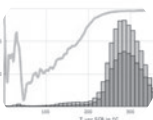


# Potentialanalyse eines zweistufigen Abgasnachbehandlungssystems zur selektiven katalytischen Reaktion für zukünftige Nutzfahrzeugantriebe



**vkm**

Schriftenreihe des Instituts für  
Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe  
Prof. Dr. techn. Christian Beidl (Hrsg.)

Band 8

**SHAKER**  
VERLAG

---

# **Potentialanalyse eines zweistufigen Abgasnachbehandlungssystems zur selektiven katalytischen Reaktion für zukünftige Nutzfahrzeugantriebe**

Am Fachbereich Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

## **Dissertation**

von

**Christian von Pyschow, M.Sc.**

aus Hanau

|                             |                                              |
|-----------------------------|----------------------------------------------|
| Berichterstatter:           | Prof. Dr. techn. Christian Beidl             |
| Mitberichterstatter:        | Ao. Univ.-Prof. Dr. techn. Stefan Hausberger |
| Tag der Einreichung:        | 26.09.2017                                   |
| Tag der mündlichen Prüfung: | 12.12.2017                                   |

Darmstadt 2018

D17

---



---

Schriftenreihe  
des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe

Band 8

Christian von Pyschow

**Potentialanalyse eines zweistufigen Abgasnachbehandlungssystems zur  
selektiven katalytischen Reaktion für zukünftige Nutzfahrzeugantriebe**

D17 (Dissertation TU Darmstadt)

Shaker Verlag  
Aachen 2018

---

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5738-6

ISSN 2365-3795

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

Hab nun, ach! Philosophie,  
Juristerei und Medizin  
Und leider auch Theologie!  
Durchaus studiert, mit heißem Bemühn.  
Da steh ich nun, ich armer Tor!  
und bin so klug als wie zuvor.

Faust

---



---

## **Vorwort des Autors**

---

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Doktorand am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe der Technischen Universität Darmstadt. Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. techn. C. Beidl danke ich herzlichst für die jederzeit offene Tür und die fachlichen Diskussionen die mir halfen, die Arbeit anzugehen und mich auf das Wesentliche zu fokussieren. Herrn Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hausberger danke ich herzlich für die Übernahme des Koreferats.

Die Arbeit entstand in einem gemeinsamen Forschungsvorhaben in Zusammenarbeit mit der Umicore AG & Co. KG, weshalb ich der Firma Umicore für die technische und fachliche Unterstützung bedanken möchte. Im Besonderen danke ich Herrn Dr. Geißelmann für die vielen fachlichen Gespräche und die gute Zusammenarbeit im Laufe der Jahre sowie die sehr wertvollen Verbesserungsvorschläge für diese Arbeit.

Der Firma Kirchner und Partner und Herrn Birkenfeld danke ich für ihre Interesse an der Forschung und ihre Bereitwilligkeit diese zu unterstützen. Viele Ergebnisse dieser Arbeit wären ohne sie nicht möglich gewesen.

Bei allen Studenten, die im Rahmen Ihrer Abschlussarbeit oder als Hilfswissenschaftlicher Mitarbeiter an dieser Publikation mitwirkten, möchte ich mich im Besonderen Bedanken.

Mein herzlicher Dank gilt auch Herrn Wolfgang Paul für seine langjährige Unterstützung und die vielen gemeinsamen Stunden am Prüfstand.

Nicht zuletzt die gute Atmosphäre und die Hilfsbereitschaft aller Kollegen am Institut haben für eine fruchtbare Umgebung gesorgt, in der dieser diese Arbeit entstehen konnte. Im Besonderen danke ich meinen Bürokollegen für die vielen fachlichen und fachfremden Gespräche und eine gute gemeinsame Zeit.

Mein herzlicher Dank gilt meiner Familie, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Im Besonderen möchte ich meiner Mutter für ihre bedingungslose Liebe und Unterstützung in allen Lebenslagen, auch während der Zeit dieser Arbeit, danken.

---



---

## Abstract

---

European cities do not achieve the set air quality goals in spite of tightening emission limits for newly registered vehicles. Especially nitrogen oxides are a challenge, for which diesel engines are a major source, among them the engines of commercial vehicles, which are the focus of this thesis. A further tightening of the exhaust emission legislation of heavy duty diesel engines can be expected. The European Commission is already introducing a more stringent test procedure for In-Service-Conformity limits, whereas in the United States of America the Environmental Protection Agency and especially the California Air Resources Board is considering reducing the limits for certification cycles.

Selective Catalytic Reduction (SCR) with aqueous urea solution was implemented in large scale for exhaust gas aftertreatment systems with the introduction of the emission standard “Euro IV” in 2005 and has been the essential technology for limiting nitrogen oxide emissions down to low values since.

A long term study over 16 months and a covered distance of 176.000 kilometers on a long haul truck vehicle is the part of the investigation in this thesis, in which the real driving emissions are recorded and analyzed statistically. The results show that low temperatures during cold start and long motoring lead to an impaired nitrogen oxide conversion, whereas throughout elevated temperatures during normal driving the exhaust gas aftertreatment system provides high conversion rates.

Current development strategies approach the task of higher conversion rates to fulfil future emission limits in different ways. One option taken into account is to increase the catalyst temperature more quickly to a level suitable for the catalytic reduction, and to hold it longer on that level. There are many ways to achieve this temperature characteristic, for example by actively heating the exhaust gas or moving the catalyst upstream in the exhaust tract to expose it to higher temperatures. The second possibility can be achieved by coating the particulate filter with catalyst material for SCR.

For the investigation within this thesis, a close coupled SCR-catalyst with an extra dosing unit and an extra mixing element is placed in front of the conventional exhaust gas aftertreatment system. Due to the earlier position and the missing heat capacity of the diesel oxidation catalyst and the diesel particulate filter the catalyst reaches the light of temperature more quickly than at the downstream position. Another benefit of the closed coupled system is the higher average temperature level due to less heat loss. Other benefits are the possibility for additional SCR-catalyst volume and less  $\text{N}_2\text{O}$  formation. The disadvantage of lower passive particulate filter regeneration can in part be compensated with an optimized dosing strategy. This setup achieves higher

---

---

conversion rates than the conventional system in both the cold and hot Federal Test Procedure, because of the better low temperature performance.

