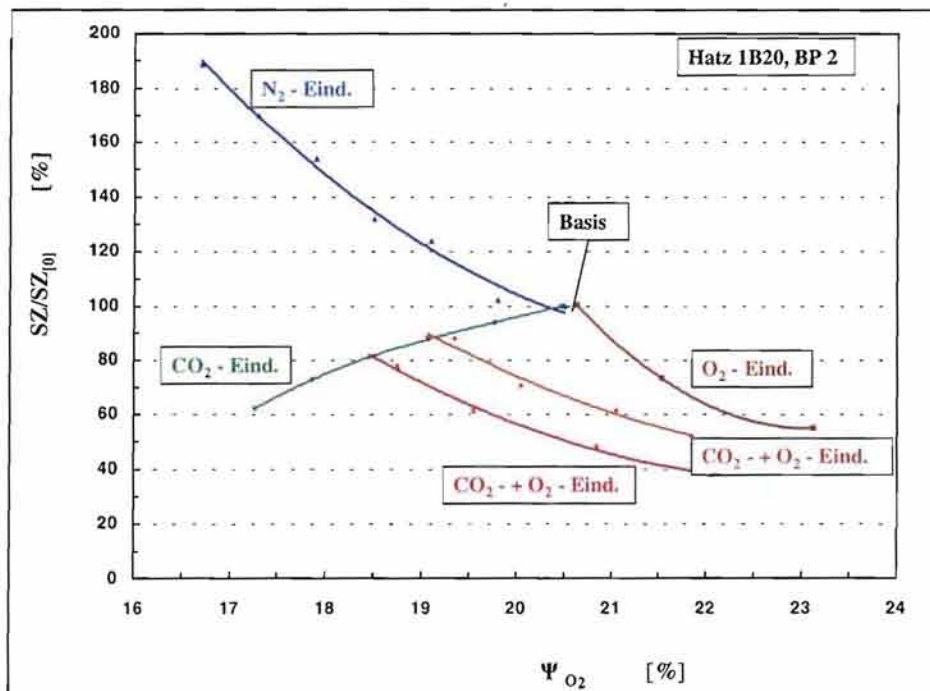


Bild A8: Relative Änderung der SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 2

