



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology



Institut für Fahrzeugantriebe
& Automobiltechnik

Dissertation

Herausforderungen und Lösungsansätze bei der Gestaltung von Diesellabgasanlagen zur Selektiven Katalytischen Reduktion

Ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
technischen Wissenschaften unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr. techn. Dipl.-Ing. Bernhard Geringer

E315

Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Dipl.-Ing. René Bitto

Matrikelnummer 9925037

Thürnlhofstraße 5/8/826, 1110 Wien

Wien, am 14. Februar 2014

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Universitäts-Assistent am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik (IFA) an der Technischen Universität Wien im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte mit Partnern der Industrie.

Mein besonderer Dank gilt dem Institutsvorstand Univ. Prof. Bernhard Geringer für die Betreuung dieser Dissertation und der Ermöglichung einer sehr selbstständigen Aufarbeitung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr. Winter danke ich für das Interesse an dieser Arbeit, die Übernahme der Zweitbetreuung und der damit verbundenen Mühe.

Meinen Kollegen danke ich für die gute Zusammenarbeit, viele wertvolle Diskussionen und den darüber hinaus freundschaftlichen Umgang. Namentlich erwähnen möchte ich Herrn Dr. Markus Kieberger, mit dem ich viele gemeinsame Bürostunden verbringen durfte und eine sehr wertvolle Freundschaft entstanden ist. Der Dank zur Unterstützung bei zahlreichen Aufbau-, Umbau- und Reparaturarbeiten gebührt Herrn Ing. Christian Bauer und allen fleißigen Mitarbeitern im Werkstättenbereich. Ohne ihre schnelle und effiziente Hilfe würde der Prüfstandbetrieb zum Erliegen kommen.

Herzlicher Dank gebührt meinen Eltern, die meinen schulischen und beruflichen Werdegang in allen Lebenslagen ermöglicht und unterstützt haben.

Schließlich gebührt mein Dank unseren Industriepartnern, Herrn Dr. Berthold Keppeler von der Daimler AG aus dem Bereich Vorentwicklung Dieselmotoren, Herrn Dr. Stefan Zarl von der BMW Motoren GmbH und Partnern der Jaguar-Land Rover Ltd., für die Ermöglichung der gemeinsamen Forschungsprojekte.

Kurzfassung

Bei der Gestaltung von Dieselaabgasanlagen zur selektiven katalytischen Reduktion (SCR) von Stickoxiden für den Fahrzeugeinsatz sind verschiedene Aspekte zu beachten. Hauptziel ist die ideale Aufbereitung und Gleichverteilung des in den Abgasstrang eingebrachten Reduktionsmittels AdBlue®. Die Durchmischung kann durch Maßnahmen wie verschiedene Dosierwinkel und Abgasrohrführungen verbessert werden. Scheinbar unerlässlich ist jedoch der Einsatz eines Mischelements, welches die Gleichverteilung wesentlich verbessern kann. Abgesehen von unterschiedlichen geometrischen Formen kommt auch der Oberfläche des Mixers eine entscheidende Funktion zu. Allen Mixern gemein ist jedoch die ungünstige Erhöhung des Gegendrucks in der Abgasanlage. Es gilt somit Methoden zu finden Mischelemente auf ihre Gleichverteilungsfähigkeit und gleichzeitig ihr Gegendruckverhalten hin zu untersuchen und zu beurteilen. Dies ist ein wesentlicher Teil dieser Arbeit. Gleichzeitig treten bei der Dosierung von AdBlue® unterschiedliche Ablagerungserscheinungen in der Abgasanlage auf. Die wohl kritischste Stelle für Ablagerungen stellt dabei die Düsenspitze des Injektors dar. Auf deren Entstehungsmechanismen und -gründe wurde daher besonderes Augenmerk gelegt. Schließlich konnte mit der Untersuchung von Anlagen zur gasförmigen Einbringung eines Reduktionsmittels auf die Einsatzfähigkeit alternativer Systeme rückgeschlossen werden.

Abstract

The design of diesel exhaust systems for selective catalytic reduction (SCR) of nitrogen oxides requires the consideration of different aspects. The main aim is the ideal conditioning and uniformity of the reducing agent AdBlue®, which is injected in the exhaust gas system. Measures like different dosing angles and exhaust pipe conductions may improve the mixing. Nevertheless, the use of a mixing element, which is able to ameliorate the uniformity essentially, seems to be indispensable. Apart from different geometric forms a crucial function must also be attached to the mixer's surface. However, what all mixers have in common is the raise of counterpressure inside the exhaust system. Therefore it is necessary to find methods in order to examine and evaluate the mixing elements' equipartition-ability and its counterpressure properties simultaneously. This is a substantial part of this paper. In the same time different appearances of deposits associated with the dosing of AdBlue® occur in the exhaust system. The perhaps most critical spot for deposits is the nozzle tip. Special attention was therefore put on their origination mechanisms and reasons. Finally inferences about the availability of alternative systems could be drawn from the examination of systems for the gaseous insertion of a reducing agent.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Motivation und Zielsetzung.....	3
3	Dieselaabgasemissionen – Entstehung und Minderung	5
3.1	Dieselaabgasemissionen	5
3.1.1	Kohlenmonoxid CO.....	7
3.1.2	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe HC.....	7
3.1.3	Stickoxide NO _x	8
3.1.4	Partikelemissionen PM	12
3.2	Abgasminderung.....	13
3.2.1	Diesel-Oxidations-Katalysator.....	13
3.2.2	Diesel-Partikel-Filter (DPF)	15
3.2.3	Stickoxidminderung	16
4	Selektive Katalytische Reduktion	21
4.1	AdBlue®.....	24
4.2	NH ₃ -Schlupf	26
4.3	SCR im Nutzfahrzeug	27
4.4	Erfahrungen mit Drallelementen	27
4.5	Wandfilmbildung und Ablagerungen	29
4.5.1	Ablagerungsbildung	30
4.5.2	Leidenfrost-Effekt.....	34
4.5.3	Injektor.....	36
5	Programm und entwickelte Methoden.....	38
5.1	Prüfstandsufbau.....	38
5.1.1	Bestimmung der Dosiermenge	42
5.2	Untersuchungen am geschlossenen Katalysatoraustritt	43
5.3	Untersuchungen am offenen Katalysatoraustritt	44

5.4	Berechnung der Gleichverteilungszahl	46
5.4.1	Beispiel für einen negativen Messeinfluss:	49
5.5	Verwendete Betriebspunkte zur Untersuchung der Gleichverteilung	50
5.6	Messung der Druckverluste im Abgassystem	51
5.7	Bildung von Ablagerungen am Prüfstand.....	52
5.7.1	Düsen Spitze	57
5.7.2	Mischer	61
5.7.3	Mischrohr	62
5.7.4	Chemische Analyse von Ablagerungen	64
5.8	NH ₃ -Gasdosierung zur Beurteilung alternativer Reduktionsmittel.....	66
6	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen und Diskussion der erlangten Erkenntnisse	68
6.1	Untersuchungen zur Gleichverteilung	68
6.1.1	Mischergeometrien	69
6.1.2	Mischer mit alternativen Oberflächen	73
6.1.3	Abgasanlagen ohne Mischer	77
6.1.4	Variation der Mischstreckendimensionen	79
6.1.5	Dosierposition und -winkel.....	85
6.1.6	Düsenbauformen, Spraykegelwinkel	89
6.1.7	Variation des Harnstoffeinspritzdrucks	92
6.2	Wechselwirkung zwischen erzielter Gleichverteilung und verursachtem Abgasgegendruck	97
6.2.1	Druckkorrigierte Gleichverteilungszahl nach Bitto.....	99
6.3	Einflussgrößen zur Ablagerungsbildung am Düsensitz.....	105
6.3.1	Gestaltung der Zulaufstrecke.....	106
6.3.2	Düsenvergleich im Zuge eines Benchmarks.....	110
6.3.3	Detaillierte Untersuchung des Aufbaus von Ablagerungen an der Spitze des Harnstoffinjektors	119

6.3.4	Highspeed-Aufnahmen des Injektors.....	125
6.4	Möglichkeiten zur Ablagerungsreduktion in Entkoppelementen.....	140
6.5	Konstruktive Maßnahmen zur schnelleren Erreichung der Betriebstemperatur des SCR-Systems.....	146
6.6	Beurteilung der Alternative NH ₃ -Gasdosierung.....	151
7	Ausblick.....	154
8	Zusammenfassung.....	156
9	Literaturverzeichnis	159

Abkürzungen und Formelzeichen

AGR	Abgasrückführung
$(\text{H}_2\text{NCO})_2\text{CO}$	Biuret
$(\text{HNCO})_3$	Cyanursäure
$(\text{HNCO})_n$	Cyamelid
$(\text{NH}_2)_4(\text{CO})_3$	Triuret
B _{Pi}	Betriebspunkt i (i=1, 2, 3,...)
c	Mittelwert der NH ₃ -Konzentration in ppm
$\text{C}_3\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_2$	Ammelid
$\text{C}_3\text{H}_5\text{N}_5\text{O}$	Ammelin
$\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$	Melamin
cDPF	Catalysed Diesel Particulate Filter
$\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$	Harnstoff
c _i	NH ₃ -Konzentration in Punkt i in ppm
CLD	Chemolumineszenzdetektor
c _{NO_x}	Stickoxidkonzentration in ppm
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
CSF	Catalysed Soot Filter
d _{TR}	Tropfendurchmesser
DOC	Diesel Oxidations Katalysator
DPF	Diesel Partikel Filter
EKE	Entkoppelement
EOP	End of Pipe
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
GDU	Gas Dosing Unit
GuFo	Guanidiniumformiat
H ₂ O	Wasser
HC	Kohlenwasserstoff
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition
HCN	Blausäure
HCLI	Homogeneous Charge Late Injection
HNCO	Isocyanensäure
HNO ₃	Salpetersäure
HPLI	Highly Premixed Late Injection
LambdaBS	Lambda Brettschneider
m	Masse in kg
m	Massenstrom in kg/h
m _{Abgas}	Abgasmassenstrom in g/h
M _{Abgas}	Molmasse des Abgases in g/mol
m _{AdBlue}	AdBlue®-Massenstrom g/h bzw. mg/s
M _d	Motormoment in Nm
m _{NH₃}	NH ₃ -Massenstrom in g/h
M _{NH₃}	Molmasse des Ammoniak in g/mol
m _{Urea}	AdBlue®-Massenstrom g/h bzw. mg/s
n	Motordrehzahl in U/min

N	Anzahl der Messpunkte am SCR
N ₂ O	Lachgas
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NH ₃	Ammoniak
n _{NH3}	Stoffmengenstrom Ammoniak
n _{NOx}	NOx-Stoffmengenstrom
NO	Stickstoffmonoxid in ppm
NO ₂	Stickstoffdioxid in ppm
NO _{vSCR}	Stickstoffmonoxid vor SCR in ppm
NO _x	Stickoxide in ppm
NO _{xRoh}	Stickoxid-Rohemissionen in ppm
NO _{xvSCR}	Stickoxide nach SCR in ppm
NSK	NOx-Speicherkatalysator
O ₃	Ozon
p ₀	Umgebungsdruck in bar
Pe	Effektive Leistung in kW
p _{inj}	Einspritzdruck in bar
PM	Partikel (Particulate matter)
p _{nDPF}	Abgasdruck nach Dieselpartikelfilter in mbar
p _{Oel}	Öldruck nach Pumpe in bar
p _{Umg}	Umgebungsdruck in bar
p _{vDPF}	Abgasdruck vor Dieselpartikelfilter in mbar
p _{vLLK}	Ladedruck in mbar
Re	Reynolds-Zahl
SCR	Selektive katalytische Reduktion
SDPF	DPF mit selektiver katalytischer Beschichtung
SF	Sensy Flow zur Messung des Ansaugluftmassenstroms
SMD	Sauterdurchmesser in µm
SO ₂	Schwefeldioxid
T _{AdBlue-Einlass}	Temperatur am AdBlue®-Einlass der Düse in °C
T _{AdBlue-Sitz}	Temperatur im inneren der Düsen Spitze in °C
T _{AnsvLF}	Ansaugtemperatur vor Luftfilter in °C
T _{Düsensitz-Abgas}	Temperatur am Düsensitz im Abgas in °C
T _{inlet}	Temperatur am AdBlue®-Einlass der Düse in °C
TiO ₂	Titanoxid
T _{KwA}	Kühlwassertemperatur Motorausstritt in °C
T _{KwE}	Kühlwassertemperatur Motoreintritt in °C
T _{nDPF}	Abgastemperatur nach Dieselpartikelfilter in °C
T _{nSCR}	Abgastemperatur nach SCR in °C
T _{raum}	Raumtemperatur in °C
T _{tip}	Temperatur im inneren der Düsen Spitze in °C
T _{vDPF}	Abgastemperatur vor Dieselpartikelfilter in °C
T _{vLLK}	Lufttemperatur vor Ladeluftkühler in °C
T _{vSCR}	Abgastemperatur vor SCR in °C
US CARB	Californian Air Resources Board
US EPA	Environmental Protection Agency
v	Strömungsgeschwindigkeit m/s

\dot{V}	Volumenstrom in kg/h
v_{TR}	Tropfengeschwindigkeit in m/s
VTG	Variable Turbinengeometrie
We	Weberzahl
Δp_{BP3}	Druckverlust über die Mischstrecke in BP3 in mbar
α	Gaspedalwert in %
γ	Gleichverteilungszahl / Uniformity-Index
γ_{BPi}	Gleichverteilungszahl in Betriebspunkt i (i=1, 2, 3)
γ_{PB}	Druckkorrigierte Gleichverteilungszahl nach Bitto
γ_{rel}	relative Gleichverteilung in %
κ_B	Druckkorrekturfaktor nach Bitto
λ	Luftzahl
ν	Kinematische Viskosität in m ² /s
ρ	Dichte in kg/m ³
ρ_{TR}	Dichte des Tropfens in kg/m ³
σ_{TR}	Oberflächenspannung des Tropfen in N/mm ²

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Geltungsbereich der verschiedenen Abgasgesetzgebungen für PKW und leichte Nutzkraftwagen	1
Abbildung 3.1: Schadstoffkonzentration eines EURO 4-Seriendieselmotors bei der Variation der Luftzahl.....	6
Abbildung 3.2: Experimentell bestimmte Daten und berechnete Gleichgewichtslage des NO/NO ₂ -Verhältnisses für einen Oxidationskatalysator	10
Abbildung 3.3: Auswirkung von Stickstoffoxiden auf die Umwelt.....	11
Abbildung 3.4: NO _x -PM-Tradeoff der Emissionen eines CR-Versuchsmotors mit zweistufiger Aufladung und Zwischenkühlung, Hoch-AGR und hohem Einspritzdruck.	17
Abbildung 3.5: Funktionsprinzip eines NO _x -Speicherkatalysators.....	19
Abbildung 3.6: Umsatzverhalten eines NO _x -Speicherkatalysators in Abhängigkeit von Temperatur und Alterung.....	20
Abbildung 4.1: NO-Oxidation (X_{NO}) bei konstantem NO-Zulauf von NO=550ppm....	22
Abbildung 4.2: Strömungsverteilung in 2 senkrechten Ebenen ohne Drallelement (links) und mit Drallelement (rechts)	28
Abbildung 4.3: Phasendiagramm der 32,5%-igen Harnstoffwasserlösung	30
Abbildung 4.4: Thermogravimetrische Analyse der Harnstoffzersetzung	30
Abbildung 4.5: Übersicht der potentielle Folgereaktionen bei der Harnstoffzersetzung	33
Abbildung 4.6: Schematisches Modell der Wandfilmbildung und deren Einflussgrößen	34
Abbildung 4.7: Charakteristische Siedezustände für Einzeltropfen	35
Abbildung 4.8: Tropfenverhalten bei Wandaufprall bei unterschiedlicher Weberzahl oberhalb der Leidenfrosttemperatur	35
Abbildung 4.9: Hypothese zur Ablagerungsbildung im Bereich des Injektorsitzes [76]	36
Abbildung 4.10: Verwirbelungen am Injektorsitz auf Grund der Rohrgeometrie	37
Abbildung 5.1: Schematischer Prüfstandsufbau für den verwendeten Verbrennungsmotor	38
Abbildung 5.2: Definition des Spraykegelwinkels am Beispiel einer Dreilochdüse. ...	40
Abbildung 5.3: Tropfenverteilung eines 16°-Bosch-Injektors	41

Abbildung 5.4: Geschlossenes System - verschraubter Auslasstrichter mit 12 Messstellen und NOx-Sonde im Endrohr.....	43
Abbildung 5.5: Offenes System – eine Messsonde rastert den Katalysatorquerschnitt mit beliebiger Auflösung ab.	44
Abbildung 5.6: Messung der NOx-Werte (schwarz) zur Ermittlung der Korrekturfaktoren (rot).	46
Abbildung 5.7: Gemessene NOx-Konzentrationen bei AdBlue®-Dosierung ohne Korrektur (links) und nach Anwendung der Korrekturfaktoren (rechts).	46
Abbildung 5.8: Darstellung der relativen Gleichverteilung am Austrittsquerschnitt des SCR-Katalysators über 11 Messpunkte (geschlossenes System).	48
Abbildung 5.9: Berechnete relative Gleichverteilung bei AdBlue®-Dosierung ohne Korrektur (links) und nach Anwendung der Korrekturfaktoren (rechts).	48
Abbildung 5.10: Gleichverteilungsbilder mit korrektem (oben) und fehlerhaftem (unten) Messaufbau.....	49
Abbildung 5.11: Abgasstrang zur Ermittlung des Mischergegendrucks	52
Abbildung 5.12: Fahrzyklus A zur Analyse von Ablagerungen in der Abgasanlage..	54
Abbildung 5.13: Fahrzyklus B zur Analyse von Ablagerungen in der Abgasanlage..	55
Abbildung 5.14: Heißluft-Sonderprüfstand zur Erzeugung von Ablagerungen bei sehr niedrigen Temperaturen.	56
Abbildung 5.15: Temperaturverlauf des Thermoelementes am Düsensitz sowie nach DPF bei BP180a unter stöchiometrischer Dosierung.	58
Abbildung 5.16: Schematische Darstellung des Injektorprüfstands	60
Abbildung 5.17: Aufbau eines Entkoppelelementes im Abgasstrang.....	63
Abbildung 5.18: Ablagerungsdynamik über den entsprechenden Temperaturbereichen.	64
Abbildung 5.19: Ammonia Storage and Delivery System für PKW der Amminex A/S... ..	67
Abbildung 6.1: Definition der Mischstreckenlänge	68
Abbildung 6.2: Variation des Dosierwinkels.....	69
Abbildung 6.3: Auswahl von unterschiedlichen Mischelementen.....	70
Abbildung 6.4: Gleichverteilungsbilder eines Serienmischers (unten) und einer Alternative (oben)	71
Abbildung 6.5: Durch Ablagerungen am Heißluftprüfstand sichtbar gemachte Auftreffpunkte des Sprays am Mischer bei unterschiedlichen Luftmassenströmen. .	72

Abbildung 6.6: Mischer der gleichen Geometrie mit unterschiedlich behandelter Oberfläche.....	74
Abbildung 6.7: Einfluss einer rauen Oberfläche des Mischelementes auf die Gleichverteilung.....	74
Abbildung 6.8: Mischer mit Mikroperforation im Zentrum – Detailansicht und Mikroskop-Aufnahme rechts.....	75
Abbildung 6.9: Gleichverteilungsergebnisse von Mischelementen mit alternativer Oberfläche.....	76
Abbildung 6.10: Auswahl an Abgasanlagen ohne Mischelement.	77
Abbildung 6.11: Repräsentative Variante ohne Mischer.....	78
Abbildung 6.12: Gleichverteilungsbilder in niedrigem (oben) und hohem Betriebspunkt einer mischerlosen Abgasanlage.....	79
Abbildung 6.13: Abnehmende Gleichverteilung durch Verkürzung der Mischstreckenläng.....	80
Abbildung 6.14: Gleichverteilungsbilder für Mischstreckenlängen 600mm (oben) / 400mm (mitte) / 330mm (unten)	81
Abbildung 6.15: Einfluss einer Durchmesservariation der Dosierstrecke auf die Gleichverteilung.....	83
Abbildung 6.16: Schematische Darstellung der untersuchten Trichtervariationen in Kombination mit der jeweils zugehörigen Katalysatorbauform.	84
Abbildung 6.17: Eine vereinfachte Geometrie mit rundem Katalysator und Einlasstrichter bringt keine Vorteile zur Racetrack-Form mit Fischertrichter.....	84
Abbildung 6.18: Unterschiedliche Dosierpositionen und -winkel zur Erzielung einer optimalen Beaufschlagung des Mischers (jeweils im Flansch positioniert).....	85
Abbildung 6.19: Schematische Darstellung der Auslenkung des Dosierwinkels (rechts) zur Kompensation der Sprayverwehung (links) an Hand einer Bogendosierung.	86
Abbildung 6.20: Ursprünglich vorgesehener Ringspalt (rechts oben) wurde verschlossen (rechts unten).....	87
Abbildung 6.21: Gleichverteilungsergebnisse mit offenem (links) und geschlossenem (rechts) Ringspalt bei niedrigen (oben) und hohen (unten) Betriebspunkten.....	88
Abbildung 6.22: Eine saubere Injektorspitze (links) ist einer verklebten Spitze nach Gleichverteilung-Untersuchungen bei 180° Dosierwinkel gegenübergestellt.....	89

Abbildung 6.23: Einfluss des Spraykegelwinkels auf die Gleichverteilung des Reduktionsmittels.	90
Abbildung 6.24: Auftreffpunkte des Sprays am Mischer bei Spraykegelwinkel 11° und 16°.	91
Abbildung 6.25: Abstimmung der geometrischen Abmessungen zur idealen Mischerbenetzung.	92
Abbildung 6.26: Basisversion einer bedingt durch die Fahrzeuggeometrie komplexen Abgasanlage mit wassergekühltem Injektor und Entkoppелеlement (EKE) in der Mischstrecke.	93
Abbildung 6.27: Überarbeitete Version mit geänderter Position von Injektor und Mischer sowie Prallblechen am Ausgang des Entkoppелеlementes.	94
Abbildung 6.28: Auswirkung auf die Gleichverteilung bei einer Variation des Harnstoff-Dosierdrucks an zwei Abgasanlagen in unterschiedlichen Betriebspunkten.	95
Abbildung 6.29: Die Gleichverteilungsbilder bei Gegenstromdosierung in hohen Betriebspunkten zeigen starke lokale Reduktionsmittel-Maxima im linken Bereich mit einer leichten Abhängigkeit vom Dosierdruck in BP2.	96
Abbildung 6.30: Gleichverteilungsergebnisse von Mischern relativ zu einem Referenzmischer in Prozent.	97
Abbildung 6.31: Ergebnisse des Abgasgedrucks verschiedener Mischer relativ zu einem Referenzmischer in Prozent.	98
Abbildung 6.32: Mögliche Funktionen zur Druckkorrektur der Gleichverteilungszahl γ	100
Abbildung 6.33: Gelochte Mischermodelle auf Basis eines Serienmodells zur Reduktion des Abgasgedrucks.	101
Abbildung 6.34: Anwendung der Druckkorrektur auf die Gleichverteilungsergebnisse gelochter Mischermodelle in Betriebspunkt BP3.	103
Abbildung 6.35: Anwendung der druckkorrigierten Gleichverteilung auf Mischstrecken unterschiedlicher Ausführung.	103
Abbildung 6.36: Beispiele für Ablagerungen an der Düsen spitze und am Düsen sitz	105
Abbildung 6.37: Rohrbogen mit Dosierstützen für einen Dosierwinkel von 0°.	106
Abbildung 6.38: Geradrohr mit symmetrischer Geometrie zur Abgasführung im Bereich des Dosierstützens.	107

Abbildung 6.39: Geradrohr mit asymmetrischer Geometrie zur Abgasführung im Bereich des Dosierstutzens.	107
Abbildung 6.40: Ablagerungsbilder nach 30-stündigem Fahrzyklus für drei verschiedene Anströmungsformen des Dosierstutzens.	108
Abbildung 6.41: Ablagerungsbilder nach 8-stündigem Stationärpunkt mit stark überstöchiometrischer Dosierung für drei verschiedene Anströmungsformen des Dosierstutzens.	109
Abbildung 6.42: Abmessungen und Mischergeometrie der SCR-Abgasanlage für einen BMW E70.	110
Abbildung 6.43: Detailansichten der SCR-Abgasanlage für einen BMW E70.	111
Abbildung 6.44: Abmessungen der SCR-Abgasanlage für einen VW Passat.	111
Abbildung 6.45: Gesamtansicht der SCR-Abgasanlage und Detailansicht der Dosierstelle für einen Daimler X164.	112
Abbildung 6.46: Ablagerungsbilder im Bereich der Düsenspitze nach 8-stündigem Ablagerungstest einer Daimler-, einer BMW- und einer VW-Abgasanlage.	113
Abbildung 6.47: Temperaturverlauf im AdBlue®-Injektor bei DPF-Regeneration der untersuchten Daimler-Abgasanlage.	115
Abbildung 6.48: Temperaturverlauf im AdBlue®-Injektor bei DPF-Regeneration der untersuchten BMW-Abgasanlage.	116
Abbildung 6.49: Temperaturverlauf im AdBlue®-Injektor bei DPF-Regeneration der untersuchten VW-Abgasanlage.	117
Abbildung 6.50: NOx- und Temperaturverlauf im AdBlue®-Injektor bei DPF-Regeneration der untersuchten VW-Abgasanlage.	118
Abbildung 6.51: Beispiel für einen wassergekühlten Injektor der Firma Bosch aus einem Forschungsprojekt am IFA.	119
Abbildung 6.52: Ablagerungen am Injektor bei BP180 und $\alpha=1$ am Motorprüfstand.	120
Abbildung 6.53: Ablagerungen am Injektor bei BP180 und $\alpha=1$ am Injektorprüfstand.	122
Abbildung 6.54: Vergleich der Ablagerungen am Motorprüfstand (links) und Injektorprüfstand (rechts) nach 2-stündiger stöchiometrischer Dosierung.	122
Abbildung 6.55: Temperaturverteilung im Bereich des Injektorsitzes in BP180.	123

Abbildung 6.56: Untersuchungen zur Ablagerungsbildung am Injektor bei 4 verschiedenen Düsenstizentemperaturen unter einstündigem AdBlue®-Massenstrom von 13mg/s.....	124
Abbildung 6.57: Filmbildung an der Injektorspitze bei $T_{\text{AdBlue-Sitz}} > 106^{\circ}\text{C}$	125
Abbildung 6.58: Ablagerungsbildung an der Injektorspitze nach Dosierung bei BP180 und $T_{\text{AdBlue-Sitz}} < 106^{\circ}\text{C}$	126
Abbildung 6.59: Verlauf des Zersetzungsprozesses von Ablagerungen am Düsenstiz	127
Abbildung 6.60: Temperaturverlauf während der Ablagerungszersetzung an der Düsenstiz.....	128
Abbildung 6.61: Vergleich des Nachdampfens des Injektors für $T_{\text{AdBlue-Sitz}} < 106^{\circ}\text{C}$ und $T_{\text{AdBlue-Sitz}} > 106^{\circ}\text{C}$. (Effekt rot gerahmt)	129
Abbildung 6.62: Tropfen nach dem Schließen des Injektors bei $T_{\text{AdBlue-Sitz}} < 106^{\circ}\text{C}$ (links) und $T_{\text{AdBlue-Sitz}} > 106^{\circ}\text{C}$ (rechts).	130
Abbildung 6.63: Sprayvergleich in Betriebspunkt BP180 bei $T_{\text{AdBlue-Sitz}} < 106^{\circ}\text{C}$ (links) und $T_{\text{AdBlue-Sitz}} > 106^{\circ}\text{C}$ (rechts).	130
Abbildung 6.64: „Flash boiling“-Phänomen an Hand der Dampfdruckkurve	132
Abbildung 6.65: Ergebnisse der Highspeed-Aufnahmen bei verschiedenen AdBlue®-Temperaturen im Kontext zur Dampfdruckkurve.	133
Abbildung 6.66: Temperaturverläufe im Bereich der Düse bei einer Lastrampe über eine Stunde von 10-100% Pedalstellung unter 2000min ⁻¹ bei einem AdBlue®-Massenstrom von 13mg/s.....	134
Abbildung 6.67: Relative Häufigkeitsverteilung der jeweils ersten Injektion des eindosierten Spray bei unterschiedlichen AdBlue®-Temperaturen (20-150°C).....	135
Abbildung 6.68: Kumulierte Häufigkeitsverteilung der jeweils ersten Injektion des eindosierten Spray bei unterschiedlichen AdBlue®-Temperaturen (20-150°C).....	136
Abbildung 6.69: Relative Häufigkeitsverteilung der jeweils 1. Injektion des eindosierten Spays speziell bei AdBlue®-Temperaturen von 105-130°C.....	137
Abbildung 6.70: Verlauf des Sauterdurchmessers der 1. Injektion des eindosierten Sprays bei AdBlue®-Temperaturen von 20-150°C.	138
Abbildung 6.71: Kumulierte Häufigkeitsverteilung der jeweils ersten Injektion des eindosierten Spray speziell bei den AdBlue®-Temperaturen von 105-130°C.	139
Abbildung 6.72: Anordnung und Bauformen von Verdampfern in der Abgasanlage zur Vermeidung von Ablagerungen in Entkoppellelementen.	140

Abbildung 6.73: 2 Beispiele für Ablagerungsergebnisse nach 10 stündigem Testlauf.	141
Abbildung 6.74: Zeitrafferaufnahmen nach 45/90/135 Minuten zur Veranschaulichung des Wandfilmtransportes durch das Verdampfer-Mischer-Element.....	142
Abbildung 6.75: Temperaturen und Gegendruckverhalten am Verdampfer während des 10-stündigen Testlaufs.....	143
Abbildung 6.76: Konstruktive Maßnahmen am Agraffschlauch zur Reduktion der Ablagerungsbildung im EKE.	143
Abbildung 6.77: Ablagerungen (rot gerahmt) in einem EKE mit Hydrolyse- Beschichtung.	144
Abbildung 6.78: Ablagerungen (rot gerahmt) in einem als Doppelrohr ausgeführten EKE.	145
Abbildung 6.79: Temperaturverlauf in einer Dieslabgasanlage während eines NEFZ. [132].	147
Abbildung 6.80: AdBlue®-Dosierung vor SDPF an einer X204-Abgasanlage.	148
Abbildung 6.81: AdBlue®-Dosierung vor SDPF an einer W212-Abgasanlage.	148
Abbildung 6.82: Gleichverteilungsergebnisse bei Dosierung vor SDPF in 2 unterschiedlichen Anlagenkonzepten zur AdBlue®-Einbringung.....	150
Abbildung 6.83: Gasdosierung über einzelnes Röhrchen an adaptierter W-212- Abgasanlage.....	151
Abbildung 6.84: Gasdosierung über Rohr-Stern an adaptierter W-212-Abgasanlage.	152
Abbildung 6.85: Gleichverteilungsergebnisse nach SDPF verschiedener Abgasanlagen mit Gas-Dosierung im Vergleich zu einer AdBlue®-Dosierung.....	152
Abbildung 6.86: Aufwendige Konstruktion einer Kombibuchse aus DOC und SDPF mit dazwischen geschalteter Boysen Gas-Dosing-Unit.	153

1 Einleitung

Zum Schutz der Umwelt und des Menschen vor den Emissionen des Automobils gelten in weiten Teilen der Welt unterschiedliche Abgasvorschriften. Zu den wichtigsten Vertretern gehören die Regulierungen der US CARB (Californian Air Resources Board), US EPA (Environmental Protection Agency), der EU und Japans. Eine Aufteilung der Gültigkeitsbereiche dieser Gesetzgebungen und ihrer Abwandlungen sind in Abbildung 1.1 dargestellt.

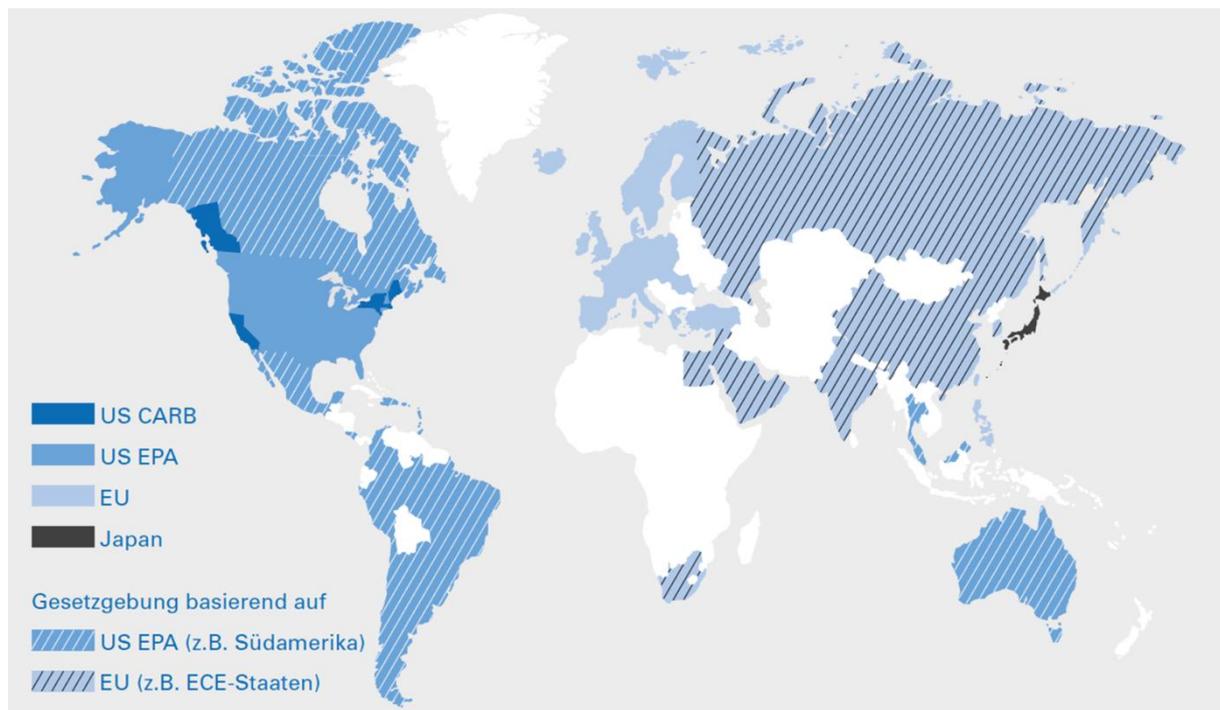


Abbildung 1.1: Geltungsbereich der verschiedenen Abgasgesetzgebungen für PKW und leichte Nutzkraftwagen. [1]

Auf eine genaue Auflistung der Vorschriften soll an dieser Stelle verzichtet werden, da hierzu auf eine Vielzahl von Literatur verwiesen werden kann. Für die auch in Österreich gültige europäische Gesetzgebung für PKW sind dies: [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10].

Um diese Ziele und Vorschriften auch künftig einhalten zu können muss eine Weiterentwicklung der Abgasnachbehandlungssysteme erfolgen. Neufahrzeuge mit Dieselantrieb werden daher je nach Gewicht und Markt mit Abgassystemen ausgestattet, die sich aus einer Vielzahl von Systemkomponenten zusammensetzen. Zu diesen zählen Dieseloxidationskatalysator (DOC), Partikelfilter (DPF), NO_x-

Speicherkatalysator (NSK) oder Systeme zur selektiven katalytischen Reduktion von Stickoxiden (SCR).

Vor allem die Reduktion der Stickoxide ist auf Grund der aktuellen und künftigen Emissionsvorschriften (Euro 6 für PKW und Euro VI für LKW) eine spezielle Herausforderung. Ein besonderes Problem der letzten Jahre stellen die NO_2 -Emissionen dar. Diese zeigen eine abweichende Entwicklung zu jener der Gesamtstickoxide. Die Weiterentwicklung der Motoren- und Abgasnachbehandlungstechnologien führte auf Grund der letzten Gesetzgebungsstufen zu einer Erhöhung des NO_2 -Anteils an den NO_x -Emissionen [11]. Bei Dieselmotoren ist es zu einem Anstieg des NO_2/NO_x -Verhältnisses von bis zu 80% gekommen [12]. Primär dafür verantwortlich ist die Einführung des Oxidationskatalysators und des Dieselpartikelfilters [13], [14]. Dies führte zur Erweiterung des Abgasnachbehandlungssystems mit Komponenten zur direkten Reduktion der Stickoxide. Die dafür vielversprechendste Technologie, stellt das Verfahren der Selektiven Katalytischen Reduktion dar. Die Herausforderungen und Lösungsansätze bei der Gestaltung eines solchen Systems für den PKW sind Thema dieser Arbeit.

2 Motivation und Zielsetzung

Aus der Kraftwerkstechnik ist das System der selektiven katalytischen Reduktion bereits seit Jahrzehnten bekannt und hat sich zur Entstickung der Rauchgase bewährt. Dabei werden mit Hilfe des Reaktionspartners Ammoniak NH_3 unter Einwirkung des Katalysators TiO_2 die Stickoxide NO und NO_2 wieder zu unschädlichen N_2 und Wasser H_2O reduziert. Das Rauchgas hat dabei eine relativ konstante Temperatur von $320\text{-}400^\circ\text{C}$ und durchströmt den meist auf keramischen, wabenförmig durchbrochenen Grundkörpern aufgetragenen Katalysator. Der DeNOx-Block wird hinreichend groß ausgeführt, um den Druckverlust minimal zu halten und die notwendige Reaktionszeit zu erzielen. [15]

Auch in der Abgasnachbehandlung von Nutzfahrzeugen ist bereits seit einigen Jahren die SCR-Technologie einer der Entwicklungsschwerpunkte. Basis des Systems ist dabei neben dem Einsatz eines geeigneten Katalysators die mengenbezogene exakte Dosierung eines geeigneten Reduktionsmittels. Da es sich beim in der Kraftwerkstechnik verwendeten Ammoniak um ein hochgiftiges Gas handelt, musste zur Wahrung der Sicherheit im Straßenverkehr eine Alternative gefunden werden. Aus verschiedenen Möglichkeiten hat sich hier für aktuelle Fahrzeugentwicklungen eine wässrige Harnstoff-Wasser-Lösung durchgesetzt, die unter dem Markennamen AdBlue® vertrieben wird. Der in das heiße Abgas eingebrachte Harnstoff wird im Gasstrom und an der Oberfläche des nachfolgenden Katalysators zum eigentlichen Reduktionsmittel Ammoniak umgesetzt. Eine Voraussetzung für die Erreichung hoher NO_x -Umsatzraten ist schließlich die optimale Aufbereitung des eingebrachten AdBlue® im Abgasstrang. [16]

Im Nutzfahrzeug setzt sich das SCR-System aus den Hauptbestandteilen Harnstoffversorgungseinheit mit Druckluftsteuereinheit, Dosiereinheit und Düse zusammen. Das Reduktionsmittel wird somit unter Zuhilfenahme von Druckluft in den Abgasstrang eingebracht. Dabei kommt es zu einer feinen Zerstäubung, welche die gleichmäßige Verteilung des Reduktionsmittels unterstützt. [17]

Im PKW hingegen steht im Gegensatz zum LKW keine Druckluftversorgung an Board zur Verfügung. Eine Aufrüstung mit solch einem Druckluftsystem kommt aus Kosten- und Platzgründen nicht in Frage. Die Harnstoff-Wasser-Lösung muss somit ohne Druckluftunterstützung in die Abgasanlage eingebracht werden. Neben der Harnstoffdosiertechnik spielt daher das Design der Abgasanlage eine sehr große

Rolle. Im PKW werden derzeit einflutige Systeme verwendet. Auf die Harnstoffdosiereinheit folgen ein oder mehrere in Serie angeordnete SCR-Katalysatoren. Durch die beengten Bauraumvorgaben erfordert das Design der Abgasanlagen sehr spezifische Lösungen. Auf Grund der Unterschiede zur Nutzfahrzeuganwendung benötigt man neue Methoden zur Bewertung der Systemfunktionen. Besonderes Augenmerk gilt dabei der Harnstoffaufbereitung durch geeignete Mischgeometrien und die Bewertung dieser Varianten. [16]

Die sehr gute Gleichverteilung des Reduktionsmittels über den Katalysatorquerschnitt ist eine der größten Aufgaben der SCR-Thematik. Diese und die dabei auftretenden Effekte und Problemstellungen zu erkennen, zu beurteilen und zu lösen, stellen die Herausforderungen dieser Arbeit dar.

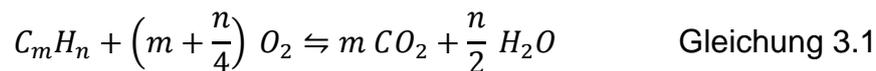
3 Dieselaabgasemissionen – Entstehung und Minderung

Um auf die Problematik der Stickoxidminderung im Dieselaabgas eingehen zu können, wird im folgenden Kapitel zunächst auf die Schadstoffentstehung während der dieselmotorischen Verbrennung eingegangen.

Im Anschluss werden Konzepte zur Abgasreinigung von Dieselmotoren behandelt, die teilweise Stand der Technik sind oder sich derzeit in der Markteinführung befinden.

3.1 Dieselaabgasemissionen

Die vollkommene Verbrennung von Dieselaabkraftstoff führt mittels Oxidation zu Kohlendioxid CO₂, Wasser H₂O und Schwefeldioxid SO₂. Letzteres hängt stark vom Schwefelgehalt im Kraftstoff ab und kann bei modernen schwefelfreien Kraftstoffen vernachlässigt werden (Gleichung 3.1).



Da CO₂ keine direkte Gefahr für den menschlichen Organismus darstellt, wird es nicht als Schadstoff bewertet. Als Treibhausgas wird es aber für den Klimawandel mit verantwortlich gemacht und steht daher immer mehr im Fokus der Öffentlichkeit.

Durch den zeitlich kurzen Brennvorgang während der realen Verbrennung kommt es weiters zur Bildung von teil- bzw. unverbrannten Stoffen. Den Großteil dieser Schadstoffemissionen bilden Kohlenmonoxid (CO), unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC), Stickoxide (NO_x) und Partikel (PM). Sie sind in erster Linie vom Brennverfahren, der innermotorischen Gemischbildung und dem lokalen Sauerstoffangebot, also dem örtlichen Luftverhältnis abhängig. Das Luftverhältnis (oder auch Luftzahl $\lambda = m_L / m_{Lst}$) beschreibt das Verhältnis aus tatsächlicher Luftmasse (m_L) zu der für die Verbrennung des Kraftstoffes benötigten stöchiometrischen Luftmasse (m_{Lst}). Das stöchiometrische Luftverhältnis λ_{St} berechnet sich über Gleichung 3.2 [18].

$$\lambda_{St} = \frac{100}{21} \cdot M_L \cdot \left(\frac{c}{M_C} + \frac{h}{2 \cdot M_{H_2}} - \frac{o}{M_{O_2}} \right) \quad \text{Gleichung 3.2}$$

Mx... Molmasse des Stoffes x (trockene Luft / C / H₂ / O₂)

c, h, o ... Anteil Kohlenstoff / Wasserstoff / Sauerstoff im Kraftstoff

Der inneren Gemischbildung in einem Dieselmotor steht nur ein sehr kurzer Zeitraum zur Verfügung. So kommt es zu einem deutlichen λ -Gradienten im Verbrennungsraum. Im Kern des Kraftstoffstrahles gibt es nahezu keinen Sauerstoff (Luftverhältnis $\lambda = 0$). Im Randbereich des Brennraums gibt es Stellen mit reiner Luft ($\lambda = \infty$). Im gesamten Brennraum liegt somit unmittelbar vor dem Beginn der Verbrennung eine inhomogene Ladung mit mehr oder weniger ausgeprägten Bereichen zwischen $0 < \lambda < \infty$ vor. In weiterer Folge ist die unterschiedliche Gemischqualität für große lokale Temperaturunterschiede verantwortlich [19]. In Abhängigkeit der Luftzahl und der Temperatur im Brennraum ergeben sich Zonen, die die Bildung unterschiedlicher Schadstoffkomponenten begünstigen. Die Schadstoffbildung ist zudem auf Grund der instationären Vorgänge während der motorischen Verbrennung zeitlich und örtlich großen Schwankungen unterworfen.

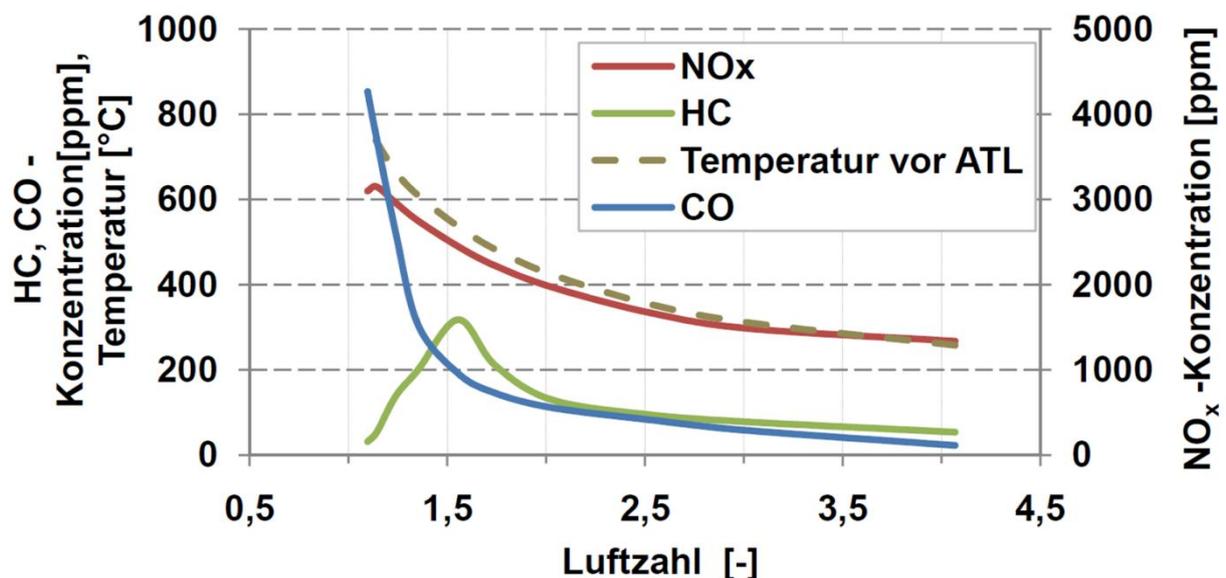


Abbildung 3.1: Schadstoffkonzentration eines EURO 4-Seriendieselmotors bei der Variation der Luftzahl. [20]

Bei geringer werdendem Sauerstoffangebot ist ein starker Anstieg der Abgas- und Partikelemissionen sowie der Verbrennungstemperatur zu verzeichnen (Abbildung 3.1). Gerade für moderne Motoren, die immer strengeren Abgasnormen entsprechen müssen, wird dieser Zusammenhang zunehmend bedeutender. Dieselmotoren werden traditionell im überstöchiometrischen Bereich und somit wirkungsgradoptimal betrieben. Heutige Maßnahmen zur Senkung der Emissionen beschränken das Sauerstoffangebot im Brennraum jedoch drastisch. Zu diesen zählen Hoch-AGR-Konzepte zur Reduktion der Stickoxide, Maßnahmen zur Anhebung der

Abgastemperatur zur Regeneration der Partikelfilter oder der Regeneration von Stickoxid-Speicher-Katalysatoren.