The system is studied on an engine test bed which is upgraded by providing a real time simulation environment. The simulation provides a realistic load to the engine by simulating the vehicle, the environment as well as the driver. This enables to not only use cycles but also realistic engine loads for evaluating the potential of exhaust gas aftertreatment systems. The temperature and emission profiles observed in reality are reproduced qualitatively with the conventional exhaust gas aftertreatment system. The suitability of the test bed for an optimized development is shown with a variation of different vehicle loads and powertrain systems.

---

---

## Kurzfassung

---

Trotz immer strengerer Emissionsgrenzwerte für neu zugelassene Kraftfahrzeuge werden die Luftqualitätsziele in europäischen Städten nicht erreicht. Vor allem zu den Stickoxidemissionen trägt der Dieselmotor einen großen Teil bei. Dies betrifft auch die Emissionen von Nutzfahrzeugen, die im Fokus dieser Arbeit stehen. Im Zuge der Problematik ist mit einer weiteren Verschärfung der Gesetzgebung zu rechnen. Für den Bereich der Nutzfahrzeuge plant die Environmental Protection Agency und vor allem das California Air Resources Board in den Vereinigten Staaten von Amerika die Einführung von strengeren Grenzwerten in den Zertifizierungszyklen. In Europa ist eine Verschärfung der Testprozedur in Betrieb befindlicher Fahrzeuge bereits beschlossen.

Mit Einführung von Euro IV im Jahr 2005 wurde die selektive katalytische Reduktion (SCR) mittels wässriger Harnstofflösung großflächig in der Abgasnachbehandlung von Nutzfahrzeugen eingesetzt und ist seither eine grundlegende Technologie zur Reduktion von Stickoxidemissionen.

In einer in dieser Arbeit durchgeführten Langzeitstudie über 16 Monate und 189.000 gefahrenen Kilometern in einem Langstreckennutzfahrzeug, bei dem Realemissionen erfasst und statistisch ausgewertet werden, zeigt sich, dass niedrige Temperaturen während der Kaltstartphase und nach dem Schleppbetrieb des Motors zu einer verminderten Stickoxidkonvertierung führen. Während in normaler Fahrt auftretenden höheren Temperaturbereichen stehen dagegen sehr hohe Konvertierungsraten zur Verfügung.

Derzeitige Entwicklungsbemühungen nähern sich der Zielsetzung erhöhter Umsatzraten zur Erreichung zukünftiger Emissionsgrenzwerte auf unterschiedliche Weise. Ein Ansatz ist ein früheres Erreichen des für die SCR notwendigen Temperaturniveaus und ein längeres Verweilen auf ebendiesem Niveau. Hierzu gibt es vielfältige Möglichkeiten, wie z. B. den Einsatz von Technologien zur aktiven Erwärmung des Abgasmassenstroms oder das Verschieben des SCR-Katalysators stromaufwärts im Abgasstrang, um diesen höheren Temperaturen auszusetzen. Die zuletzt genannte Herangehensweise kann z. B. durch die Beschichtung des weiter vorne positionierten Partikelfilters mit einem SCR-Katalysator stattfinden.

In dieser Arbeit wird ein System untersucht, in welchem ein motornaher SCR-Katalysator mit zusätzlicher Dosierung wässriger Harnstofflösung vor dem Dieseloxydationskatalysator platziert wird. Aufgrund des Wegfallens der thermischen Kapazität des Dieseloxydationskatalysators und des Dieselpartikelfilters wird die Light-Off-Temperatur zum einen schneller erreicht, zum anderen kommt es durch die motornaher Position und kürzeren Abgasleitungen zu geringeren Abwärmeverlusten und einer Anhebung des mittleren Temperaturniveaus. Weitere Vorteile bestehen in der

---

---

Option zur Anhebung des SCR-Gesamtkatalysatorvolumens sowie einer verminderten  $\text{N}_2\text{O}$ -Bildung der vorderen SCR-Einheit. Die Nachteile bei der passiven Regeneration des Partikelfilters können teilweise durch eine optimierte Dosierstrategie kompensiert werden. Mit diesem System werden sowohl in der kalten Federal Test Procedure als auch in der warmen Federal Test Procedure deutlich höhere Umsatzraten als mit einem konventionellen System erzielt und insbesondere das Tieftemperaturverhalten verbessert.

Das System wird an einem Motorenprüfstand aufgebaut, der um eine Echtzeitsimulationsumgebung erweitert wird, die es ermöglicht, sowohl das Fahrzeug, als auch die Umgebung und den Fahrer zu simulieren und aus der Simulation heraus den Prüfstandsmotor realistisch anzuregen. Damit können nicht nur Zyklen zur Potentialanalyse, sondern auch realistische Motorenbelastungen aus Realfahrten verwendet werden. Am konventionellen Abgasstrang kann anhand des Auskühlens durch den Schleppbetrieb ein qualitativ ähnliches Temperatur- und Emissionsverhalten am Prüfstand nachgestellt werden, wie dies im Feld beobachtet wird. Die Eignung des Prüfstands für eine optimierte Entwicklung wird anhand einer Beladungs- und einer Antriebskonzeptvariation vorgeführt. Damit sind eine realitätsnahe Versuchsdurchführung und eine gezielte Auswahl von Testfällen für die Systemauslegung möglich.