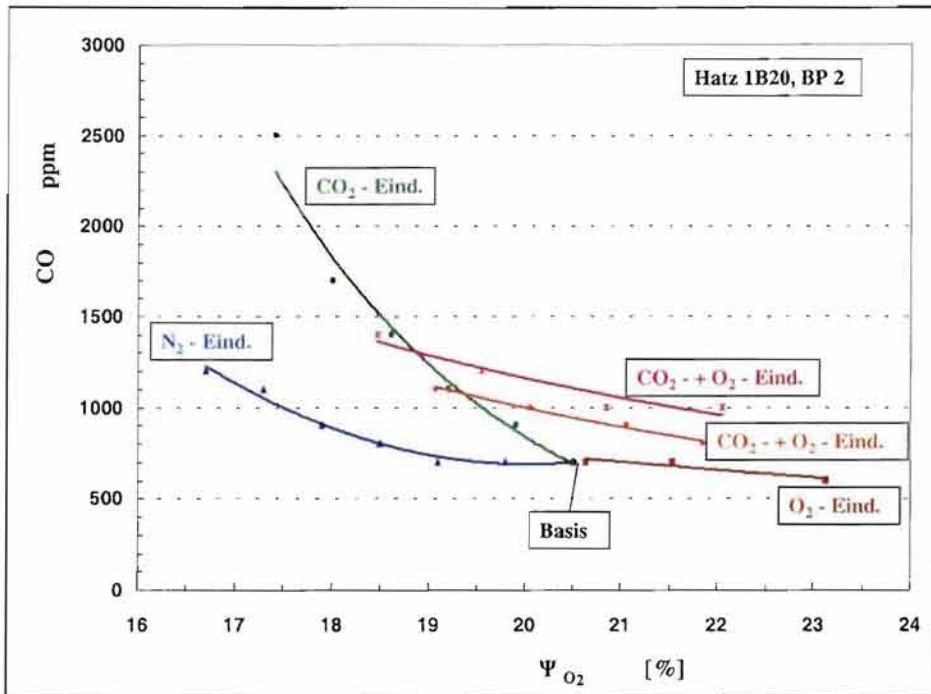


Bild A9: CO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 2

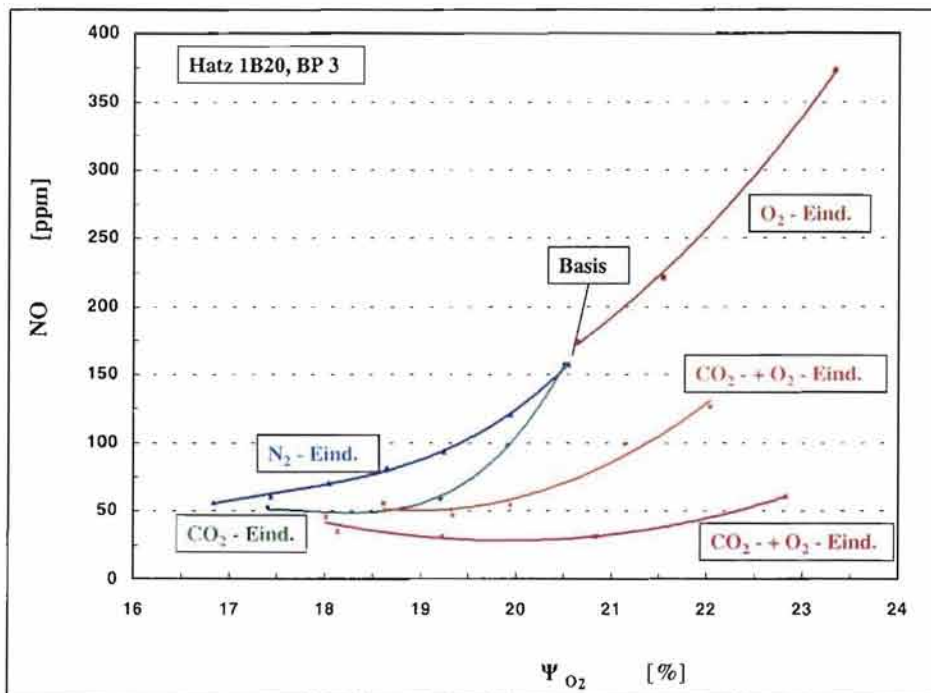


Bild A10: NO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 3

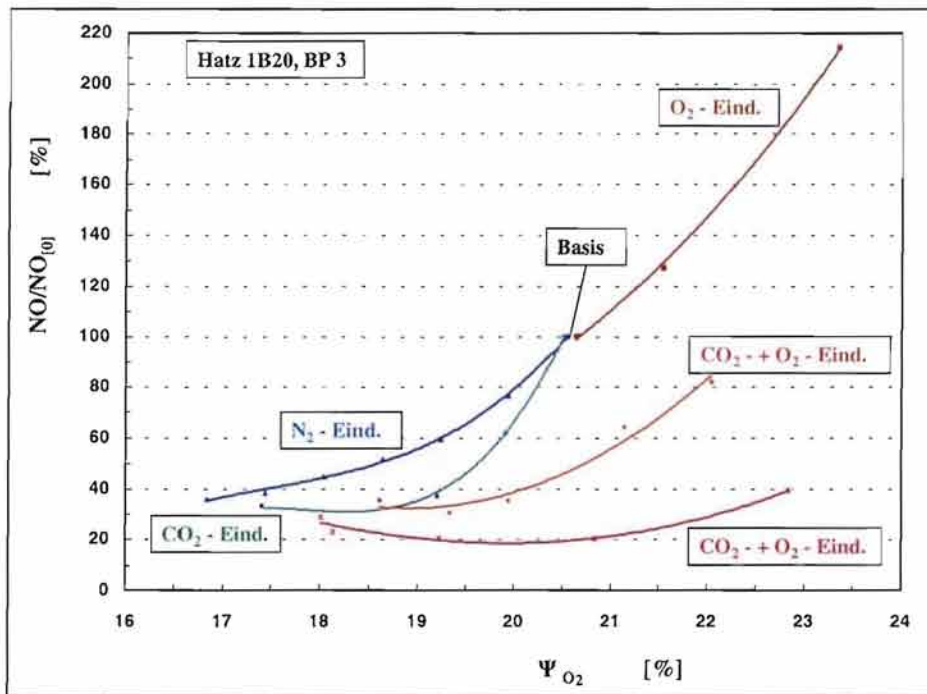


Bild A11: Relative Änderung der NO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 3