Im folgenden Kapitel werden die limitierten Schadstoffe aus der dieselmotorischen Verbrennung näher betrachtet.

3.1.1 Kohlenmonoxid CO

Kohlenmonoxid entsteht bei lokalem Luftmangel ($\lambda < 1$). Im Vergleich zum Ottomotor tritt CO somit beim Diesel in deutlich geringerem Umfang auf [21]. Aber auch in überstöchiometrischen Bereichen kann CO durch Auslöschung der Flammenfront an kühleren Brennraumwänden (wall quenching) entstehen. In diesem Bereich entstehen hohe CO-Konzentrationen, die jedoch durch Nachreaktionen zum größten Teil zu CO₂ oxidiert werden. Bei Kohlenmonoxid handelt es sich um ein geruch-, farb- und geschmackloses Gas. Auf Grund seiner 250-fach höheren Affinität zu Hämoglobin, das für den Sauerstofftransport im Körper verantwortlich ist, als die des Sauerstoffes, kann Kohlenmonoxid bereits bei geringer Konzentration in der Atemluft tödlich sein [22]. Bereits bei einem Gehalt von 0,3% CO in der eingeatmeten Luft werden 80% des Bluthämoglobins besetzt. Diese stehen dadurch nicht mehr für den Sauerstofftransport zur Verfügung und es kommt zu einer Unterversorgung des Körpers. An Stelle von Oxihämoglobin (O₂Hb) bildet sich Carboxihämoglobin (COHb). Die Folge wird als „innere Erstickung“ bezeichnet [23].

3.1.2 Unverbrannte Kohlenwasserstoffe HC

Die HC-Emissionen sind auf Grund des Luftüberschusses beim Dieselmotor ebenfalls deutlich niedriger als beim Ottomotor. Sie bestehen aus unverbranntem und teilverbranntem Dieselkraftstoff sowie aus Crack- und Folgeprodukten [24]. Sie entstehen zum Beispiel am äußeren Rand des Dieselkraftstoffsprays, in dem sich das Kraftstoff-Luftgemisch unterhalb der Zündgrenze befindet und somit eine Zone unvollständiger Verbrennung darstellt [19]. Eine weitere Entstehungsquelle von HC-Emissionen liegt in der Nähe der relativ kalten Zylinderwand. Hier sinkt die Verbrennungsgeschwindigkeit so stark ab, dass es zum Erlöschen der Flamme kommt. Man spricht hier vom sogenannten „Wall Quenching Effekt“ [25]. Die Dicke dieser Quenchingschicht wächst mit fallender Last und der dadurch bedingt sinkenden Brennraumtemperatur und Flammengeschwindigkeit [26]. Gasräume in die zwar das Gemisch, aber nicht die Flamme eindringt, sind weitere Quellen. Hierzu

zählt der Feuerstegraum, Bereiche an der Zylinderkopfdichtung, an den Ventilsitzen und Poren von Brennraumablagerungen.

Auch der Ölschmierfilm an der Zylinderwand liefert einen Beitrag. Dieser absorbiert kurzzeitig Kohlenwasserstoffe, die erst nach der Verbrennung desorbiert und somit unverbrannt ausgeschoben werden [27].

Kraftstoffinjektoren, die nach dem Einspritzvorgang nicht ausreichend schnell und präzise schließen, können eine weitere starke HC-Quelle darstellen. Die geringen Mengen Kraftstoff, die so verloren gehen, können zumeist nicht mehr umgesetzt werden und stellen vor allem beim Kaltstart einen relevanten Emissionsfaktor dar.

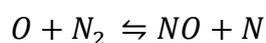
Unverbrannte Kohlenwasserstoffe fördern die Bildung von Ozon, riechen unangenehm und stehen unter Verdacht krebserregend zu sein.

3.1.3 Stickoxide NO_x

Unter Stickoxiden fasst man im Allgemeinen Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) zusammen [28]. In ausgedehnteren Definitionen [29] ist auch Di-Stickstoffoxid (Lachgas N₂O) enthalten. Dies soll in dieser Arbeit jedoch nicht näher berücksichtigt werden.

Stickstoffoxide variabler Zusammensetzung werden als nitrose Gase bezeichnet. Sie haben einen wesentlichen Anteil an der Luftverschmutzung. Etwa 50% der NO_x Gesamtemissionen entstehen aus Autoabgasen [30]. Bei der vom Verbrennungsmotor emittierten Form von Stickoxiden handelt es sich hauptsächlich um Stickstoffmonoxid. Dies wird jedoch in der Atmosphäre vor allem durch Ozon schnell zu Stickstoffdioxid umgesetzt.

NO wird im Brennraum hauptsächlich durch Radikalreaktionen nach dem Zeldovich-Mechanismus gebildet. Wegen der dafür erforderlichen hohen Temperatur wird das so gebildete Stickoxid auch als „thermisches Stickoxid“ bezeichnet. Folgende drei Elementarreaktionen liegen der thermischen NO-Bildung zugrunde [31].



Gleichung 3.3



Unterhalb von etwa 2000K sind die zur NO-Bildung erforderlichen Reaktionen kinetisch limitiert [32], sodass unmittelbar nach der Verbrennung der vorliegende NO-Anteil deutlich geringer als der Gleichgewichtsanteil ist. Bei der anschließenden Expansion und der damit verbundenen Abkühlung des Gasgemisches erfolgt zuerst noch eine leichte Rückbildung des NO. Bei weiterer Abkühlung überschreitet der NO-Anteil die Gleichgewichtskonzentration, da die Rückbildung des NO kinetisch limitiert ist und die Reaktionen einfrieren [33].

Das Maximum der NO-Bildung erreicht man bei Luftzahlen oberhalb von eins ($\lambda=1,1$ beim Ottomotor). Durch Zugabe von noch mehr Luft sinkt die maximale Verbrennungstemperatur, womit auch die NO-Konzentration sinkt (siehe Abbildung 3.1).

Über die Startreaktion von Kohlenwasserstoffradikalen mit molekularem Stickstoff nach dem Fenimore-Mechanismus wird sogenanntes „prompt“-NO gebildet (Gleichung 3.6) [34].



Durch die Oxidation von im Kraftstoff gebundenem Stickstoff kommt es zur Bildung von „fuel“-NO. [35]

NO₂ wird hauptsächlich am Katalysator nach Gleichung 3.7 durch Oxidation von NO gebildet.



Zu dieser Reaktion kommt es nicht nur im Abgaskatalysator, sondern auch in der Atmosphäre.

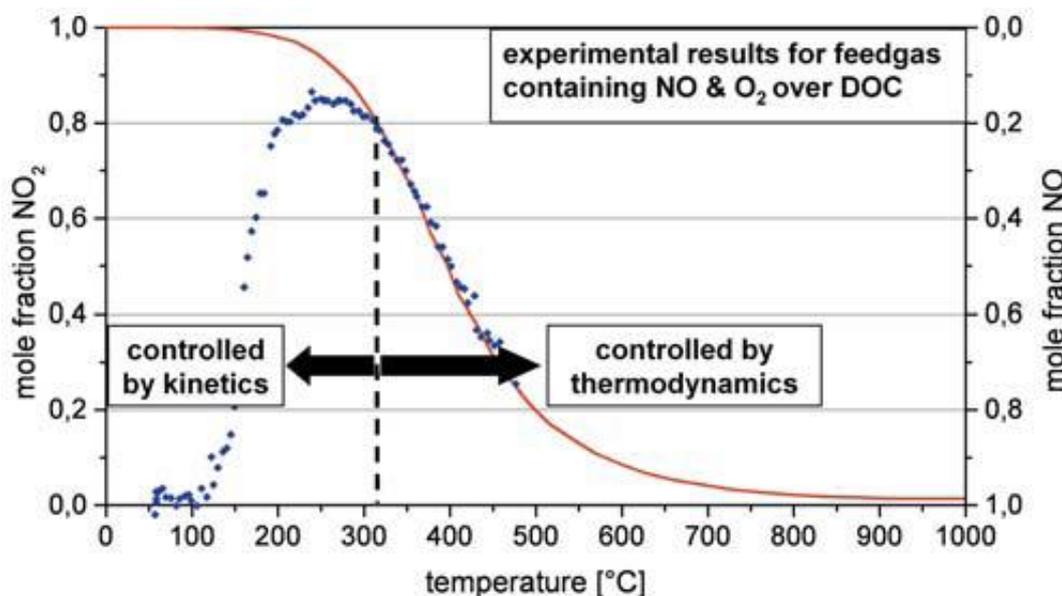


Abbildung 3.2: Experimentell bestimmte Daten und berechnete Gleichgewichtslage des NO/NO₂-Verhältnisses für einen Oxidationskatalysator [36]

In Abbildung 3.2 wird die NO/NO₂-Gleichgewichtslage am Oxidationskatalysator in Abhängigkeit von der Gastemperatur dargestellt. In Gleichung 3.7 liegt das NO₂/NO-Gleichgewicht aus thermodynamischer Sicht bei tiefen Temperaturen auf der Seite des NO₂. Die Oxidation ist jedoch kinetisch gehemmt und so stellt sich erst ab einer Temperatur von 300°C ein Gleichgewicht ein. Da die Reaktion exotherm verläuft, verschiebt sich das Gleichgewicht mit zunehmender Temperatur wieder zu Gunsten von NO. Oberhalb von 650°C liegt das Verhältnis weit auf der Seite von NO [37]. Im Rohabgas vor Katalysator liegt der NO₂-Anteil bei Dieselmotoren in der unteren Teillast am höchsten und beträgt hier maximal 30% [38]. Eigens durchgeführte Untersuchungen am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik zeigen jedoch, dass der NO₂-Anteil in der Aufwärmphase des Motors nach dem Kaltstart deutlich höher sein kann [39]. Aus Abbildung 3.2 geht aus dem thermodynamisch kontrollierten Bereich hervor, dass bis zum Erreichen höherer Temperaturen ein Großteil der NO₂-Emissionen wieder zu NO reduziert wird.

Das Verhältnis von NO zu NO₂ stellt vor allem in der Abgasnachbehandlung mit Dieselpartikelfilter, Stickoxidspeicherkat oder selektiver katalytischer Reduktion einen wichtigen Faktor für die Umsatzgüte dar. Je nach Nachbehandlungssystem strebt man einen mehr oder weniger hohen NO₂-Anteil im Abgas nach Oxidationskatalysator an [40].

Stickstoffmonoxid ist wie Kohlenmonoxid ein farb-, geruch- und geschmackloses Gas, welches aber im Gegensatz zu Kohlenmonoxid eine Veränderung der Lungenfunktion in Form einer Erweiterung der Blutgefäße bewirkt. Stickstoffdioxid hingegen ist ein stechend riechendes, giftiges, rotbraunes Gas, das bereits in geringer Konzentration lungenreizende Eigenschaften besitzt. Das Gefahrenpotential von Stickoxiden liegt in der Reaktion mit Ozon. Die Produktion und der Abbau von Ozon verlaufen in der Stratosphäre nach anderen Mechanismen als in der Troposphäre. Auch die Resultate sind dabei unterschiedlich erwünscht. Während Ozon in der Stratosphäre durch seine absorbierende Wirkung die Energiereiche Sonnenstrahlung vom Erdboden fernhält und dadurch das Leben erst ermöglicht, ist das Ozon in der Troposphäre ein Zellgift und damit gesundheitsschädlich. [41]

Somit sorgen Stickoxide in der Troposphäre (0-15 km) zur Bildung von bodennahem Ozon und fotochemischem Smog. In der Stratosphäre (15-50 km) hingegen trägt NO zum katalytischen Abbau der als UV-Filter wirkenden Ozon-Schicht bei [42]. Die unterschiedlichen Auswirkungen von Stickstoffoxiden durch komplexe Prozesse in der Atmosphäre sind in Abbildung 3.3 dargestellt.

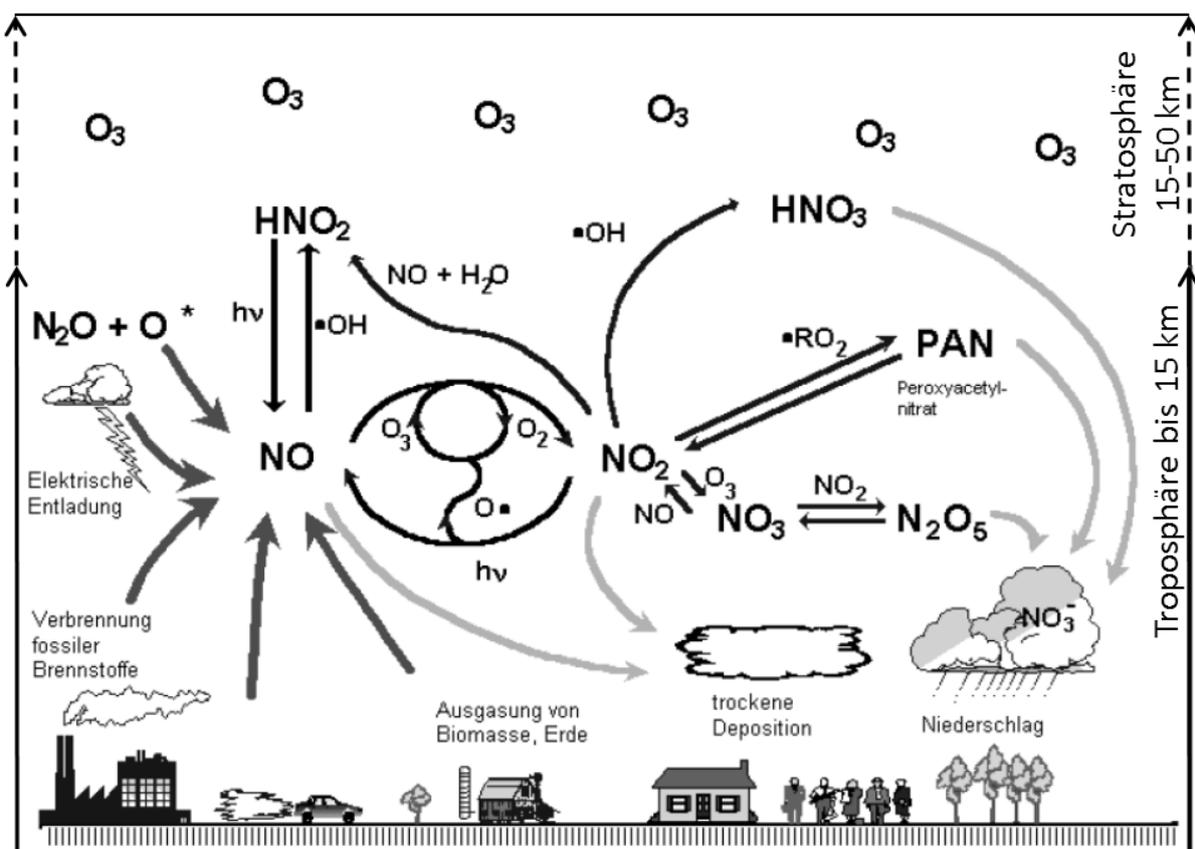


Abbildung 3.3: Auswirkung von Stickstoffoxiden auf die Umwelt [43]

NO_2 wird unter intensiver Sonneneinstrahlung photochemisch unter Bildung von Ozon zu NO reduziert, wobei auch das freigesetzte O_3 zur Schädigung der Troposphäre führt. Umgekehrt wird in den Nachtstunden das Ozon durch Reoxidation von NO zu NO_2 wieder abgebaut. Dieser Abbau erfolgt allerdings hauptsächlich in den Ballungsräumen, da nur hier das dafür erforderliche NO noch in ausreichender Menge in der Troposphäre vorliegt. In der ländlichen Region kann die Schädigung der Vegetation durch Ozon in der Nacht unvermindert andauern. Durch mehrstufige Oxidation von NO mit Ozon und weiterem NO_2 kann in Anwesenheit von Luftfeuchtigkeit, Salpetersäure (HNO_3) gebildet werden. Diese säuert die Niederschläge auch in weit vom Verursacher entfernten Regionen an und führt zur nachhaltigen Schädigung von Pflanzen. Vor allem die flächendeckenden Waldschäden in den 80er Jahren gelangten in das Bewusstsein der Öffentlichkeit.

Darüber hinaus kann NO_2 mit emittierten Kohlenwasserstoffen zu Peroxyacetylnitraten (PAN , $\text{C}_2\text{H}_3\text{NO}_5$) reagieren, welche für die reizende Wirkung der Schadgase aus Kraftfahrzeugen auf die menschlichen Atmungsorgane verantwortlich gemacht werden [43].

Lachgas (N_2O) trägt zur Erwärmung der bodennahen Luftschichten bei und verstärkt den Treibhauseffekt [44].

3.1.4 Partikelemissionen PM

Die Partikelentstehung in Form von Feststoffen und Kondensat ist eng mit den Vorgängen zur HC-Bildung verbunden. Partikel aus dieselmotorischer Verbrennung sind 10 bis 100 Nanometer groß und bestehen im Wesentlichen aus aneinander geketteten Kohlenstoffteilchen [45]. Sie besitzen eine sehr große spezifische Oberfläche, was zur Folge hat, dass sich weitere Teilchen wie Aromaten oder unverbrannte Kohlenwasserstoffe leicht anlagern können. Dieselpartikel bestehen bis zu 95% aus organischen (Ruß und polyzyklische Kohlenwasserstoffe) sowie 5% anorganischen Bestandteilen wie Asche von Öladditiven, keramische Fasern, Metallspäne, Rostpartikel, Salze und Sulfate [19].

Die innere Gemischbildung im Dieselmotor bewirkt im Gegensatz zum Ottomotor ein heterogenes Kraftstoffgemisch. Dadurch entstehen sowohl fette, als auch magere Bereiche im Brennraum. Durch die Verdichtung erhitzt das Luft-Kraftstoff-Gemisch

stark und in den fetten Bereichen kommt es zu ersten Reaktionen. Diese finden vorerst nur im Dampfmantel des Kraftstofftröpfchen statt. Durch die thermische Belastung werden die Moleküle des Kraftstoffs aufgebrochen und freier Kohlenstoff entsteht. Wird beim Fortschreiten der Reaktion das Verbrennen dieser feinen Kohlenstoffteilchen verhindert, findet man die Teilchen als Rußpartikel im Abgas wieder. Dies passiert zum Beispiel in Folge örtlichen Sauerstoffmangels, mangelhafter Vermischung oder Erlöschung der Flamme an kalten Stellen.

Die Masse aller Stoffe, die sich auf einem Filter abscheiden, nachdem das Abgas nach definierter Verdünnung abgekühlt wurde, nennt man Partikelgehalt [46].

Partikel können schwere Erkrankungen verursachen [47]. Ihre geringe Größe ermöglicht es nämlich, dass sich die Partikel im Lungengewebe, in den Alveolen (Lungenbläschen), einlagern. Auf Grund dieses möglichen Gesundheitsrisikos ist die Minderung des Partikelaustrittes notwendig.

Im Zusammenhang mit der immer wieder aufkeimenden Feinstaubproblematik muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass gemessen an einer innerstädtischen Hauptverkehrsstraße nur 7% der Feinstaubbelastung aus Motorabgasen stammen. Der Gesamtanteil des Verkehrs am Feinstaub von 35% ergibt sich aus Straßen-, Reifen-, Bremsen- und Kupplungsabrieb [22].

Neben diesen „limitierten Abgaskomponenten“ kommt es beim Dieselmotor auch noch zum Ausstoß so genannter „nicht limitierter Abgaskomponenten“, die jedoch ebenfalls gesundheitliche Schäden verursachen können. Als Beispiele einer Vielzahl solcher Stoffe sollen hier nur Ammoniak, Aldehyde und Cyanid genannt werden.

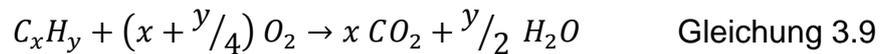
3.2 Abgasminderung

Die in Kapitel 3.1 beschriebenen Emissionen werden durch unterschiedliche technische Lösungen gemindert, die im Folgenden beschrieben werden sollen.

3.2.1 Diesel-Oxidations-Katalysator

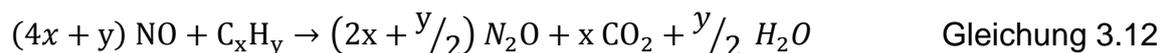
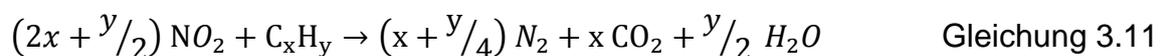
Im Gegensatz zum Ottomotor, der mit $\lambda=1$ betrieben wird und somit im 3-Wege-Katalysator die Komponenten CO, HC und NO_x minimieren kann, kommt bei der

Dieselabgasnachbehandlung ein Oxidations-Katalysator zur Anwendung. Damit werden die Emissionen Kohlenmonoxid, unverbrannte Kohlenwasserstoffe und Stickstoffmonoxid unter Verwendung des im Abgas enthaltenen Sauerstoffs oxidiert.



Das chemische Gleichgewicht in Gleichung 3.8 und Gleichung 3.9 liegt bei typischen Abgastemperaturen zwischen 150 und 600°C auf der rechten Seite der Gleichung. Bei chemischem Gleichgewicht handelt es sich um einen scheinbar ruhenden Zustand, allerdings laufen die chemischen Reaktionen weiterhin in beide Richtungen gleich schnell ab. Es handelt sich somit um ein dynamisches Gleichgewicht, in dem weiterhin Reaktionen ablaufen. In Gleichung 3.10 ist bei chemischem Gleichgewicht das NO_2/NO_x -Verhältnis bei niedrigen Temperaturen höher und bei hohen Temperaturen niedrig. Das NO_2/NO_x -Verhältnis der Rohemissionen ist in der Regel niedriger als das chemische Gleichgewicht bei der jeweiligen Temperatur. Über den Diesel-Oxidations-Katalysator verschiebt sich das Verhältnis Richtung Gleichgewicht.

In Nebenreaktionen kann die Reaktion von Kohlenwasserstoffen mit Stickoxiden zu deren Reduktion zu Stickstoff (N_2), oder in einer unerwünschten Nebenreaktion zur Bildung von Lachgas (N_2O) führen. Da Lachgas eine etwa 300-fach höhere Treibhausgaswirkung als CO_2 hat, ist es höchst unerwünscht.



Der Haupttreiber für diese Reaktionen sind Kohlenwasserstoffe. Da diese nun in recht geringer Menge im Dieselrohgas vorhanden sind und eine starke Neigung zur Oxidation mit Sauerstoff aufweisen, laufen diese Reaktionen nur in sehr geringem Ausmaß ab [48]. Somit verbleibt das NO_x weiter im Abgas.

3.2.2 Diesel-Partikel-Filter (DPF)

Die Basisfunktion des DPF ist die Beseitigung der Dieselpartikel aus dem Abgas. In manchen Anwendungen wird der Filter unbeschichtet, in anderen Fällen mit einer metallischen Beschichtung, ähnlich einem DOC, betrieben. Solch beschichtete Filter sind als cDPF (catalysed diesel particulate filter) oder CSF (catalysed soot filter) bekannt. Wenn das Abgas den DPF erreicht, wurden Kohlenmonoxid und unverbrannte Kohlenwasserstoffe zum größten Teil bereits im DOC umgewandelt und das NO_2/NO_x -Verhältnis befindet sich nahe dem chemischen Gleichgewicht. Auch die HCs, die am Ruß angelagert sind, wurden Großteils reduziert. Der aus Kohlenstoff bestehende Ruß wird im Filter durch Tiefen- und Oberflächenfiltration gefangen und kommt in Folge mit Sauerstoff und Stickstoffdioxid zur Reaktion.



Um Gleichung 3.13 zur Verbrennung von Ruß nutzen zu können wird trotz des Überangebotes an Sauerstoff im Dieselabgas eine Temperatur von über 500°C benötigt. Da dies weit über der durchschnittlichen Abgastemperatur beim Dieselmotor liegt, müssen mittels Motorbetriebsstrategie zwischenzeitliche Regenerationsphasen zur Erhöhung der Abgastemperatur und somit Verbrennung der Partikel im Filter angewendet werden. Man spricht daher von aktiver DPF-Regeneration. Mit Gleichung 3.14 wird die passive Regeneration beschrieben. Diese beginnt bei Temperaturen über $200 - 250^\circ\text{C}$, bedingt jedoch ein hohes $\text{NO}_2/\text{Ruß}$ -Verhältnis. Falls das NO_2/PM -Verhältnis etwas zu gering, oder die Temperatur noch zu niedrig ist, kann eine katalytische Beschichtung des Filters zur Wiederverwendung von NO nach Gleichung 3.10 nützlich sein. Eine Beschichtung des DPF erhöht jedoch den Gegendruck des Systems, da das Abgas nicht nur die Filterwände, sondern auch den Washcoat passieren muss. [48]

Das den Diesel-Partikel-Filter verlassende Gas ist somit im Wesentlichen frei von Kohlenmonoxid, unverbrannten Kohlenwasserstoffen und Partikeln. Die Menge der Stickoxide ist jedoch unverändert zum Rohabgas. Nur das Verhältnis NO_2/NO_x hat sich seit dem Verlassen des Brennraums im Laufe der beschriebenen Reaktionen erhöht.

3.2.3 Stickoxidminderung

Zur Minderung der Stickoxidemissionen stehen eine Reihe von innermotorischen Maßnahmen zur Verfügung. Dazu zählen verschiedenen Verbrennungsstrategien wie HCCI, HCLI, HPLI, die auf den Grundzügen Ladungsverdünnung und Gemischhomogenisierung beruhen. Um zumindest teilweise Gemischhomogenisierung zu erreichen, muss die Einspritzung abgeschlossen sein, bevor die Verbrennung einsetzt. Bei der Ladungsverdünnung wird durch Beimischung von verbranntem Abgas und weitgehender Ladungshomogenisierung die örtliche Verbrennungstemperatur soweit abgesenkt, dass Stickoxid- und Russbildung vermieden wird. Durch die Kombination moderner Technologien wie Verschiebung des Einspritzzeitpunktes, mehrstufiger Aufladung, variabler Turbinengeometrie und Niederdruck-Abgas-Rückführung lassen sich aus den genannten Ansätzen hoch komplexe Systeme kreieren, die eine innermotorische Absenkung der Stickoxidemissionen ermöglichen. [49], [50], [51], [52], [53], [54]

Zusätzlich lassen sich die Emissionen durch die Verwendung hochwertiger oder sogar synthetischer Kraftstoffe senken [55], [56], [57].

All diese Maßnahmen bewirken einen starken Anstieg der Systemkosten, schaffen es alleine jedoch nicht zukünftige Emissionsvorschriften zu erfüllen. Das Hauptproblem liegt in der NO_x-Partikel-Schere der innermotorischen Maßnahmen zur Emissionsreduktion (Abbildung 3.4). Jede Maßnahme zur Reduktion der Stickoxide führt zum Anstieg der Partikel-Emissionen und umgekehrt. Wird also eine Betriebsstrategie zur Reduktion der Stickoxide gewählt, muss der Partikelfilter öfters regeneriert werden, was zu einem unerwünschten Anstieg des Kraftstoffverbrauchs führt.

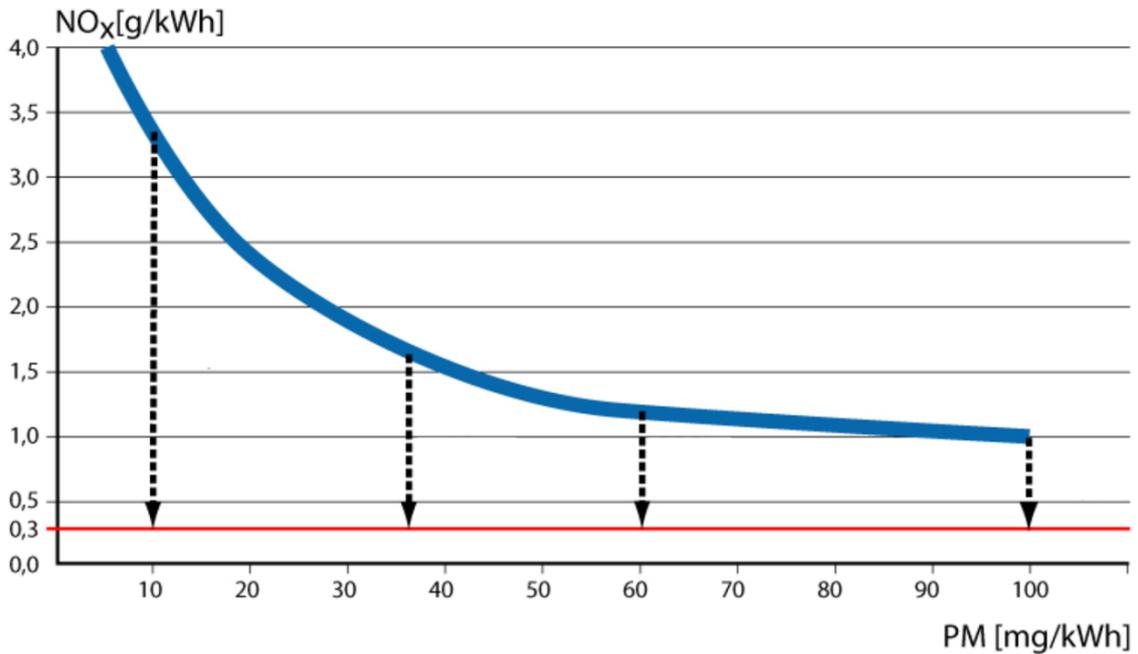


Abbildung 3.4: NOx-PM-Tradoff der Emissionen eines CR-Versuchsmotors mit zweistufiger Aufladung und Zwischenkühlung, Hoch-AGR und hohem Einspritzdruck. [58]

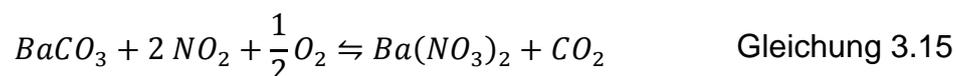
Dieser Umstand führt zur Anwendung von externen Methoden der Abgasnachbehandlung, die über die bisher genannten Systeme des DOC und DPF hinausgehen.

Heute sind zwei Abgasnachbehandlungsverfahren zur Reduzierung von Stickoxiden bekannt. Dies sind der NOx-Speicherkat (NSK) und das Verfahren der selektiven katalytischen Reduktion (SCR).

Beim NSK kommen zwei Betriebsphasen zum Einsatz [59] [60]:

- Beladungsphase
- Regenerationsphase

Unter Sauerstoffüberschuss ($\lambda > 1$) wird Stickstoff kontinuierlich als Nitrat im Katalysator gespeichert. [61]

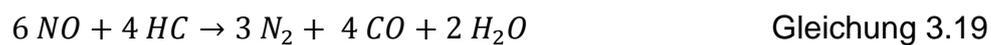


Dazu muss NO zunächst an Platin zu NO₂ oxidiert werden, welches dann an der Beschichtung unter Sauerstoff nach Gleichung 3.15 zu Nitrat reagiert.

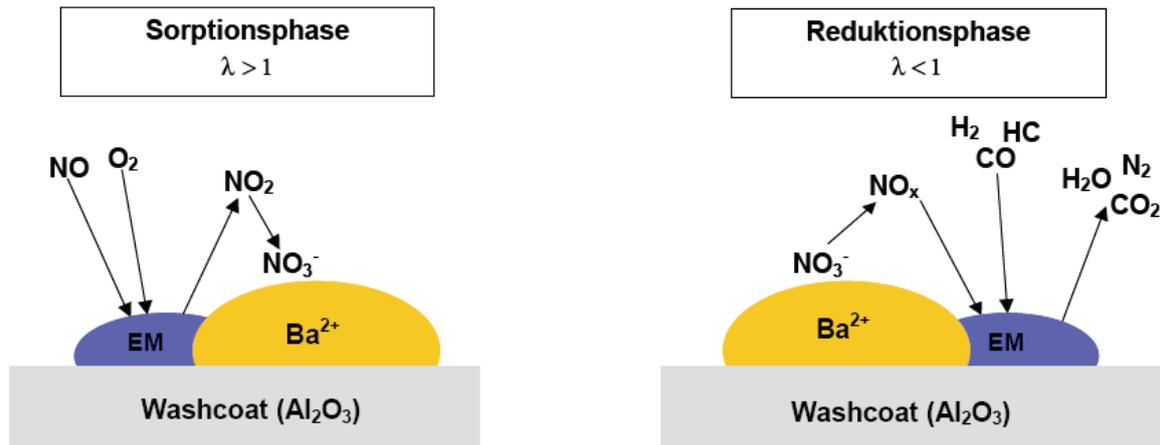
Da die Speicherung der Stickoxide gleichgewichtslimitiert ist, nimmt die Effizienz des NSK mit zunehmender Beladung ab. Deshalb muss der NSK in gewissen Abschnitten regeneriert werden. Zur Regeneration der eingelagerten Stickoxide zu Stickstoff muss der Motor für einige Sekunden mit Kraftstoffüberschuss ($\lambda < 1$) betrieben werden. Das so angefettete Abgas enthält die passende Menge an Kohlenmonoxid, unverbrannten Kohlenwasserstoffen und Wasserstoff um die desorbierten Stickoxide zu reduzieren. Die eingelagerten Stickoxide müssen dazu aus der Speicherkomponente entfernt und in N_2 konvertiert werden. Nach Gleichung 3.16 zerfällt dabei das $Ba(NO_3)_2$ zu BaO und bildet mit CO wieder $BaCO_3$.



Das entstandene NO kann direkt, oder indirekt an der reduzierenden Platinbeschichtung zu N_2 reagieren. Als Reduktionsmittel wird dabei Wasserstoff (H_2) [62], [63], [64] und Kohlenmonoxid (CO) bevorzugt. Somit ergibt sich die Stickoxidbildung nach folgenden Summenformeln [65]:



Die so beschriebenen 2 Phasen der Einspeicherung und Reduktion sind in Abbildung 3.5 anschaulich dargestellt.

Abbildung 3.5: Funktionsprinzip eines NO_x-Speicherkatalysators [66]

Um diese Prozesse ablaufen lassen zu können, muss der NO_x-Speicherkat mit chemischen Verbindungen beschichtet sein, die eine hohe Neigung haben, mit NO₂ eine feste, aber chemisch reversible Verbindung einzugehen. Als Beispiel sind hier Carbonate und Oxide der Alkali- und Erdalkalimetalle zu nennen. Hierfür wird überwiegend Bariumnitrat auf Grund seines günstigen Temperaturverhaltens verwendet.

Im Gegensatz zur SCR ist beim NSK kein zusätzlicher Betriebsstoff erforderlich. Durch das zur Regeneration notwendige Anfetten entsteht jedoch der Nachteil eines erhöhten Treibstoffverbrauchs.

Bei Untersuchungen zur Anwendung des NSK bei Dieselmotoren wurden Umsätze von über 90% erreicht. In [Abbildung 3.6](#) ist die Umsatzrate eines NSK in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt. Die Speicherkapazität des NSK wird speziell durch die thermische Alterung mit fortlaufender Betriebsdauer herabgesetzt [67].

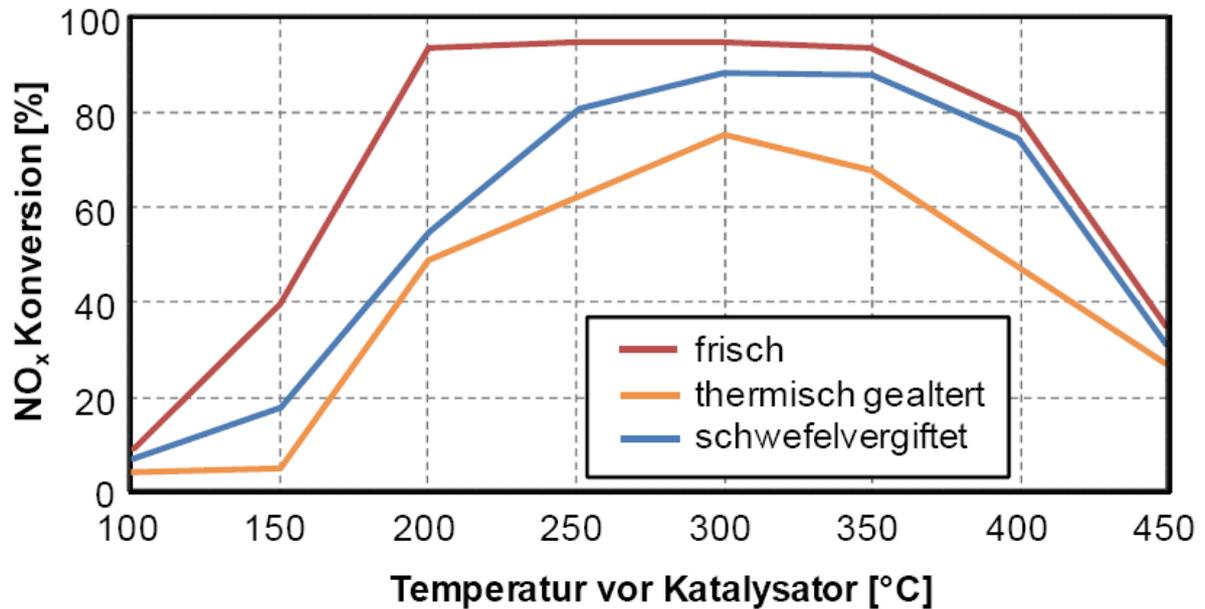


Abbildung 3.6: Umsatzverhalten eines NO_x-Speicherkatalysators in Abhängigkeit von Temperatur und Alterung [68]

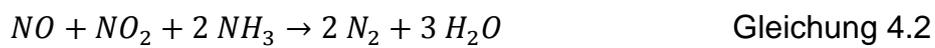
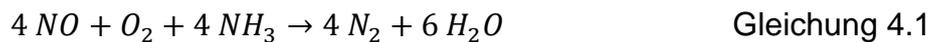
Auch die Anfälligkeit durch die Vergiftung vor allem durch Schwefel beeinflusst die Umsatzrate stark [69], [70], [71], [72], [73]. Die Verwendung von Dieseldieselkraftstoff mit einem Schwefelgehalt von 350ppm kann nach wenigen Betriebsstunden einen Rückgang der Konvertierungsrate auf 15% bewirken [74]. Jedoch auch die Verwendung von schwefelfreiem Kraftstoff (3 ppm Schwefel) setzt die Umsatzrate durch stetige Vergiftung herab [75].

Auf Grund dieser Nachteile wird sich aus heutiger Sicht das Verfahren der selektiven katalytischen Reduktion gegenüber dem NSK durchsetzen. Das SCR-Verfahren wird auf Grund seiner Wichtigkeit für diese Arbeit im nächsten Kapitell gesondert behandelt.

4 Selektive Katalytische Reduktion

Als einzelnes Kapitel nach dem allgemeinen Teil der Emissionen soll auf Grund der Hauptrolle in dieser Arbeit gesondert auf die Selektive Katalytische Reduktion eingegangen werden. Der Begriff selektiv beschreibt in diesem Fall, dass die Oxidation des Reduktionmittels mit dem Sauerstoff der Stickoxide erfolgt, obwohl molekularer Sauerstoff gegenwärtig ist. Lediglich das Reduktionsmittel Ammoniak wird einer solchen selektiven Umsetzung der Stickoxide gerecht [76].

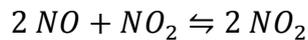
Zu diesem Zweck wird beim SCR-Verfahren zur Dieselabgasnachbehandlung eine wässrige Harnstofflösung in den Abgasstrang eingebracht, welche über chemische Prozesse in Ammoniak umgewandelt wird. Im SCR-Katalysator werden schließlich die Stickoxide unter Verwendung des Ammoniaks NH_3 zu Stickstoff reduziert. Gleichungen 4.1 - 4.3 geben den Ablauf der dabei entscheidenden Reaktionen wieder [61]:



Bei Gleichung 4.1 handelt es sich um die Standard-SCR-Reaktion, bei der Stickstoffmonoxid und Ammoniak 1:1 umgesetzt werden. Im Falle eines äquimolaren Verhältnisses zwischen NO und NO_2 liegt Gleichung 4.2, die sogenannte Fast-SCR-Reaktion vor. Diese weist eine um den Faktor 10 höhere Reaktionsgeschwindigkeit auf. Ein solch äquimolares Verhältnis kann durch die Vorschaltung eines geeigneten Oxidationskatalysators, welcher NO zu NO_2 oxidiert, herbeigeführt werden. Unter den üblichen PKW-Betriebsbedingungen überwiegen Gleichung 4.1 und Gleichung 4.2, wodurch sich die benötigte Dosiermenge für eine gewünschte NO_x -Reduktion relativ genau bestimmen lassen. [77]

Gleichung 4.3 wird NO_2 -SCR-Reaktion genannt. Sie beschreibt die Stickoxidreduktion in einem SCR-Katalysator für den Fall, dass der Anteil an NO_2 den NO-Anteil im Abgas übersteigt. Allerdings weist sie die geringste Reaktionsgeschwindigkeit auf und fördert in weiterer Folge die Entstehung von N_2O während der Stickoxidreduktion. [78]

Stickstoffmonoxid und -dioxid entstehen bei Luftüberschuss in einem gewissen thermodynamischen Gleichgewicht zueinander. Die Oxidation von NO zu NO₂ ist im Gegensatz zu den Oxidationsreaktionen von HC und CO gleichgewichtslimitiert. Gleichung 4.4 zeigt die trimolekulare NO-Oxidation [46] :



Gleichung 4.4

Bei dieselmotorischen Abgasbedingungen liegt die Limitierung der NO_x-Oxidation durch das thermodynamische Gleichgewicht je nach Konzentration der Reduktionspartner bei Temperaturen von 200-280°C. Abbildung 4.1 zeigt das thermodynamische Gleichgewicht (gepunktete Linien) für verschiedene Sauerstoffkonzentrationen (1, 5, 10% O₂). Dem Bild ist zu entnehmen, dass sich mit steigender O₂-Konzentration das Gleichgewicht zu Gunsten des NO₂-Anteils verschiebt (Prinzip von Le Chatelier). [46]

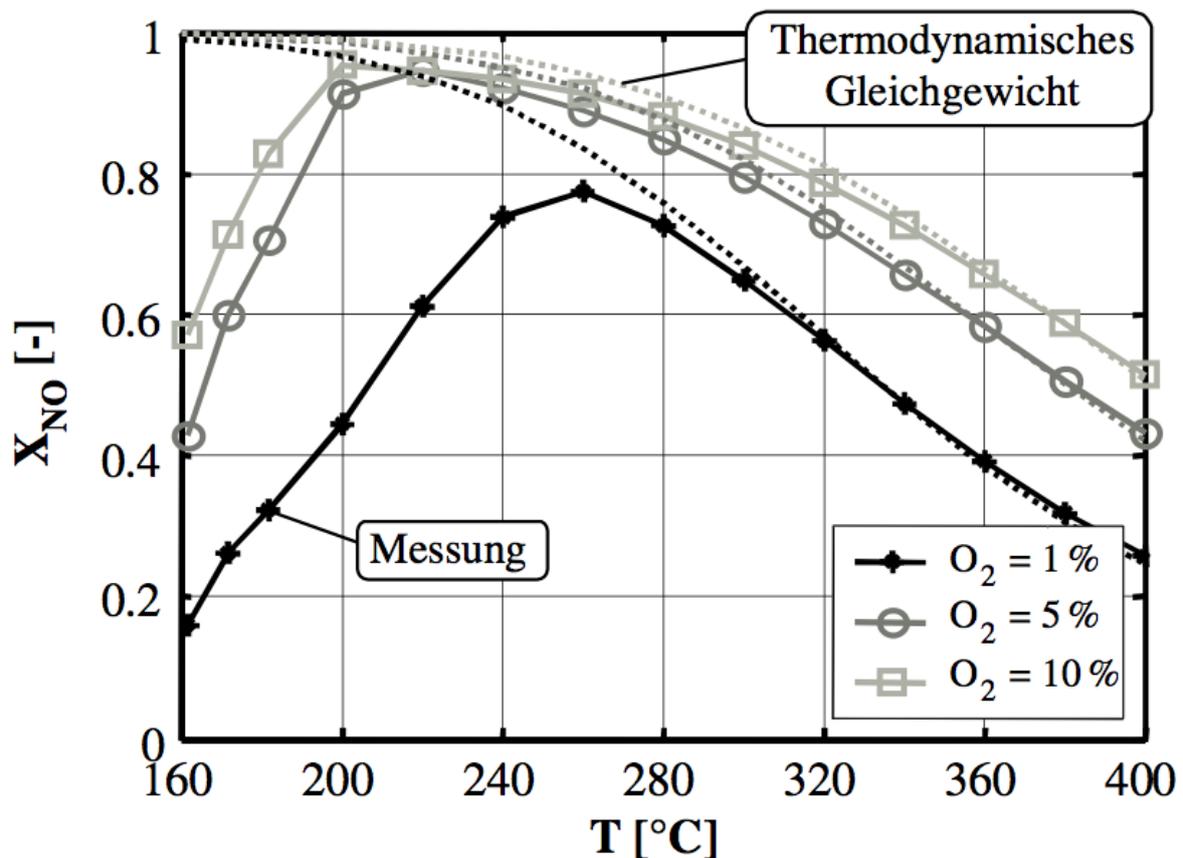
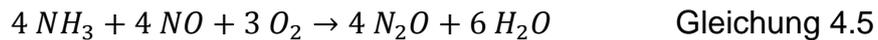


Abbildung 4.1: NO-Oxidation (X_{NO}) bei konstantem NO-Zulauf von NO=550ppm. [46]

Der NO₂-Anteil im dieselmotorischen Abgas liegt dementsprechend betriebspunktabhängig bei 5 bis 50% [61].