---

---

---

## Inhaltsverzeichnis

---

|                                                 |          |
|-------------------------------------------------|----------|
| Vorwort des Autors.....                         | 9        |
| Abstract .....                                  | 11       |
| Kurzfassung .....                               | 13       |
| Inhaltsverzeichnis.....                         | i        |
| Abbildungsverzeichnis.....                      | v        |
| Tabellenverzeichnis .....                       | xi       |
| Formelverzeichnis .....                         | xiii     |
| Abkürzungsverzeichnis .....                     | xv       |
| Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes ..... | xix      |
| <b>1 Einleitung .....</b>                       | <b>1</b> |
| <b>2 Grundlagen und Stand der Technik .....</b> | <b>7</b> |
| 2.1 Abgasemissionen .....                       | 7        |
| 2.1.1 Kohlenwasserstoffe .....                  | 7        |
| 2.1.2 Kohlenstoffmonoxide .....                 | 8        |
| 2.1.3 Kohlenstoffdioxide .....                  | 8        |
| 2.1.4 Stickoxide .....                          | 9        |
| 2.1.5 Ammoniak .....                            | 13       |
| 2.1.6 Partikel .....                            | 13       |
| 2.2 Abgas- und Treibhausgasgesetzgebung .....   | 14       |
| 2.2.1 Schwere Nutzfahrzeuge .....               | 15       |
| 2.2.2 Mobile Maschinen und Geräte .....         | 17       |
| 2.2.3 Treibhausgas-Gesetzgebung .....           | 17       |
| 2.3 Abgasnachbehandlungssysteme .....           | 19       |
| 2.3.1 Dieselpartikelfilter .....                | 20       |
| 2.3.2 Dieseloxidationskatalysator .....         | 24       |

|          |                                                                                        |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.3.3    | Selektive katalytische Reaktion .....                                                  | 27        |
| 2.3.4    | Systemauslegung.....                                                                   | 48        |
| 2.4      | Entwicklungsumgebung und Methodik .....                                                | 48        |
| <b>3</b> | <b>Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit.....</b>                                      | <b>51</b> |
| <b>4</b> | <b>Versuchsaufbau.....</b>                                                             | <b>55</b> |
| 4.1      | Versuchsträger Flottenfahrzeug.....                                                    | 55        |
| 4.2      | Prüfstand.....                                                                         | 57        |
| 4.2.1    | EiL-Umgebung.....                                                                      | 57        |
| 4.2.2    | Verbrennungskraftmaschine .....                                                        | 58        |
| 4.2.3    | Harnstoff-Dosiersystem .....                                                           | 59        |
| 4.2.4    | Messtechnik .....                                                                      | 60        |
| 4.3      | Abgasnachbehandlung .....                                                              | 63        |
| 4.3.1    | Gemischtaufbereitung .....                                                             | 63        |
| 4.3.2    | Eingesetzte Katalysatoren.....                                                         | 64        |
| 4.3.3    | Untersuchte AGN-Architektur-Varianten .....                                            | 65        |
| <b>5</b> | <b>Versuchsplanung und -durchführung.....</b>                                          | <b>67</b> |
| 5.1      | Randbedingungen der Feldversuche.....                                                  | 68        |
| 5.2      | Testprozeduren .....                                                                   | 69        |
| 5.2.1    | Federal Test Procedure.....                                                            | 70        |
| 5.2.2    | EiL-Versuche .....                                                                     | 72        |
| 5.3      | Versuchsprogramm zweistufiges SCR.....                                                 | 73        |
| <b>6</b> | <b>Auslegung einer optimierten Gesamt-Dosierstrategie.....</b>                         | <b>75</b> |
| 6.1      | Grundauslegung der Strategie.....                                                      | 76        |
| 6.2      | Berücksichtigung des NH <sub>3</sub> -Schlupfes und der N <sub>2</sub> O-Bildung ..... | 78        |
| 6.3      | Optimierte Gesamtsystemabstimmung der Dosierstrategie.....                             | 79        |
| <b>7</b> | <b>Diskussion der Ergebnisse.....</b>                                                  | <b>83</b> |
| 7.1      | Realemissionen des Flottenfahrzeugs .....                                              | 83        |
| 7.2      | Randbedingungen des Abgasnachbehandlungs-Konzepts .....                                | 92        |

---

---

|                  |                                                                                                       |            |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.2.1            | Dimensionierung des vorgelagerten SCR-Katalysators .....                                              | 92         |
| 7.2.2            | Temperatur und Speicherbetrachtung .....                                                              | 93         |
| 7.2.3            | Betrachtung des $\text{NH}_3$ -Schlupfs und der $\text{N}_2\text{O}$ -Bildung .....                   | 97         |
| 7.3              | Auslegung einer optimierten Gesamtsystem-Dosierstrategie .....                                        | 102        |
| 7.4              | Potentialbewertung des zweistufigen SCR-Systems mit optimierter Gesamtsystem-Dosierstrategie .....    | 109        |
| 7.4.1            | Emissionsvergleich zwischen der Referenz und dem zweistufigen SCR-System im kalten FTP-Zyklus .....   | 109        |
| 7.4.2            | Emissionsvergleich zwischen der Referenz und dem zweistufigen SCR-System im warmen FTP-Zyklus .....   | 117        |
| 7.4.3            | Vergleich der kombinierten Emissionen des FTP-Zyklus .....                                            | 119        |
| 7.5              | Zusammenfassende Analyse des zweistufigen Ansatzes mit optimierter Gesamtsystem-Dosierstrategie ..... | 120        |
| <b>8</b>         | <b>RDE-Entwicklungsumgebung .....</b>                                                                 | <b>123</b> |
| <b>9</b>         | <b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>                                                              | <b>129</b> |
| <b>Anhang</b>    | <b>.....</b>                                                                                          | <b>133</b> |
| A.1              | Statistische Daten Rückfahrt Teil 1 .....                                                             | 133        |
| A.2              | Temperaturverteilung für Referenz und Variante B für den FTP-Zyklus                                   |            |
|                  | 134                                                                                                   |            |
| <b>Literatur</b> | <b>.....</b>                                                                                          | <b>135</b> |