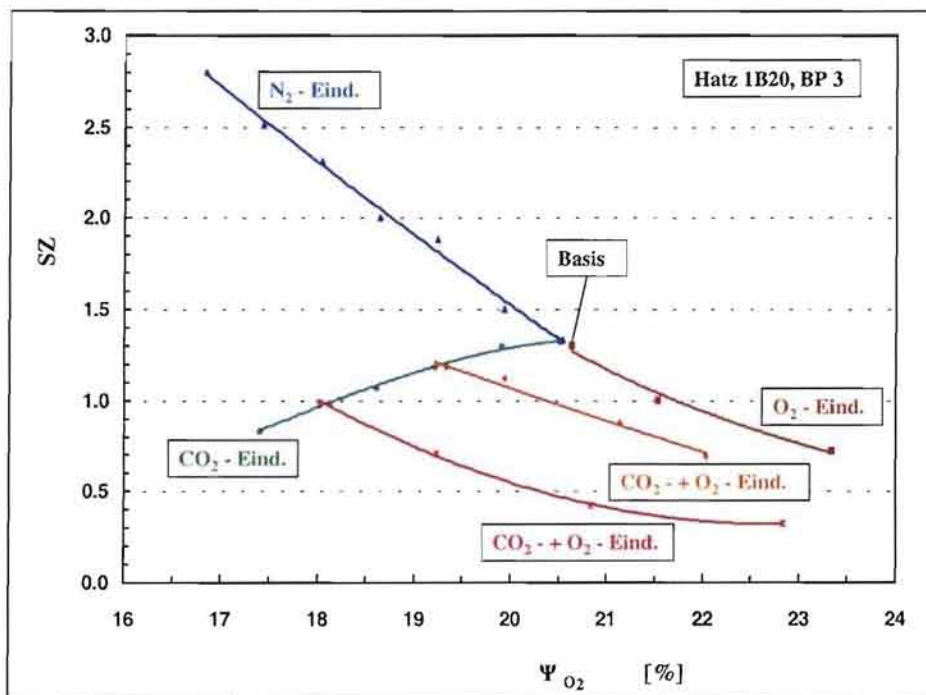


Bild A12: SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 3

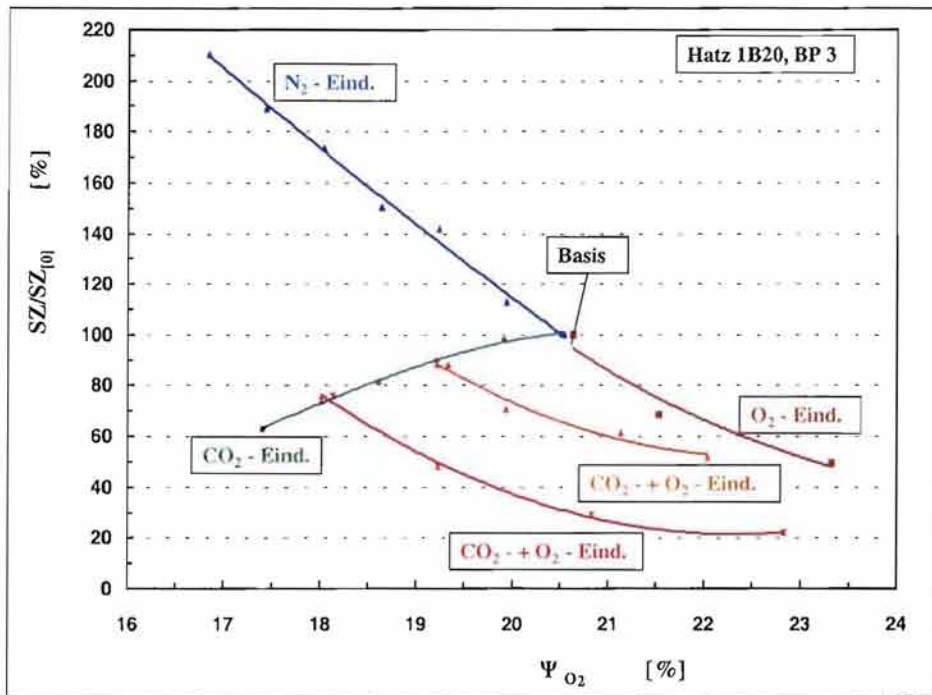


Bild A13: Relative Änderung der SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 3