Es ist jedoch auch mit einer Reihe von unerwünschten Nebenreaktionen zu rechnen, die neben der Umsetzung zu N_2 und H_2O auftreten. Neben der Bildung von N_2O (Gleichung 4.5), wird dabei besonders bei hohen Abgastemperaturen die Oxidation von Ammoniak zu N_2 und sogar NO beobachtet (Gleichung 4.6 bis Gleichung 4.8). Es kommt also nicht nur zum Verlust von Reduktionsmittel, sondern kehrt das SCR-Verfahren sogar ins Gegenteil um.



Bei stationärem Betrieb gilt das SCR-Verfahren als zuverlässig und äußerst effizient. Unter instationären Bedingungen treten jedoch eine Reihe von Problemen auf, die eine Applikation auf den Kraftfahrzeugsektor erschweren.

Zu den Hauptproblemen für den Einsatz im KFZ zählt, dass das Mitführen eines separaten Reaktionsmitteltanks erforderlich ist. Außerdem sind auf Grund der Toxizität von Ammoniak mögliche Leckagen an Tank und Leitungen als sehr bedenklich anzusehen. Daher wurde die Idee von NH_3 -abspaltenden Substanzen verwirklicht, die unter toxikologischen Gesichtspunkten weit weniger bedenklich sind. Diese können in fester Form (Ammoniumcarbamat – Kapitel 5.8) oder als wässrige Lösung (Harnstoff) ausgeführt sein. Beide erlauben ein ungefährliches Mitführen und zudosieren. Die europäische Automobilindustrie hat sich in den 90er Jahren auf die Verwendung einer wässrigen Harnstoffwasserlösung (AdBlue®) geeinigt.

4.1 AdBlue®

Bei AdBlue® handelt es sich um eine 32,5%ige Harnstofflösung. Es ist eine klare, farblose Flüssigkeit und, da es kein Gefahrenstoff ist, leicht zu handhaben. Sowohl die Flüssigkeit selbst, als auch eingetrocknete Reste sind physiologisch unbedenklich. Außerdem wird es als Stoff mit geringem Risiko für Wasser und Boden eingestuft und es ist keine Belastung für die Atmosphäre zu erwarten. [79]

Da unterschiedliche Harnstofflösungen nicht nur zu unterschiedlichen Werten bei der Stickoxidumwandlung, sondern auch zu einer Schädigung des Abgasmachbehandlungssystems führen würden, muss das Reduktionsmittel in einer technischen Norm festgehalten werden. Für AdBlue® ist dies in der „DIN 70 070 NO-Reduktionsmittel AUS32“ der Fall [80]. AdBlue® besteht aus technisch reinem Harnstoff und voll entsalztem Wasser. Ein Nachfüllen des Reduktionsmitteltanks mit Leitungswasser würde auf Grund des Gehalts an Calcium und Magnesium den SCR-Katalysator schädigen.

Da Harnstoff stark korrosiv ist, kommen als Behälter-, Leitungs- und Armaturenmaterial nur beständige Werkstoffe wie Edelstahl und verschiedene Kunststoffe in Frage. Dazu gehören hochlegierter austenitischer Chromnickelstahl und Chromnickelmolybdänstahl, HD-Polyethylen, HD-Polypropylen, Polyfluorethylen, Titan und Viton. Metallische Teile müssen auf ihre Korrosionsfestigkeit geprüft werden. Kunststoffteile können eine Reihe von Additiven enthalten, die bei der Herstellung und Verarbeitung des Kunststoffes zugesetzt wurden. Diese Additive können sich auf das darin gelagerte Reduktionsmittel mit einer Qualitätsbeeinträchtigung auswirken. Um eine Qualitätsverschlechterung von AdBlue® während Transport und Lagerung zu verhindern, müssen einige Lagerbedingungen erfüllt sein. Um eine Kristallisierung zu vermeiden, sollte es über -11°C gelagert werden. Da es bei höheren Temperaturen zur Hydrolyse kommt, wird eine Lagerung unter 30°C empfohlen. Anderenfalls kann es zur Bildung von Ammoniak und zu Druckanstieg führen und verkürzt die Lagerzeit. Schließlich sollte direktes Sonnenlicht vermieden werden, um Augenbildung zu vermeiden. Unter Einhaltung der Lagerbedingungen und der Verwendung geeigneter Materialien ist AdBlue® mindestens ein Jahr haltbar. [79]

Nachstehende Tabelle 4.1 listet einige wichtige Eigenschaften von AdBlue® auf.

Summenformel	CH ₄ N ₂ O
Harnstoffgehalt	31,8 - 33,3%
Dichte bei 20°C	1,082 g/cm ³
Aussehen	klare farblose Flüssigkeit, kein bis schwacher Geruch nach Ammoniak
Viskosität bei 25°C	1,4 mPa s
Kristallisationsbeginn	-11,5°C
Löslichkeit	mit Wasser in jedem Verhältnis mischbar
Nach Augenkontakt	sofort mit Wasser ausspülen
Hautkontakt	mit Seife und viel Wasser abwaschen
Verschlucken	sofort reichlich Wasser trinken
Besondere Gefahren	Keine bekannt. Produkt ist nicht brennbar

Tabelle 4.1: Produkteigenschaften von AdBlue® [79]

In Österreich wird AdBlue® von der OMV geliefert und von ihrem Partner, der Borealis Agrolinz Melamine GmbH, produziert [81].

Das AdBlue® wird im Fahrzeug vor dem SCR-Katalysator eingedüst. Nach anschließender Verdampfung des Wasseranteils wird über die Reaktionen der Thermolyse (Gleichung 4.9) und Hydrolyse (Gleichung 4.10) Ammoniak gebildet und steht zur NO_x-Reduzierung zur Verfügung [82], [83], [84].



Das Zwischenprodukt HNCO wird als Isocyan Säure bezeichnet. Aus dieser können bei zu niedriger Abgastemperatur (<250°C) feste Ablagerungen entstehen, weshalb auch beim SCR-Katalysator ein schnelles Erreichen der entsprechenden Betriebstemperatur zwingend erforderlich ist. Während also bei unvollständiger Hydrolyse (Gleichung 4.10) Teile des eingesetzten Reduktionsmittels feste Ablagerungen bilden, reagiert wie oben erwähnt bei zu hohen Temperaturen (>550°C) ein Teil des Ammoniaks mit Sauerstoff, wodurch jeweils die Effizienz des SCR-Katalysators eingeschränkt wird.

Für eine dauerhaft effiziente Konvertierung (>50%) sind Mindestabgastemperaturen von 250°C vor dem SCR-Katalysator erforderlich. Als Trägersystem für die Katalysatoren dient zumeist Titanoxid (TiO₂), auf welches die Oxide Vanadumpentoxid (V₂O₅) und Wolframtrioxid (WO₃) aufgebracht werden [85]. Bei

der Aktivkomponente handelt es sich vorrangig um V_2O_5 . Da es bereits bei Temperaturen von über 650°C zu einem Austrag von V_2O_5 und damit zu einer Verringerung der Aktivität des Katalysators kommt, aber auch der Einfluss von Vanadium auf den Menschen nicht restlos geklärt ist, wurde vermehrt an Zeolith-SCR-Katalysatoren ohne Vanadium gearbeitet [85]. So kommen in neuesten PKW-Anwendungen Cu-Zeolithe als SCR-Katalysatoren zum Einsatz [86].

4.2 NH_3 -Schlupf

Ein weiteres Problem bei der Übertragung des SCR-Verfahrens auf das Kraftfahrzeug stellt die Vermeidung des NH_3 -Schlupfs dar.

Unter NH_3 -Schlupf ist eine Ammoniakemission gemeint, die auf Grund eines überstöchiometrischen NH_3/NO_x -Verhältnisses auftritt (niedrige Geruchsschwelle von 5-40 ppm in der Luft [87]) und nicht an der NO_x -Reduktion teilgenommen hat. Einerseits führt Überdosierung und in Folge das Überschreiten der Absorptionfähigkeit des SCR-Katalysators zu NH_3 -Schlupf. Diese regelungstechnisch anspruchsvolle Aufgabe ist wegen der instationären Betriebsweise des Motors nur schwierig zu lösen. Besonders bei Lastwechseln, die mit großen Temperatursprüngen und der Desorption von NH_3 aus dem SCR-Katalysator verbunden sind, kann die Regelung schwierig werden. Außerdem kann eine unzureichende Homogenisierung des eingedüsten Reduktionsmittels zu NH_3 -Schlupf führen. Um NH_3 -Schlupf zu verhindern, kann nach dem SCR-Katalysator ein Oxidationskatalysator angebracht werden, der als Sperrkatalysator den überschüssigen Ammoniak zu N_2 und H_2O oxidiert. Eine wirtschaftlichere Methode das gesamte eingebrachte Reduktionsmittel zu nutzen, statt es in einem Sperrkatalysator zu oxidieren, ist die Homogenisierung der Harnstoffwasserlösung im Abgasstrom. Eine perfekte Gleichverteilung des Reduktionsmittels bis zum Eintrittsquerschnitt des SCR-Katalysators ist Voraussetzung für die optimale Nutzung des vorhandenen Katalysatorvolumens. Auf diesem Gebiet wurde am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik sowohl am Motorprüfstand, als auch auf Seiten der CFD-Simulation aufwendige Forschungsarbeit geleistet, die großer Bestandteil dieser Arbeit ist.

4.3 SCR im Nutzfahrzeug

Erfahrungen mit der SCR-Technologie im Kraftfahrzeugbau standen bisher hauptsächlich im Nutzfahrzeugsektor zur Verfügung. Dabei wurde diese Technologie bereits zur Einhaltung der seit Oktober 2006 gültigen Euro4-Norm für Nutzfahrzeuge [88], [89] verwendet. Zu den Herstellern, die schon damals SCR-Systeme in ihren Fahrzeugen zum Einsatz brachten gehören unter anderem DAF Trucks N.V., Daimler AG, Iveco, MAN AG und Scania AB. Später wurde die Technologie mit der im Oktober 2009 in Kraft tretenden Euro5-Norm [88], [89] praktisch unumgänglich. Bei diesen Systemen wird AdBlue® durch eine Versorgungseinheit aus dem Tank angesaugt und der Dosiereinheit über eine beheizte Versorgungsleitung zugeführt. Die Versorgungseinheit ist meist in Tanknähe als Rahmenbauteil angebracht. Die Dosiereinheit hingegen ist als Motoranbauteil ausgeführt. Eine Druckluftsteuerung der Dosiereinheit stellt Luft in ausreichender Menge und auf geregelter Druckniveau zur Harnstoffeindüsung bereit. In der Dosiereinheit wird durch das Dosierventil AdBlue® in angepasster Menge so in das heiße Abgas eingedüst, dass eine gleichmäßige Verteilung des Reduktionsmittels im Abgas gewährleistet ist. Die für diese Gleichverteilung und das somit effektiv arbeitende SCR-System so wichtige Druckluft steht bei einem LKW bereits an Bord zur Verfügung. Sie wird über Kompressor, Lufttrockner, Druckregler und Vorratsbehälter erzeugt, geregelt und gespeichert, und diente zuvor hauptsächlich zur Erzeugung der Anpresskraft in den Druckluftbremsen.

In einem PKW wird ein derartiges Druckluftsystem nicht mitgeführt und würde neben dem steigenden Fahrzeuggewicht und dem erhöhten Platzbedarf auch einen weiteren großen Kostenfaktor bei Dieselfahrzeugen darstellen. Somit ist ein solches System im PKW-Sektor nicht akzeptabel. Es muss ein anderer Weg gefunden werden, die Harnstofflösung gleichmäßig im Abgas zu verteilen.

4.4 Erfahrungen mit Drallelementen

Eine Möglichkeit zur homogenen Einbringung der Harnstoffwasserlösung besteht darin, das Reduktionsmittel über ein Einspritzventil ohne Luftunterstützung einzubringen. Dieses Ventil ist einem Otto-Saugrohr-Einspritzventil ähnlich. Die verwendeten Drücke befinden sich in einem Bereich von 4 – 7,5 (10) bar. Auf die

stark korrosive Wirkung des Reduktionsmittels wurde bereits etwas weiter oben eingegangen.

Mittels Drallelementen oder anderen Mischern, die im Abgasstrang eingebaut werden, kann die Erzeugung von Turbulenzen erfolgen. Mit deren Hilfe verspricht man sich eine erfolgreiche gleichmäßige Verteilung [90].

Drallelemente wurden zuvor in Kombination mit Dieselpartikelfiltern erprobt und zeigten durchaus positive Einflüsse. Gegenüber einer herkömmlichen Konfiguration ohne Mischer (Abbildung 4.2– links) sind die Vorteile einer Anordnung mit Drallelement (Abbildung 4.2 – rechts) vor allem in einer gleichmäßigen Beladung des DPF zu sehen. Dies bewirkt darüber hinaus auch eine gleichmäßigere Regeneration. Die wesentlich homogenere Temperaturverteilung im Monolithen selbst ermöglicht auch in geometrisch anspruchsvollen Filtern eine gleichmäßige Regeneration. Der Abfall des durch die Partikelbeladung hervorgerufenen Abgasgedrucks während der thermischen Regeneration kann dadurch verbessert werden. Dies bewirkt eine Verkürzung der Regenerationszeit. Da die notwendige Temperaturerhöhung mit einer Nacheinspritzung realisiert wird, ergibt sich durch diese Zeitersparnis auch ein erhebliches Potential zur Kraftstoffeinsparung. [91]

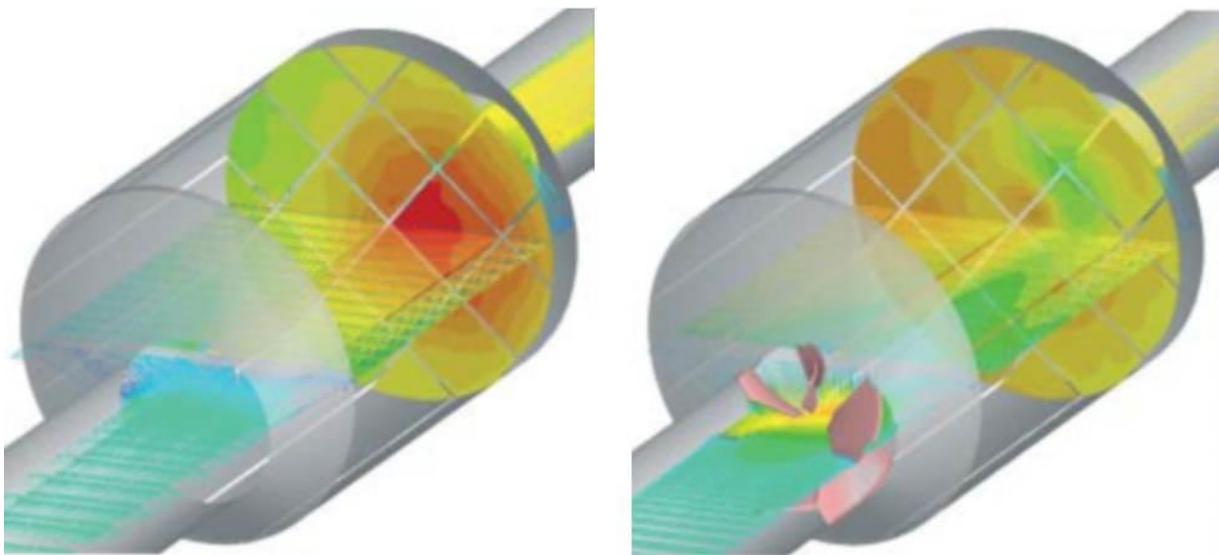


Abbildung 4.2: Strömungsverteilung in 2 senkrechten Ebenen ohne Drallelement (links) und mit Drallelement (rechts) [91]

Für heutige PKW-SCR-Systeme ergeben sich somit derzeit folgende Hauptherausforderungen [92]:

- Verdampfung und gleichmäßige Verteilung des Reduktionsmittels in allen Betriebspunkten und
- Ablagerungsfreies Einspritzen des Reduktionsmittels in allen Betriebspunkten.

Beide Herausforderungen wurden im Zuge der Forschungsarbeiten für diese Arbeit untersucht. Die Wichtigkeit einer guten Gleichverteilung und mögliche Wege dahin wurden soeben skizziert und werden an Hand der Ergebnisse in Kapitel 6 weiter untermauert. Um auf die Erkenntnisse der Ablagerungsuntersuchungen in einer Diesellabgasanlage mit SCR-System eingehen zu können, soll hier noch auf die theoretischen Grundlagen zu Wandfilmbildung und Ablagerungen eingegangen werden.

4.5 Wandfilmbildung und Ablagerungen

Um die Wandfilmbildung und die nach heutigem Wissensstand vorrangig daraus resultierende Bildung von Ablagerungen in der Abgasanlage verstehen zu können, soll zuvor noch ein Blick auf spezifische Eigenschaften der Harnstoffwasserlösung geworfen werden. Wie bereits in Kapitel 4.1 ausgeführt wurde, handelt es sich beim Reduktionsmittel um eine Harnstoffwasserlösung die sich aus 32,5% reinem Harnstoff und 67,5% demineralisiertem Wasser zusammensetzt. In Abbildung 4.3 ist das Phasendiagramm dieser Lösung dargestellt, das auch den Gefrierpunkt bei $-11,5^{\circ}\text{C}$ erkennen lässt. Auf Grund der deutlichen Änderung seiner Eigenschaften bei leicht verändertem Mischungsverhältnis, ist die Lösung bei der Herstellung innerhalb einer Toleranz von $\pm 0,7\%$ einzuhalten [80].

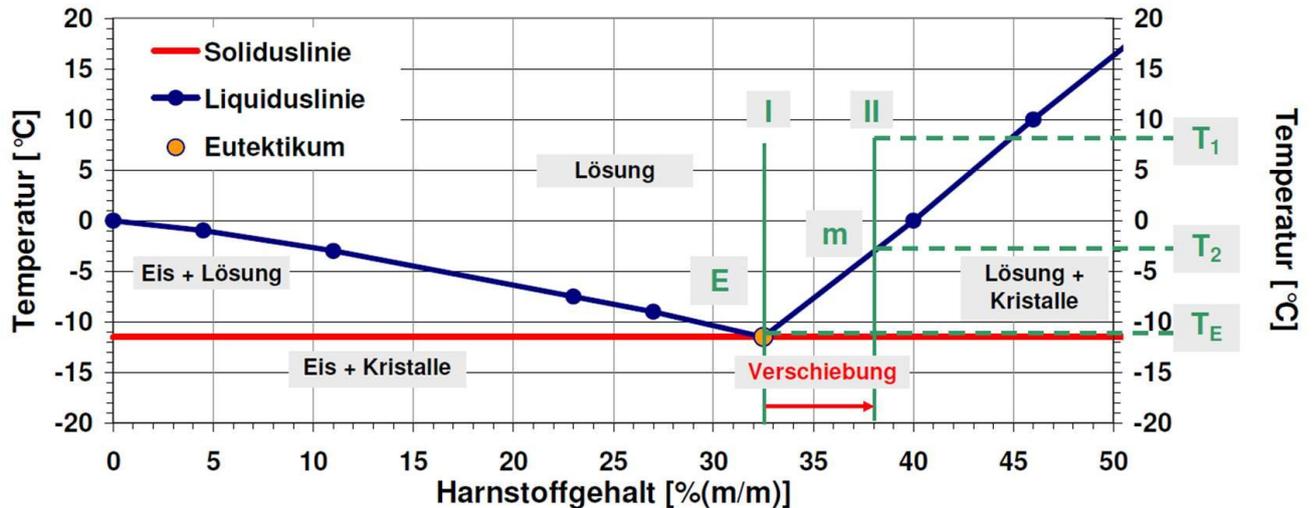


Abbildung 4.3: Phasendiagramm der 32,5%-igen Harnstoffwasserlösung [76]

4.5.1 Ablagerungsbildung

Neben den in Kapitel 4.1 angeführten Zersetzungsreaktionen der Thermolyse und Hydrolyse, bilden sich bei diesen Reaktionen unter gewissen Umständen Nebenprodukte. Bevor diese Reaktionen angeführt werden, soll in Abbildung 4.4 die Zersetzung von Harnstoff und seinen Nebenprodukten an Hand einer thermogravimetrischen Analyse des Harnstoffzersetzungprozesses dargestellt werden. Bei der Thermogravimetrie wird unter einer vorgegebenen langsamen Aufheizrate die Gewichtsabnahme der untersuchten Probenmasse aufgezeichnet und somit auf das Zersetzungsverhalten rückgeschlossen.

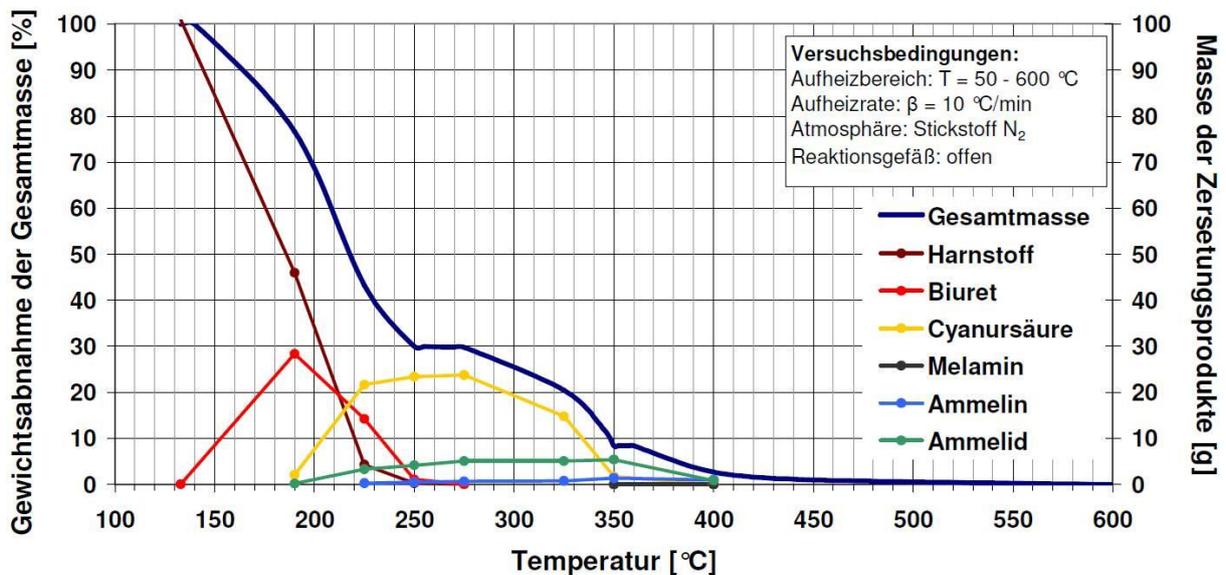


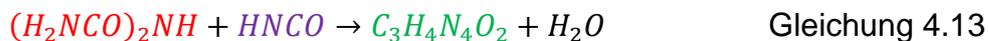
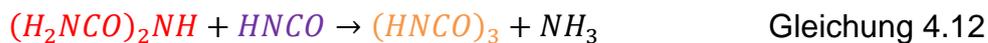
Abbildung 4.4: Thermogravimetrische Analyse der Harnstoffzersetzung [76]

In Abbildung 4.4 ist ersichtlich, dass von den angeführten Nebenprodukten speziell Biuret und Cyanursäure den größten Teil der Harnstoffzersetzung einnehmen. In Abhängigkeit der Versuchsbedingungen wie Aufheizrate und Aufheizbereich, können sich die einzelnen Temperaturbereiche geringfügig verschieben, doch der Masseanteil der einzelnen Nebenprodukte bleibt gleich.

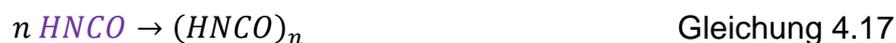
Die Bildung der Nebenprodukte erfolgt über verschiedenste Reaktionen mit Isocyanensäure, Ammoniak und Wasser. So neigt das Zwischenprodukt der Harnstoffzersetzung, die Isocyanensäure HNCO , bei Temperaturen oberhalb von 0°C zur Polymerisation und bildet somit die Ausgangslage für mögliche Ablagerungen im SCR-System. Über 152°C kann nicht zersetzter Harnstoff $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ bei ausbleibender Hydrolyse mit einem Teil der Isocyanensäure HNCO zu Biuret $(\text{H}_2\text{NCO})_2\text{NH}$ reagieren (Gleichung 4.11). [93], [94], [95]



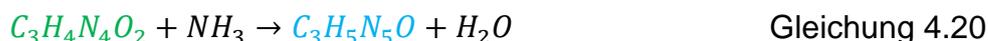
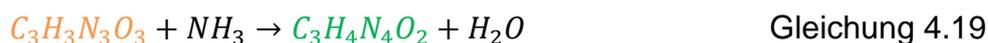
Dieses Biuret besteht aus farblosen Kristallen [96]. Beim Schmelzpunkt von 193°C zerfällt es wieder in Harnstoff und Isocyanensäure [97], [95]. Tritt dieser Zerfall nicht ein, können sich aus Biuret $(\text{H}_2\text{NCO})_2\text{NH}$ über weitere Schritte weitere Nebenprodukte bilden. In Folge sollen die Reaktionen (Gleichung 4.12 bis Gleichung 4.16) zur Bildung der Folgeprodukte Cyanursäure $(\text{HNCO})_3$, Ammelid $\text{C}_3\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_2$, Ammelin $\text{C}_3\text{H}_5\text{N}_5\text{O}$ und Triuret $(\text{NH}_2)_4(\text{CO})_3$ angegeben werden [95], [98], [93].



Zumeist handelt es sich hierbei also um Reaktionen von **Biuret** mit **Isocyanensäure** unter der Abgabe von Wasser oder Ammoniak. Des Weiteren kann **Isocyanensäure** selbst zu Cyamelid $(\text{HNCO})_n$ polymerisieren (Gleichung 4.17) [93], bzw. zu **Cyanursäure** $(\text{HNCO})_3$ trimerisieren (Gleichung 4.18) [93].



Schließlich können auch aus dem Folgeprodukt **Cyanursäure** über die Aminierung unter Abspaltung von Wasser die Verbindungen **Ammelid** $\text{C}_3\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_2$ und **Ammelin** $\text{C}_3\text{H}_5\text{N}_5\text{O}$ [99], sowie Melamin $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$ [95], [100], [101] gebildet werden (Gleichung 4.19 bis Gleichung 4.21).



Eine Übersicht der genannten Reaktionen zur Bildung der unerwünschten Nebenprodukte und die für den Ablauf erforderlichen Temperaturbereiche, sind in Abbildung 4.5 dargestellt. Dabei stellt der linke Pfad die Folgeprodukte aus Biuret der Gleichung 4.12 bis Gleichung 4.16 dar. Der rechte Pfad zeigt erst die Trimerisation und schließlich die Aminierung unter Abspaltung von Wasser (Gleichung 4.18 bis Gleichung 4.21).

Somit gibt es eine Reihe potenzieller Ablagerungsprodukte in kristalliner Form, wie die farblosen **Biuret** und **Cyanursäure**, oder das weiße geruchslose Melamin.

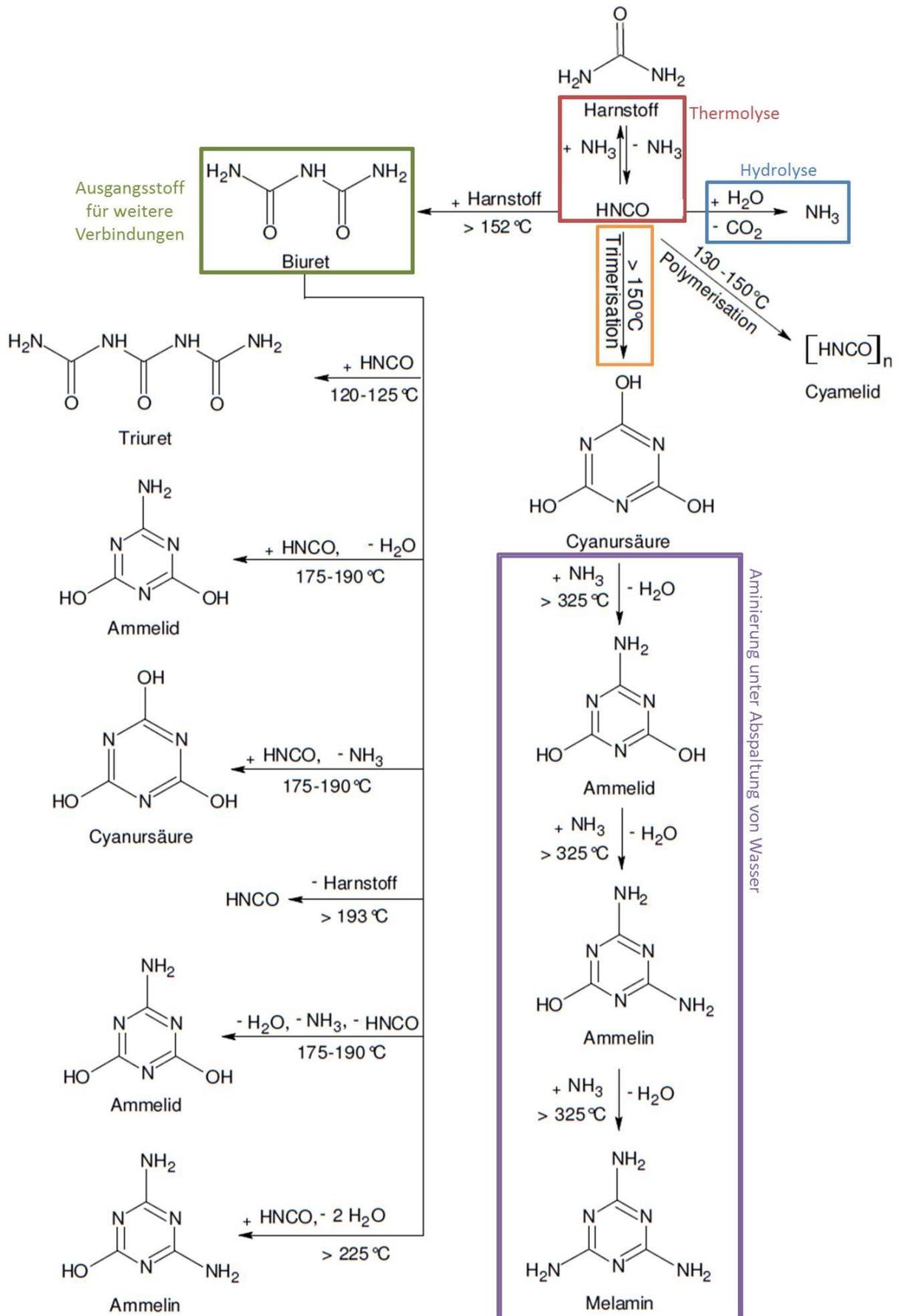


Abbildung 4.5: Übersicht der potentielle Folgereaktionen bei der Harnstoffersetzung [76]

Als Ursache für mögliche Ablagerungen im Bereich des Injektors oder direkt an der Rohrwand wird Wandfilm gesehen. Neben der vorherrschenden Temperatur der Auftrefffläche ist auch die eindosierte Reduktionsmittelmenge ausschlaggebend für die Bildung möglicher Ablagerungen. Die zu hohe Reduktionsmittelmenge muss dabei nicht unbedingt durch eine Überdosierung entstehen. Sie kann einer unzureichenden Reduktionsmittelaufbereitung im Abgasmassenstrom zu Grunde liegen. In [Abbildung 4.6](#) ist ein schematisches Modell zur Wandfilmbildung dargestellt. Es zeigt die wesentlichen Einflussgrößen der Wand, des Reduktionsmittels und der gebildeten Tropfen. Aus diesen Einflussgrößen lassen sich mit der Weber- und der Ohnesorge-Zahl zwei dimensionslose Zahlen bilden, die ein Maß für die Reduktionsmittelzerstäubung und in weiterer Folge für die Wandfilmbildung sind. [76]

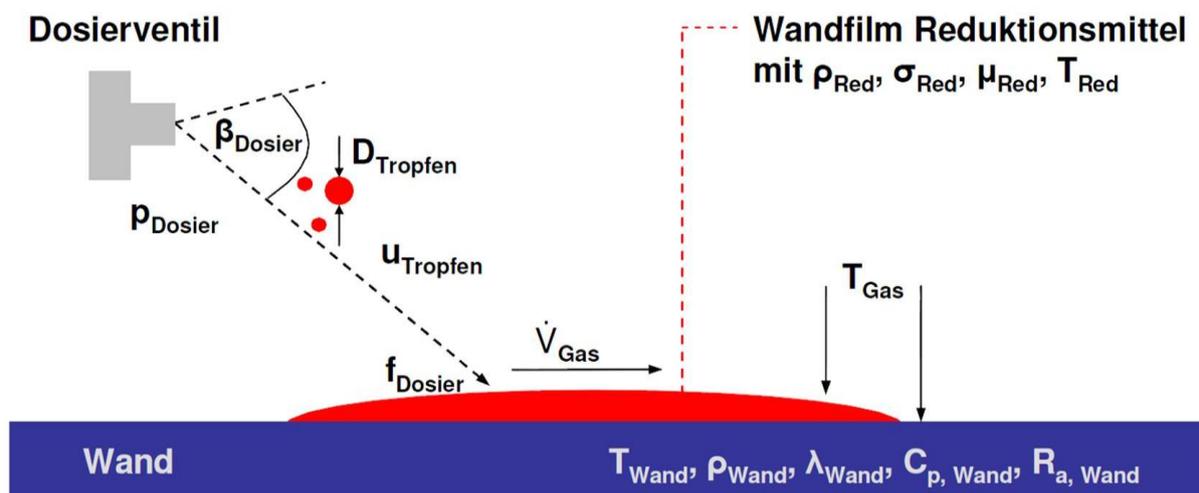


Abbildung 4.6: Schematisches Modell der Wandfilmbildung und deren Einflussgrößen [76]

4.5.2 Leidenfrost-Effekt

Der Leidenfrost-Effekt (Filmsieden) ist auch als Herdplatten-Effekt bekannt. Darunter versteht man die Ausbildung eines stabilen Dampffilms, wenn die Temperatur des berührten Körpers oberhalb der Siedetemperatur des auftreffenden Tropfens liegt. Dieser Dampffilm wirkt isolierend, wodurch sich die größte Verdampfungszeit für den auftreffenden Tropfen ergibt [102]. In [Abbildung 4.7](#) sind unterschiedliche Siedezustände für Einzeltropfen angeführt.

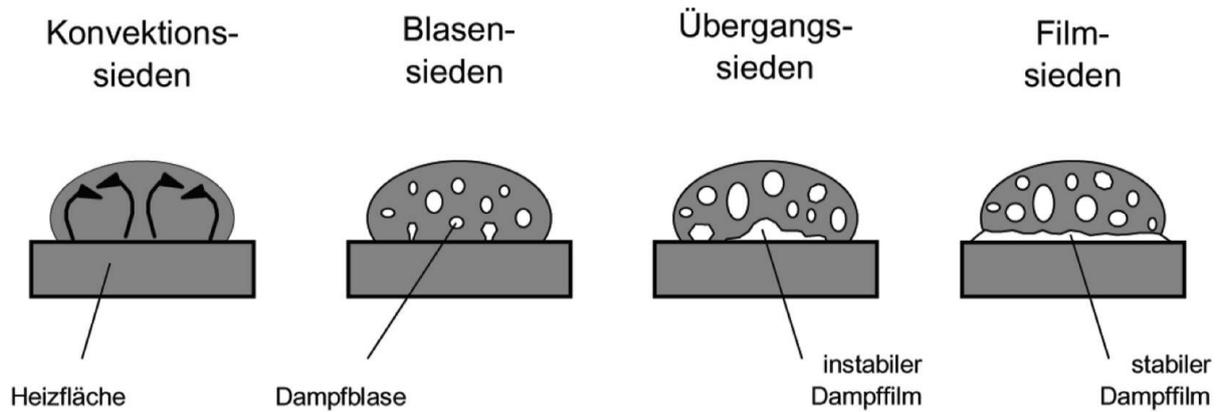


Abbildung 4.7: Charakteristische Siedezustände für Einzeltropfen [102]

Auf Grund der isolierenden Wirkung ist oberhalb der Leidenfrosttemperatur nur eine geringe Steigerung des Wärmeübergangskoeffizienten zu verzeichnen. Neben der Wandtemperatur spielt vor allem die Weberzahl (We-Zahl) eine Rolle.

$$We = \frac{\rho_{Tr} * v_{Tr}^2 * d_{Tr}}{\sigma_{Tr}} \quad \text{Gleichung 4.22}$$

Die Weberzahl gibt das Verhältnis zwischen kinetischer Energie und Oberflächenspannung des Tropfens an (Gleichung 4.22) [103]. Das Tropfenverhalten bei Wandaufprall oberhalb der Leidenfrosttemperatur für unterschiedliche Weberzahlen zeigt Abbildung 4.8.

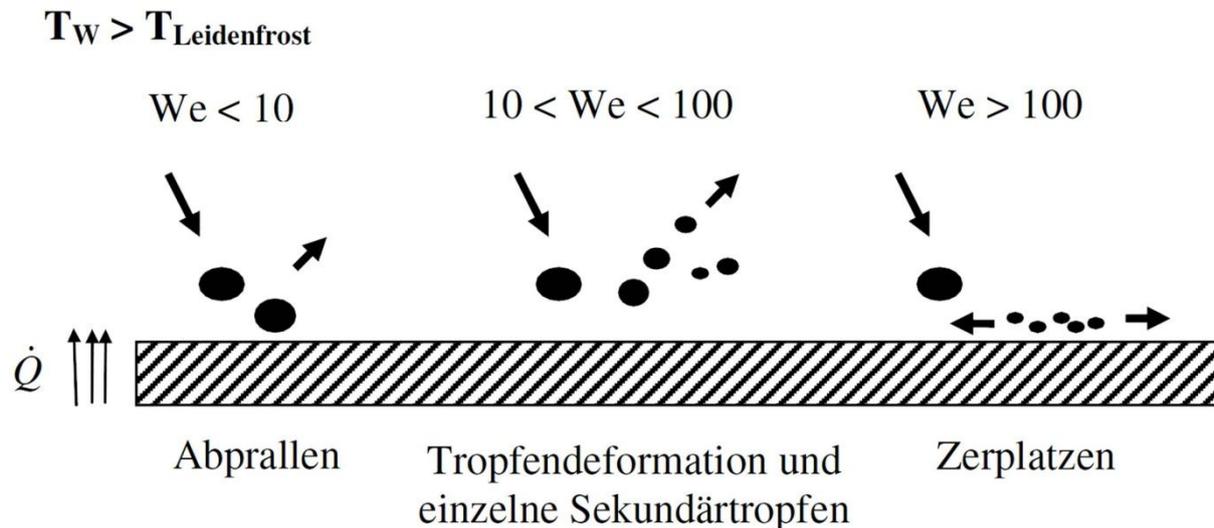


Abbildung 4.8: Tropfenverhalten bei Wandaufprall bei unterschiedlicher Weberzahl oberhalb der Leidenfrosttemperatur [103]

Die genaue Kenntnis der Leidenfrosttemperatur ist somit vor allem bei Gleichverteilungs- und Ablagerungsversuchen von großer Bedeutung, da hierbei Tropfen an Mischelementen und Rohrwänden auftreten ohne auf Grund des

isolierenden Dampffilmes zu verdampfen. Dies kann einen Tropfentransport bis zum Katalysator bewirken.

4.5.3 Injektor

Hinsichtlich Temperatur und Strömungssituation stellt die Dosierstelle eine wahrscheinliche Ablagerungsstelle dar. Auf Grund der geringen Temperaturbeständigkeit des Injektors muss dieser etwas außerhalb des heißen Abgasstromes positioniert werden. Dadurch stellen sich naturgemäß nicht nur niedrigere Ventil- sondern auch geringere Wandtemperaturen ein. In Abbildung 4.9 sind Entstehungsmechanismen von Ablagerungen im Bereich der Dosierstelle angegeben.

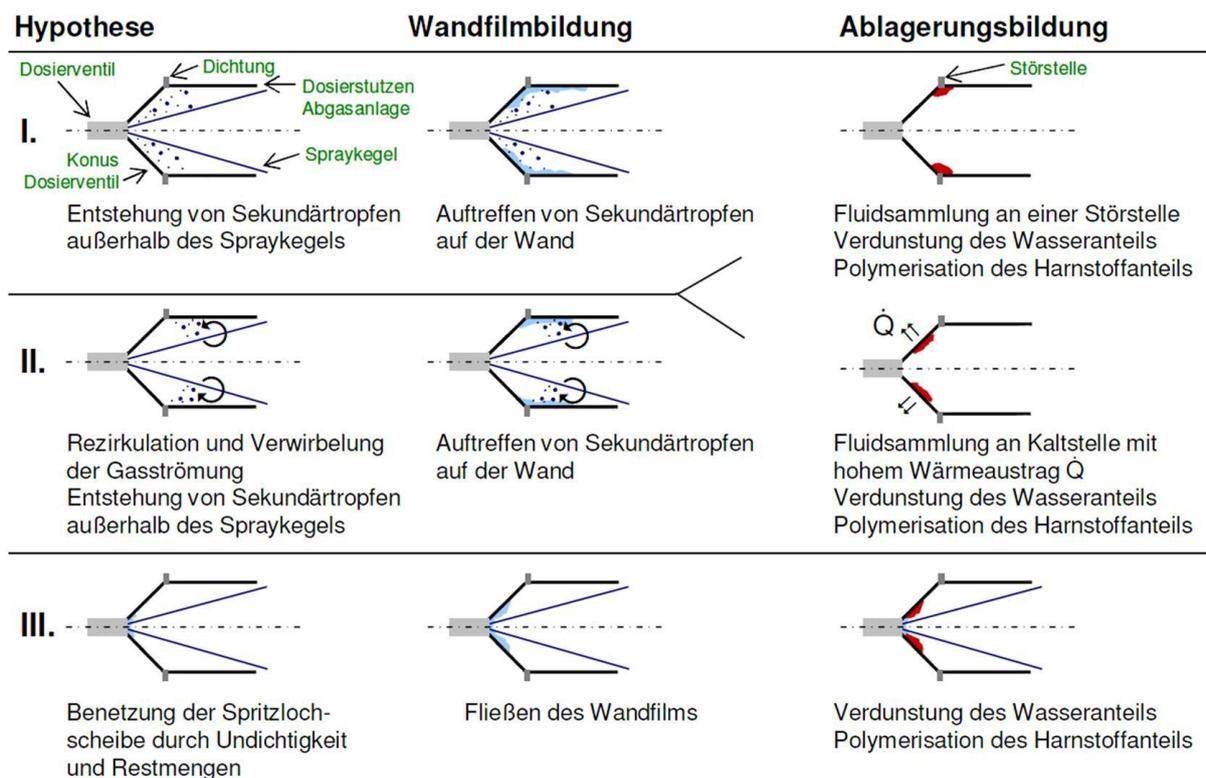


Abbildung 4.9: Hypothese zur Ablagerungsbildung im Bereich des Injektorsitzes [76]

In Hypothese I und II wird die Wandfilmbildung von Sekundärtropfen ausgelöst, die sich besonders an kalten Stellen wie dem Dosierventilkonus oder der Anschlussdichtung des Injektors zu Ablagerungen ausbilden.

In Hypothese III wird von einem dauerhaft benetzten Injektor ausgegangen. So können sich auf Grund von Undichtigkeiten, oder Restmengen nach der Dosierung Wandfilm und in weiterer Folge Ablagerungen an der Injektorspitze ausbilden. [76]

Über diese Hypothesen hinaus gehend können auch noch Verwirbelungen auf Grund der Rohrgeometrie ein Rückströmen der eingesetzten Tropfen bewirken. Abbildung 4.10 zeigt schematisch die Strömungssituation am Injektorsitz.

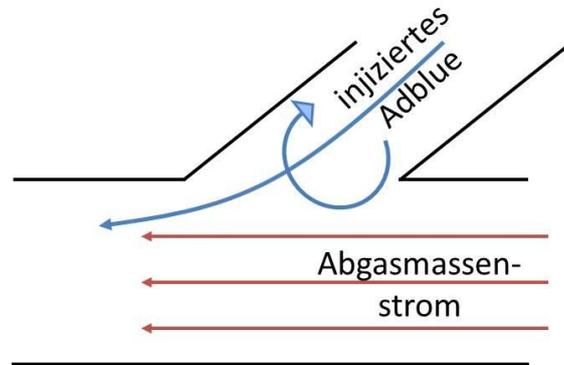


Abbildung 4.10: Verwirbelungen am Injektorsitz auf Grund der Rohrgeometrie [104]

Ablagerungen im Bereich der Dosierstelle sind als sehr kritisch zu bewerten, da sie dazu führen können, dass auch das Spraybild sowie die grundsätzliche Funktion der Dosiereinheit beeinträchtigt werden.

5 Programm und entwickelte Methoden

Die Untersuchungen und Analysen der Abgasanlagen, Mischelemente und Dosiersysteme wurden größtenteils an einem Motorenprüfstand durchgeführt.