---

## Abbildungsverzeichnis

---

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1-1: Anteil verschiedener Gruppen von Schadstoffemittenten in der europäischen Union am Ausstoß von Stickoxidemissionen (Tista, Gager und Ullrich, 2016) .....                                                                                                                                      | 1  |
| Abbildung 1-2: Entwicklung der NO <sub>2</sub> -Jahresmittelwerte der Messstationen in Deutschland; Ausgewählt wurden diejenigen Stationen, die über den ganzen Zeitraum hinweg gemessen haben (Minkos et al., Januar 2017) .....                                                                             | 2  |
| Abbildung 1-3: Durchschnittliche Stickstoffdioxidkonzentrationen in Europa 2014 (Europäische Umwelt Agentur, 2014) .....                                                                                                                                                                                      | 3  |
| Abbildung 1-4: Basisszenario zur Abschätzung des Dieselanteils bei Nutzfahrzeugen in den USA: Dieselmotor(CI), CI HYBRID, CI Super Truck mit 50 % mehr Ladekapazität (ST) und CI HYBRID ST; Rest: Motor für komprimiertes Erdgas (CNG) und flüssiges Erdgas (LNG) (Askin et al., 2015) .....                  | 4  |
| Abbildung 2-1: Zusammensetzung dieselmotorisches Roh-Abgas (Merker und Teichmann, 2014, S. 472) .....                                                                                                                                                                                                         | 7  |
| Abbildung 2-2: Keeling Kurve (Keeling, 2016) .....                                                                                                                                                                                                                                                            | 9  |
| Abbildung 2-3: Thermodynamisches Gleichgewicht der Stickoxide (Ahari et al., 2015) .....                                                                                                                                                                                                                      | 12 |
| Abbildung 2-4: Selektivität ausgedrückt als N <sub>2</sub> O-Entstehung an unterschiedlichen Katalysatoren, blau: über DOC bei unterschiedlichen HC-Konzentrationen, türkis und gelb über SCR und ASC bei unterschiedlichen NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Verhältnissen. (Kamasamudram et al., 2012)..... | 13 |
| Abbildung 2-5: Übersicht über global geltende Abgasgesetzgebung und die jeweilige Marktgröße (European Federation for Transport and Environment AISBL) .....                                                                                                                                                  | 15 |
| Abbildung 2-6: Vergleich von VECTO und GEM für verschiedene Fahrzeuge und Zyklen (Franco, Delgado und Muncrief, 04.2015) .....                                                                                                                                                                                | 18 |
| Abbildung 2-7: Anstieg des Druckverlusts bei konstantem Motorbetriebspunkt (Gietzelt, 2007) .....                                                                                                                                                                                                             | 21 |
| Abbildung 2-8: DPF-Kontroll-Strategie mittels Differenzdruck über DPF. 1: DPF defekt, 2: unbelasteter DPF, 3: Standard-Arbeitsbereich DPF, 4: belasteter DPF, 5: überladener DPF, 6: verstopfter DPF (Landgraf, 2005, S. 54) .....                                                                            | 22 |
| Abbildung 2-9: Regenerationseffizienz von Ruß mit NO <sub>2</sub> und O <sub>2</sub> dargestellt als CO <sub>2</sub> -Intensität in Abhängigkeit der Temperaturen (Allansson et al., 2002) .....                                                                                                              | 23 |
| Abbildung 2-10: Verminderung der Abbrandgeschwindigkeit aufgrund der Verminderung der Stickoxidemissionen (Soeger et al., 2005) .....                                                                                                                                                                         | 24 |
| Abbildung 2-11: Deaktivierungen am Katalysator. a) idealer Katalysator b) Edelmetallsinterung c) Washcoatsinterung d) selektive Vergiftung e) nicht selektive Vergiftung (nach van Basshuysen und Schäfer, 2015, S. 840–842) .....                                                                            | 26 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 2-12: Aktivität der verschiedenen Technologien in Abhängigkeit der Temperatur (Werner Mueller, 2011) .....                                                                                                                                                                                      | 30 |
| Abbildung 2-13: Abhängigkeit der Konvertierung (Isolinien) von Temperatur und Raumgeschwindigkeit; gestrichelte Linien stellen die Motordrehzahl dar (Schär et al., 2004b) .....                                                                                                                          | 31 |
| Abbildung 2-14: Speichervolumina für verschiedene Katalysatortechnologien, einfarbig: ungealterter Katalysator, schraffiert: gealterter Katalysator (Pittner, Herberger und Kurth, 2013) .....                                                                                                            | 32 |
| Abbildung 2-15: NO <sub>x</sub> -Reduktion über NH <sub>3</sub> -Speicherbeladung für Cu-Katalysatoren; durchgezogene Linie: T= 210 °C und RG = 21000 l/h, gepunktete Linie: T = 290 °C und RG = 30000 l/h, Strich-Punkt-Linie: T = 370 °C und RG = 65000 °l/h (Pittner, Herberger und Kurth, 2013) ..... | 32 |
| Abbildung 2-16: Speicher von Fe-Z und Cu-Z in Abhängigkeit der Temperatur (Zimmermann, 2014) .....                                                                                                                                                                                                        | 33 |
| Abbildung 2-17: Unerwünschte Reaktionen Ammoniak bei 500 ppm NH <sub>3</sub> und 2 % O <sub>2</sub> (Winkler et al., 2003) .....                                                                                                                                                                          | 35 |
| Abbildung 2-18: NO <sub>x</sub> -Umsetzungsgrad in Abhängigkeit der N <sub>2</sub> O-Emissionen (Zimmermann, 2014) .....                                                                                                                                                                                  | 37 |
| Abbildung 2-19: Bosch Helix Mixing Section (HMS) aus (Hammer et al., 2016) .....                                                                                                                                                                                                                          | 39 |
| Abbildung 2-20: Harnstoffzersetzung als Abnahme der Gesamtmasse über der Temperatur (Schaber et al., 2004) .....                                                                                                                                                                                          | 41 |
| Abbildung 2-21: Struktur der Dosiermengenregelung nach (Schmitt, 2013, S. 66) ...                                                                                                                                                                                                                         | 42 |
| Abbildung 2-22 modellbasiertes Regelungskonzept für Non-Road-Anwendungen (Schilling, Kiwitz und Wallmüller, 2014) .....                                                                                                                                                                                   | 43 |
| Abbildung 2-23 Regelkonzept nach (Hisao et al., 2014) .....                                                                                                                                                                                                                                               | 44 |
| Abbildung 2-24: VKM durchgängiger Entwicklungsprozess und –umgebung (Maschmeyer, Schmidt und Beidl, 2015) .....                                                                                                                                                                                           | 50 |
| Abbildung 3-1: Konzept zur Erreichung niedrigster Stickoxidemissionen .....                                                                                                                                                                                                                               | 51 |
| Abbildung 3-2: Dem hier vorgestellten Ansatz vergleichbare Konzepte; a) nach (Bülte und Schraml, 2013), b) nach (Gietzelt, 2007) und (Müller, 2011), c) nach (Cloudt et al., 2009) .....                                                                                                                  | 52 |
| Abbildung 4-1: Aufbau des verwendeten RDE-Prüfstands, abgeändert nach (Maschmeyer, Schmidt und Beidl, 2015) .....                                                                                                                                                                                         | 58 |
| Abbildung 4-2: Schema Harnstoffdosiersystem. Abbildung Dosiermodul Denoxtronic abgeändert nach (Bosch Emission Systems GmbH & Co. KG) .....                                                                                                                                                               | 60 |
| Abbildung 4-3: Mess- und Dosierstellen .....                                                                                                                                                                                                                                                              | 61 |
| Abbildung 4-4: Konfigurationsmöglichkeiten des AGN-Systems .....                                                                                                                                                                                                                                          | 65 |
| Abbildung 5-1: Anwendung der VKM-Entwicklungsmethodik für den vorliegenden Fall (nach Maschmeyer, Schmidt und Beidl, 2015) .....                                                                                                                                                                          | 67 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 5-2: Vorgehen zur Untersuchung des Ansatzes mit vorgelagertem SCR-System .....                                                                                                                                                                        | 68 |