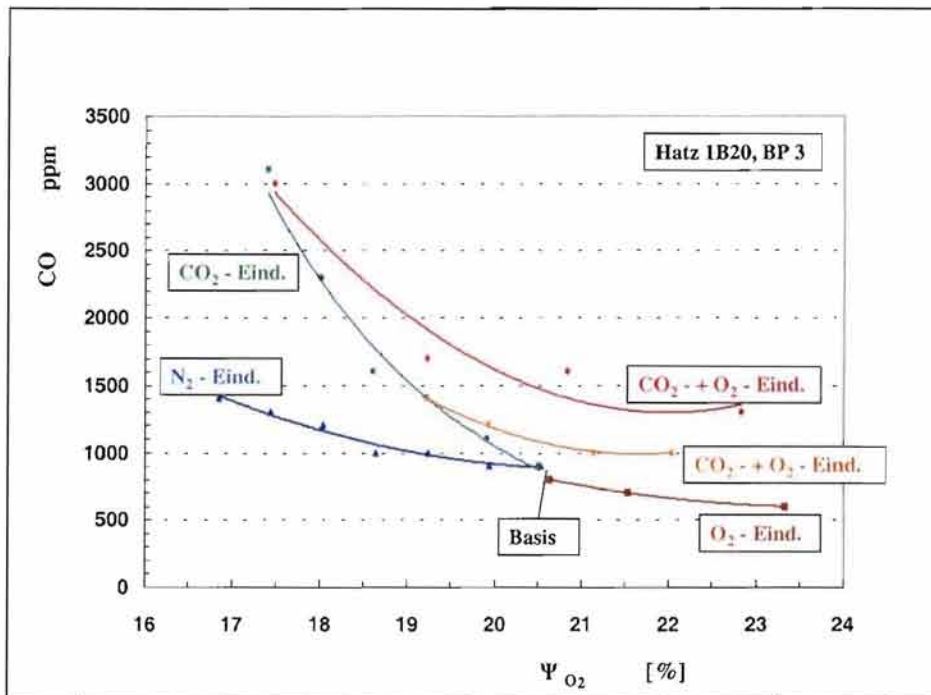


Bild A14: CO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 3

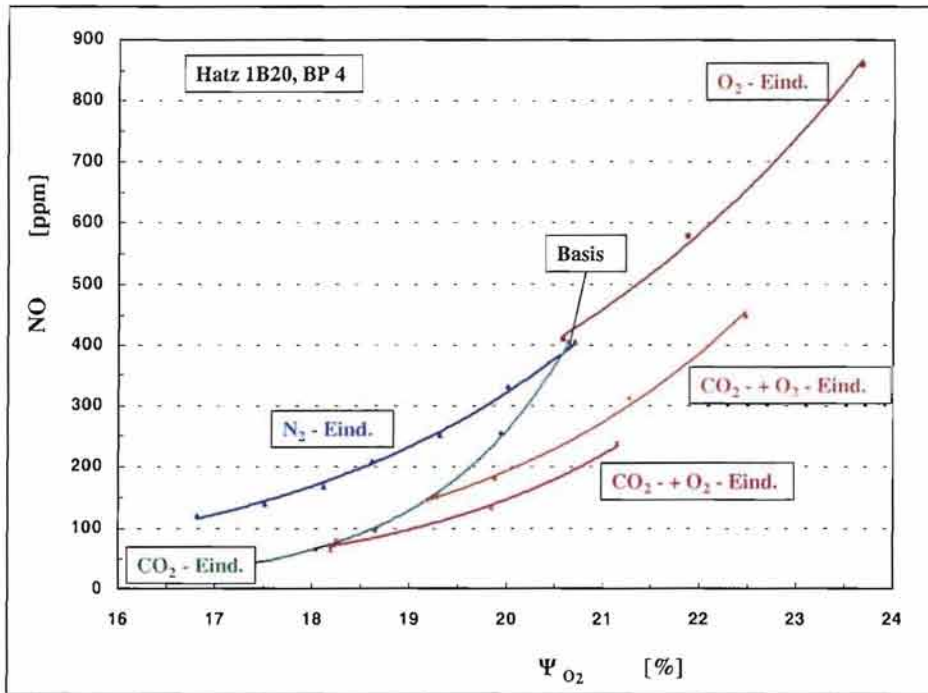


Bild A15: NO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 4

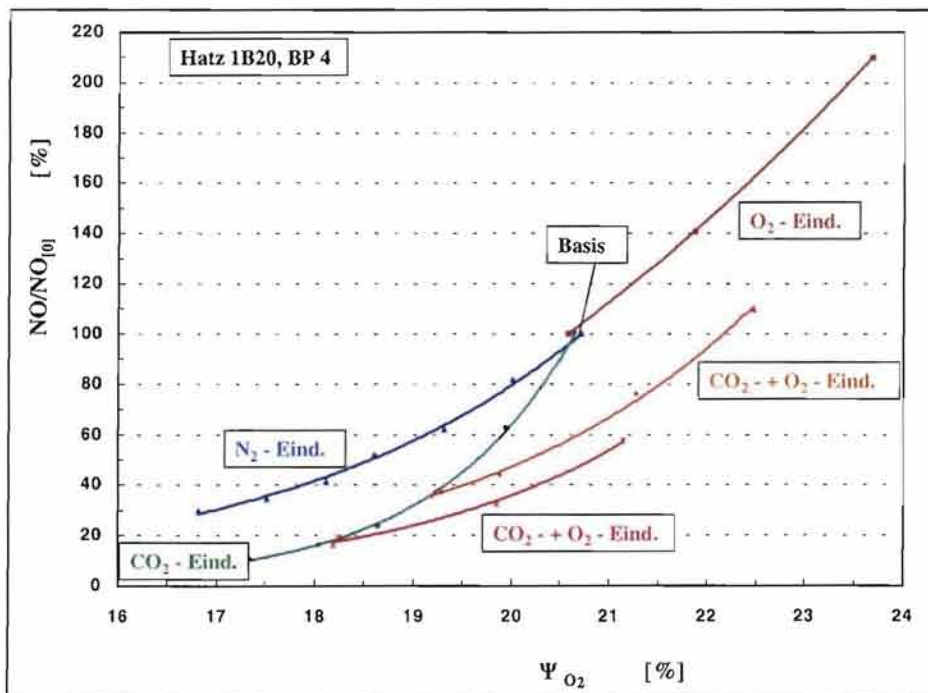


Bild A16: Relative Änderung der NO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 4

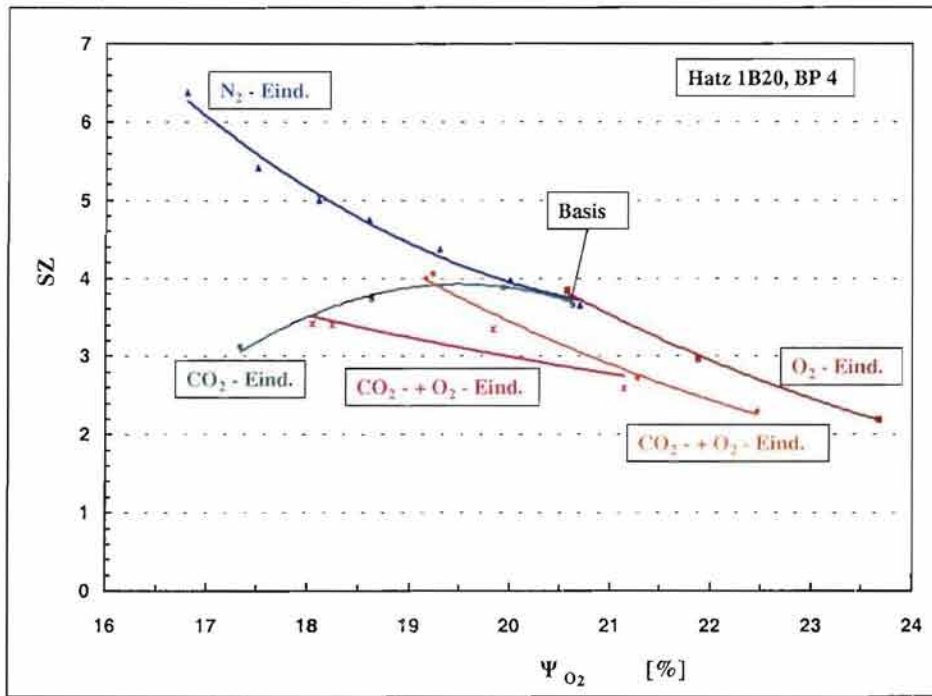


Bild A17: SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 4

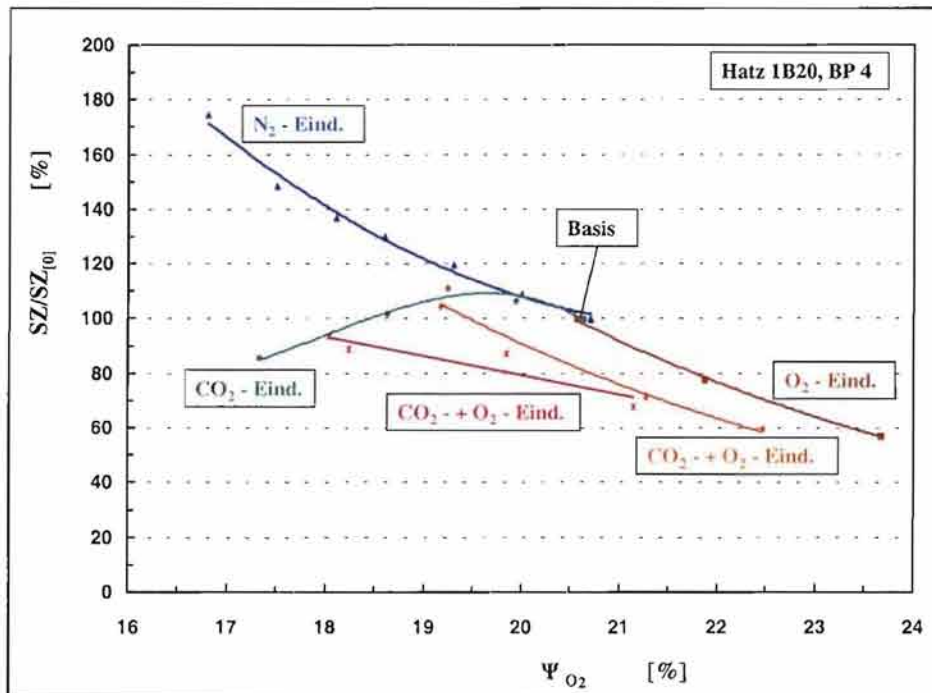


Bild A18: Relative Änderung der SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 4