5.1 Prüfstandsaufbau

Der Prüfstandsaufbau hat sich im Laufe der Untersuchungen stets weiterentwickelt und wurde an die spezifischen Anforderungen angepasst. Die meisten Adaptierungen betrafen den Abgasstrang. In seiner Grundform wurde er jedoch konstant beibehalten. Abbildung 5.1 zeigt einen solchen Prüfstandsaufbau für den verwendeten Verbrennungsmotor schematisch. Der Oxidationskatalysator ist unmittelbar nach dem Abgasturbolader angebracht. Damit soll ein schnelles Anspringen des Katalysators gewährleistet werden. Im Abgasstrang folgt des Weiteren der Dieselpartikelfilter mit einer Differenzdruckmessung zur Überwachung des Beladungszustandes. Darauf folgt das in dieser Arbeit untersuchte System zur selektiven katalytischen Reduktion. Dies setzt sich aus der NH₃-Dosierstelle, einem Mischelement und schließlich dem SCR-Katalysator zusammen.

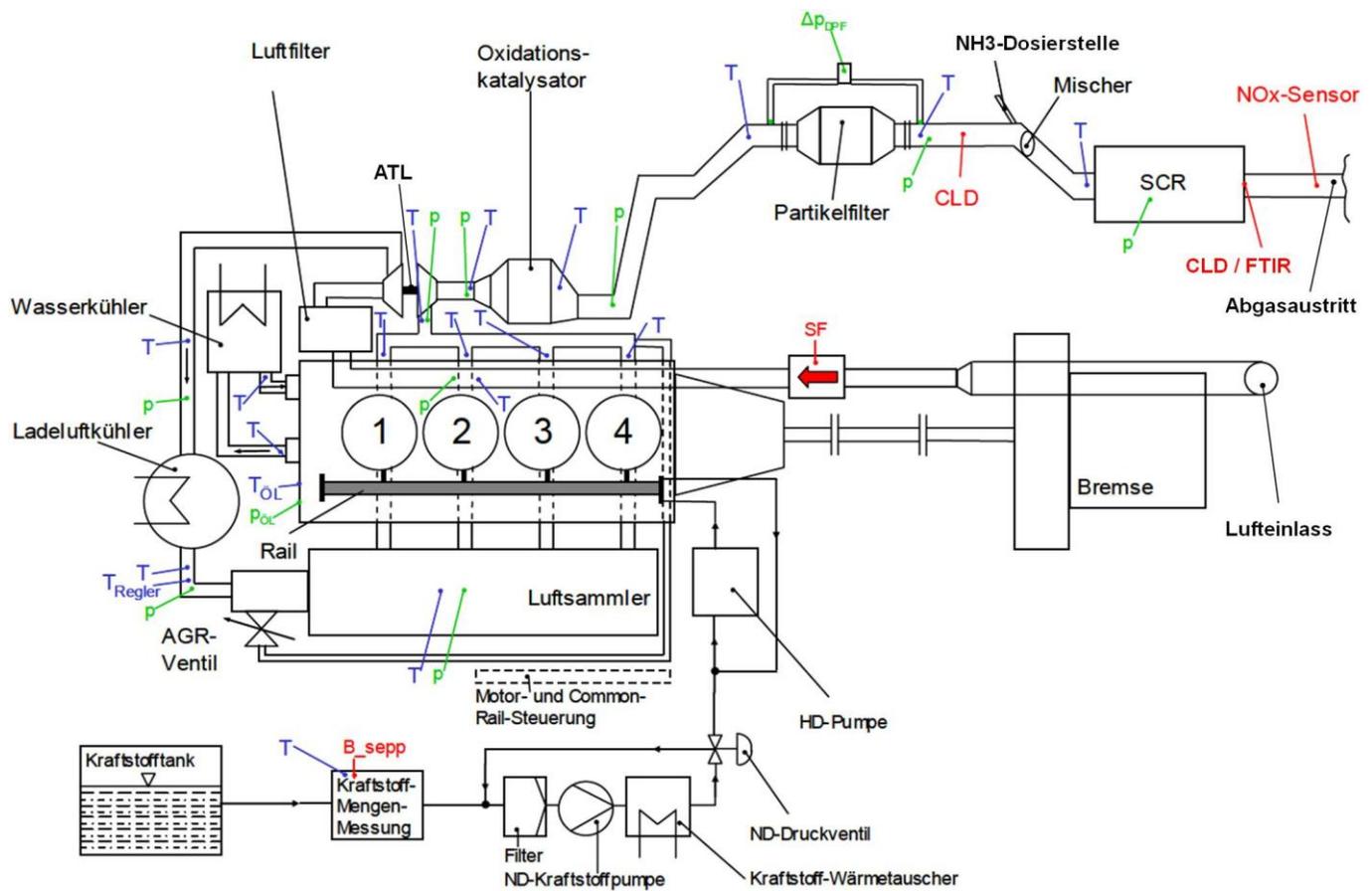


Abbildung 5.1: Schematischer Prüfstandsaufbau für den verwendeten Verbrennungsmotor

Die Verbrennungskraftmaschine und das Wechselgetriebe sind als eine starre Einheit elastisch in drei Punkten gelagert. Im Getriebe ist die Schaltstufe mit der direkten Verbindung der Eingangs- und der Ausgangswelle eingelegt. Eine Gelenkwelle realisiert die Verbindung zur Lastmaschine. Die Abwärme des Systems wird mittels Wasser-Wasser-Wärmetauscher über Frischwasserkühlung abgeführt. In gleicher Form wird über einen Luft-Wasser-Wärmetauscher die Ladeluft gekühlt.

Eine wassergekühlte Wirbelstrombremse vom Typ Schenck W230 dient als Lastmaschine („Bremse“ in Abbildung 5.1). Der Maschinensatz befindet sich auf einem entkoppelten Maschinenfundament.

Als Versuchsmotor dient ein direkt einspritzender 4-Zylinder Dieselmotor mit Common-Rail-Einspritzsystem und Abgasturboaufladung mit variabler Turbinengeometrie. Das Aggregat verfügt über eine externe, gekühlte Abgasrückführung, zwei getrennte Einlasskanäle pro Zylinder zur Drallerzeugung und über schwingungsreduzierende Ausgleichswellen. Die wichtigsten technischen Daten sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Versuchsträger	
Interne Bezeichnung	Daimler OM 646
Hubraum [cm ³]	2148
Bohrung [mm]	88
Hub [mm]	88,4
Zylinder Anzahl / Anordnung	4 Reihe
Ventilanzahl / Zylinder	4
Nennleistung [kW] bei min ⁻¹	110 bei 3800
Nennmoment [Nm] bei min ⁻¹	330 bei 1800-2400
Kraftstoff	Diesel
Gemischaufbereitung	Common Rail Direkteinspritzung bis 1600bar
Aufladung	VTG Abgasturboaufladung mit Ladeluftkühlung
Abgasrückführung	gekühlt
Verdichtungsverhältnis	18:1

Tabelle 5.1: Technische Daten des Versuchsmotors

In Tabelle 5.2 sind die physikalischen und chemischen Grundeigenschaften der verwendeten Betriebsstoffe angegeben.

Kraftstoff		Motoröl	
CEC Dieselkraftstoff		BP VISCO 3000 SAE 10W40	
Dichte	836,7 kg/m ³	Dichte bei 15°C	865 kg/m ³
Schwefelgehalt	8 mg/kg	Flammpunkt	199 °C
Cetanzahl	52,2	Viskosität bei 100°C	14,6 mm ² /s
PAH	2,6 %Masse	Viskosität bei 40°C	105 mm ² /s
Viskosität	3,02 mm ² /s	Stockpunkt	-39 °C

Tabelle 5.2: Eigenschaften der Betriebsmittel [105]

Als Kühlmittel wurde Mercedes-Benz Frostschutzmittel zu gleichen Teilen mit Wasser gemischt.

Zur Einbringung der HWL wurde zumeist eine heute im Serieneinsatz befindliche 3-Lochdüse verwendet. Die drei gepulst austretenden Strahlen spannen bei diesem Modell einen Kegel mit einem Winkel von etwa 16° auf (Abbildung 5.2). Dieser Winkel wird als Spraykegelwinkel α bezeichnet. Allerdings ist dessen Definition auf 2 Arten möglich. Die angegebenen 16° entsprechen der Methode mit r , dem Radius der Strahl-Mittelpunkte.

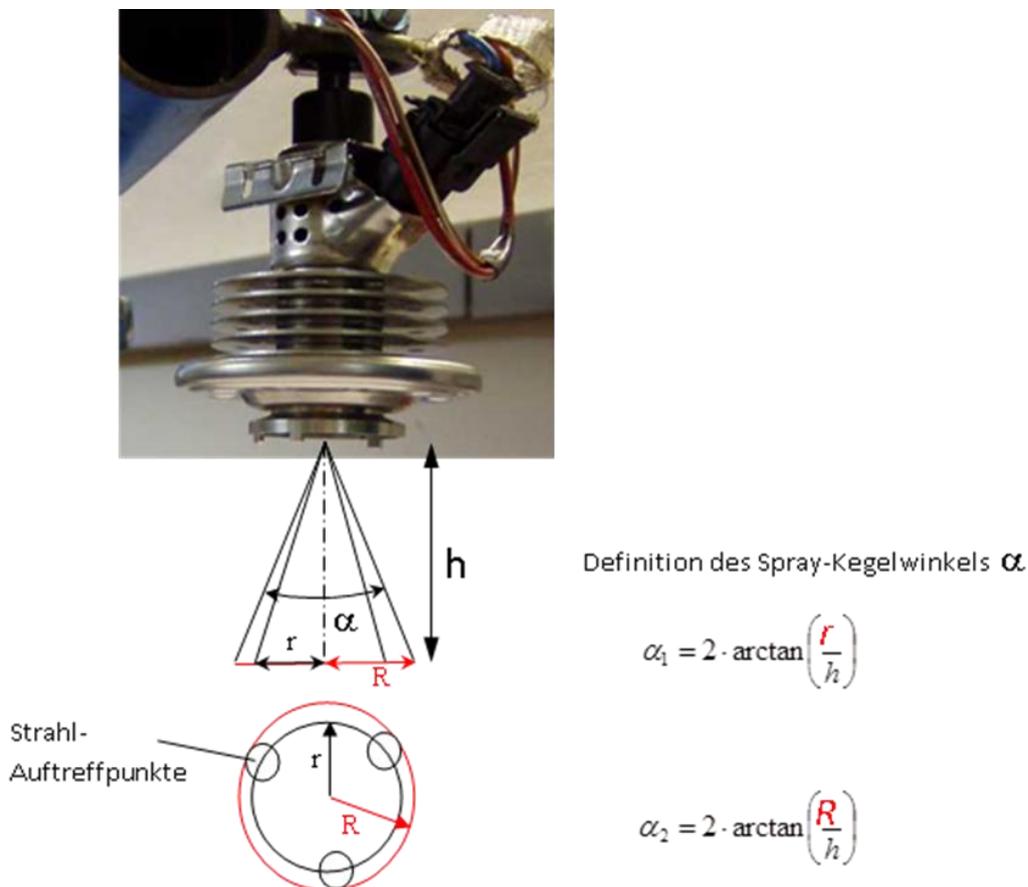


Abbildung 5.2: Definition des Spraykegelwinkels am Beispiel einer Dreilochdüse.

Im Laufe der Untersuchungen wurden jedoch auch Düsen mit alternativem Spraykegelwinkel eingesetzt. Seine Auslegung ist abhängig von den gewünschten Auftreffpunkten des Sprays in der Abgasanlage. Dosierwinkel, Rohrdurchmesser und Abstand zum gewünschten Auftreffpunkt sind dabei die zu berücksichtigenden Parameter.

Neben dieser luftgekühlten Variante kamen in späterer Folge wassergekühlte Injektoren zum Einsatz, die im Fahrzeug im Kühlwasserkreislaufsystem eingebunden sind. Am Prüfstand wurde die Kühlung mit Frischwasser realisiert. Der Düsenkörper selbst bleibt aber unabhängig von der Kühlungsart weitgehend identisch. Als Einspritzdruck wurden zumeist 5bar eingestellt. Alternativ wurden auch Drücke von 4,5 bis 10bar untersucht. Der mittlere Sauterdurchmesser der verwendeten Düsen liegt bei etwa $100\mu\text{m}$. Der Sauterdurchmesser gibt einen mittleren Durchmesser der bei der Dosierung der Harnstoffwasserlösung entstehenden Tröpfchen an. Er ist definiert als das Verhältnis von Gesamtvolumen der eingespritzten AdBlue®-Menge zur Gesamtoberfläche der gebildeten Tröpfchen. Damit ist der Sauterdurchmesser eine wichtige Kenngröße zur Bewertung eines Einspritzstrahls. Abbildung 5.3 zeigt beispielhaft die Größenverteilung der erzeugten Tröpfchen eines verwendeten Injektors bei 5bar Einspritzdruck.

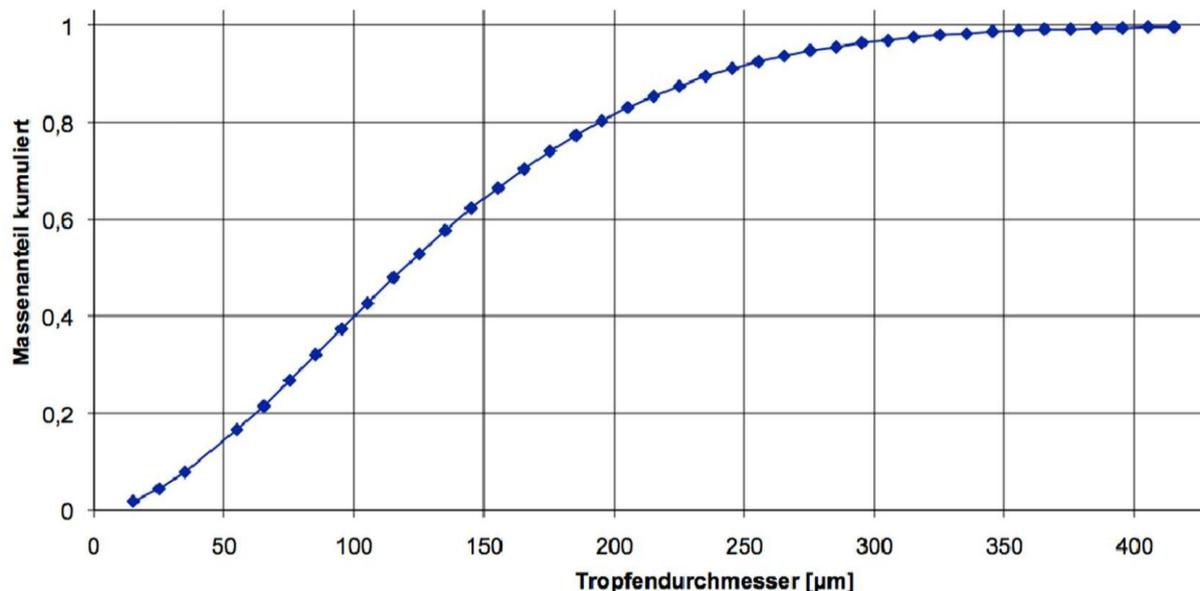


Abbildung 5.3: Tropfenverteilung eines 16°-Bosch-Injektors [106]

5.1.1 Bestimmung der Dosiermenge

Die Dosiermenge ergibt sich aus dem gewünschten Dosierverhältnis (Feedverhältnis) α (Gleichung 5.1). Dies gibt den Zusammenhang zwischen der eindosierten Ammoniakmenge und der vorhandenen NO_x-Menge an [107]. Für einen Wertebereich von $0 < \alpha < 1$ erfolgt die Dosierung unterstöchiometrisch, während bei $\alpha > 1$ eine überstöchiometrische Dosierung vorliegt.

$$\alpha = \frac{\dot{n}_{NH_3}}{\dot{n}_{NO_x}} = \frac{\dot{m}_{NH_3} \cdot M_{Abgas}}{c_{NO_x} \cdot \dot{m}_{Abgas} \cdot M_{NH_3}} \quad \text{Gleichung 5.1}$$

\dot{n}_{NH_3}	...Stoffmengenstrom Ammoniak
\dot{n}_{NO_x}	...NO _x -Stoffmengenstrom vor dem SCR-System
\dot{m}_{NH_3}	...NH ₃ -Massenstrom in g/h
\dot{m}_{Abgas}	...Abgasmassenstrom in g/h
c_{NO_x}	...Stickoxidkonzentration in ppm * 10 ⁻⁶
M_{NH_3}	...Molmasse des Ammoniak in g/mol
M_{Abgas}	...Molmasse des Abgases in g/mol

Neben den für die Messungen wesentlichen, direkt vom Steuergerät gelieferten Signalen, wurden am Prüfstand weitere Messeinrichtungen und Geräte verwendet. Manche der in Tabelle 5.3 aufgelisteten Geräte kamen nur für gewisse Messungen zum Einsatz, andere waren dauernd im Einsatz.

Messgröße	Messprinzip	Messgerät
Temperatur	Thermoelektrischer Effekt	Ni-Cr-Ni Thermoelement
Druck	Piezoresistiv	Keller Absolutdruckaufnehmer
HC vor Oxi	Flammenionisation	TESTA FID 1230
NO, NO _x vor SCR	Chemolumineszenz	Eco Physics CLD 700 EL hat
NO, NO _x nach SCR	Chemolumineszenz	Eco Physics CLD 700 EL hat
NO _x End of Pipe	Elektrochemisches Pumpen	Siemens VDO Smart NO _x
Kraftstoffverbrauch	Volumetrisch	Seppeler-Gefäß
NO, NO _x , NH ₃ , HNCO,...	IR-Spektrometrie	FT-IR MultiGas 2030HS

Tabelle 5.3: Vom Steuergerät unabhängige Messgrößen

Um die Geräte vor Verschmutzung zu schützen, wurde das Abgas, über kurze Leitungen mit den Entnahmestellen verbunden, durch Filter geleitet. Um ein

kondensieren der gasförmigen Abgaskomponenten vor dem Erreichen der Messgeräte zu verhindern, wurden die Entnahmeleitungen und Filter mittels elektronischer Beheizung auf eine Temperatur von 190°C geregelt. Noch höhere Temperaturen sind durch die Verwendung von Teflon-Leitung nicht möglich. Zusätzlich zu den Chemolumineszenzdetektoren (CLDs) kamen NO_x-Sensoren zum Einsatz. Die Funktion eines NO_x-Sensors ist ähnlich einer linearen Breitband-Lambdasonde. Es wird mittels elektrochemischer Pumpen die Sauerstoffkonzentration im Sensorelement erfasst. Die NO_x-Konzentration im Abgas ist proportional zum Pumpstrom des Sensorelements. Diese Sensoren können auf Grund ihrer Querempfindlichkeit auf Ammoniak zur Erkennung eines Ammoniakschlupfes am Ende des Abgasstrangs dienen. Es wird damit jedoch keine Ammoniakkonzentration gemessen, sondern nur eine mögliche Überdosierung detektiert.

Zur Entnahme der Abgasproben nach dem SCR-System wurden zwei unterschiedliche Methoden angewendet. Sowohl die Messungen am geschlossenen, als auch jene am offenen System und deren Vor- und Nachteile sollen in den nächsten beiden Kapiteln beschrieben werden.

5.2 Untersuchungen am geschlossenen Katalysatoraustritt

Bei dieser Methode werden Messsonden in das geschlossene System eingebaut und dabei gleichmäßig über den Querschnitt verteilt (Abbildung 5.4).



Abbildung 5.4: Geschlossenes System - verschraubter Auslasstrichter mit 12 Messstellen und NO_x-Sonde im Endrohr.

Die sehr kurz ausgeführten, isolierten Messleitungen werden zu einer beheizten Gasumschalteneinheit und weiter über beheizte Leitungen zu einem Chemolumineszenzdetektor (CLD) geführt. Alternativ kam hier bei einigen Untersuchungen an Stelle des CLD ein FT-IR zum Einsatz. Die Umschalteneinheit ermöglicht dabei ein automatisches Abtasten jeder Messstelle.

Der Vorteil dieser Anordnung liegt im Erhalt des Auslasstrichters des SCR-Katalysators. Damit werden die Strömungsverhältnisse an diesem Querschnitt der Abgasanlage nur unwesentlich verändert. Das Gegendruckverhalten der Anlage bleibt unverändert. Des Weiteren kann in der weiteren Abgasanlagenverrohrung ein Stickoxidsensor verbaut werden, um einen möglichen Ammoniakslupf auf Grund dessen Querempfindlichkeit zu detektieren (siehe Kapitel 5.1.1). Die Anzahl der konkreten Messpunkte am Auslassquerschnitt ist jedoch auf Grund des beschränkten Platzangebotes limitiert.

Diesem Nachteil kann man mit der Gleichverteilungsmessung an einem offenen System entgegenzutreten.

5.3 Untersuchungen am offenen Katalysatoraustritt

Die Gleichverteilungsmessung an einem offenen Katalysatoraustritt ist in [Abbildung 5.5](#) dargestellt.



Abbildung 5.5: Offenes System – eine Messsonde rastert den Katalysatorquerschnitt mit beliebiger Auflösung ab.

Ohne Auslasstrichter besteht die Möglichkeit den gesamten Querschnitt mit einer Lanze abzurastern. Die Verfahrensbewegung der Messgaslanze wird mit Hilfe eines 3-Achsen-Roboters realisiert, der über das Prüfstandmesssystem gesteuert werden kann. Die Achsen x und y ermöglichen die horizontale und vertikale Bewegung entlang der Querschnittsfläche. Achse z ermöglicht eine Zustellbewegung in Strömungsrichtung. So kann ein konstanter minimaler Abstand der Lanze zum Auslassquerschnitt gewährleistet werden. Die Anzahl der Messpunkte kann hier frei gewählt werden. In den in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurden 65 Messpunkte gleichmäßig über den Querschnitt verteilt. Dies entspricht der mehr als fünffachen Auflösung im Vergleich zum geschlossenen System und stellt somit einen klaren Vorteil dar.

Es geht jedoch der Einfluss des Auslasstrichters verloren. Da das Abgas direkt hinter der Messvorrichtung von der Abgasabsaugung aufgesammelt wird, besteht keine Möglichkeit mehr über Sensoren einen möglichen Ammoniakslupf zu detektieren. Des Weiteren besteht in den Randgebieten des Katalysators die Gefahr der Verwehungen und der Durchmischung des zu messenden Abgases mit Umgebungsluft. Dies würde die Konzentration herabsetzen und das Messergebnis verfälschen. Um diesen Effekt ausschließen zu können verfährt die Messsonde in maximal 2-3mm Abstand zum Auslassquerschnitt. Außerdem wird der Rand durch ein aufgeschweißtes Metallband abgeschirmt. Schließlich wurde zu jeder Messung am offenen Katalysator eine Korrekturmessung ohne HWL-Dosierung durchgeführt (Abbildung 5.6). Dabei ist davon auszugehen, dass die unbehandelten Emissionen den Katalysator passieren ohne reduziert zu werden. Somit kann vollständige Gleichverteilung angenommen werden. Durch Abweichungen von dieser Annahme können in den betroffenen Messpunkten Korrekturfaktoren ermittelt werden, die auf die Ergebnisse der eigentlichen Gleichverteilungsmessung angewendet werden können (Abbildung 5.7).

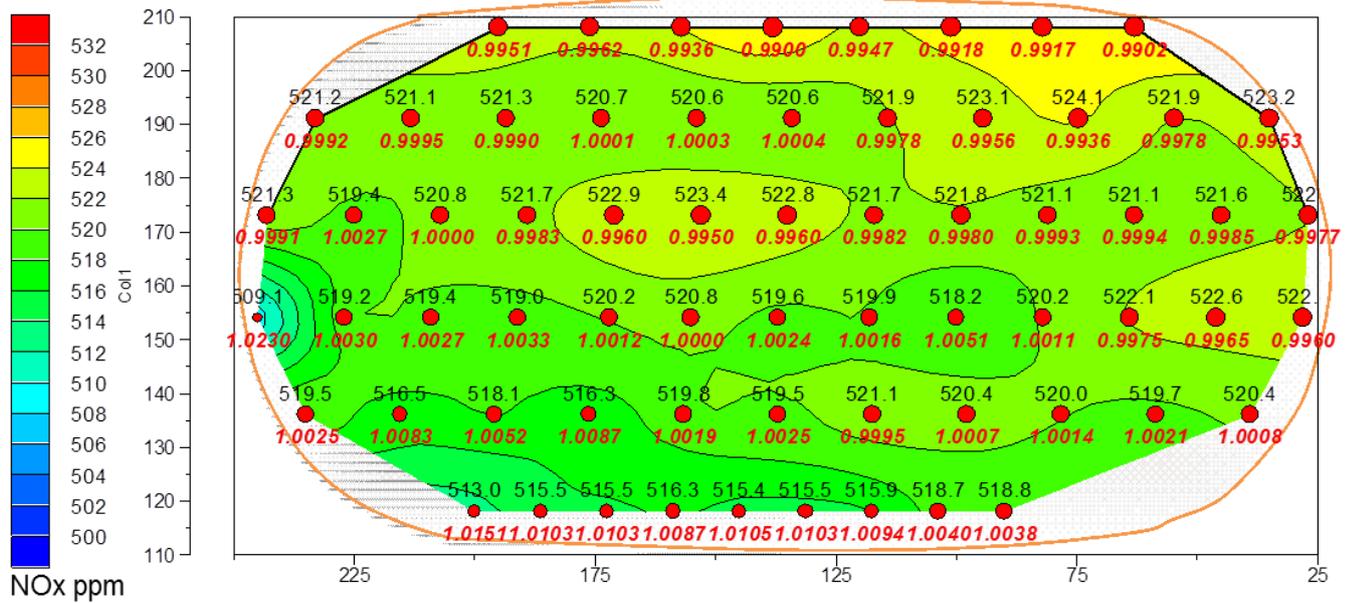


Abbildung 5.6: Messung der NO_x-Werte (schwarz) zur Ermittlung der Korrekturfaktoren (rot).

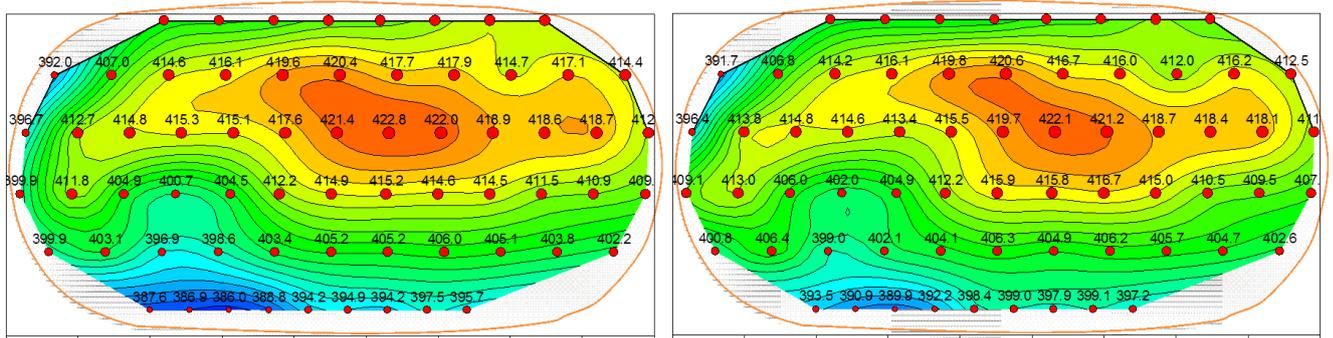


Abbildung 5.7: Gemessene NO_x-Konzentrationen bei AdBlue®-Dosierung ohne Korrektur (links) und nach Anwendung der Korrekturfaktoren (rechts).

5.4 Berechnung der Gleichverteilungszahl

Die vom Chemolumineszenzdetektor ermittelten Stickoxidwerte (NO und NO_x) können zur Auswertung mit einem auf gleiche Weise ermittelten Wert aus dem Abgasrohr nach DPF bzw. vor der AdBlue®-Dosierstelle verglichen werden. Über eine Differenzbildung kann auf die Reduktion und somit auf die Verteilung des Reduktionsmittels geschlossen werden. Dabei wird eine NO_x-Gleichverteilung vor der Dosierstelle vorausgesetzt. Zum Vergleich der untersuchten Anlagen wird die Gleichverteilungszahl γ (Uniformity-Index) gebildet, deren Definition in Strömungsanalysen sehr gebräuchlich und in [Gleichung 5.2](#) dargestellt ist [108].

$$\gamma = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |c_i - \bar{c}|}{2 \cdot \bar{c} \cdot N} \quad \text{Gleichung 5.2}$$

Darin sind:

N ...Anzahl der Messpunkte

$c_i = NO_{xvorSCR} - NO_{xnachSCR}$...NH₃-Konzentration in ppm

$NO_{xvorSCR}, NO_{xnachSCR}$...Stickoxidmesswert vor bzw. nach dem SCR-System

$\bar{c} = \frac{\sum_{i=1}^N c_i}{N}$... arithmetischer Mittelwert der NH₃-Konzentration

Die Gleichverteilungszahl liefert Werte zwischen 0 (schlechterster Fall) und 1 (ideal) und gibt Auskunft, wie effektiv der Ammoniak über den Katalysatorquerschnitt verteilt ist. Würde beispielsweise $\gamma=0,5$ sein, wäre bei der Hälfte der Messtellen keine NO_x-Reduktion feststellbar, während an der anderen Hälfte jeweils der doppelte Mittelwert messbar ist. [108] Außerdem lässt sich die relative Gleichverteilung (Gleichung 5.3) in den einzelnen Punkten ermitteln.

$$\gamma_{rel} = \frac{c_i}{\bar{c}} \cdot 100 \quad \text{Gleichung 5.3}$$

Die relative Gleichverteilung wird in dieser Arbeit zur Darstellung der Gleichverteilungsbilder herangezogen. Die jeweiligen Darstellungen entsprechen einem Blick auf den SCR-Katalysator-Körper vom Ende der Abgasanlage aus, also gegen die Strömungsrichtung (siehe Abbildung 5.8). So lassen sich Stellen mit NH₃-Mangel bzw. -Überschuss gut darstellen.

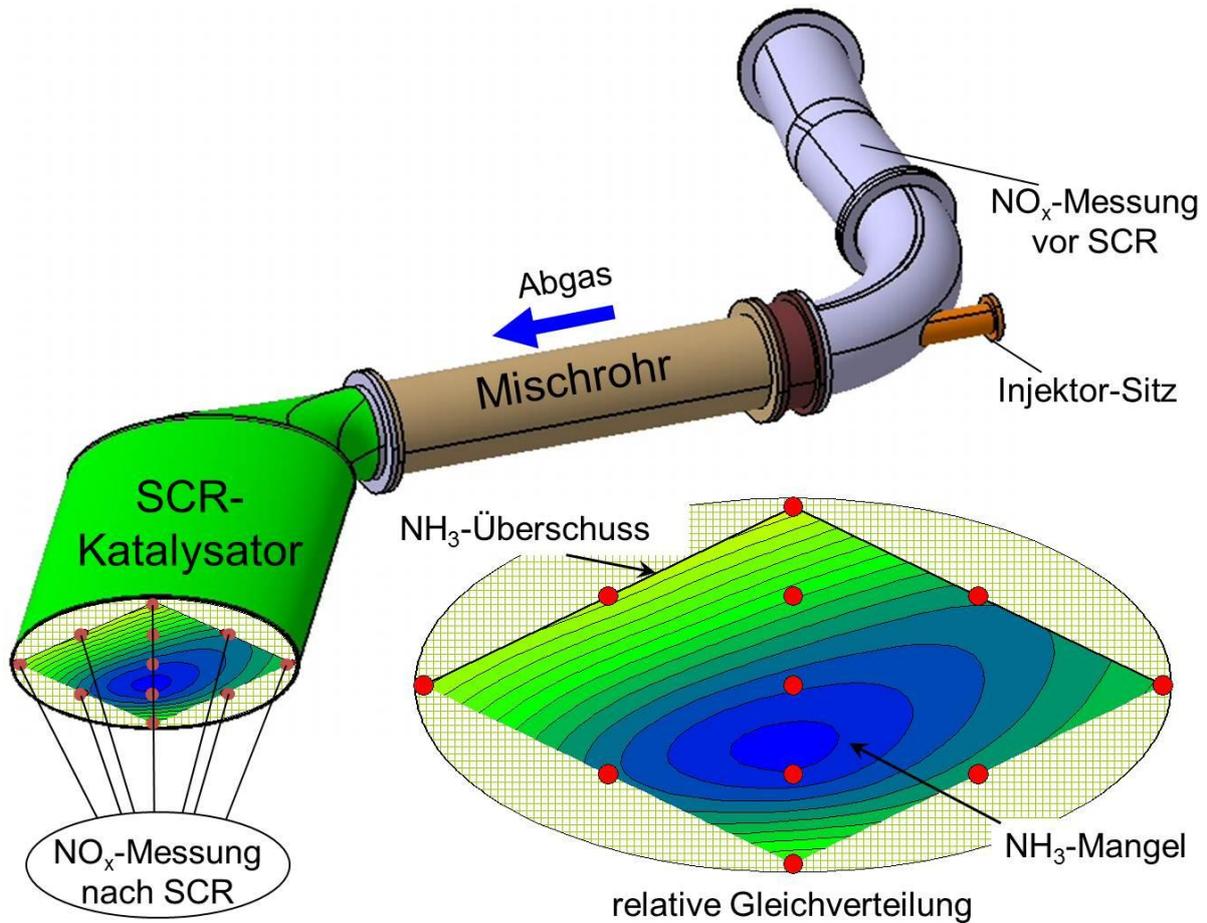


Abbildung 5.8: Darstellung der relativen Gleichverteilung am Austrittsquerschnitt des SCR-Katalysators über 11 Messpunkte (geschlossenes System).

Mit dieser Methode lassen sich auch die in Abbildung 5.7 dargestellten NO_x-Konzentrationen in Diagramme mit relativer Gleichverteilung umwandeln (Abbildung 5.9). Auch hier ist der Einfluss der Korrekturfaktoren bei der Messung am offenen System zu erkennen.

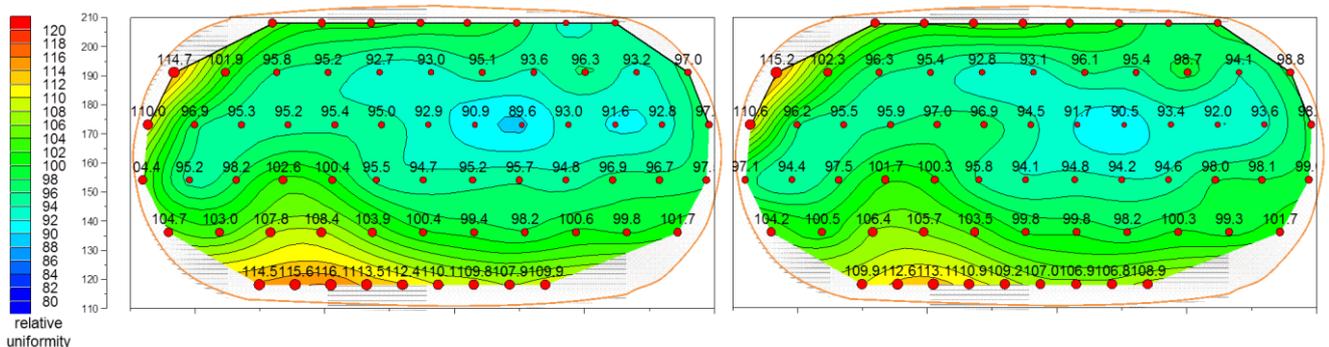


Abbildung 5.9: Berechnete relative Gleichverteilung bei AdBlue®-Dosierung ohne Korrektur (links) und nach Anwendung der Korrekturfaktoren (rechts).

Um einer wissenschaftlichen Arbeit gerecht zu werden, wurde eine sorgfältige Planung und Installation des Messtechnikaufbaus bezüglich Leitungslänge und Beheizung sowie geeigneten Armaturen zur Probenahme und Versorgung der Messgeräte durchgeführt. Nur so sind belastbare und reproduzierbare Ergebnisse erzielbar. Hier ist sehr auf die Länge der verwendeten Messleitungen zu achten. Wie in nachfolgendem Beispiel gezeigt, können vor allem nicht ausreichend oder schlecht beheizte Leitungen zu starken Verfälschungen der Resultate führen.

5.4.1 Beispiel für einen negativen Messeinfluss:

In Abbildung 5.10 sind Gleichverteilungsbilder und Gleichverteilungszahlen (nach Gleichung 5.2) von ein und derselben Abgasanlage gezeigt.

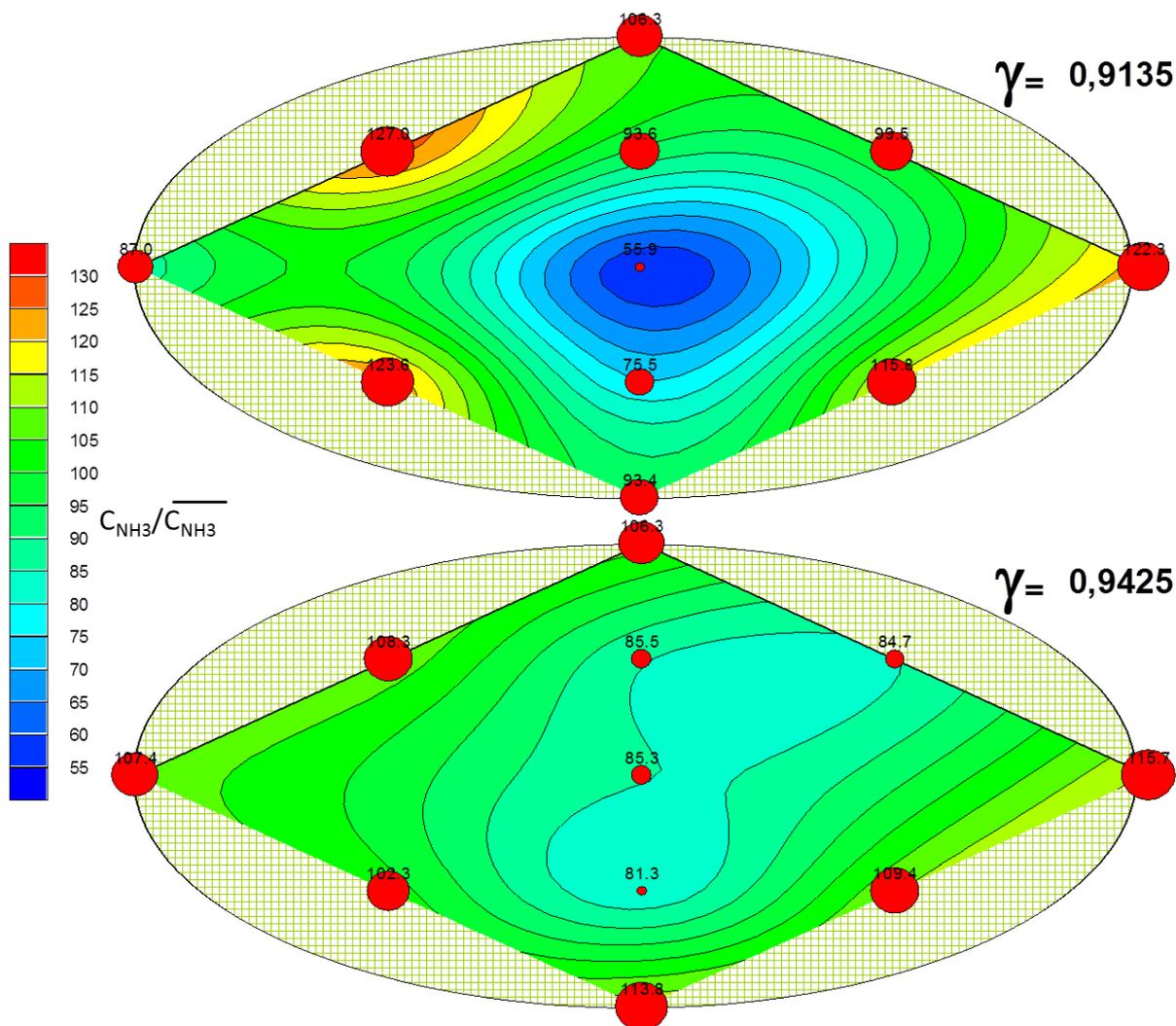


Abbildung 5.10: Gleichverteilungsbilder mit korrektem (oben) und fehlerhaftem (unten) Messaufbau.

Die Diagramme sind als Blick auf den SCR-Katalysator gegen die Strömungsrichtung, also die Austrittsfläche des Kats zu sehen (wie Abbildung 5.8). Die rötlichen Bereiche kennzeichnen hier hohe NH_3 -Konzentrationen. In blauen Bereichen herrscht hingegen eine Unterversorgung an Reduktionsmittel.

Die Messungen erfolgten am gleichen Tag und im selben Betriebspunkt. Der Unterschied liegt im Aufbau der Messleitungen zwischen Messpunkt und Messgerät. Oben wurde mit unserem Standardaufbau gemessen. Die Leitungen sind sehr kurz gehalten und überwiegend beheizt ausgeführt. Unten hingegen wurde eine um 1,5 Meter längere schlecht beheizte Leitung verwendet. Nachreaktionen in den Messleitungen führen hier zu einer Störung der Messwertermittlung. Das Messergebnis wurde dabei nicht nur verfälscht, sondern war zudem nicht reproduzierbar.

5.5 Verwendete Betriebspunkte zur Untersuchung der Gleichverteilung

Die Wahl der Betriebspunkte entwickelte sich im Laufe der wissenschaftlichen Untersuchungen stetig weiter und war somit nicht über alle untersuchten Komponenten, die in dieser Arbeit angeführt sind ident. Später angeführte Vergleiche und darauf basierende Rückschlüsse basieren jedoch ausschließlich auf identen Betriebspunkten.

Die Betriebspunkte (BP) zur Untersuchung der Gleichverteilung wurden so gewählt, dass ein möglichst großer Bereich des Motorkennfeldes abgedeckt ist. Somit soll eine Funktion der untersuchten Komponenten in jedem Anwendungsfall gewährleistet sein.

BP	$T_{\text{vSCR}} [^{\circ}\text{C}]$	$m_{\text{Abgas}} [\text{kg/h}]$	$\text{NO}_x \text{ Roh} [\text{ppm}]$	$m_{\text{Urea}} [\text{mg/s}]$
0	200	75	ca. 140	5,6
1	250	100	ca. 140	5,6
11	250	125	ca. 290	25
1s*	250	130	ca. 270	12
2*	350	200	ca. 340	25
22	350	200	ca. 340	40
23	350	350	ca. 420	35
3	450	350	ca. 720	25
4J	500	500	ca. 780	100

Tabelle 5.4: Betriebspunkte (BP) zur Untersuchung der Gleichverteilung

In Tabelle 5.4 sind beispielhaft einige der verwendeten Betriebspunkte angeführt. Sie ergaben sich aus ersten Annahmen und späteren Adaptierungen auf Grund im Laufe der Messungen gewonnener Erkenntnisse.

Als Hauptkriterium wurden die Abgastemperatur vor SCR-Katalysator T_{VSCR} und der Abgasmassenstrom m_{Abgas} herangezogen. Um diese Zielgrößen erreichen zu können wurde neben der Motordrehzahl n und dem Pedalwert α auch auf die Abgasrückführrate und den Ladedruck Einfluss genommen. Zur Änderung der Abgasrückführrate wurde über das Motorsteuergerät das Abgasrückführventil angesteuert. Die Varianz des Ladedrucks wurde über die Verstellung des Leitschaufelgitters des VTG-Abgasturboladers ebenfalls über das Motorsteuergerät realisiert.

5.6 Messung der Druckverluste im Abgassystem

Bei den untersuchten Varianten der Abgasanlagen und deren Komponenten ist nicht nur die erzielte Gleichverteilung von großer Bedeutung, sondern auch der damit verbundene entstehende Abgasgedruck. So wurde eine Vielzahl der verwendeten Mischelemente neben der Gleichverteilungsmessung auch auf ihren Druckverlust hin untersucht. Dafür wurden die zu untersuchenden Elemente in ein einfaches Geradrohr eingesetzt (Abbildung 5.11) und der Druckabfall in einem definierten Hochlastpunkt (Abgasmassenstrom = 520kg/h) ermittelt. Da sich der Fokus der Untersuchungen auf das Mischelement bezog, konnte auf den Einbau eines SCR-Katalysators in diesem Vergleichsvorgang für Druckverluste verzichtet werden.

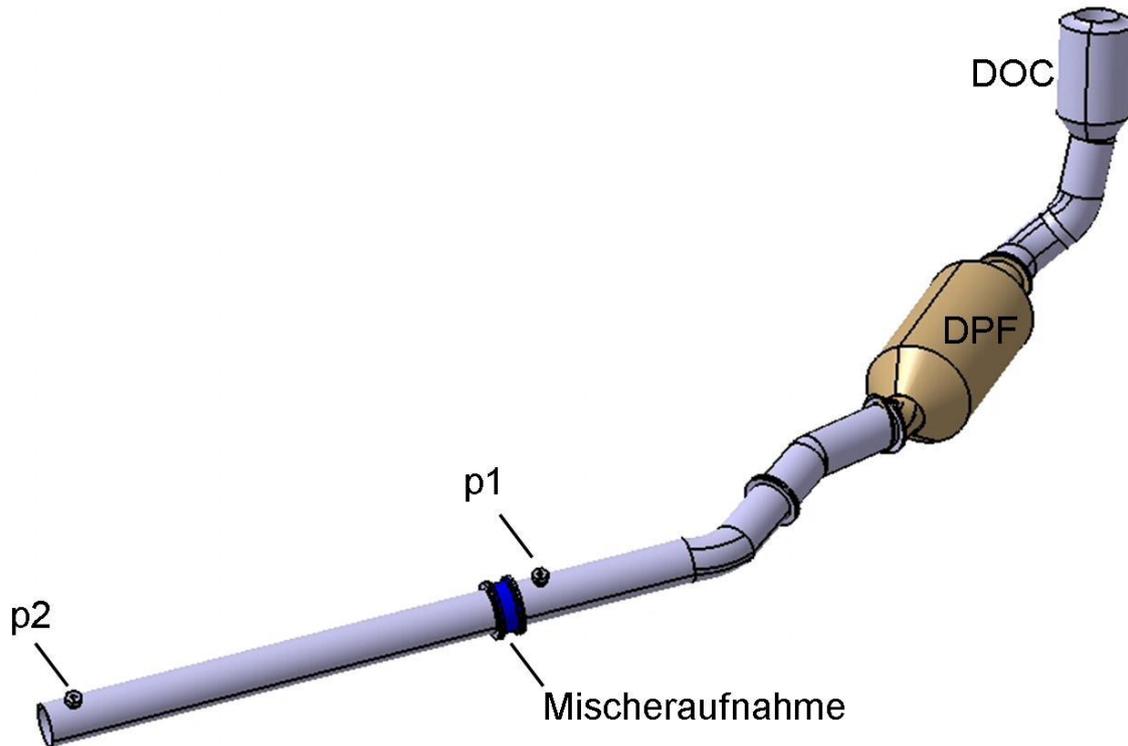


Abbildung 5.11: Abgasstrang zur Ermittlung des Mischergedrucks

5.7 Bildung von Ablagerungen am Prüfstand

Bei der Untersuchung diverser Abgasanlagen auf ihre Gleichverteilung wurden immer wieder feste Ablagerungen im Inneren der Anlage festgestellt. Es fiel auf, dass sich die Ablagerungen eher in niedrigen Lastpunkten bildeten und so wurden eigene Betriebspunkte und Fahrzyklen entwickelt, um verschiedene Anlagenelemente auf ihre Ablagerungsneigung hin zu untersuchen.