| Abbildung 5-3: Höhenprofil der Realfahrt-Strecken .....                                                                                                                                                                                                         | 69 |
| Abbildung 5-4: FTP normierte Drehzahl- und Last-Vorgaben (Ecopoint Inc.) .....                                                                                                                                                                                  | 70 |
| Abbildung 5-5: Ablaufplan Untersuchungen.....                                                                                                                                                                                                                   | 71 |
| Abbildung 5-6: EV-Trailer-Konzept; links oben: Aufbau des Anhängers, rechts oben: Sensor zur Zugkrafterfassung, links unten: elektrische Traktionsunterstützung, rechts unten: Rekuperation der Bremsenergie (Dautfest und Thiem, 1. Juni 2017) .....           | 73 |
| Abbildung 6-1: Basisstrategie zur Dosierung von WHL.....                                                                                                                                                                                                        | 77 |
| Abbildung 6-2: Gesamtsystemabstimmung.....                                                                                                                                                                                                                      | 80 |
| Abbildung 6-3: <i>Abgestimmte Dosierstrategie</i> des vorderen SCR-Systems .....                                                                                                                                                                                | 81 |
| Abbildung 7-1: Konvertierung des Systems über der Temperatur vor SCR (abgeändert nach von Pyschow, Geißelmann und Beidl, 2017) .....                                                                                                                            | 88 |
| Abbildung 7-2: Temperaturverteilung des Versuchsfahrzeugs vor SCR und vor DOC über einen Zeitraum von 16 Monaten; links: Temperaturverteilung aller Messpunkte, rechts: Temperaturverteilung aller Messpunkte, bei denen T vor SCR kleiner als 250 °C ist ..... | 89 |
| Abbildung 7-3: Kaltstart-Emissionen der Hinfahrt auf den ersten 5 km (abgeändert nach von Pyschow, Geißelmann und Beidl, 2017) .....                                                                                                                            | 90 |
| Abbildung 7-4: Auskühlung des AGN-Systems durch Schleppbetrieb auf dem zweiten Teil der Rückfahrt, Kilometer 35 bis 65 (abgeändert nach von Pyschow, Geißelmann und Beidl, 2017) .....                                                                          | 91 |
| Abbildung 7-5: Vergleich des Druckanstiegs im FTP-Zyklus über die AGN-Systeme mit SCR-Vorkatalysator im Vergleich zum Referenzsystem, 7,5“ und 10,5“ für SCR1.....                                                                                              | 93 |
| Abbildung 7-6: gemittelte Druckdifferenzen im FTP-Zyklus über die AGN-Systeme mit SCR- Vorkatalysator im Vergleich zum Referenzsystem, 7,5“ und 10,5“ für SCR1.....                                                                                             | 93 |
| Abbildung 7-7: Temperatur vor, im (2,5 cm von der Rückseite) und nach SCR1 Variante B, FTP-10min .....                                                                                                                                                          | 94 |
| Abbildung 7-8, Effekt der Temperaturdynamik auf das Umsatzverhalten im SCR1, Variante B, FTP-10min .....                                                                                                                                                        | 95 |
| Abbildung 7-9: Temperatur vor, im (2,5 cm von der Vorderseite und 2,5 cm von der Hinterseite platziert) und nach SCR2 Variante D, FTP-10min .....                                                                                                               | 95 |
| Abbildung 7-10: Speicherverlauf des SCR-Katalysators über den FTP für SCR1 und SCR2 Variante B in der <i>Basisstrategie</i> , FTP-10min .....                                                                                                                   | 96 |
| Abbildung 7-11: Temperatur in SCR2 für Referenz, Variante A/D und Variante B/C, FTP-10min .....                                                                                                                                                                 | 97 |
| Abbildung 7-12: N <sub>2</sub> O-Entstehung ohne Dosierung wässriger Harnstofflösung Variante A, FTP-10min .....                                                                                                                                                | 98 |
| Abbildung 7-13: NH <sub>3</sub> -Oxidation zu N <sub>2</sub> O über den DOC Variante A, FTP-10min .....                                                                                                                                                         | 99 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 7-14: oben: $\text{N}_2\text{O}/\text{NH}_3$ -Stoffmengenverhältnis über Temperatur vor DOC; unten: Molare Menge an $\text{NH}_3$ und $\text{N}_2\text{O}$ über Temperatur vor DOC, Variante A, FTP-10min .....                                                                                         | 100 |
| Abbildung 7-15: Vergleich der Emissionen Variante A, B und C, FTP-10min .....                                                                                                                                                                                                                                     | 101 |
| Abbildung 7-16: $\text{N}_2\text{O}$ -Bildung über das Gesamtsystem für die jeweils optimal ausgelegte Dosierstrategie, Referenz, Variante B mit <i>Basis-</i> und <i>abgestimmter Dosierstrategie</i> und Variante D mit <i>Basisstrategie</i> , FTP-10min.....                                                  | 102 |
| Abbildung 7-17: THC und CO nach SCR1 ohne und mit zonierte/hochbeladenem Schlupfkatalysator, FTP-10min .....                                                                                                                                                                                                      | 102 |
| Abbildung 7-18: Dosierung WHL Vergleich mit und ohne <i>abgestimmte Strategie</i> , FTP-10min .....                                                                                                                                                                                                               | 103 |
| Abbildung 7-19: Vergleich maximal möglicher Speicherfüllstand, Soll-Speicherfüllstand und Ist-Speicherfüllstand der <i>Basis-</i> und der <i>abgestimmten Strategie</i> für den SCR1, FTP-10min .....                                                                                                             | 104 |
| Abbildung 7-20: Vergleich SCR2-Speicherfüllstand der <i>Basis-</i> und der <i>abgestimmten Strategie</i> , FTP-10min.....                                                                                                                                                                                         | 105 |
| Abbildung 7-21: Variante B mit <i>abgestimmter Dosierstrategie</i> , Vergleich der Konvertierung SCR1 und SCR2 über die Temperatur im SCR2, FTP (kalt) .....                                                                                                                                                      | 105 |
| Abbildung 7-22: Vergleich kumulierte $\text{NO}_x$ -Massen; <i>Basis-</i> gegen <i>abgestimmte Dosierstrategie</i> , FTP-10min.....                                                                                                                                                                               | 106 |
| Abbildung 7-23: Messung FTIR nach SCR2; in der <i>Basisstrategie</i> entsteht mehr $\text{N}_2\text{O}$ , FTP-10min.....                                                                                                                                                                                          | 107 |
| Abbildung 7-24: HWL-Dosiermenge und $\text{N}_2\text{O}$ -Masse über Temperatur nach SCR1, FTP-10min .....                                                                                                                                                                                                        | 108 |
| Abbildung 7-25: Vergleich <i>Basis-</i> und <i>abgestimmte Strategie</i> , FTP-20min + 10xWHTC .....                                                                                                                                                                                                              | 109 |
| Abbildung 7-26: Temperaturverläufe für die jeweiligen SCR-Katalysatoren im kalten FTP-Zyklus, FTP (kalt) .....                                                                                                                                                                                                    | 111 |
| Abbildung 7-27: Vergleich der Konvertierungen über die einzelnen Messstellen für die Referenz und das zweistufige SCR-System mit <i>abgestimmter Strategie</i> , FTP (kalt)...                                                                                                                                    | 112 |
| Abbildung 7-28: Konvertierung über SCR1 in Variante B mit <i>Basisstrategie</i> oben und über SCR2 in der Referenz unten mit unabhängigen Dosierstrategien, FTP (kalt) ...                                                                                                                                        | 113 |
| Abbildung 7-29: Kumulierte $\text{NO}_x$ -Rohemissionen über $T_{\text{SCR1}}$ und $T_{\text{SCR2}}$ Variante B; rot: $T_{\text{SCR1}} + T_{\text{SCR2}} < T_{\text{Light-Off}}$ , gelb: Potential SCR1, grün: $T_{\text{SCR1}} + T_{\text{SCR2}} > T_{\text{Light-Off}}$ , blau: nicht relevant, FTP (kalt)..... | 114 |
| Abbildung 7-30: Vergleich der $\text{NO}_x$ -Masse vor und nach SCR2 über die Temperatur für Referenz und Variante B, FTP (kalt) .....                                                                                                                                                                            | 115 |
| Abbildung 7-31: $\text{NO}_x$ -Konvertierung über SCR2 kumuliert über $T_{\text{nach SCR2}}$ für die Referenz und Variante B mit <i>abgestimmter Dosierstrategie</i> , FTP (kalt) .....                                                                                                                           | 116 |