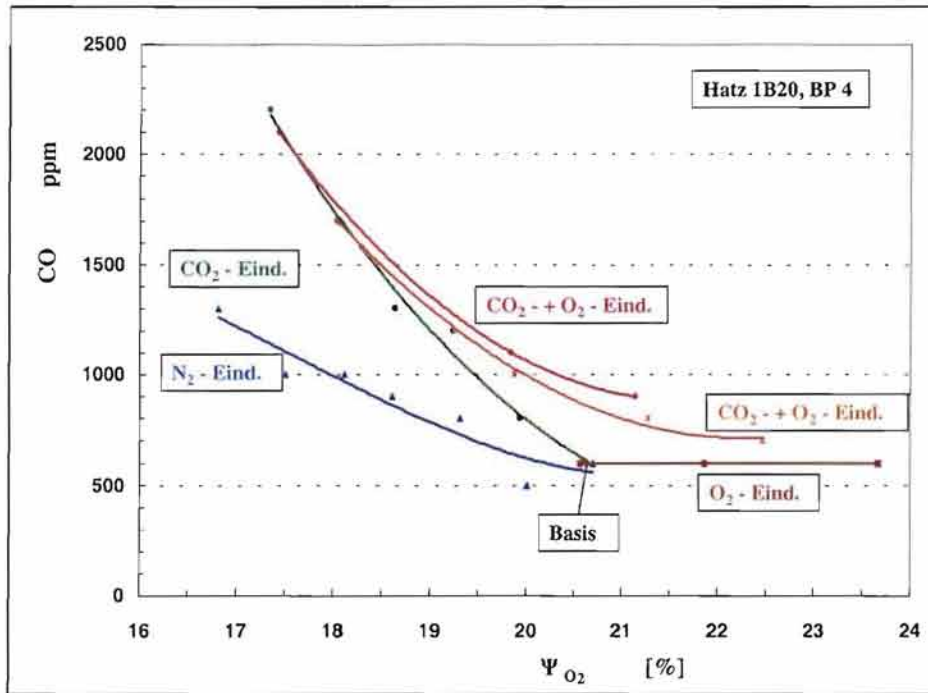


Bild A19: CO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 4

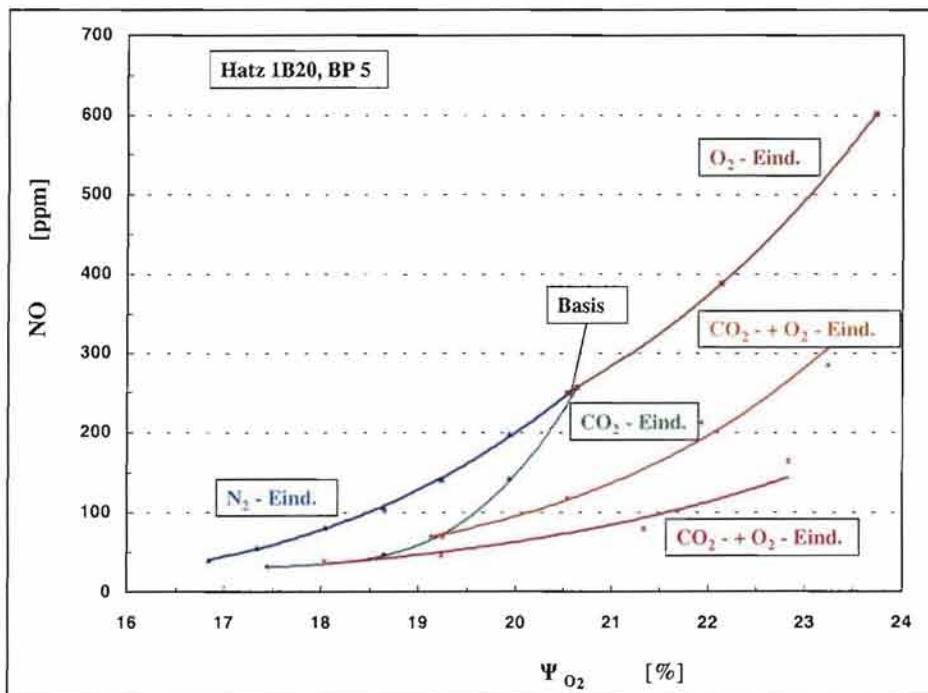


Bild A20: NO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 5

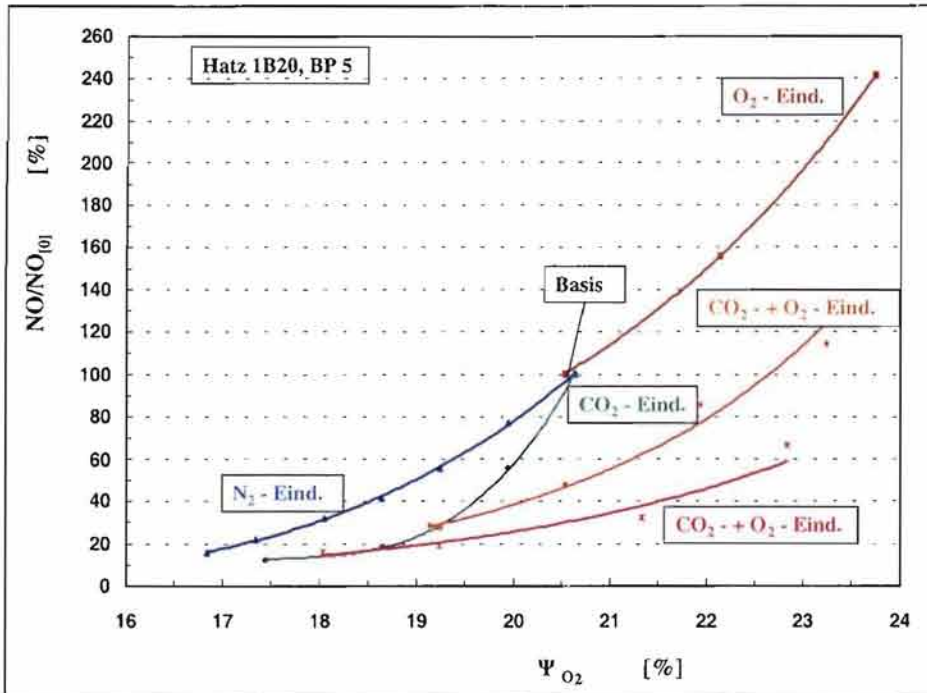


Bild A21: Relative Änderung der NO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 5