BP	n [min ⁻¹]	Pedal α [%]	T_{vSCR} [°C]	$m_{Abg.}$ [kg/h]	NO_x Roh [ppm]	m_{AdBlue} [mg/s]	α_{AdBlue} [-]
AD	2000	12	200	100	140	42	3,38
160	1700	9	160	100	140	35	2,81
180	1700	10	180	100	140	35	2,81
200	1700	11,5	200	100	200	35	1,97
220	1700	13	220	100	180	35	2,19

Tabelle 5.5: Verwendete Betriebspunkte zur Bildung von Ablagerungen

In Tabelle 5.5 sind beispielhaft Betriebspunkte zur Bildung von Ablagerungen in der Abgasanlage angeführt. Neben dem niedrigen Temperaturniveau ist auch die hohe Dosiermenge zu beachten. Mit α_{AdBlue} ist zudem das in Gleichung 5.1 (Kapitel 5.1.1) definierte Feedverhältnis angegeben und eine stark überstöchiometrische Dosierung zu erkennen. Diese deutliche Überdosierung des Reduktionsmittels für diese Betriebspunkte soll eine rasche Entstehung möglicher Ablagerungen begünstigen. Dies bewirkt, dass die Ablagerungstests in einem vertretbaren Zeitrahmen durchgeführt werden können. Da die Abgastemperatur den Parameter mit der größten Empfindlichkeit zur Ablagerungsbildung darstellt, wurden wie in Tabelle 5.5 ersichtlich, die Temperatur am SCR-Katalysatoreintritt T_{vSCR} durch Änderung der Motorlast jeweils um 20°C pro Betriebspunkt variiert. Der Abgasmassenstrom und die Dosiermenge hingegen wurden konstant gehalten.

Die stationären Betriebspunkte zur Bildung der Ablagerungen wurden teilweise bis zu 8 bzw. 16 Stunden betrieben und die Ergebnisse gravimetrisch und fotografisch festgehalten. Auch Zeitrafferaufnahmen wurden gemacht. Hierzu wurden die Anlagen nach jeder Dokumentation gereinigt und in ihren Ursprungszustand gebracht. Im Anschluss wurden die Ablagerungen erneut über den nun längeren Zeitraum aufgebracht. So konnten Effekte durch zwischenzeitliches Auskühlen vermieden werden.

Betriebspunkte mit starker Überdosierung geben einen ersten Einblick in mögliche Ablagerungsbereiche. Um darüber hinaus praxisrelevante Untersuchungen durchführen zu können, wurden weitere Betriebspunkte mit stöchiometrischer Dosiermenge verwendet. In Tabelle 5.6 ist ein Beispiel dafür angegeben.

BP	n [min ⁻¹]	Pedal α [%]	T_{vSCR} [°C]	$m_{\text{Abg.}}$ [kg/h]	NO_x Roh [ppm]	m_{AdBlue} [mg/s]	α_{AdBlue} [-]
180a	1700	10	180	100	140	13	1,04

Tabelle 5.6: Betriebspunkt zur Untersuchung praxisrelevanter Ablagerungen bei stöchiometrischer Dosierung.

Neben den angeführten stationären Betriebspunkten wurde auch Fahrzyklen zur Analyse der Ablagerungsbildung verwendet. In ersten Versuchen wurde der in Abbildung 5.12 gezeigte Zyklus gefahren. Dieser erstreckt sich über 23,5 Minuten und deckt dabei Temperaturen von 200-270°C ab.

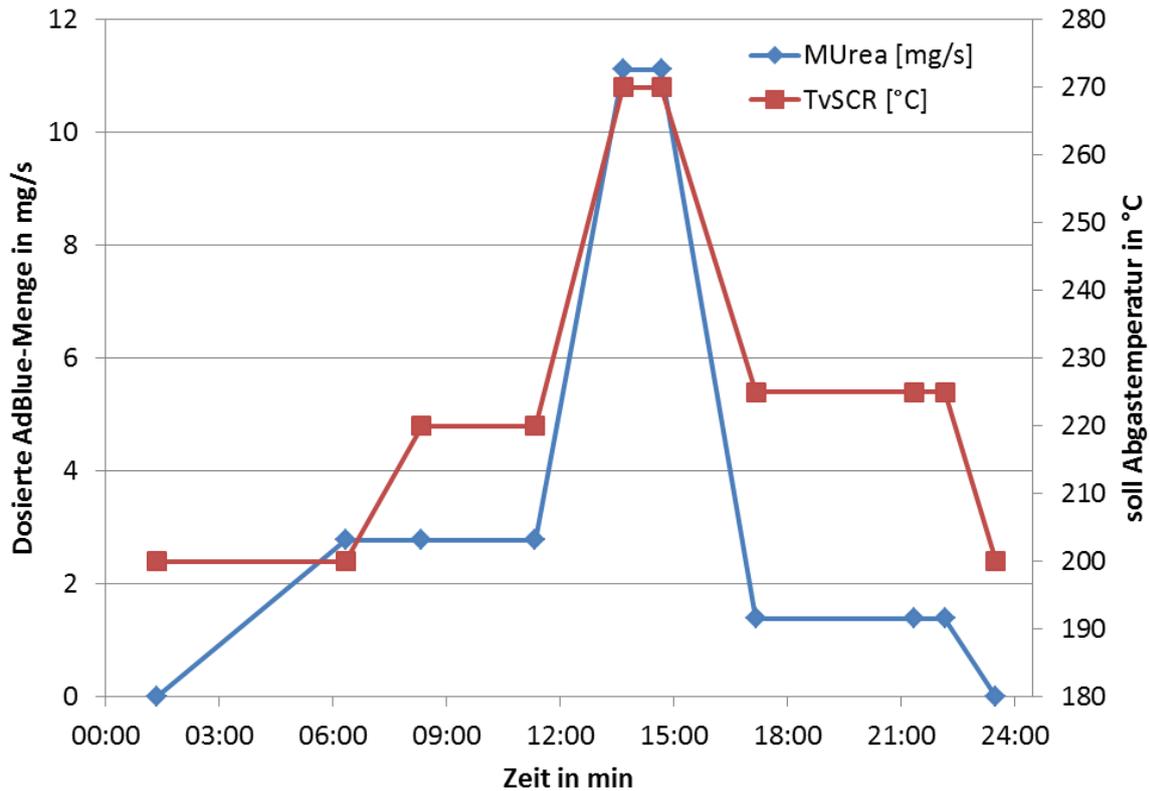


Abbildung 5.12: Fahrzyklus A zur Analyse von Ablagerungen in der Abgasanlage.

Zur Vereinfachung des Fahrprofils wurde der Zyklus auf weniger Lastpunkte gekürzt. Tabelle 5.7 zeigt die Betriebspunkte und ihre Haltezeit zur Gestaltung des modifizierten Fahrzyklus B.

BP	n [min ⁻¹]	Pedal α [%]	T_{vSCR} [°C]	m_{Abg.} [kg/h]	m_{AdBlue} [mg/s]	Zeit [min]	α_{AdBlue} [-]
A	1000	10	200	30	42	01:20	10,17
B	1000	16	200	50	35	05:00	3,75
C	1300	17	220	80	35	09:05	2,19
D	1800	22	270	150	35	09:50	1,05
E	1400	16,5	225	75	35	17:00	4,14

Tabelle 5.7: Reihenfolge der Betriebspunkte und ihre Haltezeit zur Gestaltung von Fahrzyklus B

Abbildung 5.13 zeigt das Temperaturprofil einer Messung dieses Zyklus am Motorenprüfstand.

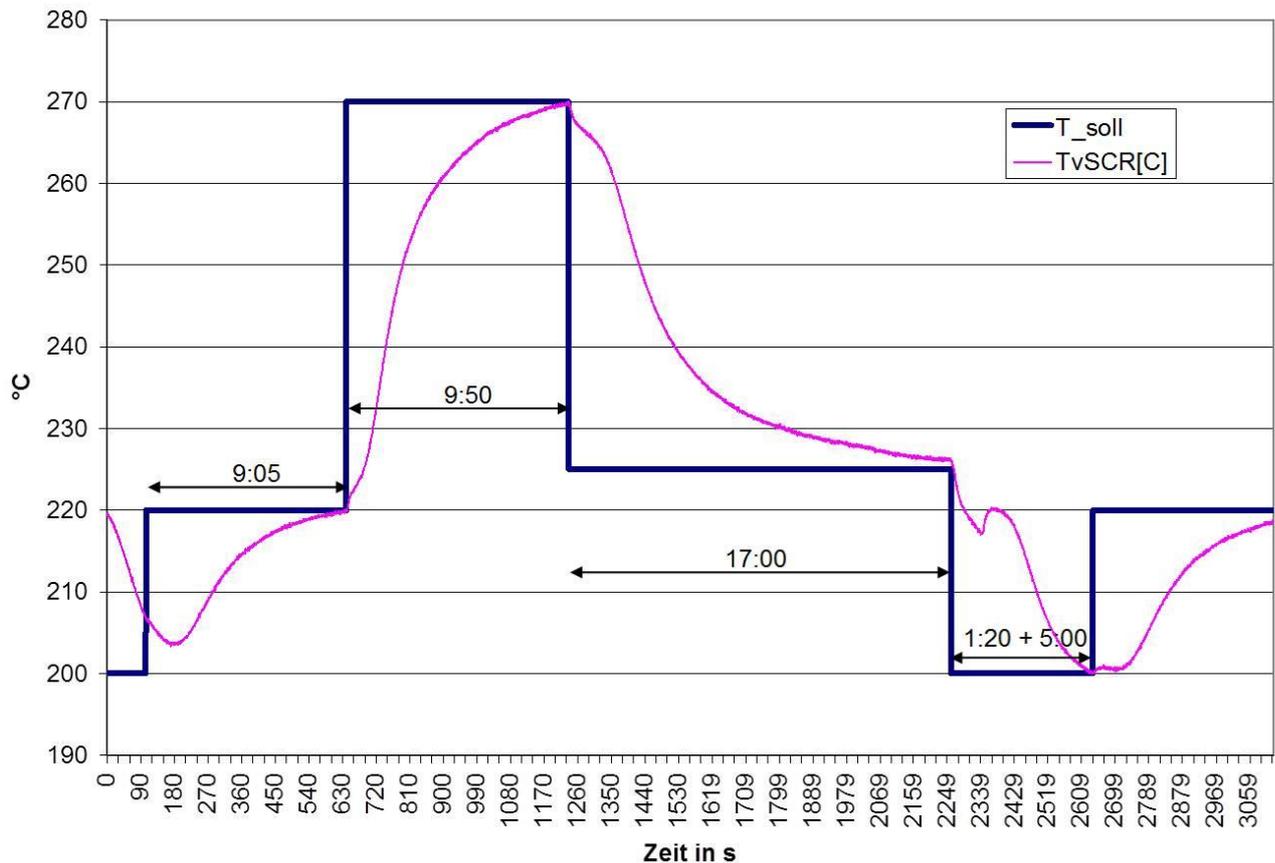


Abbildung 5.13: Fahrzyklus B zur Analyse von Ablagerungen in der Abgasanlage.

Dieser Zyklus mit einer Länge von ca. 42 Minuten wurde in einem 30 Stunden langen Dauerlauf wiederkehrend durchlaufen. Die Ergebnisse zeigten trotz der relativ hohen Abgastemperaturen von 270°C Ablagerungen an der Düsen Spitze. Um jedoch ein aussagekräftigeres Ergebnis mit mehr Ablagerungen an den untersuchten Anlagenkomponenten zu erreichen musste die Dosiermenge von AdBlue® erhöht werden. Wie die Ergebnisse in Kapitel 6.3 zeigen führten jedoch die Untersuchungen mit stationären Betriebspunkten und hoher Dosiermenge über lange Zeit (bis zu 16 Stunden) zu den aussagekräftigsten Ablagerungsbildern. So kann am besten auf die Neigung zur Ablagerungsbildung von Anlagenkomponenten rückgeschlossen werden.

Für vereinzelte Sondermessungen wurde die Abgasanlage zur Erzeugung von Ablagerungen statt am Motorenprüfstand auf einem eigens konstruierten Strömungsprüfstand aufgebaut (Abbildung 5.14). Für den Massenstrom sorgte hier ein Roots-Gebläse. Die Temperatur konnte durch einen Luftherhitzer auf den gewünschten Wert gebracht werden. Um mögliche Verwirbelungen aus der

Ansaugstrecke zu minimieren wurde vor der zu untersuchenden Komponente ein Strömungsgleichrichter verwendet. Mit diesem Aufbau ließ sich ein Luftmassenstrom von 100kg/h auf eine Lufttemperatur von 100°C regeln. Solch niedrigen Temperaturen lassen sich am Motorenprüfstand nicht über einen längeren Zeitraum konstant realisieren.

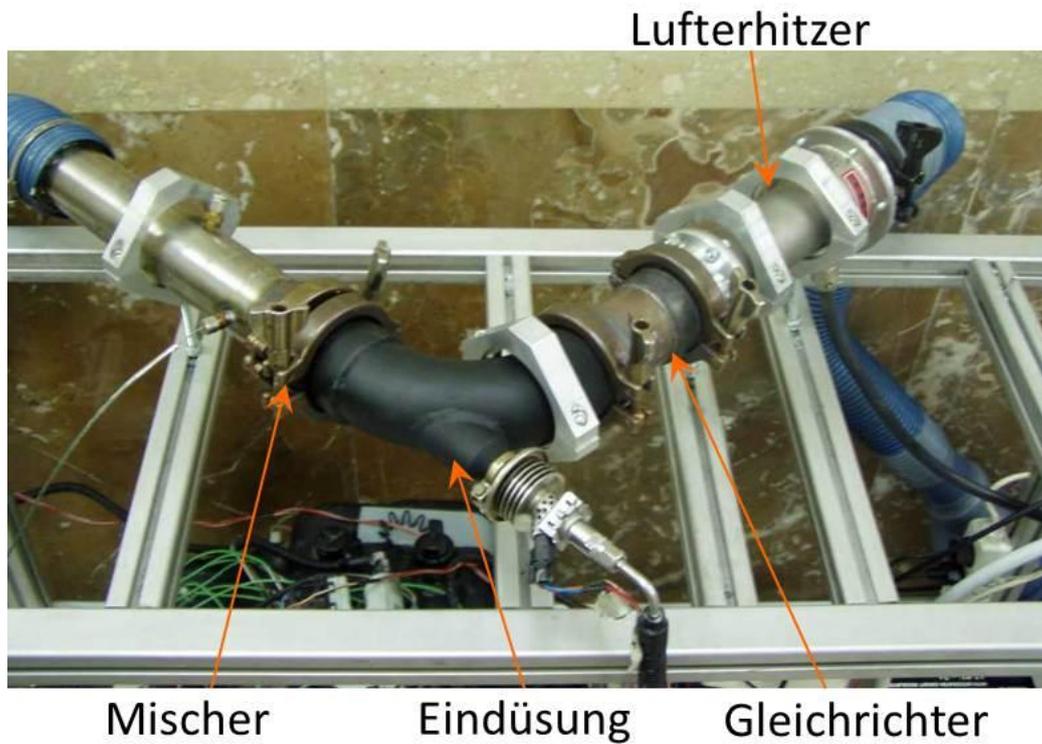


Abbildung 5.14: Heißluft-Sonderprüfstand zur Erzeugung von Ablagerungen bei sehr niedrigen Temperaturen.

Die Ablagerungsuntersuchungen in Rahmen dieser Arbeit beschäftigten sich mit der Düsenspitze, dem Mischer, dem Mischrohr und möglichen Entkoppelementen in der Abgasanlage.

5.7.1 Düsenspitze

In diversen Gleichverteilungsuntersuchungen hat sich gezeigt, dass sich die meisten Ablagerungen an der Einbringungsstelle des Reduktionmittels finden. An der Düsenspitze ist als Erstes eine Ablagerung wahrzunehmen. Hier sind sie auch am kritischsten zu beurteilen und erheblich problematischer, als an anderen Stellen der Abgasanlage.

Da sich zumeist eingesetzte luftgekühlte Injektoren aus Standfestigkeitsgründen nicht im direkten Strömungsfeld befinden, sondern in einem sogenannten Totwassergebiet, ergibt sich ein deutlicher Temperaturunterschied zwischen Düsenspitze und Abgasstrom. Sowohl diese Tatsache, als auch das Rezirkulieren von Sekundärtropfen, können bei niedrigen Temperaturen über einen längeren Zeitraum durch Ablagerungen zum Ausfall der Dosierung führen. Es kann zu Verklebungen des Ventils und in weiterer Folge zu eingeschränkter Dosierung, Ausfall der Dosierung oder Undichtigkeiten kommen. Auch das ursprünglich fein abgestimmte Spraybild (Tropfendurchmesser, Kegelwinkel) kann beeinflusst werden.

Zur Analyse unterschiedlicher Bauteile wurden die oben angeführten Betriebspunkte und Zyklen angewendet. Um darüber hinaus die Ablagerungen am Injektor qualitativ zu erfassen und einen ersten Blick in den Entstehungsverlauf zu erhalten, wurden die Ablagerungen am Injektor jeweils nach 2, 5, 10, 20, 30, 60 und 120 Minuten beobachtet.

Um in weiterer Folge ein besseres Verständnis über die Entstehungsursachen dieser Ablagerungen zu erhalten wurde abseits des Motorenprüfstandes ein Grundlagenversuch aufgebaut. Für diesen Grundlagenversuch war es nötig die vorherrschenden Bedingungen, vor allem die Temperaturen, in der realen Abgasanlage zu kennen. Zu diesem Zweck wurden, neben der uns bekannten Referenztemperatur des Abgases vor dem SCR-Katalysator, mehrere Thermolemente angebracht. Es kam ein modifizierter Injektor mit Thermolementen am AdBlue®-Einlass der Düse ($T_{\text{AdBlue-Einlass}}$) und am Düsensitz im Inneren des Körpers ($T_{\text{AdBlue-Sitz}}$) zum Einsatz. In Abbildung 5.16 (S.60) wird die Position dieser Temperaturmessstellen nachvollziehbar dargestellt. Des Weiteren wurde ein Thermolement an den Düsensitz vom Abgasrohr aus kommend ($T_{\text{Düsensitz-Abgas}}$) angelegt. Abbildung 5.15 zeigt die Position dieses Thermolementes als orangenen Punkt.

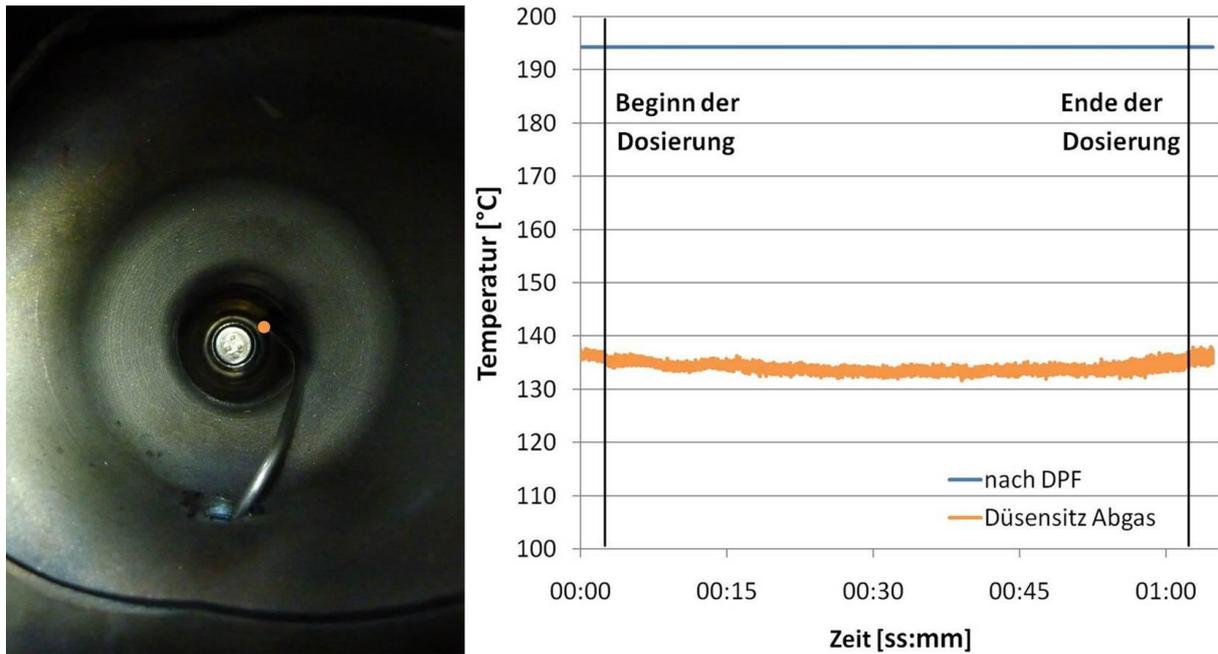


Abbildung 5.15: Temperaturverlauf des Thermoelements am Düsensitz sowie nach DPF bei BP180a unter stöchiometrischer Dosierung.

Grundsätzlich zielt die Positionierung des Thermoelements unmittelbar am Düsensitz auf die Beobachtung einer Grenztemperatur ab, bei deren Erreichung keine Ablagerungen am Injektor entstehen bzw. verbleiben. Bei der Positionierung des Thermoelements wurde darauf geachtet, dass dieses nicht direkt vom Spray beaufschlagt wird. In der rechten Bildhälfte ist der Temperaturverlauf für das Thermoelement im Düsensitz ($T_{\text{Düsensitz-Abgas}}$) bei einstündiger Dosierung in BP180a mit stöchiometrischer Dosierung dargestellt. Wie in Tabelle 5.5 angeführt herrscht hier eine Abgastemperatur von 180°C unmittelbar vor dem SCR-Katalysator. Abbildung 5.15 ist zu entnehmen, dass sich am Düsensitz unmittelbar nach der Dosierung ein geringfügiger Temperaturabfall einstellt. Dieser geht grundsätzlich mit der Einbringung des Dosiermittels einher.

In Tabelle 5.8 sind die Ergebnisse der Temperaturmessung am Motorprüfstand für die angeführten Elemente am modifizierten Injektor und das eben gezeigte Element am Sitz für verschiedene Betriebspunkte dargestellt. Diese Messergebnisse sind hier aus Kapitel 6.3 vorgezogen, um die Methodenentwicklung des Injektorprüfstandes besser beschreiben zu können.

BP	T_{vSCR} [°C]	$T_{Düsensitz\ Abgas}$ [°C]	$T_{AdBlue-Sitz}$ [°C]	$T_{AdBlue-Einlass}$ [°C]
180	180	137	63	33
1J	250	188	78	38
2J	350	187	133	66
3J	500	420	180	68

Tabelle 5.8: Ergebnisse der Temperaturmessungen am Düsensitz inklusive adaptierten Thermoelement bei ausgeschalteter Dosierung.

Neben dem bereits in Tabelle 5.5 angeführten BP180 wurden noch BP1J, BP2J und BP3J eingeführt. Spezielle Aufmerksamkeit kommt BPJ2 und BPJ3 zu, da in diesen Betriebspunkten bei abgeschalteter Dosierung (stehendes Fluid vor den Düsenlöchern) die AdBlue®-Temperatur unmittelbar vor der Sitzfläche des Düsensitzes in der Düse ($T_{AdBlue-Sitz}$) über 106°C erreicht. Auf die Bedeutung dieser Temperaturschwelle und dabei auftretende Dampfblasenbildung in Folge der Verdampfung des Wasseranteils wird in Kapitel 6.3.4 eingegangen.

Mit den nun bekannten Temperaturverhältnissen im Bereich der Düse konnte ein spezieller Injektorprüfstand aufgebaut werden um vereinfachte Grundlagenversuche durchführen zu können. Mit diesem in Abbildung 5.16 dargestellten Aufbau konnten neben ersten Entstehungserscheinungen der Ablagerungen rund um die Düsenlöcher auch die Phänomene unmittelbar nach dem Öffnen bzw. Schließen des Injektors näher untersucht werden. Um eine möglichst große Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen am Motorenprüfstand und am Injektorprüfstand zu gewährleisten wurden neben den genauen Temperaturen am Düsensitz und den AdBlue®-Temperaturen auch auf eine geometrisch ähnliche Injektoraufnahme geachtet.

Neben der Injektoraufnahme und der Düse selbst besteht der Sonderprüfstand aus folgenden Komponenten:

- Wärmequelle: in Form eines Heißluftföhns um die benötigten Temperaturen am Düsensitz zu gewährleisten
- Düsenkühlung mittels Ventilator mit punktueller Luftführung zur Kühlung des Düsenkörpers

- Thermoelemente, am Düsensitz, im Injektor und an der Außenseite der Injektoraufnahme zur Überwachung des Messvorganges
- Aufnahme-Equipment zur Video-Aufzeichnung der Ablagerungen und von speziellen Dosierphänomenen
- Lichtquelle durch eine LED zur videotechnischen Ausleuchtung des Injektorsitzes
- Hitzeschild zum Schutz der LED und der Kamera vor den entsprechend hohen Temperaturen
- Luftspülung der Kameralinse um einen Beschlag durch den AdBlue®-Nebel zu verhindern.

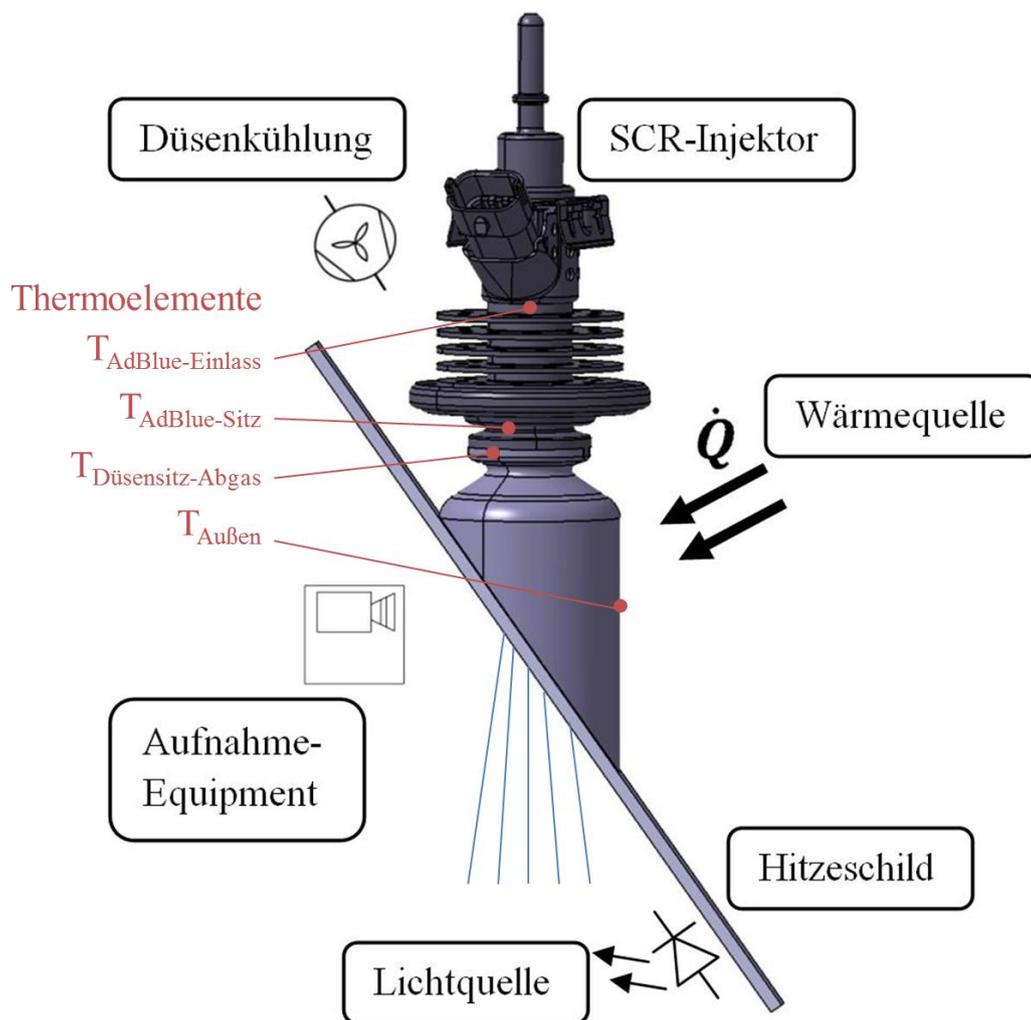


Abbildung 5.16: Schematische Darstellung des Injektorprüfstands

Für Zeitrafferaufnahmen von bis zu zwei Stunden konnte eine digitale Spiegelreflexkamera mit HD-Aufnahmefunktion verwendet werden. Zudem kam eine

Highspeed-Kamera zum Einsatz, um speziell die einzelnen Phänomene während eines Injektionsevents aufzuzeichnen. Für die spezielle Analyse von Tropfendurchmessern und Tropfenverteilung kam ein Spraytec-Gerät der Firma Malvern Instruments zur Anwendung (Prinzip der Laserbeugung [109]).

Auf Grund des großen Wärmeeintrages über den Injektorsitz auf den Injektor wurde dieser trotz eigenem Kühlkörper (Rippenkühler) zusätzlich mit einem punktuellen Luftstrom gekühlt. Dies sollte verhindern, dass die Temperaturvorgaben am AdBlue®-Einlass des Motorenprüfstands überschritten werden. Bei der Auslegung des Injektorprüfstands wurde besonderes Augenmerk auf die genaue Einhaltung der Temperatur am Düsensitz gelegt. Geringfügige Abweichungen der AdBlue®-Temperaturen im Injektorkörper nach unten wurden hingegen toleriert.

5.7.2 Mischer

Die Bildung von Ablagerungen am Mischer stellt im Fahrbetrieb eine eher untergeordnete Rolle dar. Dies liegt vor allem daran, dass die Elemente des Mixers meist direkt in der heißen Abgasströmung liegen. Somit ist die Temperatur der Mischoberfläche im Gegensatz zur Rohrwand oder der Düsen spitze zumeist heiß genug um nur geringe Mengen an Ablagerungen zu bilden. Des Weiteren werden durch den instationären Fahrbetrieb mit hohen Lastanteilen und vor allem der DPF-Regeneration immer wieder Temperaturspitzen erreicht, die einen Abbau entstandener Ablagerungen ermöglichen. Dies zeigte eine Vielzahl an Untersuchungen am Prüfstand und kann somit auf den Fahrbetrieb übertragen werden.

In den Untersuchungen dieser Arbeit dienten Ablagerungen am Mischer daher um Auftreffpunkte des Sprays auf der Mischoberfläche beurteilen zu können. Die genaue Positionierung des Spraybildes am Mischer ist von großer Wichtigkeit. Vor allem bei geometrisch offenen Mischerprofilen kann es zu einem Durchschießen der Mischergeometrie mit einem der Spraystrahlen ohne Aufbruch, oder sonstiger Beeinflussung des Strahls kommen. Dadurch können Tropfen des Reduktionsmittels bis zur Eintrittsfläche des SCR-Katalysators gelangen und dort ohne vorherige Aufbereitung sehr lokal auftreffen. Die negative Auswirkung dieses Effektes wird auch in der Arbeit von Möltner [110] beschrieben. Darin stehen SCR-Anlagen mit geradem Rohr und ohne Mischelement im Fokus der Untersuchung. Daher empfiehlt Möltner für solche mischerlosen SCR-Abgasanlagen die gesamte

Reduktionsmittelmasse an die Rohrwand zu düsen um eine Aufbereitung der Flüssigkeitstropfen sicher zu stellen. Da dabei der Aspekt der Gleichverteilung nicht oberste Priorität hat, kommt dies für die Untersuchungen in dieser Arbeit nicht in Frage und es muss eine Aufbereitung unter Verwendung des Mischelementes oder geeigneter Abgasrohrführung erreicht werden. Die Analyse der Auftreffpunkte des Sprays kann unter Zuhilfenahme von Ablagerungen erfolgen und so ein Tropfendurchbruch verhindert werden.

Weiter war es möglich an den sichtbar gemachten Auftreffpunkten am Mischer Thermoelemente anzubringen. Mit diesen wiederum lässt sich das Abkühlverhalten am Mischer auf Grund der Spraybeaufschlagung messen und können Rückschlüsse auf die Wand-Tropfen-Interaktion geschlossen werden. Diesen Ansatz hat in Folge auch Smith in seinen Arbeiten aufgegriffen um Rechenmodelle zur Simulation von SCR-Anlagen zu verbessern und in späterer Folge Wandfilmbildung abbilden zu können [111].

5.7.3 Mischrohr

Mit Ablagerungen im Mischrohr (siehe Abbildung 5.8 in Kapitel 5.4) wird ein möglicher Wandfilmverlauf nachvollziehbar. Tropfen, die beispielsweise an einem Rohrbogen, oder auf Grund der Mischergeometrie an die Rohrwand geschleudert werden, können dort zu einem Wandfilm kumulieren. Die Kenntnis über Bildung von Wandfilm, die wie auch am Mischer mit Thermoelementen zusätzlich analysiert werden kann, ist vor allem zur Bildung von Rechenmodellen zur Simulation der Harnstoffaufbereitung in der Abgasstrecke von großer Bedeutung. Eine Vielzahl von Forschungsprojekten beschäftigt sich derzeit mit dieser Simulation und wird unter anderem in Arbeiten von Fischer [112], Smith [111] und Zöchbauer [113] beschrieben. Fischer hat in seiner Arbeit das Abkühlungsverhalten der Rohrwand bei Spraybeaufschlagung mit diesen und ähnlichen Methoden untersucht und die Ergebnisse zur Abbildung der Tropfen-Wandinteraktion in sein Simulationsmodell implementiert.

Im realen Fahrbetrieb stellen Ablagerungen im Mischrohr aus den in Kapitel 5.7.2 genannten Gründen eher keine Probleme dar. Bei Verwendung von Entkoppellementen in der betroffenen Abgasstrecke ändert sich dies jedoch.

Entkoppelemente im Abgasstrang stellen flexible Verbindungen zwischen Motor und Abgasanlage dar. Ein Metallbalg in Verbindung mit einem ihn umhüllenden Drahtgeflecht überträgt die Kräfte, die für eine tragende Funktion erforderlich sind und gleichzeitig dämpfende Eigenschaften aufweist. Man kann solche Elemente als Metallschlauchleitungen beschreiben. Ein solches Schlauchgelenk ist in Abbildung 5.17 dargestellt und besteht aus einem gasdichten mehrlagigen Metallbalg (1), einem Metallgeflecht (2) zur Begrenzung der Zugbelastung und einem im Balg angeordneten Agraftschlauch/Liner (3).[114]



Abbildung 5.17: Aufbau eines Entkoppelementes im Abgasstrang [115]

Befindet sich solch ein Entkoppelement in der Mischstrecke einer SCR-Abgasanlage, so können sich Ablagerungen zwischen den beweglichen Elementen des Innenliners und dem Metallbalg bilden. Auf Grund der Bauweise sind die Temperaturen in dieser Zwischenschicht nie hoch genug, um Ablagerungen wieder abzubauen. Die Ablagerungen bilden eine feinen Sand, der wie Schleifmittel die Reibung und somit den Verschleiß im Entkoppelement erheblich erhöht. Dies führt zu einer erheblichen Reduktion der Lebensdauer des Elementes und somit bei Bruch zur Beschädigung der ganzen Abgasanlage.

Im Zuge dieser Arbeit wurden daher unterschiedliche Bauformen von Entkoppelementen untersucht, um dieses Problem zu analysieren und entgegen zu wirken.

5.7.4 Chemische Analyse von Ablagerungen

In den Arbeiten von Hongyi Dong [116] werden Harnstoffzersetzungsreaktionen in vier Temperaturbereiche unterteilt. Diese reichen von A: 20-193°C, B: 193-250°C, C: 250-400°C sowie D: über 400°C und sind in Abbildung 5.18 dargestellt. Auf die bei der Harnstoffzerlegung vorkommenden Reaktionsgleichungen wurde bereits in Kapitel 4.5.1 eingegangen.

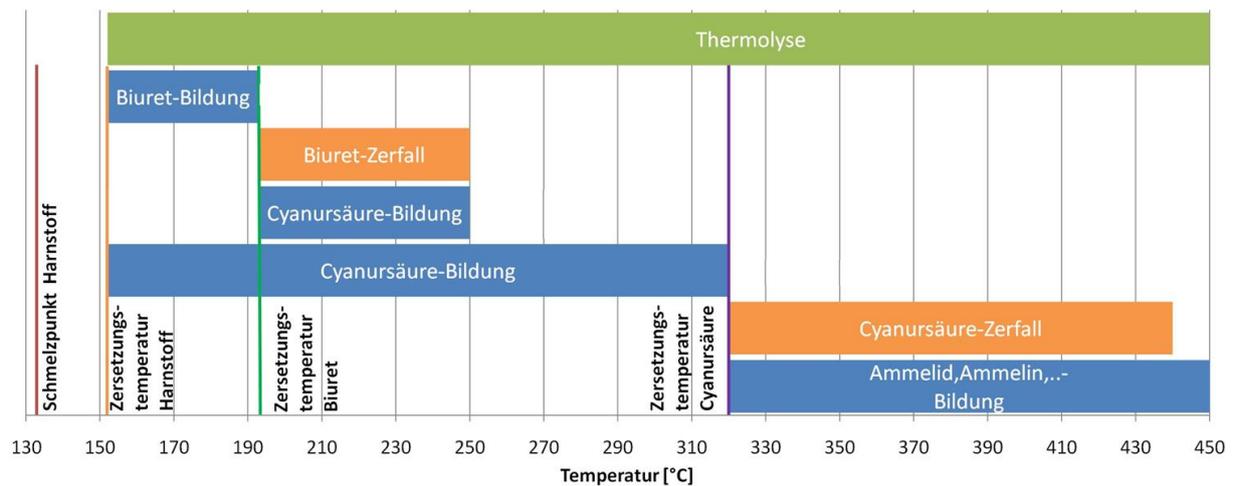


Abbildung 5.18: Ablagerungsdynamik über den entsprechenden Temperaturbereichen [117].

Die hier angegebenen Temperaturbereiche helfen bei der Interpretation der Ergebnisse aus der chemischen Analyse von Harnstoffablagerungen.

Zur chemischen Analyse von Ablagerungen aus dem SCR-System wurden die Proben an das Institut für Chemische Technologien und Analytik der TU Wien weitergegeben. Die von unserem Partner durchgeführten Messungen erfolgten mittels Laser Desorption/Ionisation Time-of-flight mass spectrometry (LDI-TOFMS). Harnstoff und Biuret, also Stoffe mit besonders geringem Molekulargewicht, können mit dieser Analysemethode gemessen werden. Es kann jedoch lediglich eine Aussage über die Existenz der Stoffe, aber keine Angabe über die Menge bzw. enthaltene Konzentrationen getroffen werden. Außerdem war es leider nicht möglich ein geeignetes Lösungsmittel für weitere Harnstofffolgeprodukte wie Cyanursäure, Ammelid und Ammelin bereitzustellen. Die verwendeten Lösungsmittel destilliertes Wasser, Methanol und Methanol-2-Propanol erlaubten lediglich die Analyse von Harnstoff und Biuret.

Auf Grund dieser eingeschränkten Möglichkeiten musste auf chemische Analysen von Ablagerungen in unterschiedlichen Betriebspunkten verzichtet werden. Es sollen an dieser Stelle aber die Möglichkeiten der Methode an Hand einer Messung gezeigt werden.

Um eine örtliche und somit temperaturabhängige Aufbereitung der Ergebnisse zu erhalten, wurden Ablagerungen an vier signifikanten Stellen der Abgasanlage entnommen. Diese sind an der Düsen Spitze (1), am Mischer (2), unmittelbar nach dem Mischelement (3) und im Eingangstrichter des SCR-Katalysators (4).

Die Ergebnisse der chemischen Analyse der Ablagerungen der vier Entnahmestellen nach einem 3-stündigen Ablagerungstest zeigen Peaks für Harnstoff und Biuret. Im Bereich des Totwassergebietes bei der Düsen Spitze (1), ist von einer Temperatur von ca. 150°C auszugehen. Unter Zuhilfenahme von Abbildung 5.18 zeigt sich, dass es sich bei den Ablagerungen hauptsächlich um Harnstoff und Biuret handeln kann. An den Entnahmestellen 2, 3 und 4 liegen die Temperaturen oberhalb von 200°C. Somit ist hier zunehmend mit Biuretzfall und gleichzeitiger Cyanursäurebildung zu rechnen. Die Ergebnisse der chemischen Analyse zeigen, dass Probe 1 maßgeblich aus Harnstoff und Biuret (HB-Verhältnis 2:1) besteht, während in den Proben 2, 3 (Verhältnis 1:2) und 4 diese Komponenten einen deutlich geringeren Anteil aufweisen. Die zunehmende Thermolyse in diesen Punkten führt zu der deutlichen Reduzierung des Harnstoffanteils.

Die angeführten Hindernisse der Lösungsmittelverfügbarkeit für höherwertige Produkte bei der chemischen Analyse zur genaueren Interpretation der Ergebnisse führten in dieser Arbeit vorerst zum Verzicht auf weitere Untersuchungen der Ablagerungszusammensetzung. Smith hat in seinen späteren Forschungsarbeiten die Idee chemischer Untersuchungen mit Hilfe thermogravimetrischer Messungen wieder aufgegriffen, die zu Aufschlüssen in diesem Themengebiet führen können.

5.8 NH₃-Gasdosierung zur Beurteilung alternativer Reduktionsmittel

Bei der Dosierung des flüssigen Reduktionsmittels AdBlue® zeigen sich diverse Probleme. Folgende Eigenschaften von AdBlue® stellen die Schwachpunkte dar [58]:

- Der Gefrierpunkt von -11°C,
- die Bildung fester Rückstände bei verzögerter Verdampfung und
- der Gehalt an aktivem Ammoniak ist mit 0,2kgNH₃/kg relativ gering.

Deshalb gibt es immer wieder die Bestrebungen alternative Reduktionsmittel zu finden, die diese Nachteile kompensieren können. Zu den flüssigen alternativen Ammoniakvorläufersubstanzen zählt Ammoniumformiat (AF). Dabei handelt es sich um eine 40%-ige Lösung in Wasser. Sie gefriert erst bei -35°C und kann auch beim langsamen Verdampfen keine Rückstände bilden. Dennoch kann AF nur mit Einschränkung empfohlen werden, da sich bei Abgastemperaturen unter 300°C und hoher Katalysatorbelastung besonders bei Überdosierung Ameisensäure bildet. [118]

Harnstoff in fester Form reduziert die mitzuführende Reduktionsmittelmenge um fast die Hälfte gegenüber einer wässrigen Lösung und verbessert die Tieftemperaturaktivität. Des Weiteren entfällt die Notwendigkeit einer aufwändigen Systembeheizung, da es kein Einfrieren gibt [58]. Vertreter der festen Ammoniakvorläufersubstanzen ist Guanidiniumformiat (GuFo) [119], [120].

Zur Verdampfung des Feststoffes ist jedoch ein praxistauglicher Ammoniakgenerator nötig. Dies kann durch einen im Nebenstromverfahren arbeitenden Hydrolysereaktor umgesetzt werden. Dies stellt eine rückstandsfreie Zersetzung der Trägersubstanz unter kontrollierten Bedingungen sicher. Ammoniak kann so durch die Entkoppelung der Reaktionsbedingungen vom Abgashauptstrom und somit vom Motorbetriebszustand auch in Betriebsphasen mit niedrigen Abgastemperaturen zur Verfügung gestellt werden. Dies bringt vor allem beim Kaltstart Vorteile [121]. Ein solches System ist in Abbildung 5.19 dargestellt.