---

|                                                                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 7-32: Vergleich der NO <sub>2</sub> -Anteile vor SCR2, klassiert nach Temperatur, FTP (kalt) .....                                                                              | 116 |
| Abbildung 7-33: Vergleich Referenz und Variante B, FTP (warm) .....                                                                                                                       | 117 |
| Abbildung 7-34: Vergleich Variante B mit <i>abgestimmter Dosierstrategie</i> zur Referenz, FTP (warm) .....                                                                               | 118 |
| Abbildung 7-35: Temperaturverhalten in der warmen FTP für SCR1 Variante B und SCR2 Referenz .....                                                                                         | 118 |
| Abbildung 7-36: NO <sub>x</sub> -Konvertierung über SCR2 kumuliert über T <sub>nach SCR2</sub> für die Referenz und Variante B mit <i>abgestimmter Dosierstrategie</i> , FTP (warm) ..... | 119 |
| Abbildung 7-37: Erreichung der gesetzlichen Grenzwerte der Systeme .....                                                                                                                  | 120 |
| Abbildung 8-1: Vergleich von Geschwindigkeiten, normierten Leistungen, Temperaturen und Höhen zwischen Realfahrt und RDE-Prüfstandsversuch .....                                          | 124 |
| Abbildung 8-2: Vergleich der Stickoxidkonzentrationen nach AGN-System für die Realfahrt und den Prüfstandsversuch .....                                                                   | 124 |
| Abbildung 8-3: Motormomente und Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der Beladung und der Unterstützung durch einen elektrifizierten Anhänger (ev) .....                                     | 125 |
| Abbildung 8-4: Stickoxidemissionen und Temperaturen im SCR2 über die Strecke in Abhängigkeit der Beladung und der Unterstützung durch einen elektrifizierten Anhänger (ev) .....          | 126 |
| Abbildung 8-5: Stickoxidemissionen vor und nach AGN über die Strecke in Abhängigkeit unterschiedlicher Beladungen und der Unterstützung durch einen elektrifizierten Anhänger (ev) .....  | 126 |