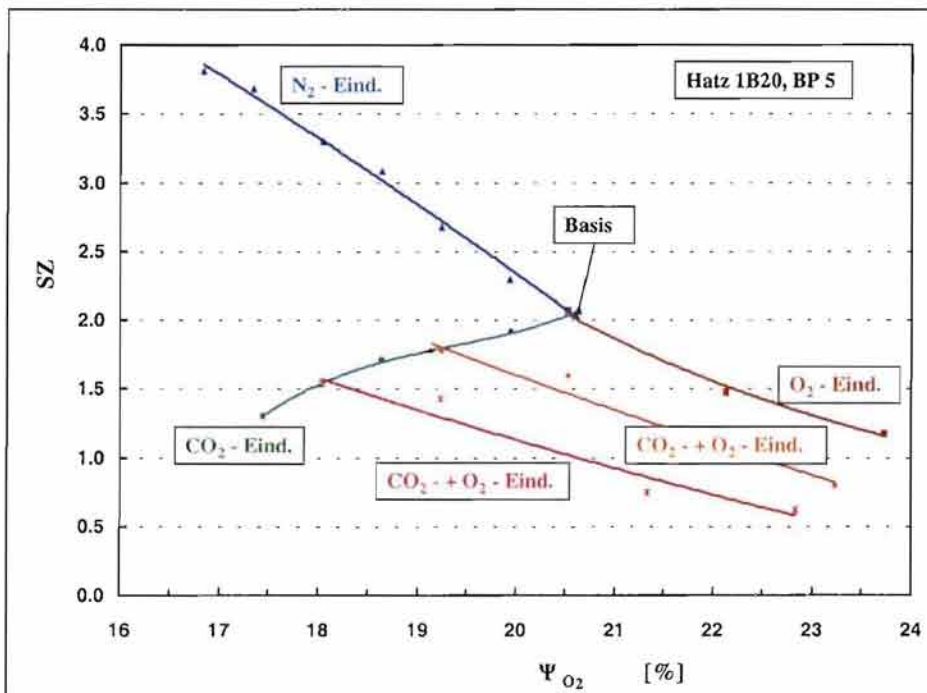


Bild A22: SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 5

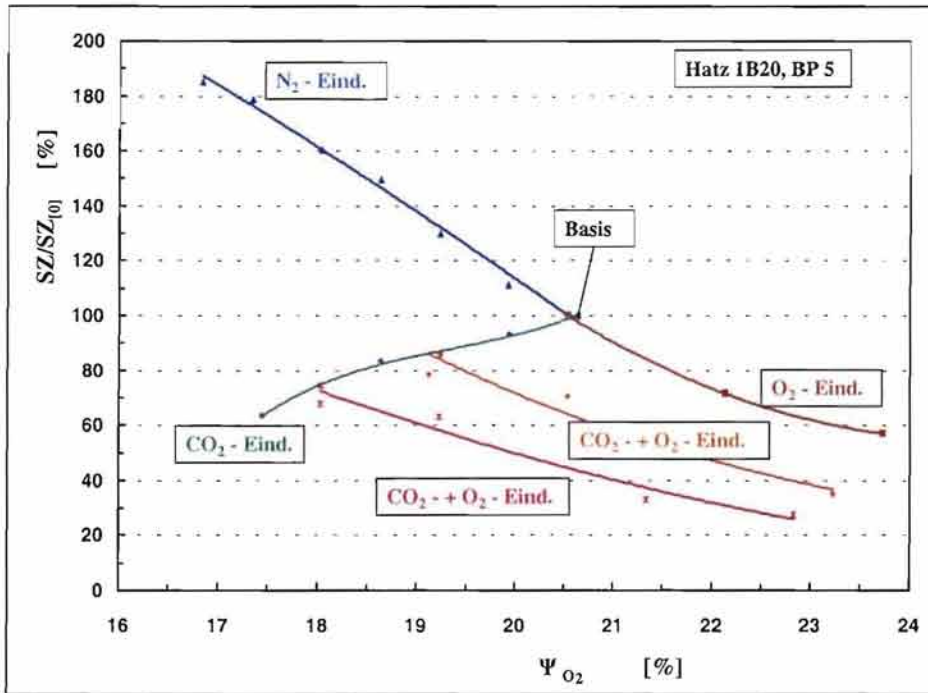


Bild A23: Relative Änderung der SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 5