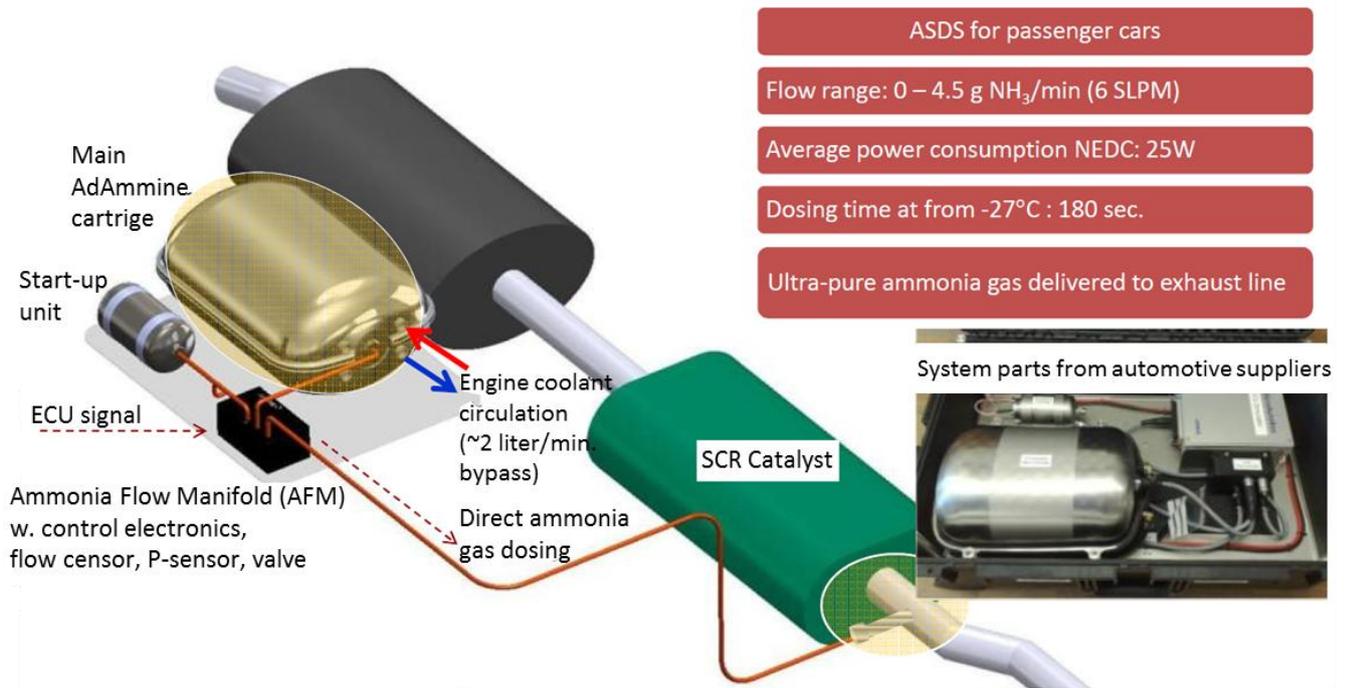


Abbildung 5.19: Ammonia Storage and Delivery System für PKW der Amminex A/S. [122], [123]

Das Reduktionsmittel Ammoniak wird somit gasförmig in den Abgasstrang eingebracht und muss dort mit dem Abgas durchmischt werden. Ob diese Aufgabe einfacher zu bewerkstelligen ist, als die Durchmischung des flüssigen AdBlue® gilt es im Rahmen dieser Arbeit am Motorenprüfstand zu klären. Zu diesem Zweck wurde eine Ammoniak-Gasflasche als Reduktionsmittelquelle eingesetzt, um von Komplikationen einer Reduktionsmittelaufbereitung, wie oben beschrieben, befreit zu sein.

Es wurden unterschiedliche Methoden zur Gaseinbringung in die Abgasanlage untersucht und mit der Einbringung von AdBlue® in vergleichbaren Anlagenkonfigurationen in Kontrast gestellt. Zur Beurteilung wurden erneut Gleichverteilungsmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse sollen einer Potentialabschätzung alternativer Systeme, wie jenes in Abbildung 5.19, dienen und sind in Kapitel 6.6 beschrieben.

6 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen und Diskussion der erlangten Erkenntnisse

6.1 Untersuchungen zur Gleichverteilung

Zur Erstellung dieser Arbeit wurden in experimentellen Untersuchungen eine Vielzahl unterschiedlicher Abgasanlagen und Systemkomponenten betrachtet und miteinander verglichen. Der größte Teil der Untersuchungen beschäftigt sich mit unterschiedlichen Mischelementen. Diese Mischelemente zwischen Düse und Katalysatoreintritt werden zur Erzielung einer guten Aufbereitung und Durchmischung eingesetzt. Erst wurden unterschiedliche Mischgeometrien analysiert um anschließend, basierend auf vielversprechenden Ergebnissen einzelner Modelle, Weiterentwicklungen im Bereich der Oberflächenbeschaffenheit und Mischeranströmung vornehmen zu können. Da in dieser Arbeit nicht die große Vielzahl der untersuchten Komponenten angeführt werden kann, soll hier nur eine Auswahl aussagekräftiger Beispiele angeführt werden.

Auch das durch den Mischer bedingte Problem des steigenden Abgasgedrucks wurde berücksichtigt. Um diesem entgegen zu wirken, wurden mehrere mischerlose Varianten ebenfalls mittels Gleichverteilungsmessungen erprobt. Hierbei wurden Variationen der Abgasstromführung, der Positionierung des Düsensitzes und der Mischstreckenlänge durchgeführt. Diese Streckenlänge definiert sich über die Distanz zwischen Düsenspitze und Querschnittsmittelpunkt der Eintrittsfläche des SCR-Katalysators (Abbildung 6.1).

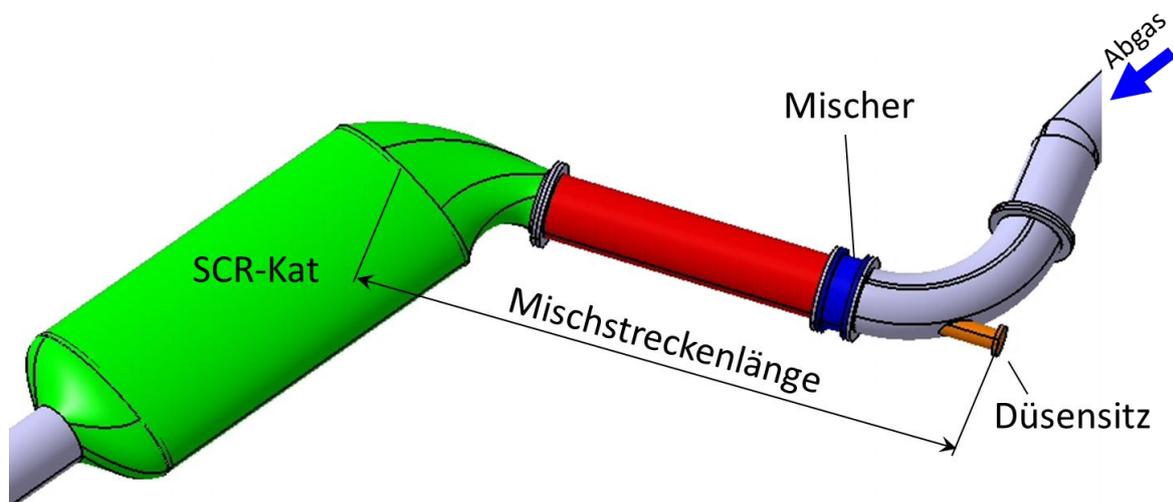


Abbildung 6.1: Definition der Mischstreckenlänge

Um die Auswirkung der Dosierrichtung relativ zur Abgasströmungsrichtung zu analysieren wurden Messungen mit unterschiedlichen Dosierwinkeln durchgeführt. Der Dosierwinkel ergibt sich aus dem Winkel zwischen Hauptachse der Abgasströmung und der Düsenachse (Abbildung 6.2).

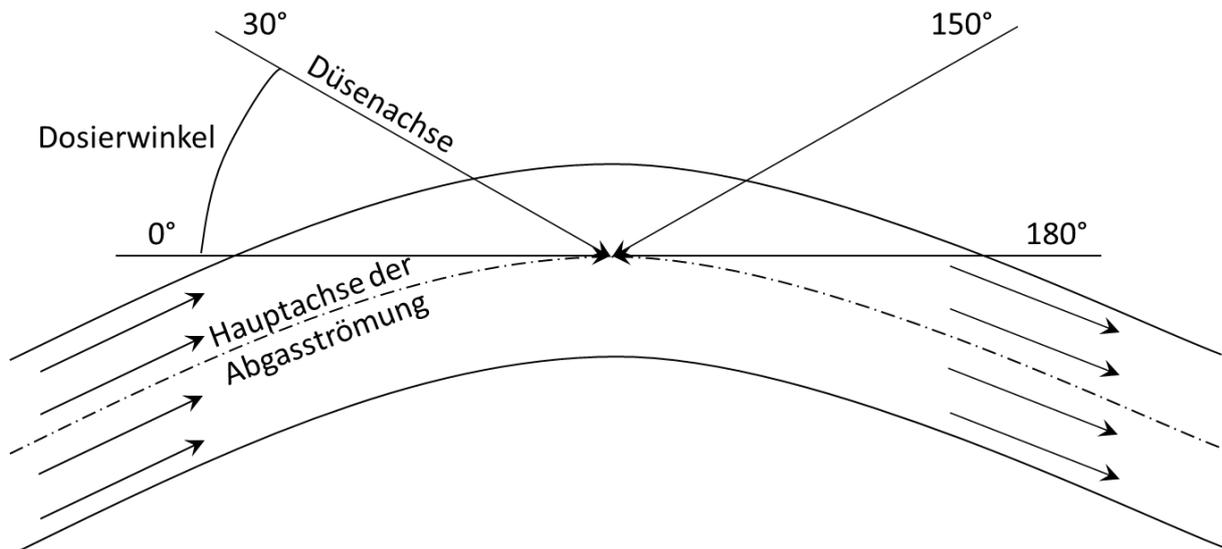


Abbildung 6.2: Variation des Dosierwinkels

Sowohl eine Winkelvariation in Strömungsrichtung (Dosierwinkel $<90^\circ$), als auch gegen die Strömungsrichtung ($>90^\circ$) wurden realisiert.

Des Weiteren wurde der Einfluss unterschiedlicher Einspritzdrücke auf das Gleichverteilungsergebnis untersucht.

Um eine Gegenüberstellung der Ergebnisse erfolgreich durchführen zu können, wurden die Gleichverteilungsmessungen bei den in Kapitel 5.5 angeführten Betriebspunkten im Stationärbetrieb als typische Referenzpunkte durchgeführt.

6.1.1 Mischergeometrien

Die Unterscheidungsmerkmale der Mischelemente sind die Flügelform und Anzahl, deren Anstellwinkel und Überdeckungsgrad sowie der Durchmesser des Mischers. In Abbildung 6.3 sind exemplarisch einige Modelle dargestellt.

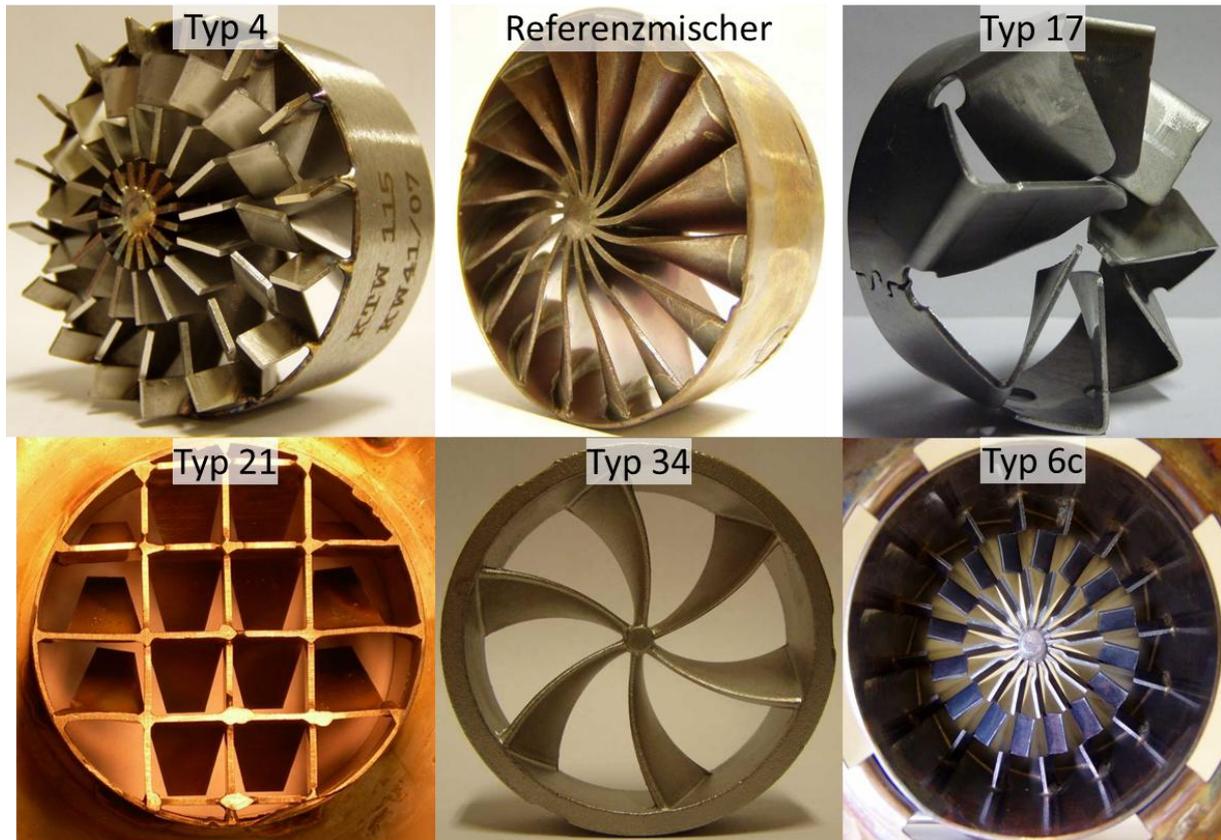


Abbildung 6.3: Auswahl von unterschiedlichen Mischelementen

Aus der Vielzahl an vermessenen Mischern sollen zwei Ergebnisse zum Vergleich herausgenommen werden. Der Referenzmischer, welcher sich im Laufe dieser Arbeit als Optimum herausgestellt hat, und ein weiteres Modell (Typ 4 – in Abbildung 6.3 oben links) wurden in der in Abbildung 6.1 gezeigten einfachen Mischstrecke bei höherem Abgasmassenstrom und höherer Temperatur (Betriebspunkt BP3 – siehe Tabelle 5.4) vermessen. Das sich daraus ergebende Gleichverteilungsergebnis ist sowohl graphisch, als auch an Hand der nach Gleichung 5.2 berechneten Gleichverteilungszahl γ in Abbildung 6.4 zu sehen.

Der Referenzmischer (unten) bewirkt eine wesentlich bessere Gleichverteilung, als das alternative Modell (oben). Hier entsteht vor allem im Zentrum ein Mangel an Harnstoff, während in den Randgebieten eine Überversorgung vorhanden ist. Die Analyse zeigt ein zu dichtes Mischer-Zentrum, welches eine Durchströmung von Abgas und AdBlue® verhindert und die Verwirbelungen im Randbereich sind zu schwach um das Reduktionsmittel gleichmäßig zu verteilen. Das Referenzmodell kommt schon nahe an das Optimum von $\gamma=1$ heran.

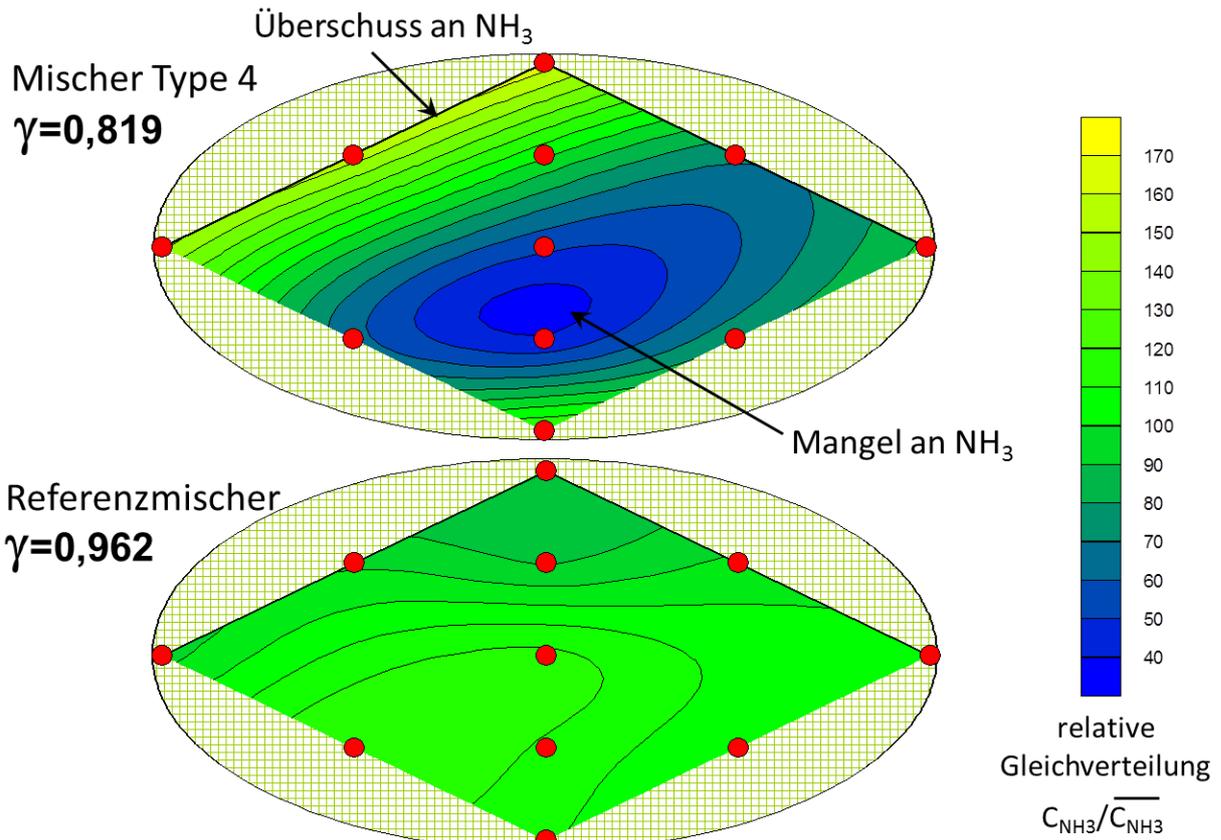


Abbildung 6.4: Gleichverteilungsbilder eines Serienmischers (unten) und einer Alternative (oben)

Das gezeigte Beispiel spiegelt eine Vielzahl der untersuchten Varianten wieder, da vor allem bei höheren Betriebspunkten die Güte der Harnstoffgleichverteilung stark abfällt. Dies ist erstens auf die geringere Verweilzeit der Tropfen bei höheren Massenströmen und zweitens auf den in Kapitel 4.5.2 beschriebenen Leidenfrost-Effekt zurückzuführen. Es kommt zum Abprallen der Tropfen von der Mischeroberfläche und den Rohrwänden. Die Tropfen-Wand-Interaktion läuft damit bei hohen Temperaturen anders ab, als unter der Leidenfrost-Temperatur. Dies bereite auch Fischer [112] in seiner Arbeit Probleme, da das von ihm entwickelte Simulationsmodell zur Berechnung der Gleichverteilung die Ergebnisse in hohen Lastpunkten überschätzte. Die größte Herausforderung stellt somit die Reduktionsmittelgleichverteilung bei hohen Temperaturen und Massenströmen dar.

Um das Problem der hohen Massenströme zu veranschaulichen wurde die gezeigte Rohrgeometrie am Heißluftprüfstand (Abbildung 5.14) aufgebaut. Der hierfür verwendete Luftstrom wurde auf 100°C erwärmt, die AdBlue®-Dosiermenge auf 20g/h eingestellt und 2 Stunden betrieben. In [Abbildung 6.5](#) sind die hierbei

entstanden Ablagerungen am Mischer-Eintritt dargestellt. Die Bilder zeigen deutlich die Auftreffpunkte des Sprays am Mischer. Das Bild in der Mitte zeigt das Ergebnis des Versuches bei einem Luftmassenstrom von 100kg/h. Eine weitere Untersuchung (rechts) wurde bei einem Luftmassenstrom von 300kg/h durchgeführt. Es ist klar ersichtlich, dass das Spray auf Grund des Rechtsbogens vor dem Mischer viel stärker nach links getragen wird und somit das Mischelement dezentral trifft. Die Durchmischung von Reduktionsmittel und Abgas wird somit erschwert.

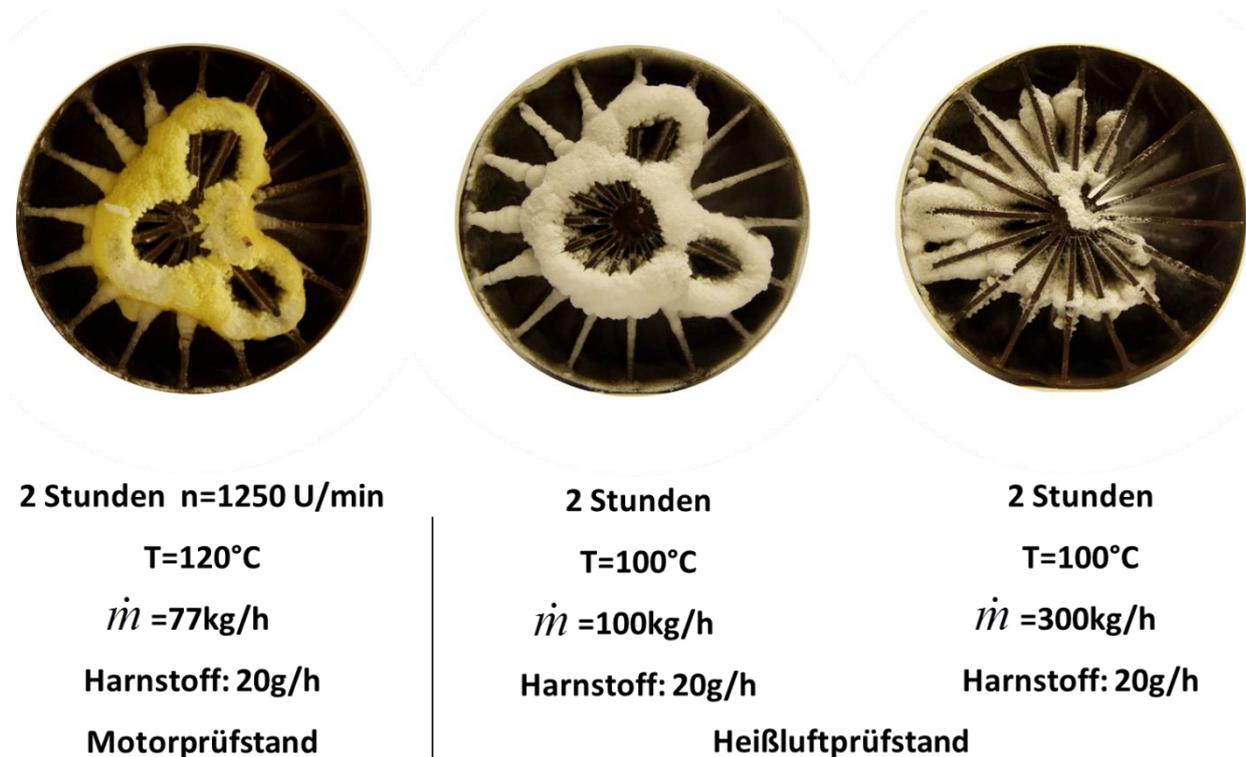


Abbildung 6.5: Durch Ablagerungen am Heißluftprüfstand sichtbar gemachte Auftreffpunkte des Sprays am Mischer bei unterschiedlichen Luftmassenströmen.

Zur Ergänzung ist in Abbildung 6.5 links auch das Ergebnis eines gleichwertigen Motorprüfstandversuches angeführt. Bei 1250U/min konnte ein Abgasmassenstrom von 77kg/h bei einer Temperatur von 120°C erreicht werden. Das Ergebnis ist sehr gut mit jenem des Heißluftprüfstandes mit 100kg/h zu vergleichen. Höhere Massenströme bei weiterhin niedriger Temperatur wären am Motorenprüfstand jedoch nicht zu realisieren gewesen, weshalb die Entwicklung des Heißluftprüfstandes eine gute Alternative für diese Untersuchungen bereitstellte.

Fazit: In höheren Betriebspunkten erschweren neben der veränderten Tropfen-Wand-Interaktion auf Grund des Leidenfrost-Effektes auch die kürzere Verweilzeit des Reduktionsmittels in der Mischstrecke und die stärkere Verwehung des Sprays durch Bögen im Abgasstrang eine gute Gleichverteilung. Dieser Herausforderung werden nur wenige Mischergeometrien gerecht. Die gefundenen Geometrien weiter zu optimieren und ideal anzuströmen ist die nächste Herausforderung dieser Arbeit.

6.1.2 Mischer mit alternativen Oberflächen

Neben verschiedenen geometrischen Varianten in der Mischergestaltung wurde der Einfluss einer Oberflächenbehandlung untersucht. In Abbildung 6.6 sind die unterschiedlich behandelten Mischer dargestellt. Ganz links ist das unbehandelte Basismodel zu sehen. Oben sind zwei sandgestrahlte Modelle abgebildet. Diese unterscheiden sich durch die Oberflächenrauheit (mittelfein und grob), die durch verschiedene Sandstrahlmittel (Korund) entstanden ist.

Die mit den sandgestrahlten Mischern erzielten Gleichverteilungswerte für unterschiedliche Betriebspunkte sind in Abbildung 6.7 dargestellt.

Die raue Oberfläche bewirkt eine klare Verbesserung der Gleichverteilung in kritischen höheren Lastpunkten BP2 und BP3. Durch die veränderte Oberflächenstruktur wird vermutlich sowohl der Tropfenaufrall, als auch der Wandfilmtransport am Mischer beeinflusst. Dies begünstigt das Abdampfverhalten am Mischer und verbessert die Durchmischung des Reduktionsmittels mit dem Abgas.



Abbildung 6.6: Mischer der gleichen Geometrie mit unterschiedlich behandelter Oberfläche.

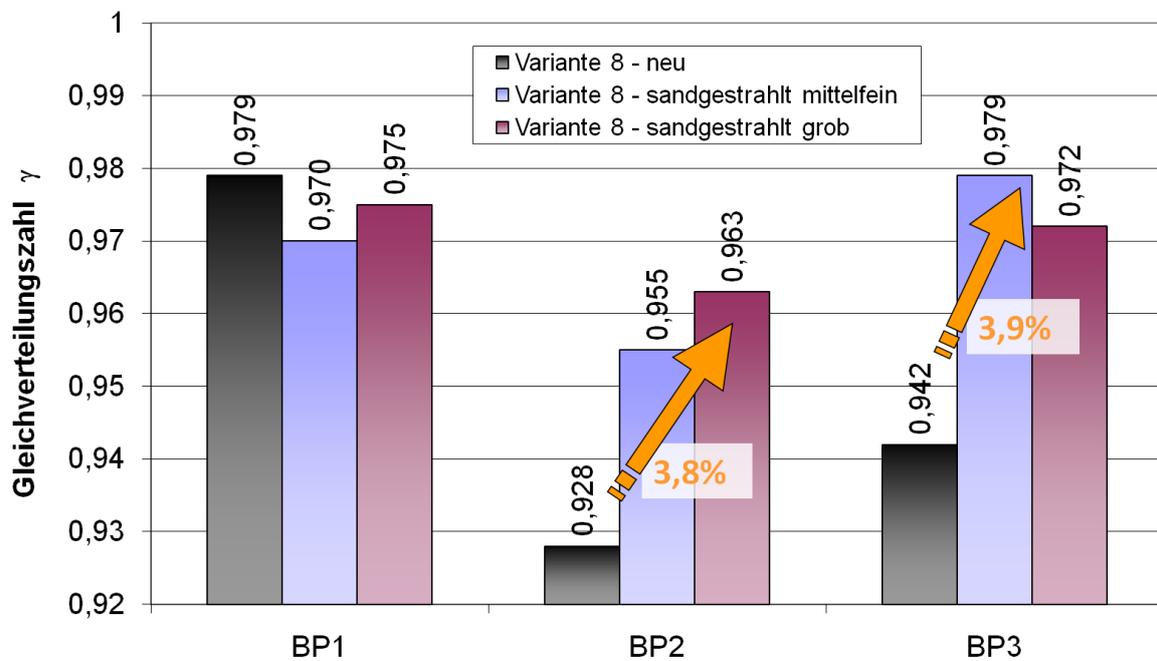


Abbildung 6.7: Einfluss einer rauen Oberfläche des Mischelementes auf die Gleichverteilung.

Versuche eines Projektpartners zeigten jedoch, dass sandgestrahlte Oberflächen durch das stark korrosive Reduktionsmittel angegriffen werden und es zu Korrosionsproblemen kommt. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit versucht mit anderen rauen Oberflächen die Gleichverteilung positiv zu beeinflussen. So wurden die weiteren in [Abbildung 6.6](#) gezeigten Mischermodele untersucht. Dabei handelt es sich um einen verzünderten Mischer (unten links) und einem Modell mit Hydrolyse-Beschichtung (unten rechts). Ergänzend dazu wurde ein anderes MischermodeLL (DT7) mit einer Mikroperforation im Bereich des Mischerzentrums hergestellt, welcher in [Abbildung 6.8](#) (inklusive Detail- und Mikroskop-Bild) dargestellt ist.



Abbildung 6.8: Mischer mit Mikroperforation im Zentrum – Detailansicht und Mikroskop-Aufnahme rechts

Um auch den perforierten Mischer beurteilen zu können wird in [Abbildung 6.9](#) auch die nichtperforierte Version des Mischers (DT7) in den Vergleich aufgenommen.

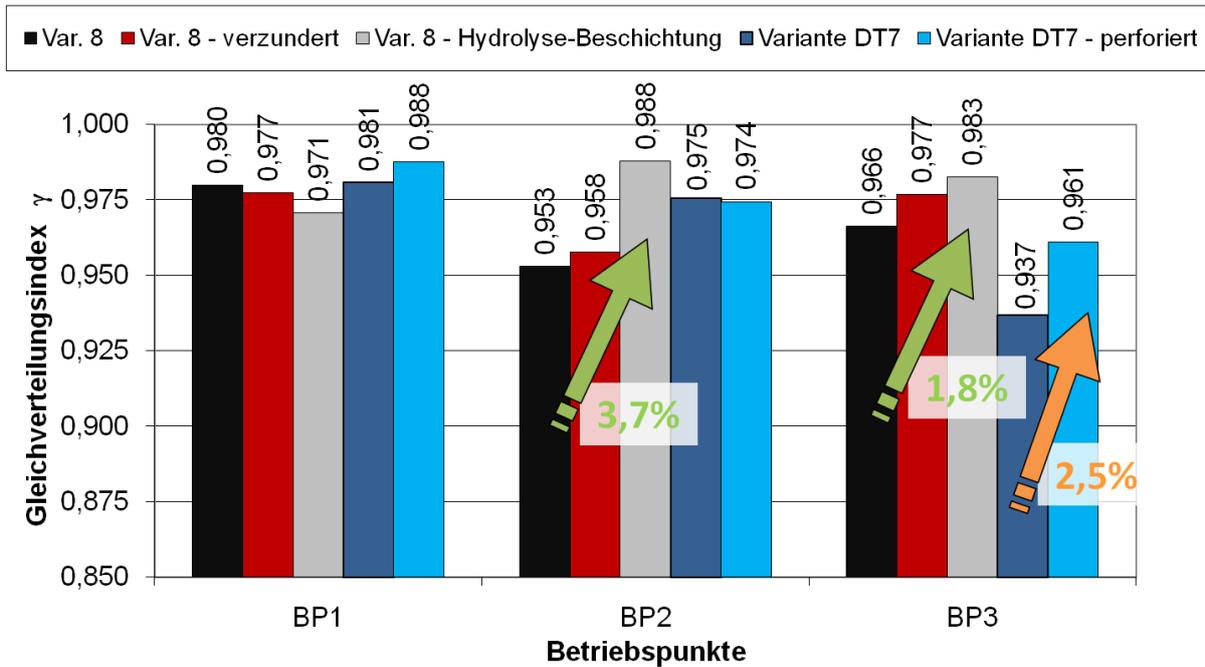


Abbildung 6.9: Gleichverteilungsergebnisse von Mischelementen mit alternativer Oberfläche.

Auch diese Methoden der Oberflächenveränderung bewirken eine Verbesserung der Durchmischung. Besonders hervorzuheben ist dabei die Hydrolyse-Beschichtung. Sie erhöht die Rauigkeit der Oberfläche und profitiert somit vom gleichen Mechanismus wie die anderen Varianten. Darüber hinaus unterstützt die Beschichtung den chemischen Prozess der Hydrolyse. Sie kann aus Titandioxid, Aluminiumoxid oder Siliciumdioxid sowie Mischungen davon bestehen, setzt die notwendigen Zersetzungstemperaturen bei der Hydrolyse herab und beschleunigt somit die Bildung von Ammoniak [124].

Auch die Mikroperforation im Kern des Mixers bringt vor allem in hohen Betriebspunkten Vorteile. Die große Menge des hier auftretenden Reduktionsmittels (siehe Abbildung 6.5) nutzt die raue Oberfläche in diesem Bereich. Allerdings steigen die Fertigungskosten des Mixers mit Perforation erheblich.

Das Mischelement mit einer Hydrolyse-Beschichtung zu versehen stellt wie andere Methoden zur Erhöhung der Oberflächenrauigkeit eine interessante Alternative dar. Einer praktischen Anwendung im Automobil könnte jedoch an den Kosten scheitern. Des Weiteren muss die Beständigkeit der Beschichtung erst untersucht und wenn erforderlich verbessert werden (siehe Kapitel 6.4).

Fazit: Es ist festzustellen, dass jede Form zur Erhöhung der Rauigkeit positive Auswirkung auf die Effektivität des Mischelements hat. In welcher Form dies im Serienbetrieb umgesetzt wird, ist eine Frage der Kosten und Standfestigkeit.

6.1.3 Abgasanlagen ohne Mischer

Da der Einbau eines Mischelementes zwangsläufig zur Steigerung des Druckverlustes in der Abgasanlage führt, wurde ein Teil dieser Arbeit der Potentialabschätzung von Abgasanlagen ohne Mischelement gewidmet. Es wurde angestrebt über unterschiedliche Linienführungen und Dosierpositionen bei genügend langer Mischstrecke eine Konfiguration mit akzeptabler Durchmischung zu finden. Der Nachteil des steigenden Druckverlustes durch den Einbau eines Mixers könnte so außer Kraft gesetzt werden. Eine kleine Auswahl der untersuchten Varianten ist in [Abbildung 6.10](#) dargestellt.

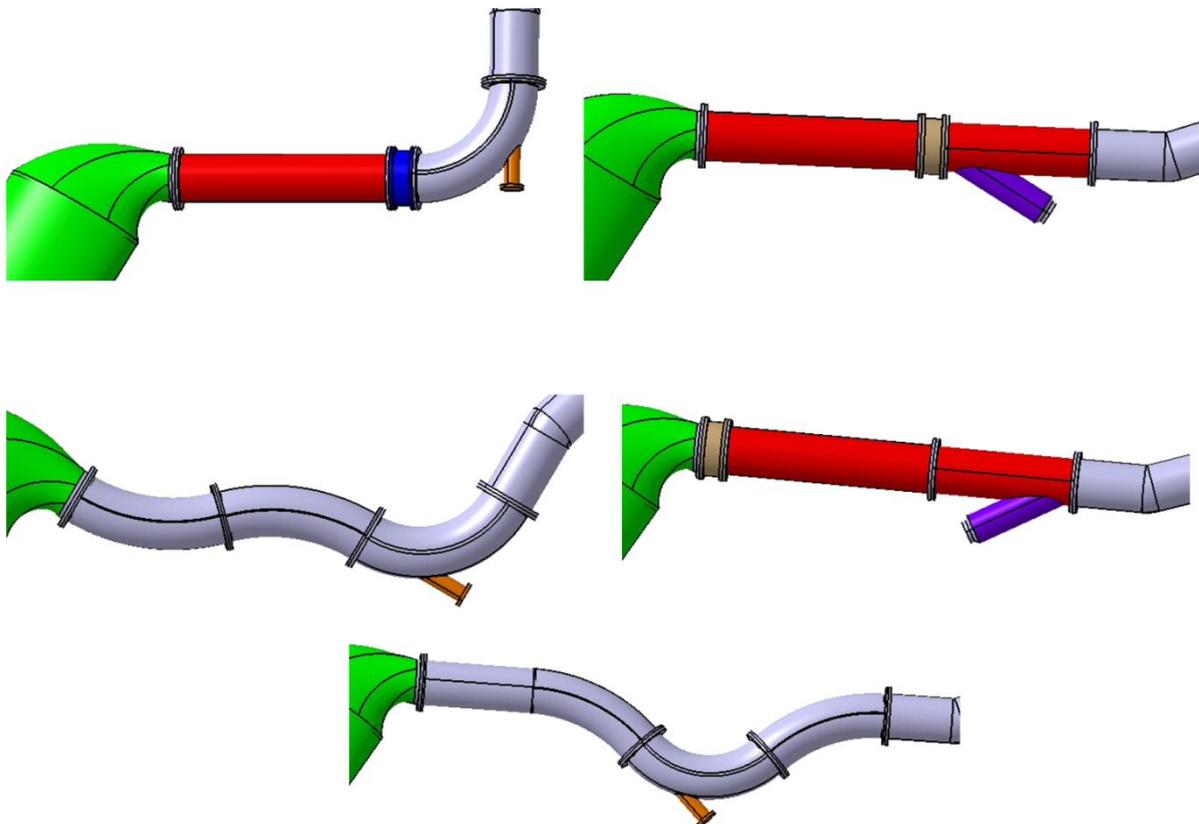


Abbildung 6.10: Auswahl an Abgasanlagen ohne Mischelement.

Eine für diese Untersuchungsreihe sehr repräsentative Variante ist in Abbildung 6.11 zu sehen. Die Dosierung erfolgt bei einem Dosierwinkel von 0° in einen 90° -Rohrbogen, der zur relativ langen (600mm) Mischstrecke gehört.

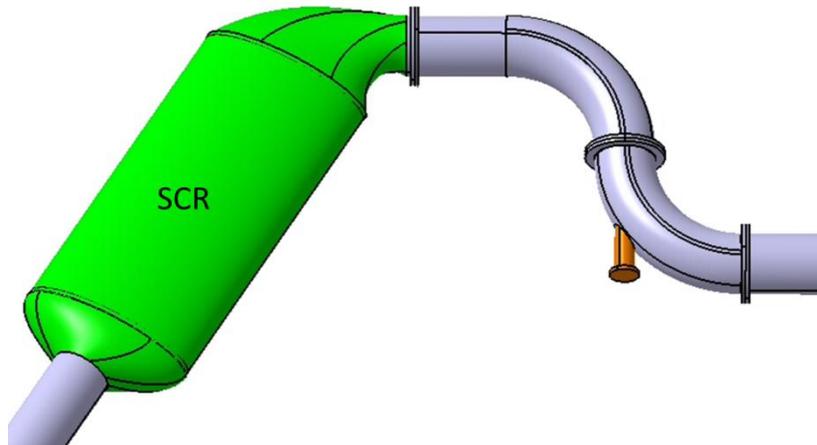


Abbildung 6.11: Repräsentative Variante ohne Mischer.

Diese Variante weist in niedrigen Betriebspunkten eine sehr gute Gleichverteilung auf (Abbildung 6.12 – oben), verliert jedoch bei höheren Abgasmassenströmen und Temperaturen massiv ihr Potential (Abbildung 6.12 – unten).

Der hier gezeigte Effekt ist bei nahezu allen Varianten ohne Mischer zu beobachten. Bestätigung findet dieses Ergebnis auch in den Arbeiten von Fischer [112] und Möltner [110]. Der Spray kann auf Grund der fehlenden Auftreffflächen nicht vollständig verdampft und aufbereitet werden. Das dosierte Reduktionsmittel bleibt bis zum SCR-Katalysator tropfenförmig und trifft dort sehr lokal auf. Möltner entgegnet diesem Effekt in seinen Ergebnissen mit einer Dosierung im Winkel von 90° um die gesamte Reduktionsmittelmasse zum Wandkontakt zu bringen. Die Untersuchungen zeigten jedoch, dass dies der Gleichverteilung nicht zuträglich ist und zu einer Reduktionsmittelanhäufung im Bereich der Auftrefffläche am Rohr und in Folge am Katalysator führt. Darüber hinaus führt bei heißen Betriebsbedingungen des bereits beschriebenen Leidenfrost-Effektes trotz Wandkontakt zu tropfenförmigen Massekonzentrationen am SCR-Kat. Somit können mischerlose Varianten bei derzeitigem Stand der Technik keine akzeptablen Gleichverteilungen gewährleisten.

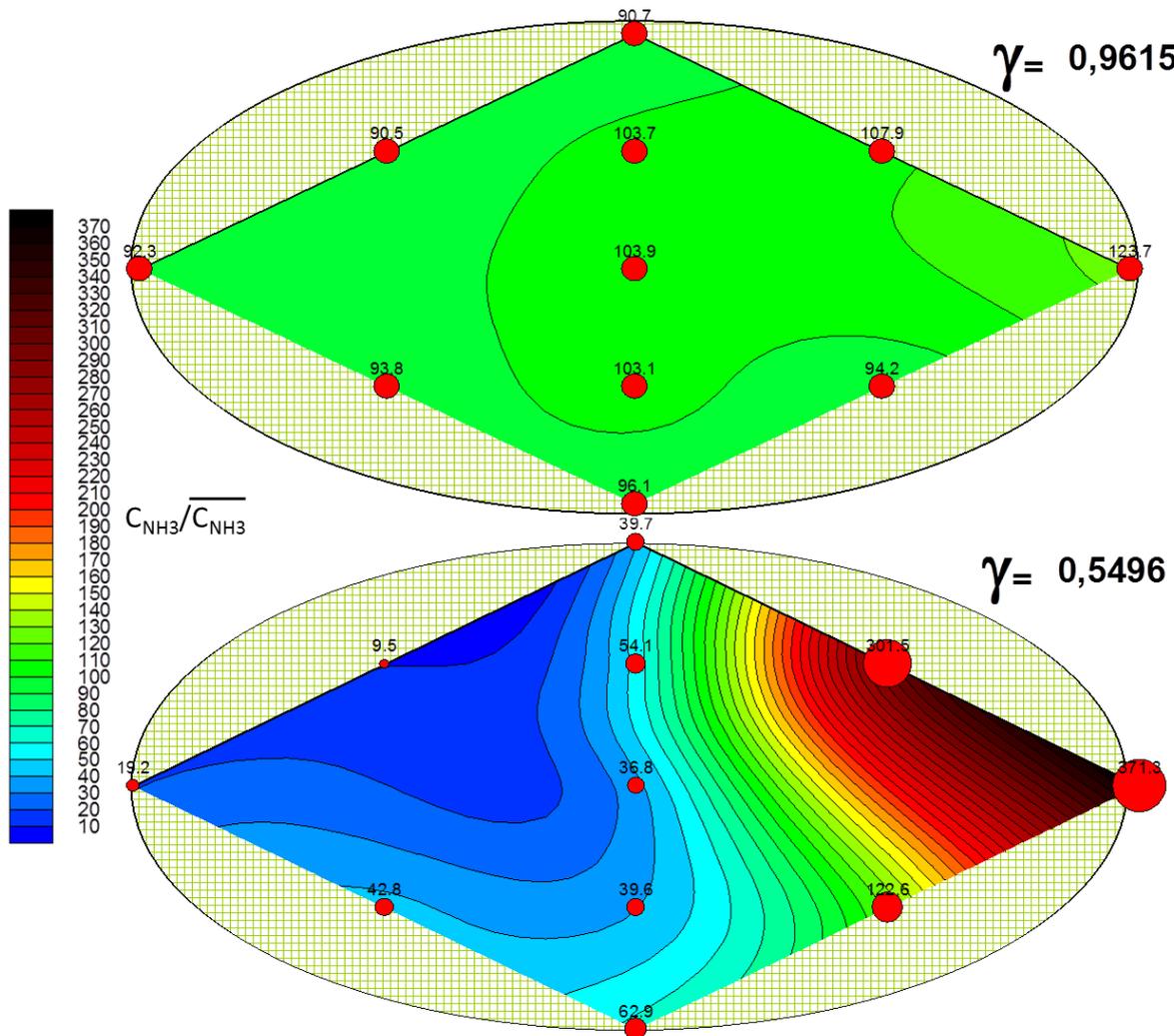


Abbildung 6.12: Gleichverteilungsbilder in niedrigem (oben) und hohem Betriebspunkt einer mischerlosen Abgasanlage.

6.1.4 Variation der Mischstreckendimensionen

Über eine Varianz der Mischstreckenlänge konnte festgestellt werden, dass mit Abnahme der Streckenlänge auch die Güte der Gleichverteilung stark abnimmt. Dies lässt sich in [Abbildung 6.13](#) gut erkennen.

Hierbei wurde ein ausgewählter Mischer in die Abgasanlage der Abbildung 6.1 verbaut und die Mischstreckenlänge von 600mm über 400mm bis auf 330mm reduziert. Bei der 330mm-Variante handelt es sich bereits um die minimale Mischstreckenlänge, die bei Verzicht auf das Mischrohr (Abbildung 6.1 - rot) entsteht. Die Restlänge ergibt sich auf Grund der restlichen unverzichtbaren Elemente der Anlage.