---

## Tabellenverzeichnis

---

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 4-1: Im Schalldämpfer eingesetzte Katalysatoren.....                                                           | 56 |
| Tabelle 4-2: Messgrößen im Fahrzeug.....                                                                               | 56 |
| Tabelle 4-3: Technische Eigenschaften des Versuchsmotors .....                                                         | 59 |
| Tabelle 4-4: Standardmessstellenbelegung der eingesetzten Abgasmesstechnik.....                                        | 62 |
| Tabelle 4-5: eingesetzte Substrate .....                                                                               | 64 |
| Tabelle 5-1: Versuchsmatrix der EiL-Tests .....                                                                        | 73 |
| Tabelle 6-1: Eingesetzte Dosierstrategien.....                                                                         | 81 |
| Tabelle 7-1: Übersicht über die Kennwerte der Fahrzeugvermessung.....                                                  | 84 |
| Tabelle 7-2: statistische Daten allgemeiner Kennwerte der Hinfahrt .....                                               | 85 |
| Tabelle 7-3: statistische Daten allgemeiner Kennwerte der Rückfahrt Teil 2 .....                                       | 85 |
| Tabelle 7-4: statistische Daten der Kennwerte des AGN-Systems der Hinfahrt .....                                       | 86 |
| Tabelle 7-5: statistische Daten der Kennwerte des AGN-Systems der Rückfahrt Teil 2 .....                               | 87 |
| Tabelle 7-6: Anteil der Stickoxidemissionen und der Zeit für Temperaturen kleiner als 250 °C vor SCR-Katalysator ..... | 91 |



---

## Formelverzeichnis

---

|                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Formel 2-1: erweiterter Zeldovich Mechanismus (Merker und Teichmann, 2014, S. 495)                                                                       | 10 |
| Formel 2-2: erweiterter Zeldovich Mechanismus (Merker und Teichmann, 2014, S. 495)                                                                       | 10 |
| Formel 2-3: erweiterter Zeldovich Mechanismus (Merker und Teichmann, 2014, S. 495)                                                                       | 10 |
| Formel 2-4: N <sub>2</sub> O-Mechanismus – N <sub>2</sub> O-Bildung (Merker und Teichmann, 2014, S. 500)                                                 | 11 |
| Formel 2-5: N <sub>2</sub> O-Mechanismus – Reaktion zu NO (Merker und Teichmann, 2014, S. 500)                                                           | 11 |
| Formel 2-6: Thermolyse-Reaktion (Koebel, Elsener und Kleemann, 2000)                                                                                     | 27 |
| Formel 2-7: Hydrolyse-Reaktion (Koebel, Elsener und Kleemann, 2000)                                                                                      | 27 |
| Formel 2-8: Standard-SCR-Reaktion (DEVADAS et al., 2006)                                                                                                 | 28 |
| Formel 2-9: schnelle SCR-Reaktion nach (DEVADAS et al., 2006)                                                                                            | 28 |
| Formel 2-10: langsame SCR-Reaktion nach (DEVADAS et al., 2006)                                                                                           | 28 |
| Formel 2-11: NH <sub>3</sub> -Oxidation über 400 °C für Vanadium-Katalysatoren (Koebel, Elsener und Madia, 2001)                                         | 34 |
| Formel 2-12: NH <sub>3</sub> -Oxidation bei noch höheren Temperaturen für Vanadium-Katalysatoren (Koebel, Elsener und Madia, 2001, Winkler et al., 2003) | 34 |
| Formel 2-13: N <sub>2</sub> O-Bildung bei Vanadiumkatalysatoren                                                                                          | 34 |
| Formel 2-14: N <sub>2</sub> O-Bildung bei Temperaturen unterhalb von 350 °C (DEVADAS et al., 2006)                                                       | 35 |
| Formel 2-15: N <sub>2</sub> O-Bildung bei Temperaturen unterhalb von 350 °C (DEVADAS et al., 2006)                                                       | 35 |
| Formel 2-16: Globale Reaktion zur N <sub>2</sub> O-Entstehung bei Kupfer Zeolithen (Colombo, Nova und Tronconi, 2010)                                    | 35 |
| Formel 6-1: NH <sub>3</sub> -Konzentrations-Bilanz am SCR-Katalysator (Fischer et al., 2014)                                                             | 76 |
| Formel 6-2: Integral zur Bestimmung der Größe des NH <sub>3</sub> -Speichers (Fischer et al., 2014)                                                      | 76 |



---

## Abkürzungsverzeichnis

---

|      |                                                                            |
|------|----------------------------------------------------------------------------|
| AGN  | Abgasnachbehandlung                                                        |
| AGR  | Abgasrückführung                                                           |
| AMA  | Abgasmessanlage                                                            |
| ANR  | Ammonia to NO <sub>x</sub> Ratio – Ammoniak zu NO <sub>x</sub> -Verhältnis |
| ASC  | Ammonia Slip Catalyst – Ammoniak-Schlupf-Katalysator                       |
| ASCh | hoch beladener ASC                                                         |
| ASCz | zonierter ASC                                                              |
| CAN  | Controller Area Network – serielles Bussystem                              |
| CARB | California Air Resource Board                                              |
| CDPF | Mit DOC-Katalysator beschichteter Partikelfilter                           |
| CF   | Conformity Factor – Übereinstimmungsfaktor                                 |
| CFR  | Code of Federal Regulation – Richtlinie in den USA                         |
| CI   | Compression Ignition - selbstzündend                                       |
| cpsi | cells per square inch – Zellen pro Quadratzoll                             |
| CRT  | Continuous Regeneration Trap – Passive Regeneration des DPF                |
| Cu-Z | Kupfer-Zeolith                                                             |
| CVS  | Constant Volume Sampling - Vollstromverdünnung                             |
| DOC  | Diesel Oxidation Catalyst – Diesel Oxidationskatalysator                   |
| DPF  | Dieselpartikelfilter                                                       |
| EG   | Europäische Gemeinschaft                                                   |
| EiL  | Engine-in-the-Loop – Motorenprüfstand mit Echtzeitsimulationsumgebung      |
| EN   | Europäische Norm                                                           |
| EPA  | Environmental Protection Agency                                            |
| EU   | Europäische Union                                                          |
| Fe-Z | Eisen-Zeolith                                                              |