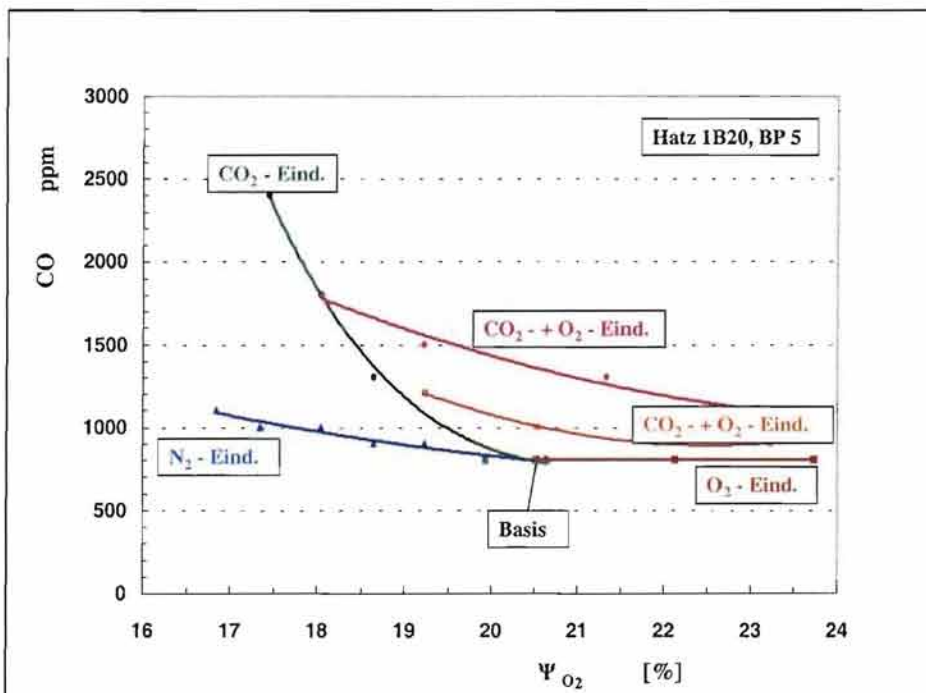


Bild A24: CO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 5

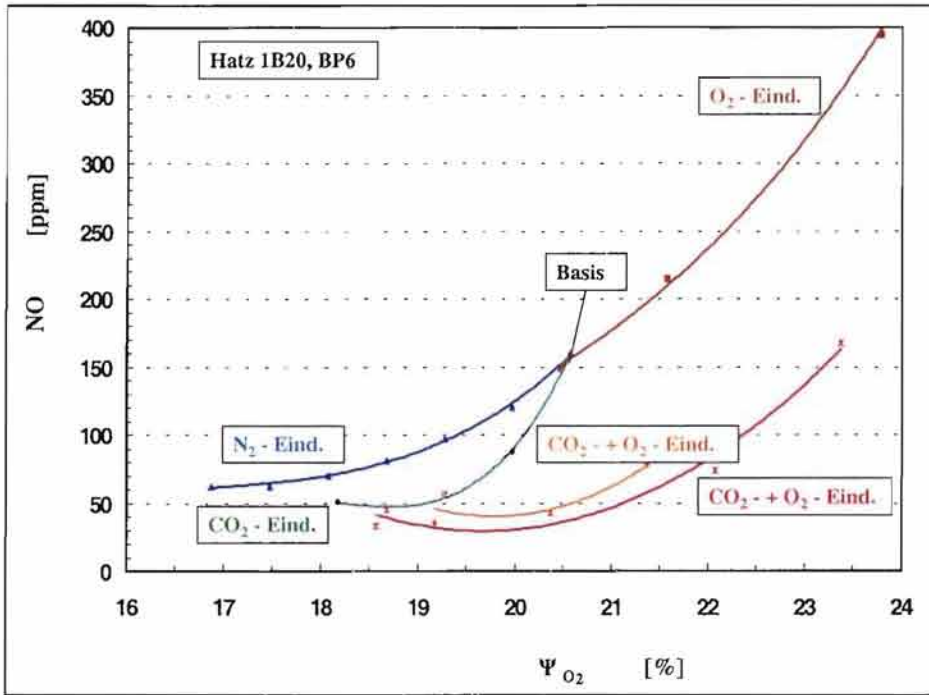


Bild A25: NO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 6

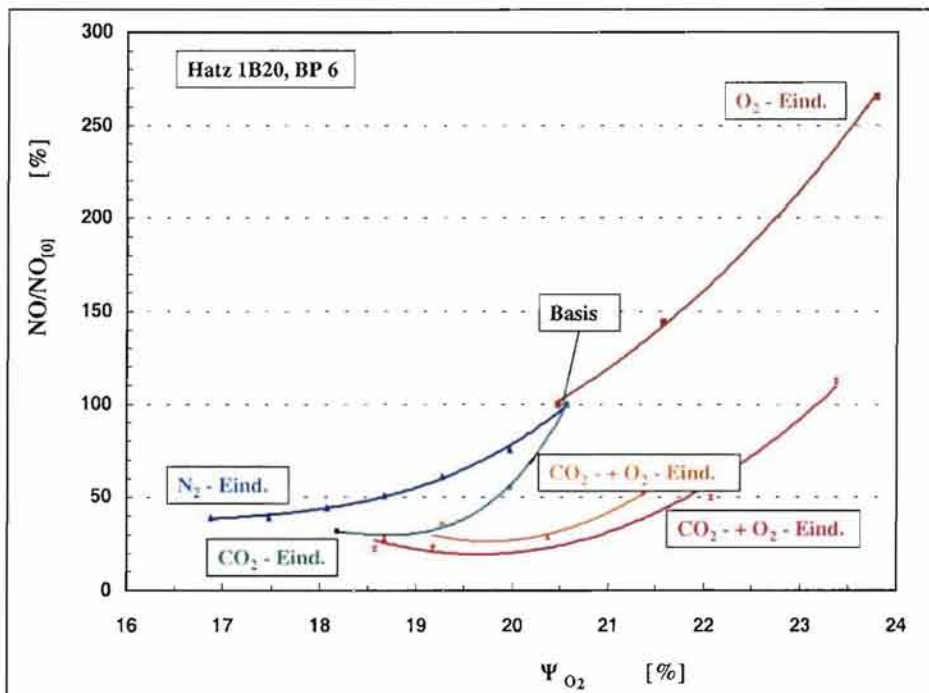


Bild A26: Relative Änderung der NO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 6