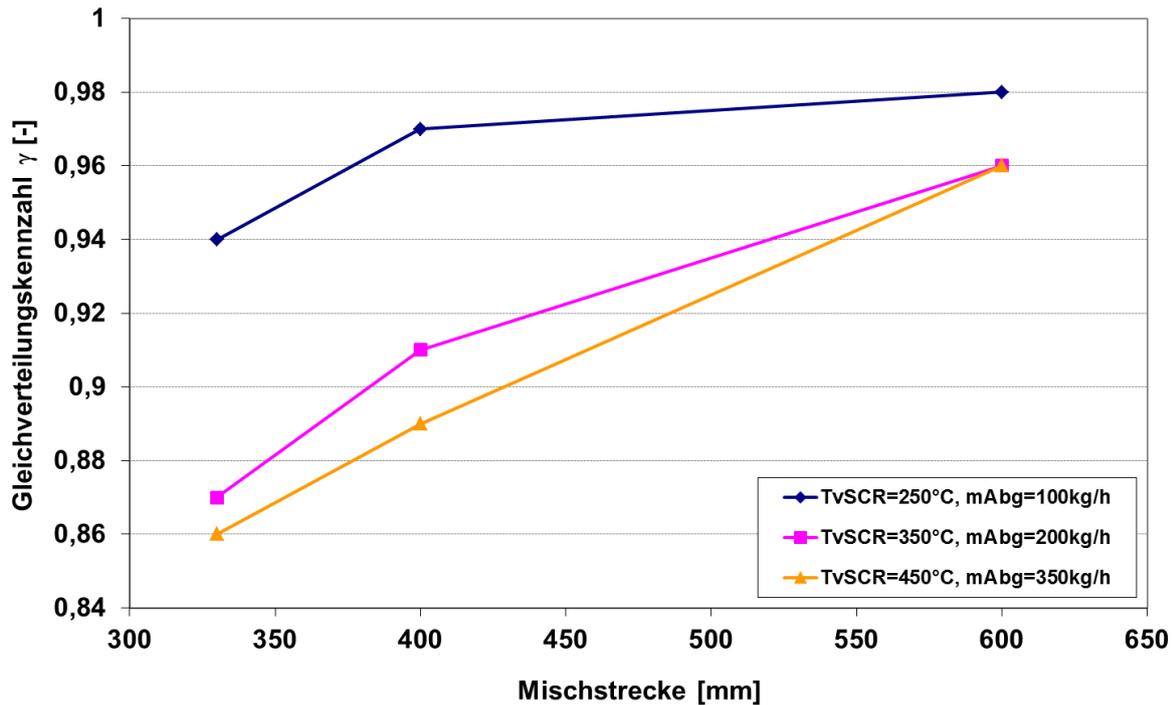


Abbildung 6.13: Abnehmende Gleichverteilung durch Verkürzung der Mischstreckenläng.

In Abbildung 6.14 sind die Gleichverteilungsbilder der verschiedenen Mischstreckenlängen ersichtlich. Es handelt sich dabei um Betriebspunkt BP2 (Tabelle 5.4).

Daraus ist ersichtlich, dass zur guten Homogenisierung des Gemisches aus Abgas und Harnstoff für die eingesetzte Dosiereinheit eine gewisse Mischstreckenlänge und somit Bauraum im Unterboden unumgänglich ist. Ein damit einhergehendes Problem ist jedoch viel größer. Durch die weite Wegstrecke bis zum Katalysator geht viel Abgaswärme verloren. Das ohnehin relativ kühle Abgas des Dieselmotors benötigt somit länger um den Katalysator auf seine Light-off-Temperatur zu bringen. Dies wirkt sich negativ auf das Anspringverhalten der Abgasanlage aus und reduziert die Funktionszeit des Abgasnachbehandlungssystems während gesetzlicher Prüfzyklen wie dem NEFZ. (siehe Kapitel 6.5)

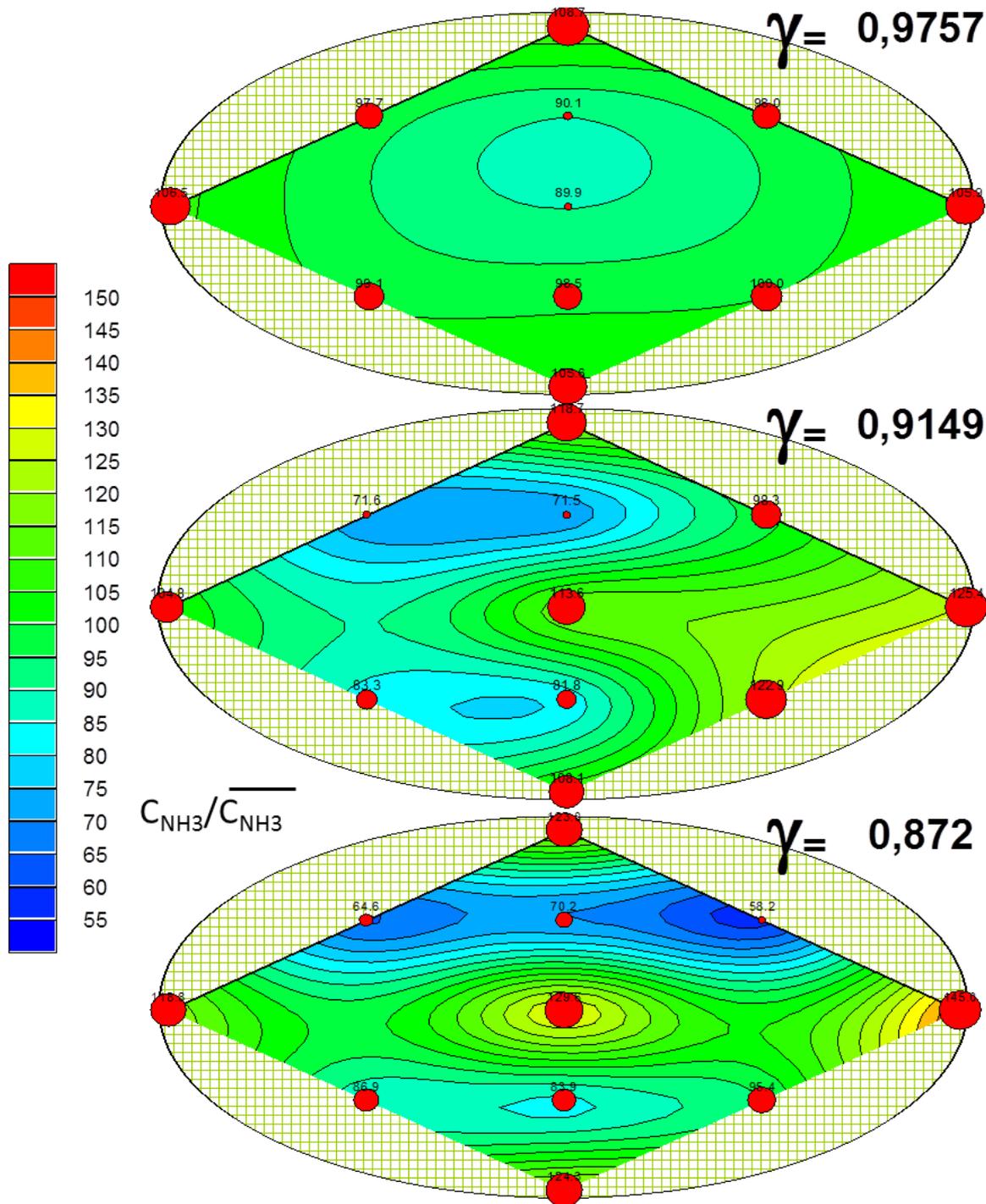


Abbildung 6.14: Gleichverteilungsbilder für Mischstreckenlängen 600mm (oben) / 400mm (mitte) / 330mm (unten)

Neben der Länge wurde auch der Durchmesser des Mischrohres variiert. Bei konstanter Mischstreckenlänge wurde das Abgasrohr zwischen Mischer und Katalysator-Eingangstrichter von 60 auf 50mm reduziert. Der Übergang wurde als kurzer Kegel ausgeführt.

D_{Mischstrecke}	BP1	BP2	BP3
60mm	$\gamma=0,98$	$\gamma=0,96$	$\gamma=0,93$
50mm	$\gamma=0,99$	$\gamma=0,97$	$\gamma=0,96$

Tabelle 6.1: Verbesserung der Gleichverteilungszahl durch Reduktion des Mischstreckendurchmessers.

Wie in Tabelle 6.1 ersichtlich, bewirkt eine Reduktion des Mischstreckendurchmessers eine Verbesserung der Reduktionsmittelhomogenisierung über alle Betriebspunkte. Dies lässt sich an Hand der Reynolds-Zahl [125] nach Gleichung 6.1 nachvollziehen.

$$Re = \frac{v * d}{\nu} = \frac{\text{Strömungsgeschwindigkeit} * \text{Durchmesser}}{\text{kinematische Viskosität}} \quad \text{Gleichung 6.1}$$

Sie stellt das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften in der Strömungslehre dar und ist ein Maß für das Turbulenzverhalten (z.B. in einer Rohrströmung).

$$v = \frac{4 * \dot{V}}{d^2 * \pi} \quad \text{Gleichung 6.2}$$

Mit Gleichung 6.2 ist auch die Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Volumenstrom \dot{V} und Rohrdurchmesser d definiert. So lässt sich erkennen, dass bei gleichem Abgasmassenstrom für kleinere Rohrdurchmesser höhere Reynolds-Zahlen erzielt werden. Der Grad der Turbulenz wird somit höher.

In einem weiteren Schritt wurde neben dem Mischrohr auch der Mischer und der Rohrbogen samt Dosierstutzen auf unterschiedliche Durchmesser skaliert. Neben der Standardgeometrie mit einem Durchmesser von 60mm wurden zwei Durchmesservarianten mit 45 bzw. 70mm untersucht. Dafür kamen lasergesinterte Mischervarianten der Seriengeometrie zum Einsatz. Natürlich wurde auch die Distanz zwischen Injektor und Mischer zur entsprechenden Mischerbenetzung (siehe Kapitel 6.1.6 - Abbildung 6.25) angepasst.

In Abbildung 6.15 bestätigt sich der Trend der verbesserten Gleichverteilung bei kleiner werdenden Anlagendurchmessern. Während der Gleichverteilungsindex beispielsweise in Betriebspunkt BP2 bei einem Rohrdurchmesser von 70mm nur bei $\gamma=0,936$ liegt, verbessert sich dieser bei 45mm auf $\gamma=0,991$.

Da der gleiche Abgasmassenstrom durch ein engeres Rohr geführt wird, kommt es zu höheren Strömungsgeschwindigkeiten und entsteht eine stärkere Drallströmung nach dem Mischer. Diese verbessert die Homogenisierung des Reduktionsmittels

AdBlue®. Diesen Vorteil erkaufte man sich jedoch leider über einen starken Anstieg des Abgasgedrucks (siehe Kapitel 6.2).

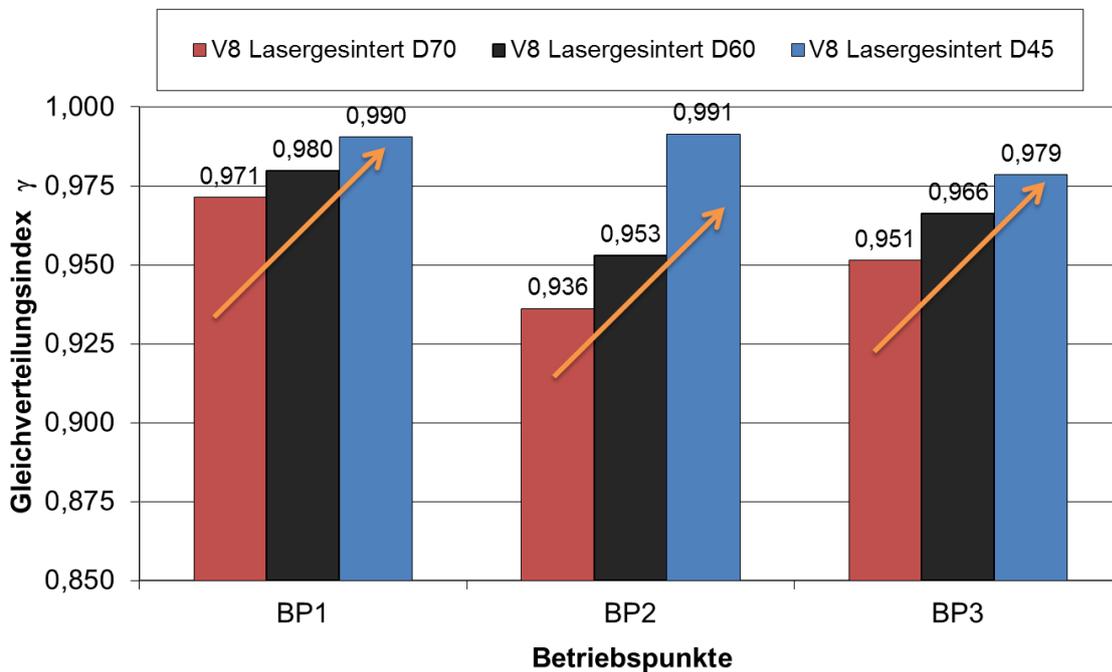


Abbildung 6.15: Einfluss einer Durchmesservariation der Dosierstrecke auf die Gleichverteilung.

Eine weitere Variation der Mischstrecke konnte über die Veränderung des Einlasstrichters in den SCR-Katalysator realisiert werden. In den bisher angeführten Varianten wurde ein Fischertrichter verwendet (siehe Abbildung 6.1). Dabei handelt es sich um einen Abgaseinlassstutzen, welcher das Abgas aus einem Rohr mit vergleichsweise kleinem Querschnitt großflächig einem ovalen Katalysator (Racetrack-Kat) zuführt. Als düsenartiges Übergangsstück weist er einen konisch sich erweiternden Trichter und auslassseitig (an der Anschlussstelle zum Katalysator-Eingang) einen Schrägschnitt des Bauteils auf [126].

In der Variation wurde nicht nur der Fischertrichter durch einen geraden kegelförmigen Trichter, sondern auch der Racetrack-Katalysator durch einen runden Kat ersetzt. Eine schematische Darstellung der beiden Mischstreckenvariationen ist in Abbildung 6.16 dargestellt.

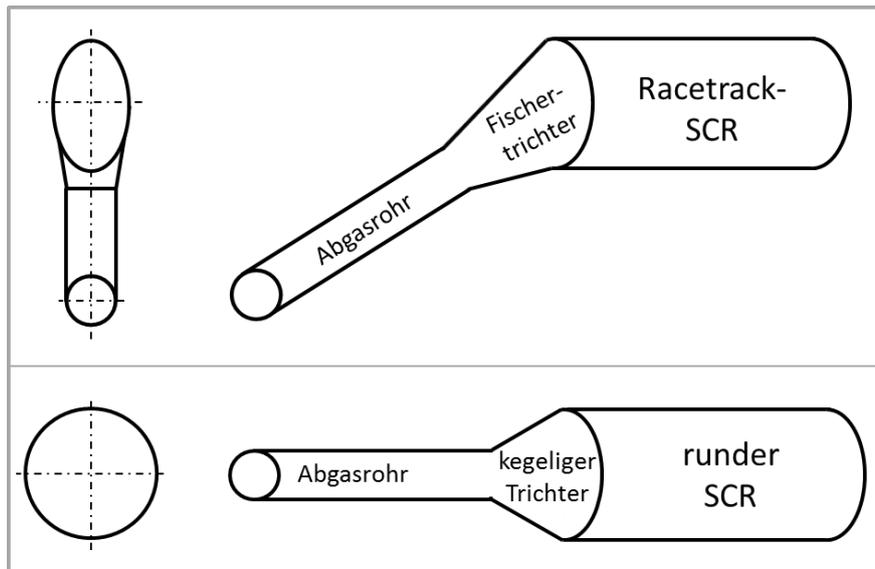


Abbildung 6.16: Schematische Darstellung der untersuchten Trichtervariationen in Kombination mit der jeweils zugehörigen Katalysatorbauform.

Durch diese Vereinfachung der Geometrie konnte jedoch keine Verbesserung der Gleichverteilung erzielt werden. Die bogenförmige Erweiterung des Fischertrichters bringt hier klare Vorteile ([Abbildung 6.17](#)).

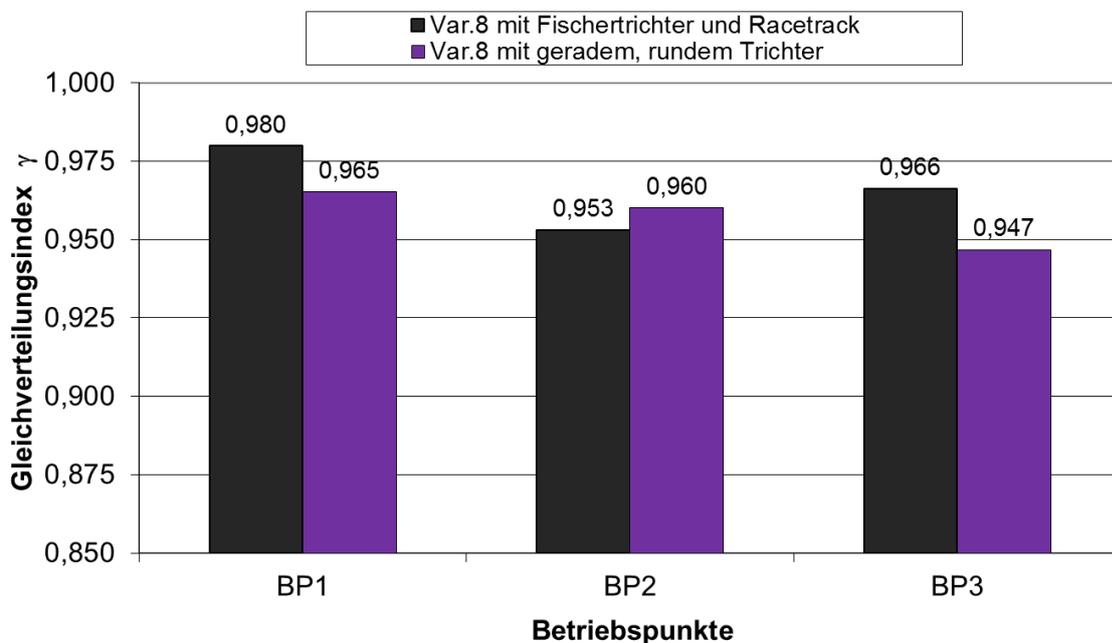


Abbildung 6.17: Eine vereinfachte Geometrie mit rundem Katalysator und Einlasstrichter bringt keine Vorteile zur Racetrack-Form mit Fischertrichter.

6.1.5 Dosierposition und -winkel

Wie in Abbildung 6.2 dargestellt, kann auch die konstruktive Gestaltung des Dosierwinkels zur Beeinflussung der Ammoniakgleichverteilung genutzt werden. Eine Auswahl anschaulicher Dosierpositionen, die im Rahmen der Arbeit untersucht wurden ist in Abbildung 6.18 dargestellt.

Links oben ist eine Geradrohrdosierung mit einem Dosierwinkel von etwa 30° zu sehen. Der Mischer wird zentral von der Dosiermittelachse getroffen. In den Bildern der rechten Seite sind Bogenrohrdosierungen zu sehen. Bei der Variante oben wird der Mischer ebenfalls zentral von der Düse anvisiert. Eine schematische Darstellung dazu ist Abbildung 6.19 links zu entnehmen. Je nach Größe des Abgasmassenstromes und der daraus resultierenden Strömungsgeschwindigkeit werden jedoch die Tropfen des dosierten AdBlue® in Richtung untere Rohrwand gedrückt. Dadurch wird der Mischer nicht mehr zentral vom Spray beaufschlagt, sondern vermehrt in der unteren Region. Dies kann zu einer Verschlechterung der Gleichverteilung führen.

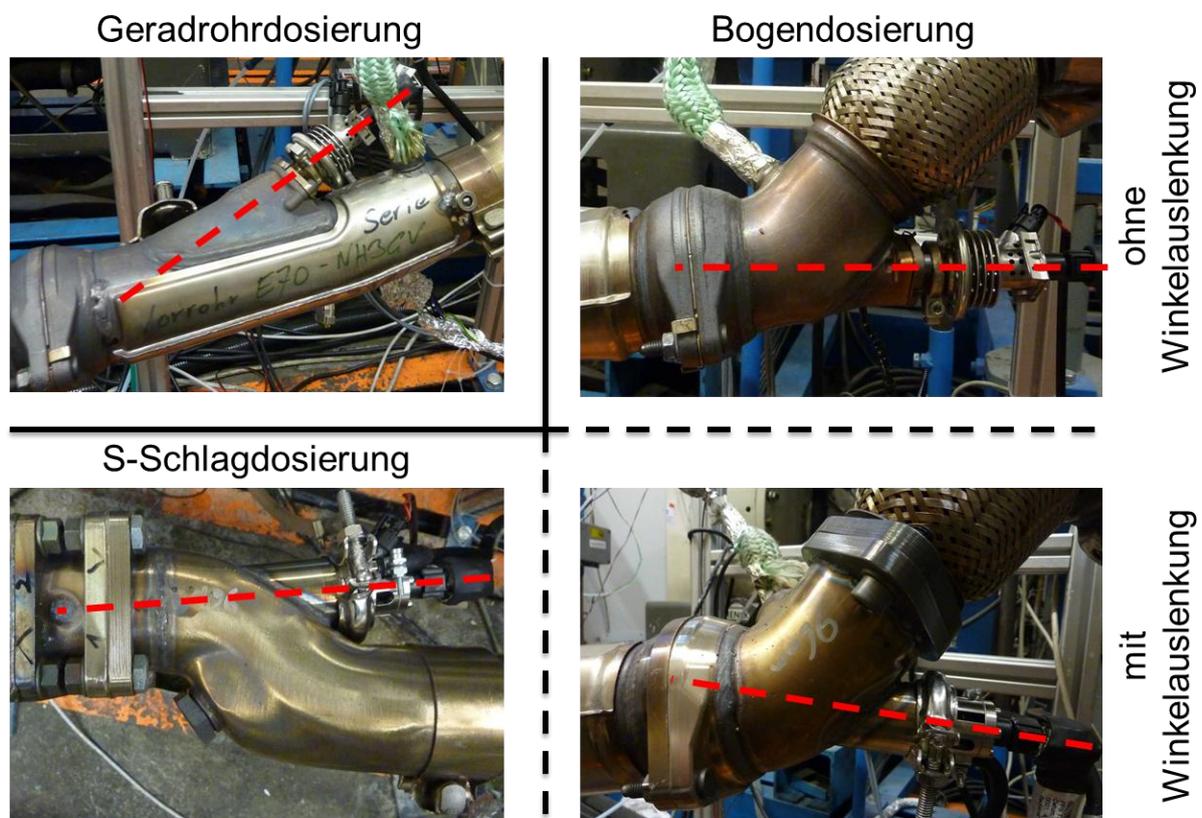


Abbildung 6.18: Unterschiedliche Dosierpositionen und -winkel zur Erzielung einer optimalen Beaufschlagung des Mixers (jeweils im Flansch positioniert).

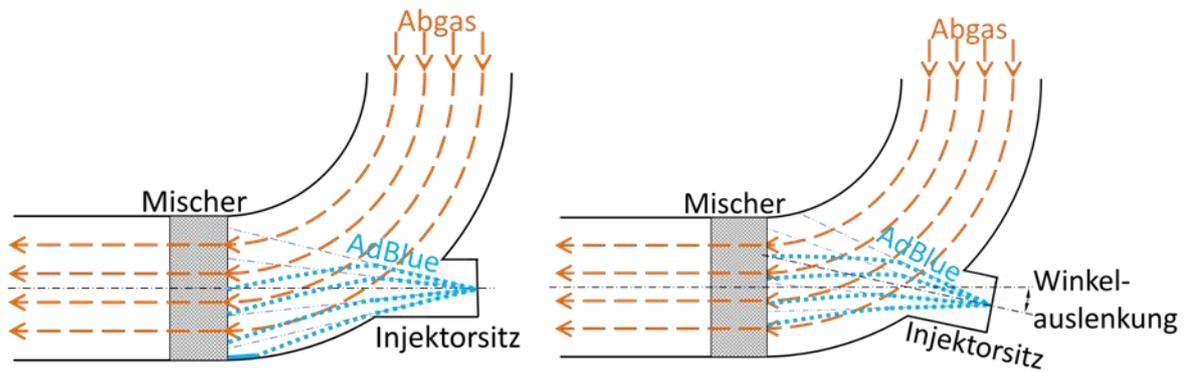


Abbildung 6.19: Schematische Darstellung der Auslenkung des Dosierwinkels (rechts) zur Kompensation der Sprayverwehung (links) an Hand einer Bogendosierung.

Dieser Sprayverwehung kann durch eine Auslenkung des Dosierwinkels (Abbildung 6.19 – rechts) entgegengewirkt werden. Ein solch überhöhter Dosierwinkel wurde in Abbildung 6.18 rechts unten realisiert. Da die Strahlablenkung je nach Lastpunkt unterschiedlich ausfällt, wäre ein variabler Dosierwinkel zur optimalen Beaufschlagung der Mischergeometrie wünschenswert. Diese wurde jedoch bisher nicht umgesetzt und ist aus Gründen des Aufwandes für die praktische Anwendung wohl nicht realisierbar. Es gilt also für den jeweiligen Rohrbogen einen für alle Kennfeldbereiche optimalen Kompromiss zu finden.

In Abbildung 6.18 ist links unten schließlich eine S-Schlagdosierung zu sehen (Ansicht von oben). Auch hier wird durch einer geringen Winkelauslenkung nach links einer Strahlverwehung nach rechts entgegengewirkt.

In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass eine komplette Querschnittsabdeckung des Rohres durch den Mischer von hoher Bedeutung ist. Versuche mit offenen Ringspalten um den Mischer zur Reduzierung des Abgasgedrucks zeigen stark negativen Einfluss auf die Gleichverteilung.

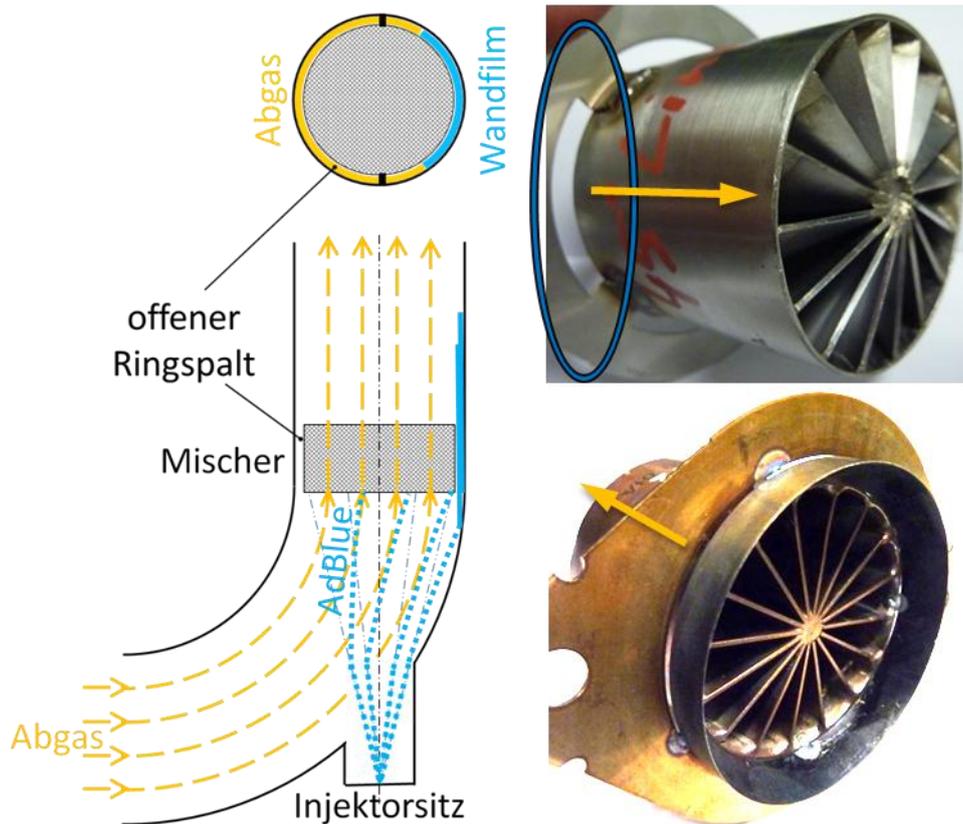


Abbildung 6.20: Ursprünglich vorgesehener Ringspalt (rechts oben) wurde verschlossen (rechts unten)

Die in Abbildung 6.20 gezeigte Konstruktion mit einem Linksbogen wurde zur Reduzierung des Gegendrucks mit einem Ringspalt um den Mischer (rechts oben) versehen. Das Abgas (gelbe Pfeile) strömt somit nicht nur durch den Mischer, sondern auch an diesem vorbei. Das verwehte Harnstoffspray (blaue Pfeile) kann einen Wandfilm bilden, der unbeeinflusst den offenen Ringspalt des Mischers passiert. Eine Verteilung dieser Reduktionsmittelmasse kann in Folge nicht mehr erreicht werden. Die Ergebnisse in Abbildung 6.21 zeigen vor allem in hohen Betriebspunkten einen starken Reduktionsmittelüberschuss im linken Bereich des Katalysators. Dies entspricht genau jener Seite, auf der das Spray den Mischer ungehindert passiert. Ammoniakschlupf kann in gewissen Kennfeldbereichen die Folge sein. Ein konstruktives Verschließen des Ringspaltes (Abbildung 6.20 – rechts unten) bringt eine eindeutige Verbesserung der Ergebnisse.

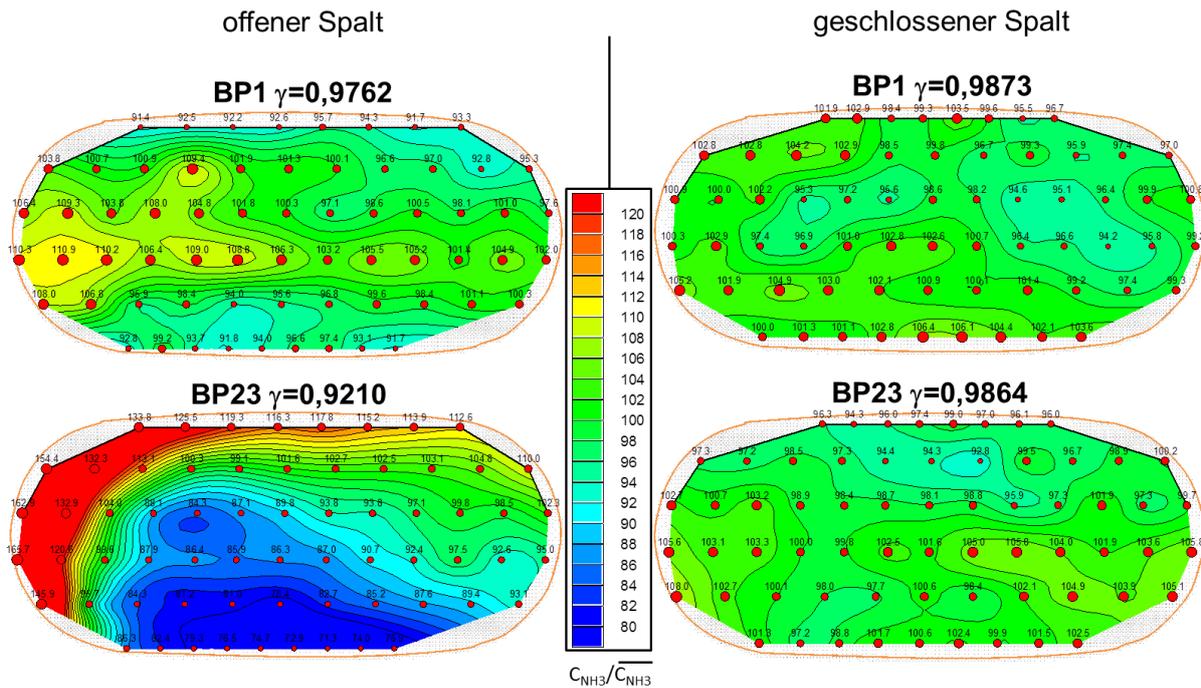


Abbildung 6.21: Gleichverteilungsergebnisse mit offenem (links) und geschlossenem (rechts) Ringspalt bei niedrigen (oben) und hohen (unten) Betriebspunkten.

In weiterer Folge wurde der Mischerdurchmesser dem Rohrrinnendurchmesser angepasst. Der höhere Gegendruck durch Verzicht auf einen Spaltring musste zu Lasten der wichtigen Gleichverteilung in Kauf genommen werden.

Es zeigt sich also bereits hier, dass eine Abstimmung der Dosierposition und sein Winkel gut auf das Anlagenkonzept und seine Einzelkomponenten abgestimmt sein müssen.

Bei den Untersuchungen zur Dosierwinkelvariation wurde außerdem das Problem der Verklebungen an der Düsenspitze auffällig. Abbildung 6.22 zeigt eine saubere und eine verklebte Injektorspitze. Diese Ablagerungen bildeten sich während Gleichverteilungsmessungen bei einem Dosierwinkel von 180° (Gegenstromdosierung). Das eingedüστε Reduktionsmittel wird dabei vom Abgas auf den Injektor zurück gedrückt und bildet die klar sichtbaren Verkrustungen.



Abbildung 6.22: Eine saubere Injektorspitze (links) ist einer verklebten Spitze nach Gleichverteilungsuntersuchungen bei 180° Dosierwinkel gegenübergestellt.

Dieser Problematik wird sich in Kapitel 6.3 gesondert gewidmet.

6.1.6 Düsenbauformen, Spraykegelwinkel

Im Rahmen dieser Arbeit kamen Düsen unterschiedlicher Hersteller und unterschiedliche Modelle zum Einsatz. Viele davon hatten den Prototypenstatus jedoch noch nicht überschritten und zeigten somit Probleme in Spraybild, Dosiermengenregulierung und Standfestigkeit.

Zur Analyse der Schwerpunktsthemen dieser Arbeit sind daher zum Großteil Harnstoff-Injektoren aus dem Hause Bosch zum Einsatz gekommen. Diese sind bereits in Serienprodukten einiger Automobilhersteller zu finden. Die einzelnen Modelle unterscheiden sich vor allem durch ihren Spraykegelwinkel (Kapitel 5.1). Aus Spraykegelwinkel und der Distanz zwischen Injektor und Mischer ergibt sich die Auftrefffläche des Sprays am Mischer. Zur Veranschaulichung wurden mit 2 Injektoren und 11° bzw. 16° Spraykegelwinkel vergleichende Gleichverteilungsuntersuchungen in einer einfachen Standard-Abgasanlage (Abbildung 6.1) durchgeführt.

Exemplarisch sind in Abbildung 6.23 die Gleichverteilungsergebnisse aus Betriebspunkt BP2 angegeben.

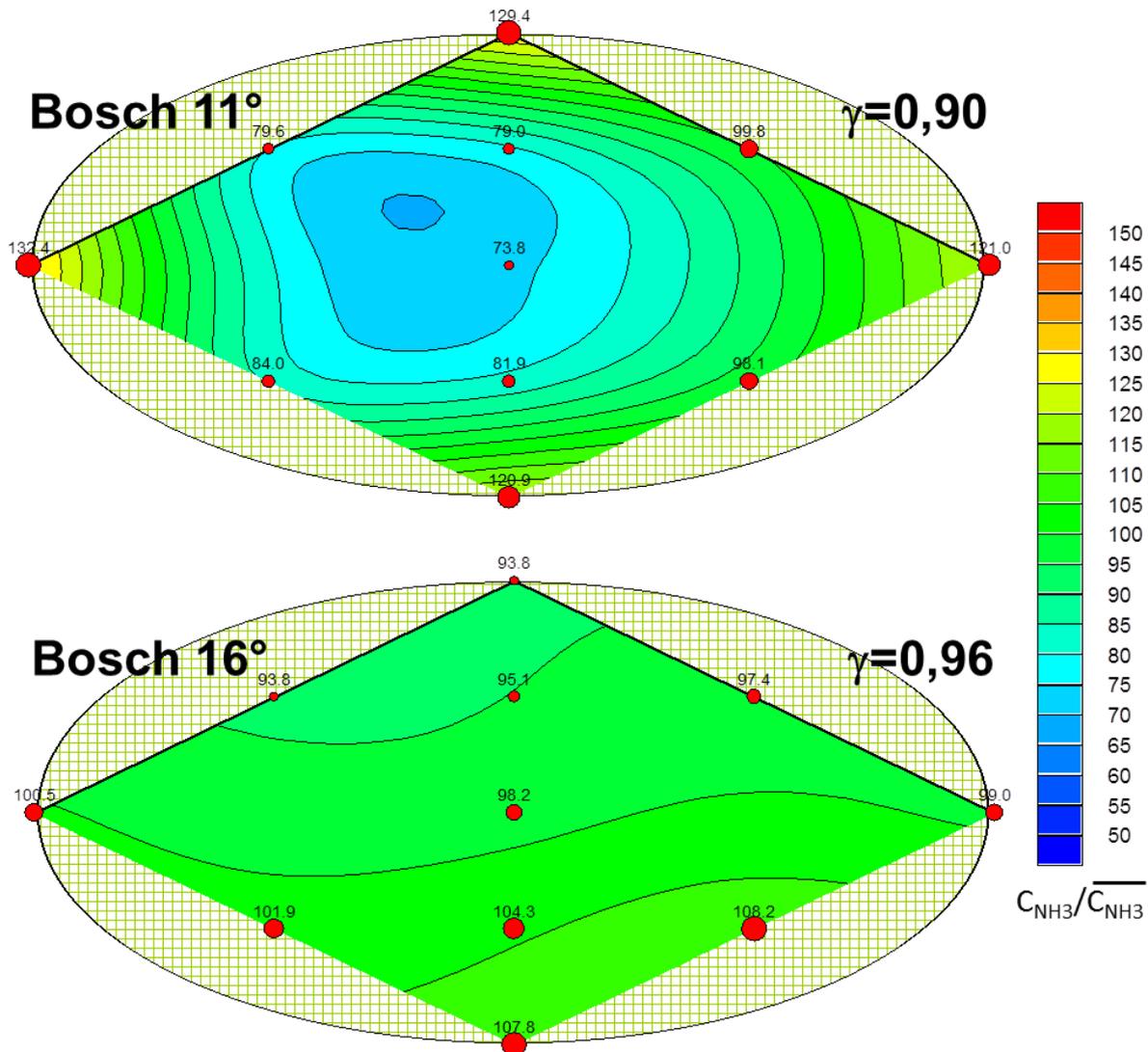


Abbildung 6.23: Einfluss des Spraykegelwinkels auf die Gleichverteilung des Reduktionsmittels.

Der Injektor mit 11° Spraykegelwinkel ergibt ein wesentlich schlechteres Gleichverteilungsergebnis als mit 16°. Es entsteht eine Zone mit Reduktionsmittelmangel im Zentrum des Katalysators. In den Randpunkten hingegen besteht ein Ammoniaküberschuss.

In Abbildung 6.24 sind links die Auftreffpunkte des Sprays am Mischer-Eingang klar zu erkennen. Das Spray trifft bei 11° den Mischer zu zentral. Die Außenbereiche werden nicht benetzt. Auch auf der Rückseite des Mixers (rechts) ist die zentrale Lage des Hauptteils der Reduktionsmittelmasse noch zu erkennen. Die folgende Durchmischung ist für eine gute Durchmischung nicht ausreichend.

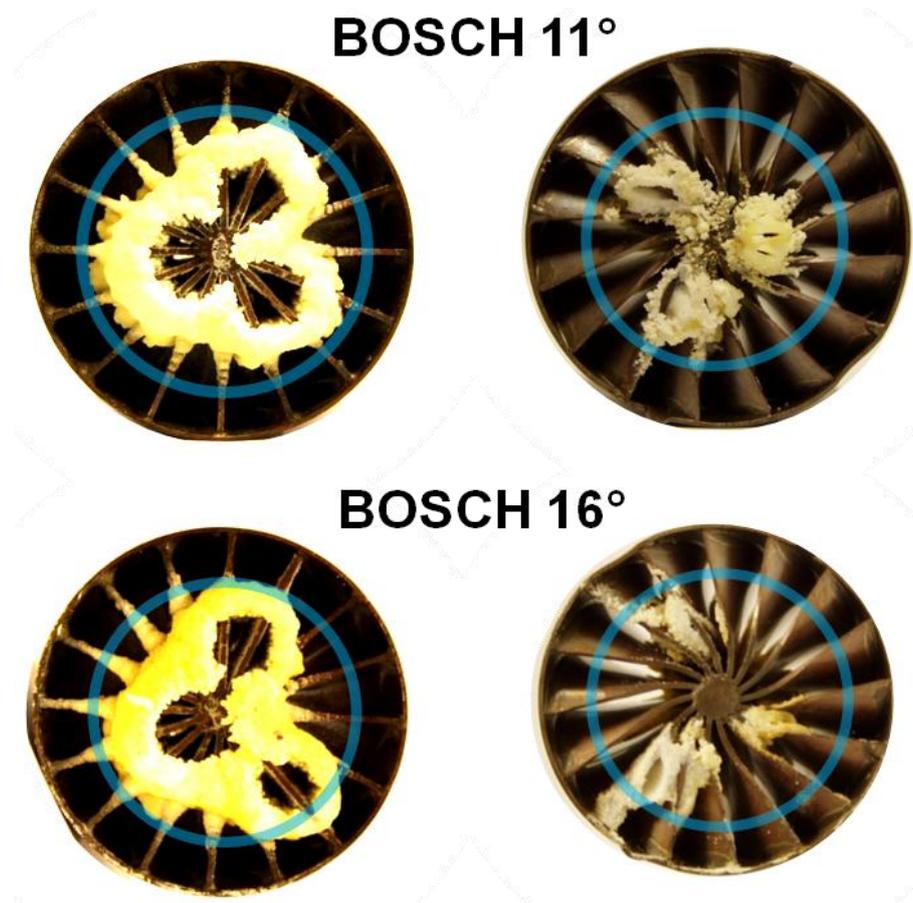


Abbildung 6.24: Auftreffpunkte des Sprays am Mischer bei Spraykegelwinkel 11° und 16°.

Bei 16° Spraykegelwinkel kann hingegen das besser über den Querschnitt verteilte Spray gut mit dem Abgasstrom durchmischt werden.

Eine präzise konstruktive Auslegung der Bauteile zueinander ist also auch hierbei von großer Bedeutung. In Abbildung 6.25 sind verschiedene Konstruktionsfehler schematisch dargestellt. Der rote Spraykegelwinkel ist zu groß gewählt. Dies führt zur Wandfilmbildung vor dem Mischer. Im Bereich des Düsensitzes kann dieser Wandfilm und die daraus resultierten Ablagerungen zu einer Verklebung des Düsensitzes führen. Der grüne Spraykegelwinkel hingegen trifft den Mischer in Position a zu zentral. So kommt es zu einer Überladung des Mischerkerns mit Reduktionsmittel und es kann wie in Abbildung 6.23 – oben keine ideale Gleichverteilung erzielt werden. Der blaue Spraykegel hingegen deckt die Querschnittsfläche des Mischers ideal ab, ohne schon zuvor die Rohrwand zu benetzen. Das auch die Positionierung des Mischers ausschlaggebend ist wird bei Mischerposition b deutlich. Hierfür wäre auch der blaue Spraykegelwinkel zu groß.

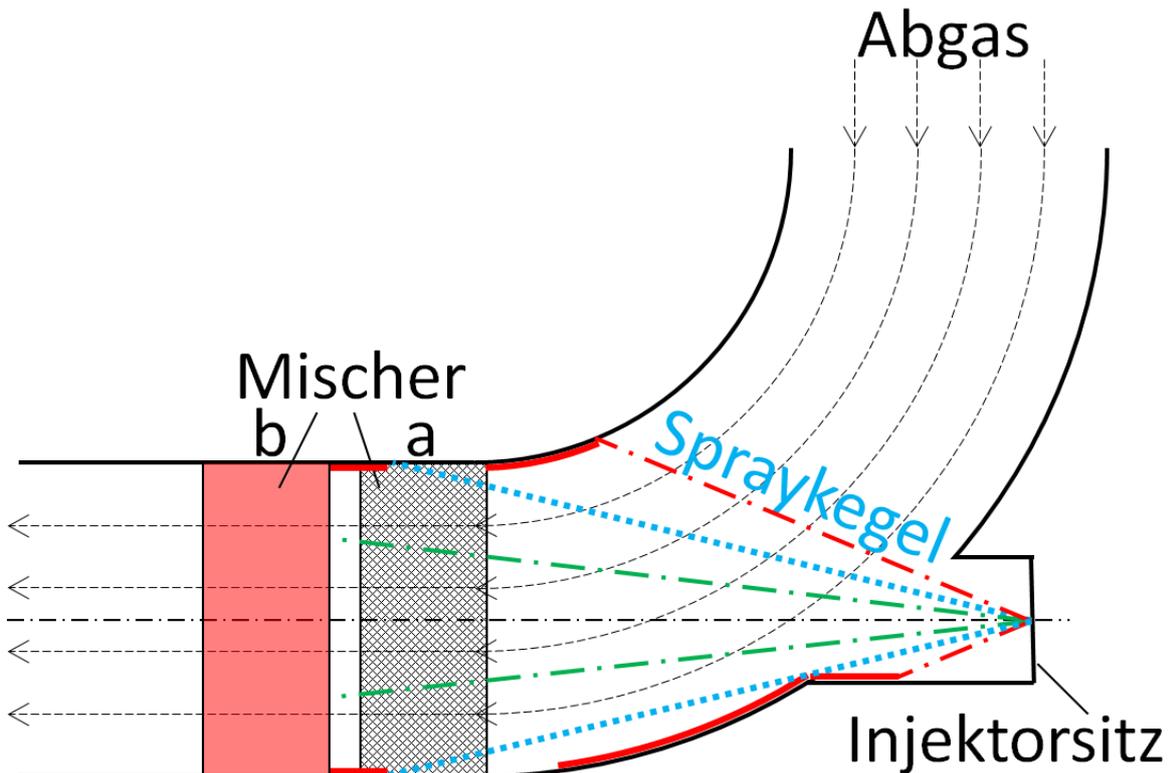


Abbildung 6.25: Abstimmung der geometrischen Abmessungen zur idealen Mischerbenetzung.

6.1.7 Variation des Harnstoffeinspritzdrucks

Mit dem zum Einsatz gekommenen Dosiersystem lassen sich unterschiedliche Dosierdrücke realisieren. Zur Anwendung kam 4,5bar, 5bar, 6bar, 7,5bar und 10bar Dosiermitteldruck. Die meisten Untersuchungen wurden mit 5bar Einspritzdruck durchgeführt und sind daher gut miteinander zu vergleichen. Um eine mögliche Abhängigkeit der Gleichverteilungsergebnisse vom Dosierdruck abklären zu können, soll zunächst eine in mehreren Aspekten interessante Abgasanlage vorgestellt werden.