---

---

|      |                                                                                |
|------|--------------------------------------------------------------------------------|
| FTIR | Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer                                   |
| FTP  | Federal Test Procedure - Test-Prozedur der amerikanischen Homologation         |
| GEM  | Greenhouse gas Emission Model – Werkzeug zur CO <sub>2</sub> -Berechnung       |
| GPS  | Globales Positionsbestimmungssystem                                            |
| GTR4 | Globale Technische Regelung Nummer 4                                           |
| HDV  | Heavy Duty Vehicles – Schwere Nutzfahrzeuge                                    |
| HiL  | Hardware-in-the-Loop – Simulation der Ein- und Rückführgrößen für die Hardware |
| HLB  | Hydraulische Leistungsbremse                                                   |
| ISC  | In-Service-Conformity – Konformität in Betrieb befindlicher Fahrzeuge          |
| ISO  | Internationale Organisation für Standardisierung                               |
| LAFY | Los Angeles Freeway                                                            |
| LANF | Los Angeles Non Freeway                                                        |
| LDT  | Light Duty Trucks – Leichte Nutzfahrzeuge                                      |
| MDE  | Messdatenerfassungssystem                                                      |
| mil  | milli-inch – milli-Zoll                                                        |
| NRMM | Non Road Mobile Machinery – Mobile Arbeitsmaschinen                            |
| NFZ  | Nutzfahrzeug                                                                   |
| NYNF | New York Non Freeway                                                           |
| PEMS | Portables Emissions-Messsystem                                                 |
| PKW  | Personenkraftwagen                                                             |
| PM   | Partikel Masse                                                                 |
| PNA  | Passiver NO <sub>x</sub> -Adsorber                                             |
| PWM  | Pulsweitenmodulation                                                           |
| RDE  | Real Driving Emissions – Realfahrtemissionen                                   |

---

---

|       |                                                                                                 |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SCR   | catalyst for Selective Catalytic Reduction – Katalysator zur selektiven katalytischen Reduktion |
| SCR1  | vorgelagertes SCR-System                                                                        |
| SCR2  | nachgelagertes SCR-System                                                                       |
| SCRf  | Dieselpartikelfilter mit SCR-Katalysator-Beschichtung                                           |
| SET   | Supplemental Emissions Test – Test-Prozedur der amerikanischen Homologation                     |
| UMTS  | Universales Mobiles Telekommunikationssystem                                                    |
| VECTO | Vehicle Energy Consumption calculation Tool – Werkzeug zur Berechnung des Energieverbrauchs     |
| VKM   | Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe                                    |
| VWT   | Vanadium-, Wolfram- und Titanoxid                                                               |
| WHL   | Wässrige Harnstoff-Lösung                                                                       |
| WHSC  | World Harmonized Stationary Cycle – Stationärer Prüfzyklus für NFZ                              |
| WHTC  | World Harmonized Transient Cycle – Transienter Prüfzyklus für NFZ                               |



---

## Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes

---

### Lateinische Buchstaben

| Zeichen | Einheit        | Bezeichnung                      |
|---------|----------------|----------------------------------|
| ANR     | -              | Ammoniak zu Stickoxid-Verhältnis |
| n       | 1/min          | Motordrehzahl                    |
| n       | mol            | Stoffmenge                       |
| p       | bar            | Druck                            |
| M       | Nm             | Moment                           |
| RG      | 1/h            | Raumgeschwindigkeit              |
| t       | s              | Zeit                             |
| T       | °C             | Temperatur                       |
| v       | km/h           | Geschwindigkeit                  |
| V       | m <sup>3</sup> | Volumen                          |
| W       | kWh            | Arbeit                           |

### Griechische Buchstaben

| Zeichen   | Einheit           | Bezeichnung                        |
|-----------|-------------------|------------------------------------|
| $\alpha$  | -                 | Lastanforderung                    |
| $\Delta$  | -                 | Differenz                          |
| $\lambda$ | -                 | Verbrennungsluftverhältnis         |
| $\rho$    | kg/m <sup>3</sup> | Dichte                             |
| $\sigma$  | -                 | Standardabweichung                 |
| $\Theta$  | -                 | NH <sub>3</sub> -Speicherfüllstand |

## Chemische Symbole

| Zeichenfolge                    | Bezeichnung                     |
|---------------------------------|---------------------------------|
| $\text{Al}_2\text{O}_3$         | Aluminiumoxid                   |
| $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ | Harnstoff                       |
| $\text{CO}$                     | Kohlenstoffmonoxid              |
| $\text{CO}_2$                   | Kohlenstoffdioxid               |
| $\text{Cu}$                     | Kupfer                          |
| $\text{Fe}$                     | Eisen                           |
| $\text{H}/\text{H}_2$           | Wasserstoff-Atom/Molekül        |
| $\text{H}_2\text{O}$            | Wasser                          |
| $\text{HC}$                     | unverbrannte Kohlenwasserstoffe |
| $\text{HCN}$                    | Blausäure                       |
| $\text{HNCO}$                   | Isocyanat                       |
| $\text{MgO}$                    | Magnesiumoxid                   |
| $\text{N}/\text{N}_2$           | Stickstoff-Atom/Molekül         |
| $\text{N}_2\text{O}$            | Distickstoffmonoxid/Lachgas     |
| $\text{N}_2\text{O}_3$          | Distickstofftrioxid             |
| $\text{N}_2\text{O}_4$          | Distickstofftetraoxid           |
| $\text{N}_2\text{O}_5$          | Distickstoffpentoxid            |
| $\text{NH}_3$                   | Ammoniak                        |
| $\text{NO}$                     | Stickstoffmonoxid               |
| $\text{NO}_2$                   | Stickstoffdioxid                |
| $\text{NO}_3$                   | Nitrat                          |
| $\text{NO}_x$                   | Stickoxide                      |
| $\text{O}/\text{O}_2$           | Sauerstoff-Atom/Molekül         |
| $\text{OH}$                     | Hydroxyl-Radikal                |
| $\text{SiO}_2$                  | Siliziumoxid                    |

---

## Indizes

| Zeichenfolge | Bezeichnung                         |
|--------------|-------------------------------------|
| ECU          | Fahrzeugsteuergerät                 |
| GPS          | Globales Positionsbestimmungssystem |
| ist          | tatsächlicher Stand                 |
| max          | Maximum                             |
| min          | Minimum                             |
| SCR1         | vorgelagertes SCR-System            |
| SCR2         | nachgelagertes SCR-System           |
| soll         | Sollwert-Vorgabe                    |