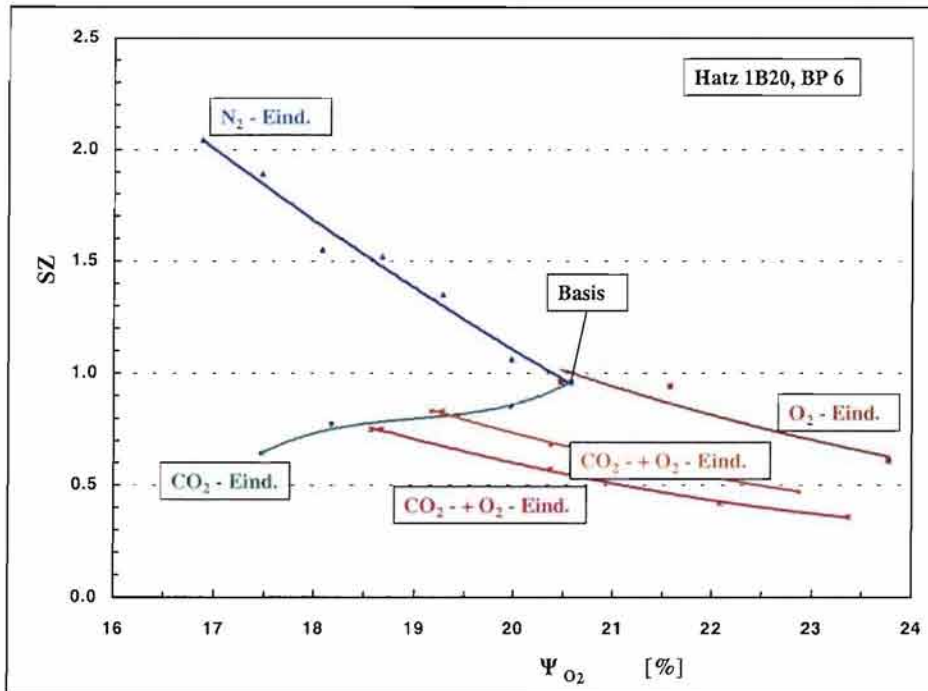


Bild A27: SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 6

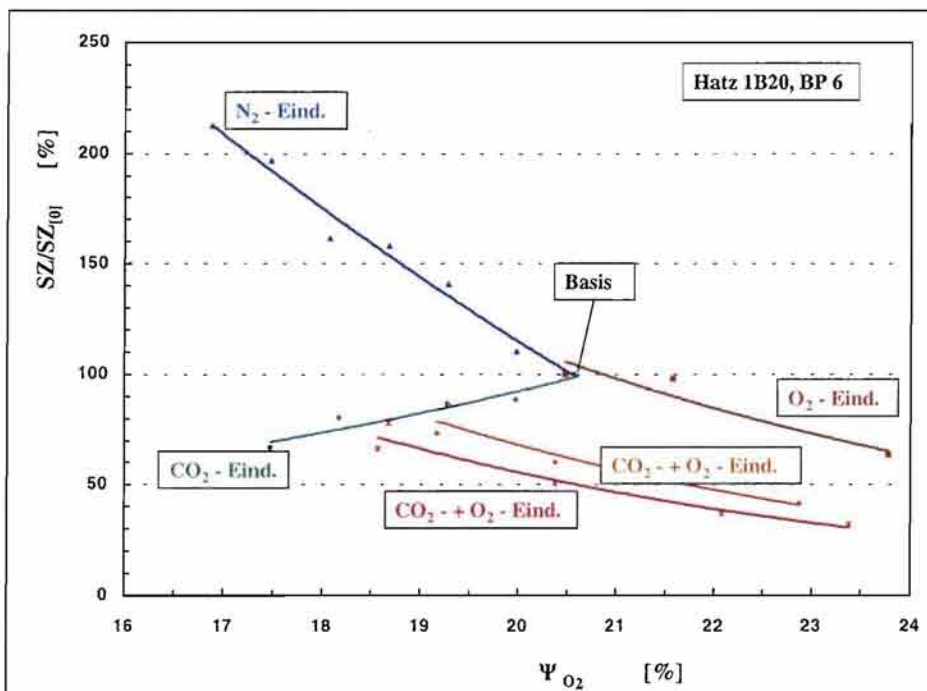


Bild A28: Relative Änderung der SZ in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 6

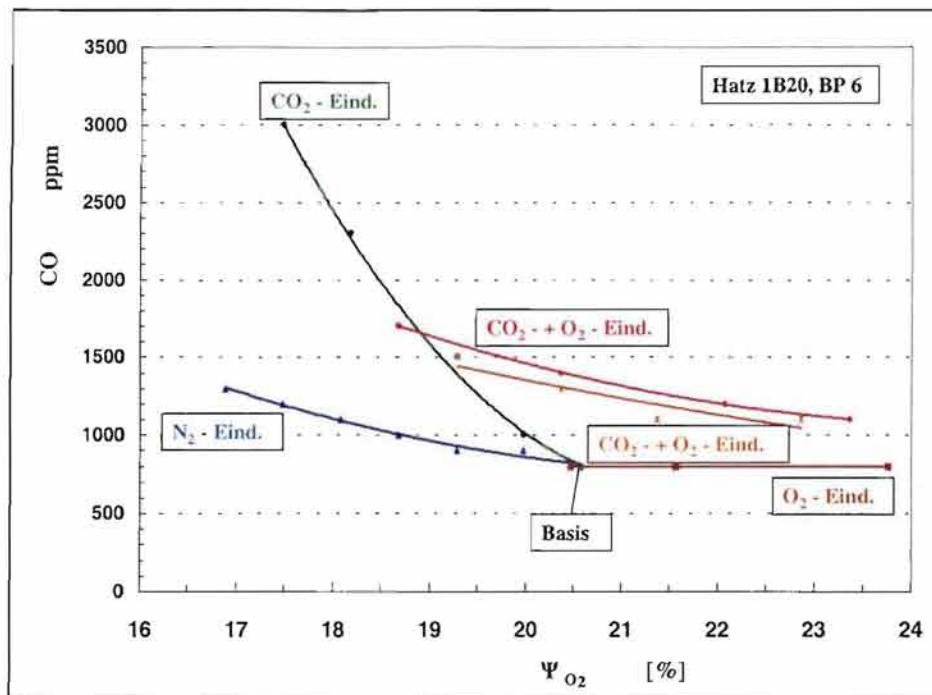


Bild A29: CO-Emission in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt beim Motor Hatz 1B20 im Motorbetriebspunkt 6