In Abbildung 6.26 ist die Basisversion dieser komplexen Abgasanlage dargestellt. Sie besteht aus einem Diesel-Oxidationskatalysator, einem Dieselpartikelfilter mit katalytischer Beschichtung und dem SCR-System. Das SCR-System besteht aus einem wassergekühlten Dreiloch-Injektor (rot), der direkt nach dem DPF in einem sehr steilen Dosierwinkel von 80° angebracht ist. Die Düse sprüht auf den darauf folgenden Mischer (blau). Dieser ist zusätzlich mit einem Prallblech versehen. Somit soll der dosiermittelbedingten Wandfilmbildung am kühleren Abgasrohr vor dem

Mischer entgegengewirkt werden. In der mittellangen Mischstrecke ist ein Entkoppelelement (EKE - siehe Kapitel 5.7.3) verbaut. Die Mischstrecke mündet schließlich über einen geraden Trichter in einem SCR-Katalysator in Racetrack-Form.

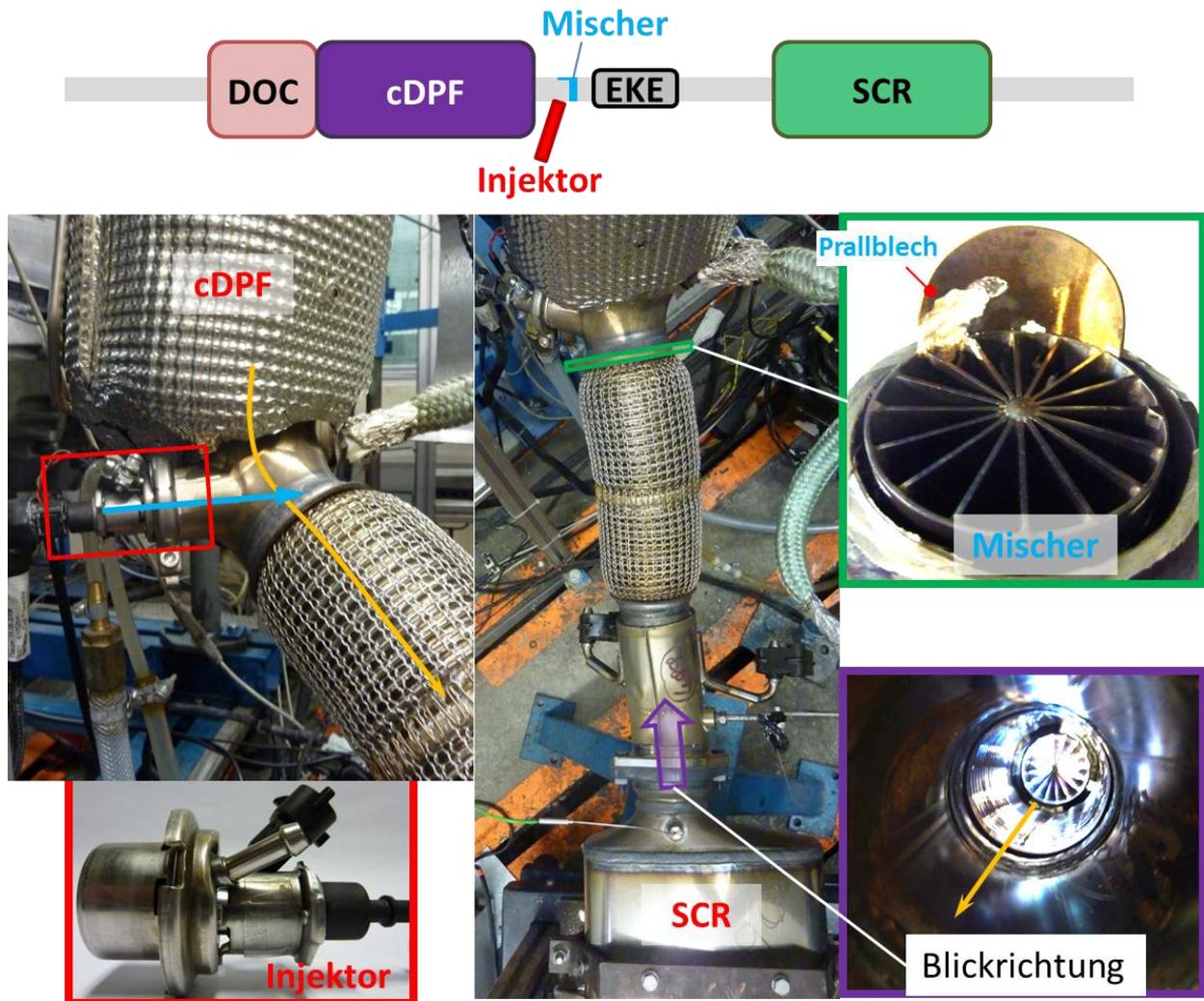


Abbildung 6.26: Basisversion einer bedingt durch die Fahrzeuggeometrie komplexen Abgasanlage mit wassergekühltem Injektor und Entkoppelelement (EKE) in der Mischstrecke.

Da die Dosierung des Reduktionsmittels vor einem Entkoppelelement Probleme bereiten kann (siehe Kapitel 6.4), wurde diese Basisversion zwischen DPF und SCR-Katalysator überarbeitet (Abbildung 6.27).

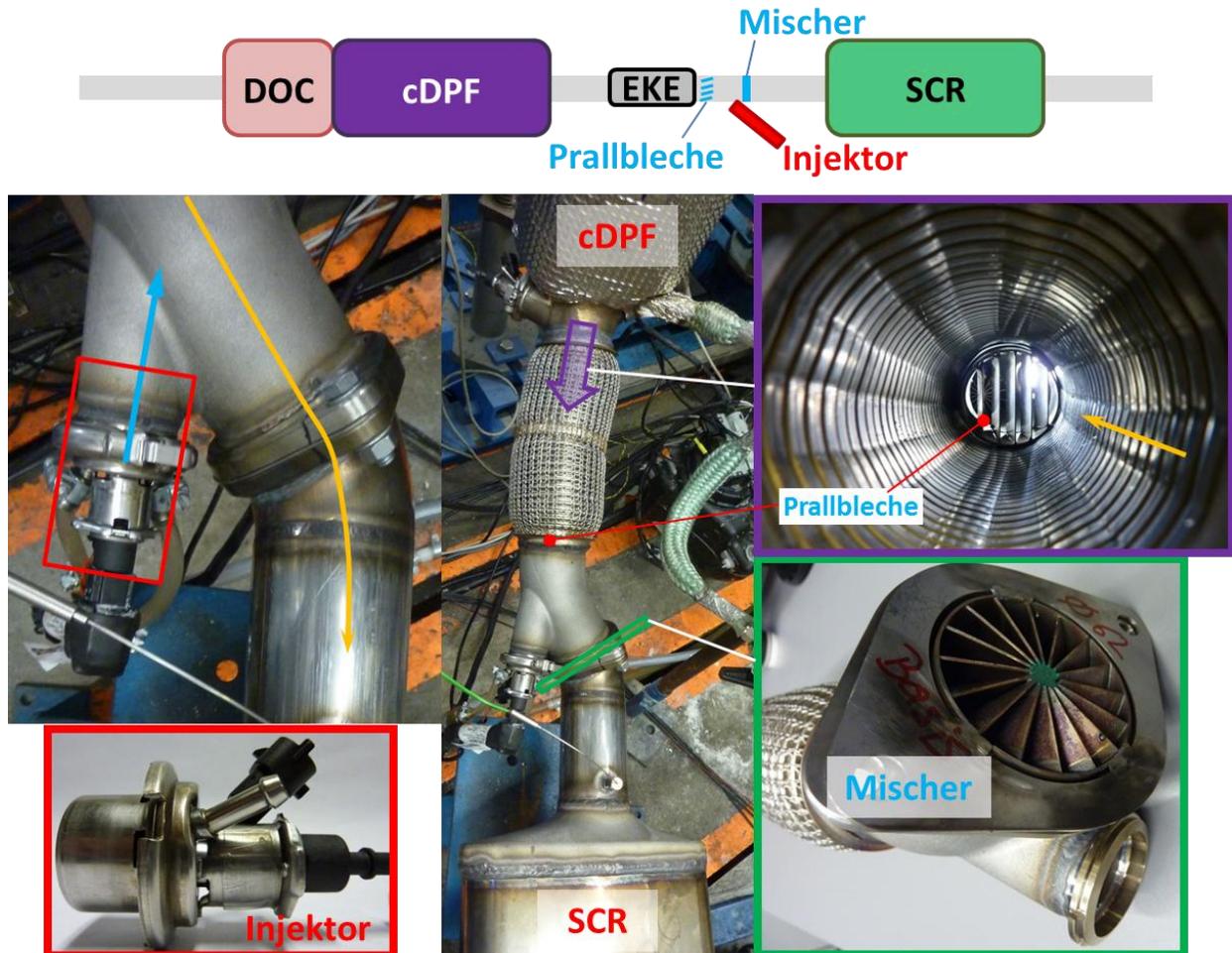


Abbildung 6.27: Überarbeitete Version mit geänderter Position von Injektor und Mischer sowie Prallblechen am Ausgang des Entkoppellementes.

In der überarbeiteten Version gibt es weiterhin ein Entkoppellement. Die Dosierposition wurde jedoch weiter nach hinten verlegt. Eine Gegenstromdosierung erfolgt somit nach dem Entkoppellement. Um zu verhindern, dass das Spray zu weit in das Entkoppellement vordringt, sind Prallbleche am Ausgang des Elementes angebracht (Abbildung 6.27 – rechts oben: Blick vom DPF durch das EKE auf die Prallbleche. Im Hintergrund ist links der Mischer und rechts an Stelle der Lichtquelle die Düse positioniert.).

An Hand der Anlagengeometrie sind die Randbedingungen nun dargestellt. Sowohl mit der Basisanlage, als auch der überarbeiteten Version wurde eine Variation des Einspritzdruckes untersucht. Dabei kamen 5 unterschiedliche Betriebspunkte zum Einsatz. Die Ergebnisse der Gleichverteilung sind in Abbildung 6.28 gegenübergestellt.

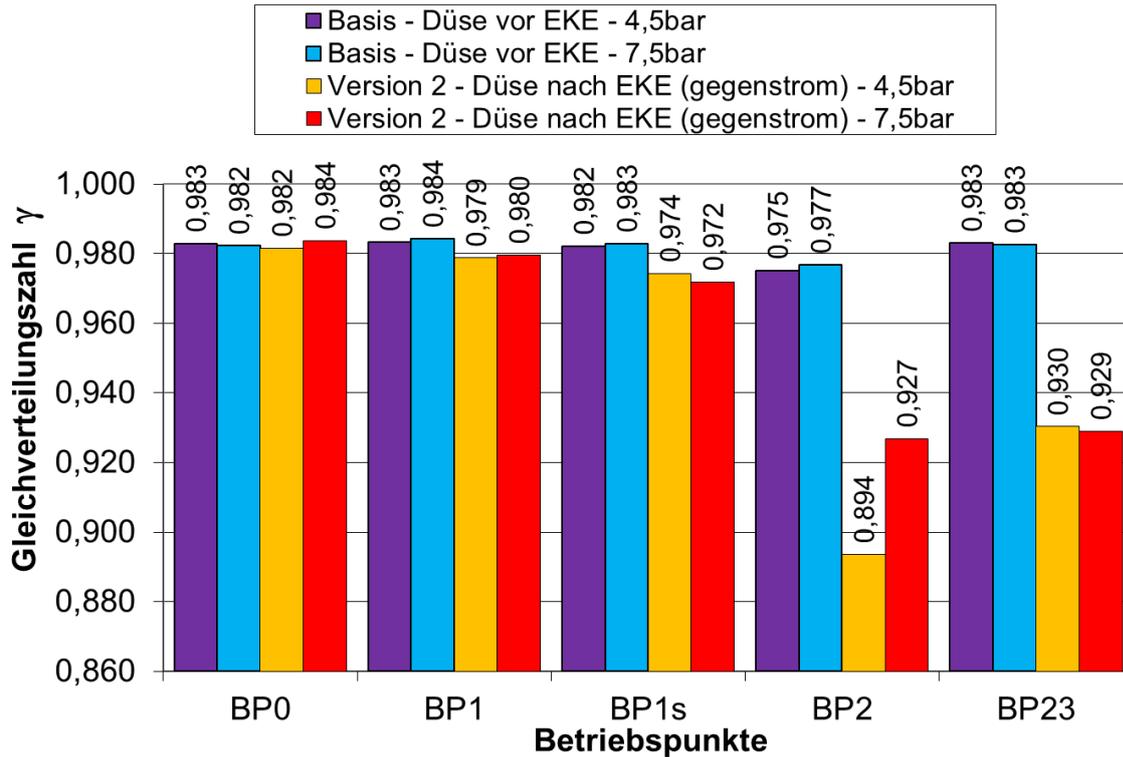


Abbildung 6.28: Auswirkung auf die Gleichverteilung bei einer Variation des Harnstoff-Dosierdrucks an zwei Abgasanlagen in unterschiedlichen Betriebspunkten.

Es ist ersichtlich, dass bei der Basisanlage kein Einfluss des Dosierdrucks festgestellt werden kann. Die Abweichungen der Gleichverteilungszahl in der dritten Kommastelle liegen im Bereich der Reproduzierbarkeitsgrenzen. Bei der überarbeiteten Version 2 hingegen ist vor allem in den hohen Betriebspunkten BP2 und BP23 eine Verschlechterung der Gleichverteilung zu erkennen.

Zur Analyse ist aus den Daten der Tabelle 5.4 (Kap.5.5) besonders der Abgasmassenstrom 200 bzw. 350kg/h und die Abgastemperatur von jeweils 350°C hervorzuheben. Bei hohen Abgasmassenströmen kann durch die Gegenstromdosierung das Spray nicht mehr tief genug in den Abgasstrang eingebracht werden. Abbildung 6.29 zeigt, dass das Spray zu seinem Ursprungsort zurückgedrückt wird. Somit entsteht an dieser Seite der Abgasanlage (Abbildung 6.29 – links) ein klares Übergewicht an Reduktionsmittel, welches auch durch den Mischer nicht ausgeglichen werden kann. In Betriebspunkt BP2 kann durch den höheren Dosierdruck noch ein etwas tieferes Vordringen des Sprays erreicht und somit im Vergleich zum geringeren Dosierdruck eine bessere Gleichverteilung erzielt werden. In Betriebspunkt BP23 hingegen kommt dieser Vorteil nicht mehr zu tragen.

Durch den noch höheren Abgasmassenstrom kommt es offenbar zu keinem Kontakt der Tropfen mit den Prallblechen und der Spray wird erneut auf die linke Seite des Katalysators zurückgedrängt.

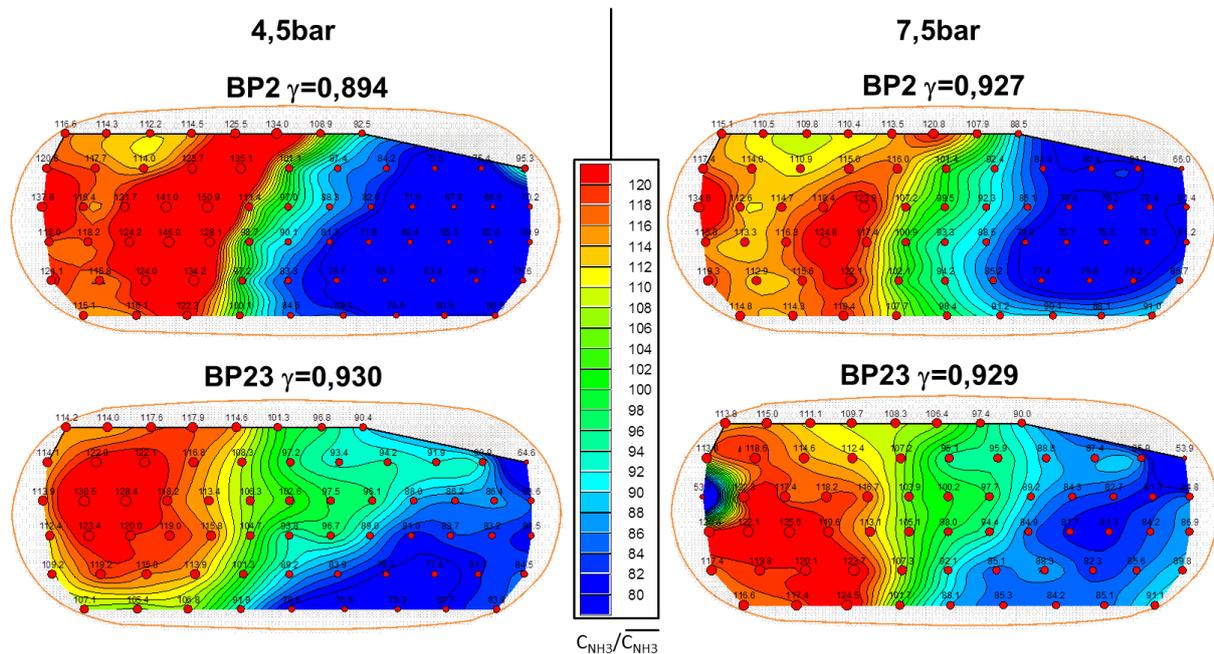


Abbildung 6.29: Die Gleichverteilungsbilder bei Gegenstromdosierung in hohen Betriebspunkten zeigen starke lokale Reduktionsmittel-Maxima im linken Bereich mit einer leichten Abhängigkeit vom Dosierdruck in BP2.

Sowohl in dieser, als auch in zahlreichen anderen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit hat sich somit gezeigt, dass bei Dosierung in Strömungsrichtung kein Einfluss des Dosiermitteldrucks auf die Gleichverteilung gegeben ist. Erst beim Sonderfall der Gegenstromdosierung kann dieser Variable eine tragende Rolle zukommen.

Außerdem wurde gezeigt, dass eine Gegenstromdosierung der Gleichverteilungsgüte nicht zuträglich ist und unterstreicht somit die Erkenntnisse aus Kapitel 6.1.5 - Abbildung 6.22.

Bevor ein Fazit über die Maßnahmen zur Optimierung der Gleichverteilung gezogen werden kann, müssen die Aspekte in Kapitel 6.2 unter Betracht gezogen werden.

6.2 Wechselwirkung zwischen erzielter Gleichverteilung und verursachtem Abgasgegendruck

Bevor auf die Problematik der Druckverluste eingegangen wird, soll noch einmal ein Blick auf Gleichverteilungsergebnisse geworfen werden. In Abbildung 6.30 sind verschiedene Mischermodelle in Bezug auf ihre Gleichverteilungsergebnisse in gleicher Abgasanlage gegenübergestellt. Basis sind Ergebnisse bei einem höheren Betriebspunkt.

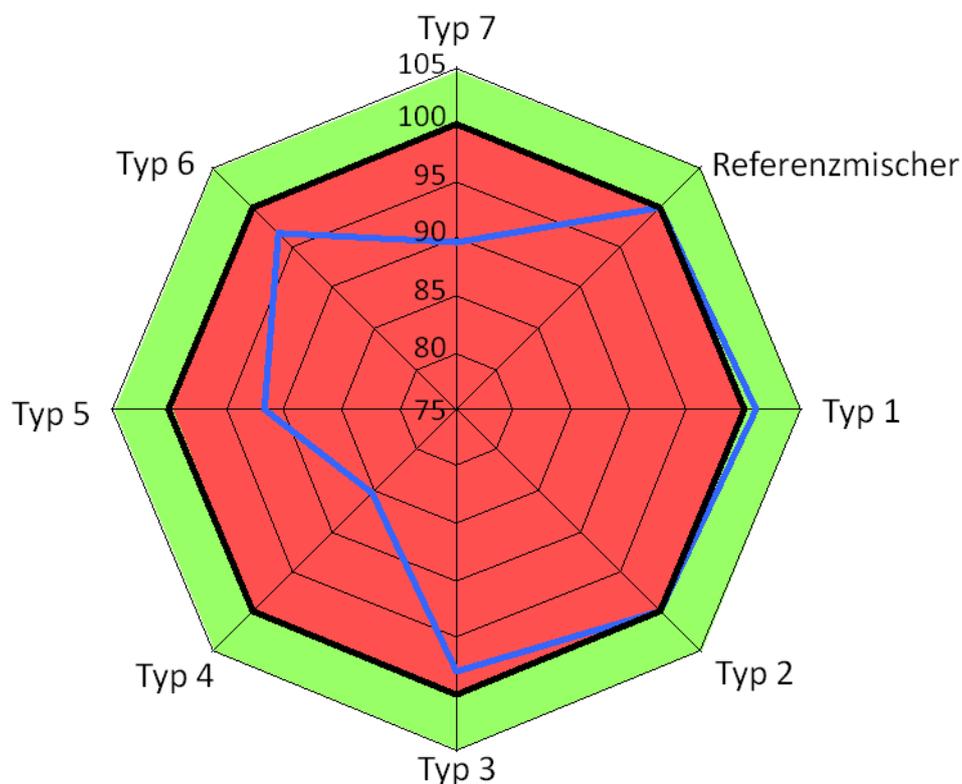


Abbildung 6.30: Gleichverteilungsergebnisse von Mischern relativ zu einem Referenzmischer in Prozent.

Der bereits in Kapitel 6.1.1 angeführte Referenzmischer wird hier als Basis gewählt. Die restlichen Mischer (Typ 1 – 7) werden auf dieses Referenzmodell bezogen. Mischer mit einer besseren Gleichverteilung (Typ 1) kommen im grünen Bereich des Diagramms zu liegen. Mischer, die eine schlechtere Gleichverteilung erreichen, sind entsprechend ihrer prozentuellen Abweichung im inneren roten Bereich zu finden.

Werden die gleichen Mischer in der in Abbildung 5.11 – Kap.5.6 gezeigten Messstrecke verbaut und auf ihr Gegendruckverhalten untersucht kann man auch

diese Ergebnisse zueinander ins Verhältnis setzen. Dies wurde in [Abbildung 6.31](#) umgesetzt. Das hieraus entstandene Diagramm setzt den Referenzmischer abermals als Basis an. Mischer mit einem schlechteren Gegendruckverhalten, also höherem Gegendruck, befinden sich im äußeren roten Bereich. Die Modelle mit besserem Gegendruckverhalten hingegen sind im inneren grünen Bereich zu finden.

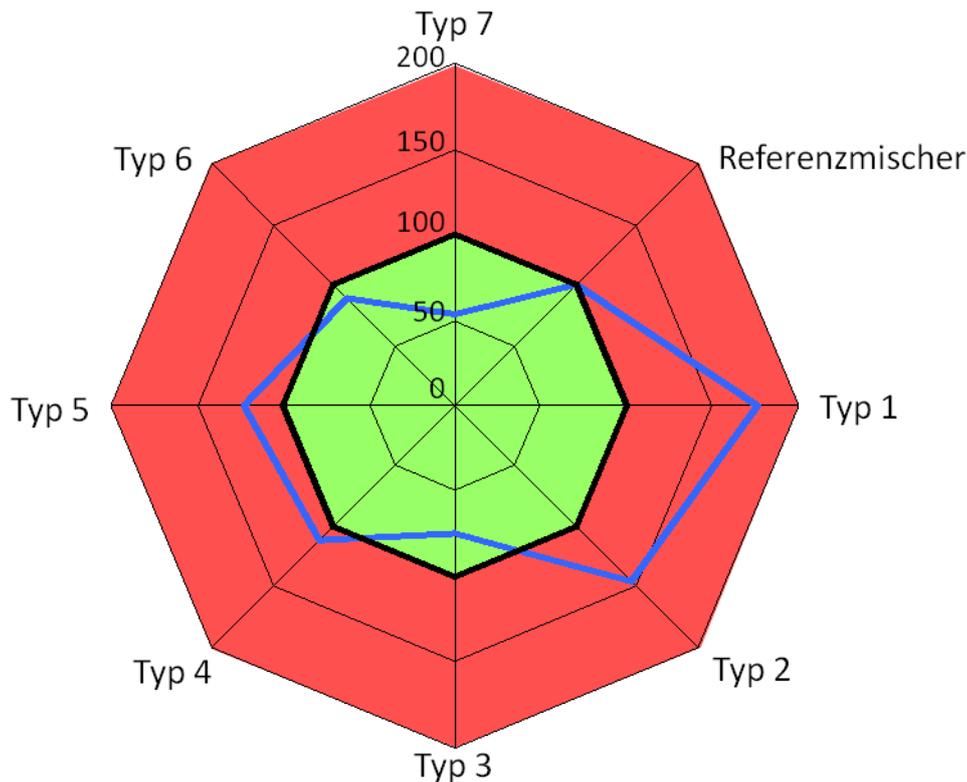


Abbildung 6.31: Ergebnisse des Abgasgegendrucks verschiedener Mischer relativ zu einem Referenzmischer in Prozent.

Beim Vergleich der beiden Diagramme in [Abbildung 6.30](#) und [Abbildung 6.31](#) ist im Allgemeinen ein Zusammenhang zwischen Gegendruckerzeugung und Durchmischungsqualität zu erkennen. Modelle mit niedrigerem Gegendruck bewirken meist eine verminderte Mischungsqualität. Bei manchen Modellen ist, wie in diesem Vergleich (Typ 5) ersichtlich, trotz höherem Gegendruck eine schlechtere Gleichverteilung zu erkennen. Ein Mischer mit höherem Gegendruck verbessert also nicht zwingend die Gleichverteilung, sondern auch die Art der erzeugten Turbulenz ist ausschlaggebend. Es gilt somit einen Mischer zu finden, der eine sehr gute Gleichverteilung bei möglichst wenig Gegendruck bewirkt.

Der prinzipiell vorhandene Zusammenhang zwischen Gegendruck und Gleichverteilungsgüte wird am Beispiel der in Kapitel 6.1.4 durchgeführten

Durchmesservariation (45/60/70mm) sichtbar. Dabei wurde festgestellt, dass sich mit kleinerem Durchmesser der Abgasanlage bessere Gleichverteilungszahlen erzielen lassen, als mit großen Dimensionen. Der mit diesen Anlagen erzeugte Gegendruck ist in Tabelle 6.2 aufgelistet.

Mischertyp und Dimension	mbar
D70 V8 inkl. Dosierbogen und Mischstrecke	54
D60 V8 inkl. Dosierbogen und Mischstrecke	65
D45 V8 inkl. Dosierbogen und Mischstrecke	455

Tabelle 6.2: Verhalten des Abgasgegendrucks bei Varianz des Anlagendurchmessers

Die bessere Gleichverteilung bei einem Durchmesser von 45mm wird mit einem inakzeptablen Abgasgegendruck bezahlt. Eine Vergrößerung des Durchmessers auf 70mm hingegen bringt keinen entscheidenden Vorteil.

6.2.1 Druckkorrigierte Gleichverteilungszahl nach Bitto

Die wichtigsten Kriterien bei der Beurteilung der Mischstrecke einer SCR-Abgasanlage sind somit die erzielte Gleichverteilung und der in der Anlage entstehende Abgasgegendruck. Beide Werte stehen in Abhängigkeit zum Motorbetriebspunkt und damit von Abgasmassenstrom und Abgastemperatur. Mit der Gleichverteilungszahl (Kapitel 5.4) existiert bereits eine Kenngröße zur Beurteilung der Ammoniak-Gleichverteilungsgüte. Nun soll diese durch die Berücksichtigung des Abgasgegendrucks erweitert werden.

Da sich ein zu hoher Gegendruck negativ auf das Antriebskonzept auswirkt, muss dieser eine Abwertung der neuen Kennzahl bewirken. Es muss also eine Funktion gefunden werden, die hohe Druckverluste stärker abwertet, als geringe. Da im imaginären Idealfall durch den Mischer kein zusätzlicher Gegendruck entstehen sollte ist eine Funktion mit dem Ergebnis $f_{(p=0)} = 1$ und $f_{(p>0)} < 1$ wünschenswert. Die Mathematik bietet hierfür mit der Cosinus- und der Exponential-Funktion zwei gebräuchliche Beispiele. In [Abbildung 6.32](#) sind mögliche Korrekturkurven mit diesen Funktionen über dem Abgasgegendruck dargestellt.

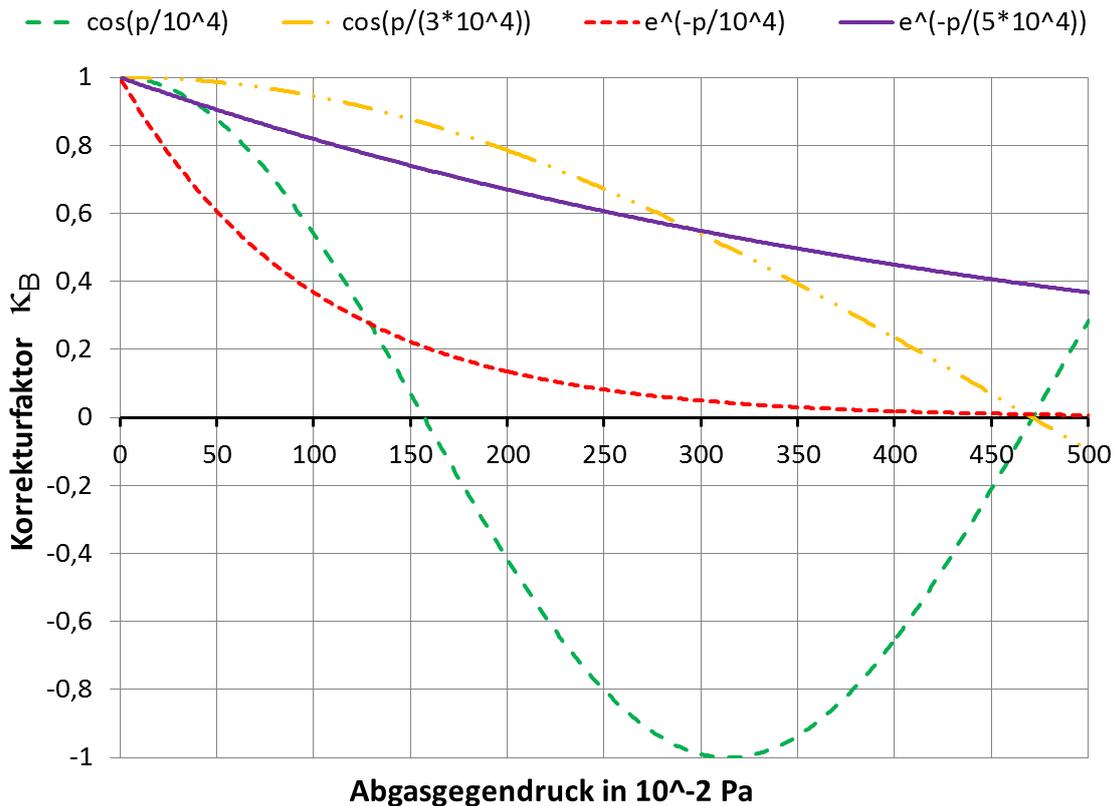


Abbildung 6.32: Mögliche Funktionen zur Druckkorrektur der Gleichverteilungszahl γ

Dabei wird klar ersichtlich, dass sich die Cosinus-Funktion (grün) auf Grund ihres recht frühen 0-Durchtritts nicht eignet. Mit Hilfe einer Funktionsdämpfung (Faktor 3) kann wie in Abbildung 6.32 gezeigt der Nullpunkt zu höheren Drücken hin verschoben werden (gelb). Allerdings verweilt die Korrekturkurve somit über zu große Druckbereiche in hohen Regionen. Die Exponentialfunktion hingegen fällt sehr schnell gegen Null und nähert sich dieser asymptotisch (rot). Eine Dämpfung bewirkt in diesem Fall eine Verzögerung des Abfalls im geeigneten Maße (violett). Als Dämpfungsfaktor wurde 5 gewählt.

Somit sei als *Druckkorrekturfaktor nach Bitto* nach Gleichung 6.3 definiert:

$$k_B = e^{-\frac{p}{5 \cdot 10^{-4}}} \quad \text{Gleichung 6.3}$$

Darin ist p der Abgasgegendruck über die Mischstrecke im untersuchten Betriebspunkt in Pascal.

Basierend auf Gleichung 5.2 leitet sich mit diesem multiplikativen Faktor die *druckkorrigierte Gleichverteilung nach Bitto* ab zu Gleichung 6.4:

$$\gamma_{PB} = \gamma * k_B = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N |(c_i - \bar{c})|}{2 \cdot \bar{c} \cdot N} \right) * e^{-\frac{p}{5 \cdot 10^{-4}}} \quad \text{Gleichung 6.4}$$

In Folge sei dieses Korrekturverfahren auf einzelne ausgewählte Beispiele der Arbeit anzuwenden.

In Kapitel 6.1.3 wurde durch Variation der Mischstreckenführung versucht eine mischerlose Abgasanlage mit akzeptabler Gleichverteilung zu finden, um den steigenden Gegendruck zu verhindern. Dies stellte sich vor allem in höheren Betriebspunkten als unmöglich heraus. Ein weiterer Weg zur Druckreduktion bietet die Verwendung gelochter Mischelemente. Beispiele dafür sind in Abbildung 6.33 dargestellt.



Abbildung 6.33: Gelochte Mischermodelle auf Basis eines Serienmodells zur Reduktion des Abgasgedrucks.

Als Basis diente ein bereits in Serienbetrieb befindlicher Mischer, der in unterschiedlicher Weise verändert wurde. So wurden große (gelocht 1) bzw. kleine (gelocht 2) Löcher in die Flügel eingebracht, oder die Ränder der Flügel reduziert (gelocht 3) bzw. abgedreht.

Als weiteres Anwendungsbeispiel für die Druckkorrektur der Gleichverteilung soll eine Varianz der Mischstrecke dienen. Nach dem Serienmischer wurden neben einem einfachen glatten Geradrohr sowohl ein Entkoppelement, als auch ein Entkoppelement in Doppelrohr-Ausführung (Doppel-EKE) untersucht (siehe Kapitel 5.7.3 und Kapitel 6.4).

Um einen Eindruck über die Größenordnungen des durch den Mischer bewirkten Abgasgedrucks zu erhalten, sind die Werte der sieben angeführten Varianten in Tabelle 6.3 dargestellt.

Mischer	Druck in mbar
Mischer unbehandelt	74
Mischer gelocht 1 (groß)	64
Mischer gelocht 2 (klein)	69
Mischer gelocht 3 (Rand)	36
Mischer abgedreht	32
Mischer mit EKE	95
Mischer mit Doppel-EKE	130

Tabelle 6.3: Bewirkter Abgasgedruck durch eine Auswahl an Abgasrohreinbauten.

In Abbildung 6.34 sind die Gleichverteilungsergebnisse den druckkorrigierten Gleichverteilungsergebnissen der unterschiedlichen Serienmischer gegenübergestellt.

Es ist gut erkennbar, dass bei besserem Gegendruckverhalten des Mischermodells (z.B. Mischer abgedreht) durch die Druckkorrektur eine geringere Abwertung der Gleichverteilung erfolgt, als bei hohem Gegendruck (z.B. Mischer unbehandelt). Das vom Gleichverteilungsergebnis ursprünglich viel schlechtere Modell „Mischer abgedreht“ reicht somit nach der Korrektur an den Referenzmischer heran. Der Referenzmischer bleibt aber das Maß der Dinge.

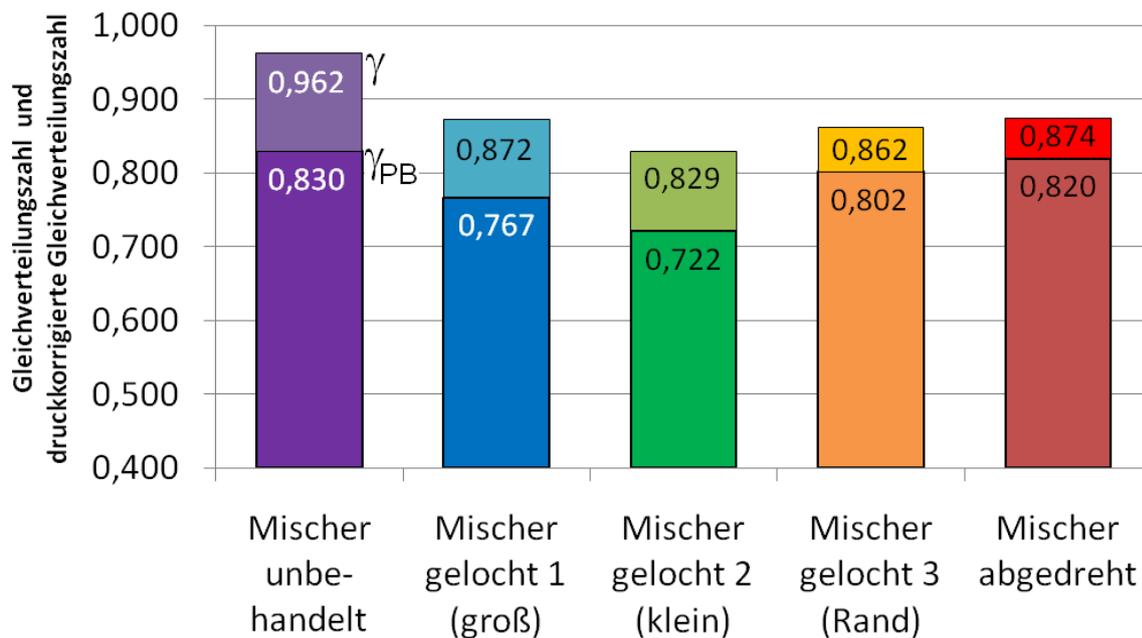


Abbildung 6.34: Anwendung der Druckkorrektur auf die Gleichverteilungsergebnisse gelochter Mischermodelle in Betriebspunkt BP3.

Anders verhält es sich bei den Ergebnissen in Abbildung 6.35.

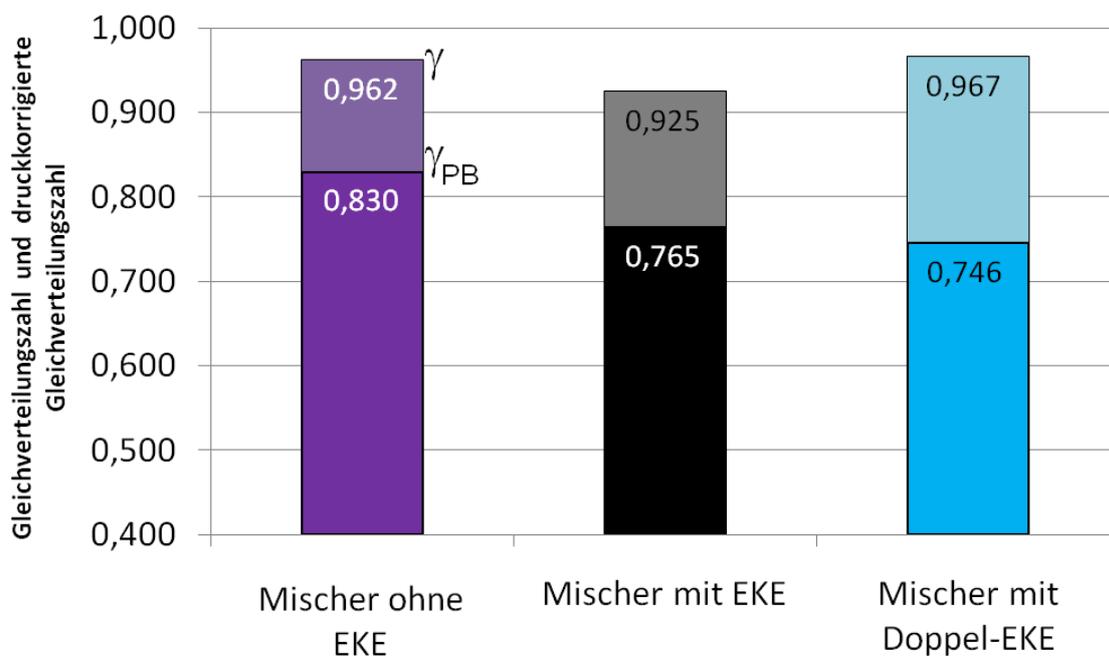


Abbildung 6.35: Anwendung der druckkorrigierten Gleichverteilung auf Mischstrecken unterschiedlicher Ausführung.

Da die Variante mit Doppelrohr-EKE einen viel zu hohen Abgasgegendruck bewirkt, muss das ursprünglich beste Gleichverteilungsergebnis in dieser Gegenüberstellung am stärksten abgewertet werden. Dieser Aspekt muss bei der Beurteilung des Entkoppellelementes in Kapitel 6.4 in Betracht gezogen werden.

Die beiden Beispiele zeigen die aussagekräftige Wirkung der in dieser Arbeit definierten Druckkorrektur der Gleichverteilungszahl nach Bitto.

Fazit: In Tabelle 6.4 sind die in dieser Arbeit wissenschaftlich untersuchten Maßnahmen zur konstruktiven Gestaltung einer SCR-Abgasanlage zur Optimierung der Gleichverteilung übersichtlich dargestellt. Dabei wird nicht nur die Auswirkung auf die Reduktionsmittelaufbereitung, sondern auch das Abgasgegendruckverhalten beleuchtet.

Maßnahme	Gleichverteilung γ	Abgasgegendruck p_{diff}	druckred. GV γ_{PB}	Ablagerungen
Ohne Mischer	- -	+	-	o
Hohe Mischerüberdeckung	+	-	o	o
Hohe Oberflächenrauigkeit	+	o	+	k.A.
Hydrolysebeschichtung	+	o	+	+
Gegenstromdosierung	-	o	-	-
Winkelauslenkung	+	o	+	o
Durchmesserreduktion	+	-	o	o
Mischstreckenverlängerung	+	o	+	o
Spraykegeloptimierung	+	o	+	+
Ringspalt um Mischer	-	+	o	o

Tabelle 6.4: Übersicht der gezeigten konstruktiven Maßnahmen zur Gestaltung einer SCR-Abgasanlage („+“ positiv, „-“ negative und „o“ neutrale Auswirkung).

Da diese beiden Aspekte mit der Gleichverteilungszahl und dem Gegendruckwert bisher nur getrennt voneinander betrachtet werden konnten, wurde im Rahmen dieser Arbeit mit der druckkorrigierten Gleichverteilungszahl eine für die Gesamtbetrachtung der Abgasanlage sehr wichtige neue Kennzahl definiert. Daraus ergeben sich Rückschlüsse für die Optimierung neuer Abgasanlagen und auf Problematiken zukünftiger Maßnahmen zur Verkürzung der Abgasstrecke zu Verbesserung des Light-Off-Verhaltens (siehe Kap. 6.5). Schließlich wird mit der

Auswirkung der untersuchten Maßnahmen auf die Neigung zu Ablagerungen im Abgasstrang ein Ausblick auf die Thematik der nächsten Kapitel gegeben.

6.3 Einflussgrößen zur Ablagerungsbildung am Düsensitz

Im Laufe der bisher gezeigten Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass es an den verwendeten Düsen bei unterschiedlichen Einbaulagen und Abgastemperaturen zu festen Ablagerungen an der Düsen Spitze kommen kann (Abbildung 6.36).



Abbildung 6.36: Beispiele für Ablagerungen an der Düsen Spitze und am Düsensitz

Diese Ablagerungen wirken dabei wie ein Feststoffreduktionsmittel. Sie lagern sich in niedrigen Betriebspunkten an den Anlagenkomponenten ab und werden in heißeren Betriebspunkten wieder abgebaut. Dadurch kann es in Betriebsphasen niedriger NO_x -Rohemissionen trotz kennfeldbedingt geringer Dosiermenge zu Ammoniakslupf des SCR-Systems führen. Des Weiteren wurden Funktionsausfälle des Dosiersystems beobachtet die auf Verklebungen zurückzuführen sind. Deshalb

wurde diesem wichtigen Effekt Beachtung geschenkt und eine Vielzahl an Methoden zur Beurteilung der Einbausituation entwickelt und angewendet (siehe Kapitel 5.7).

In Folge soll auf die markanten Beispiele aus der Reihe der untersuchten Komponenten eingegangen werden. Dabei ist zu beachten, dass solch extreme Ergebnisse im realen Betrieb nicht zu erwarten sind. Bei Erhöhung der Abgastemperatur und der Abgasmasse setzt zumindest ein teilweiser Abbau der Ablagerungen ein. Ein ständiger Wechsel des Betriebes würde schon ihren Aufbau in Grenzen halten. Die Versuche stellen ein Worst-Case-Szenario dar, können aber Aufschluss geben, bei welcher Einbausituation mit Ablagerungen und somit langfristig mit Auswirkungen zu rechnen ist.

6.3.1 Gestaltung der Zulaufstrecke

Aus der Vielzahl an untersuchten Rohrgeometrien soll hier ein Beispiel mit guter Aussagekraft angeführt werden. Als Basis dient die in Abbildung 6.37 dargestellte Dosierposition eines zum Zeitpunkt der Untersuchungen in Serienbetrieb befindlichen SCR-Systems.



Abbildung 6.37: Rohrbogen mit Dosierstutzen für einen Dosierwinkel von 0°.

Da sich in Untersuchungen immer wieder Ablagerungen an der Dosierstelle gezeigt haben, wurden alternative Rohrgeometrien einer Zulieferfirma untersucht. Dabei handelt es sich um jeweils gerade Rohrstücke. Variante S (Abbildung 6.38) verfügt über eine symmetrische Zulaufstrecke zum Düsensitz. Variante A (Abbildung 6.39) hingegen ist asymmetrisch ausgeführt.



Abbildung 6.38: Geradrohr mit symmetrischer Geometrie zur Abgasführung im Bereich des Dosierstutzens.



Abbildung 6.39: Geradrohr mit asymmetrischer Geometrie zur Abgasführung im Bereich des Dosierstutzens.

Zunächst wurde der in Kapitel 5.7 - Abbildung 5.13 gezeigte 30-stündige Fahrzyklus zur Bildung von Ablagerungen angewendet. Die mit den drei vorgestellten Rohrgeometrien erzielten Ablagerungsbilder sind in Abbildung 6.40 gegenübergestellt. Es sind darin jeweils feste Kristalle rund um die 3 Düsenlöcher zu erkennen. Die Düsenlöcher selbst sind durch die stetige Dosierung offen geblieben. Ein Einfluss auf die Strahlgeometrie kann jedoch nicht ausgeschlossen werden.

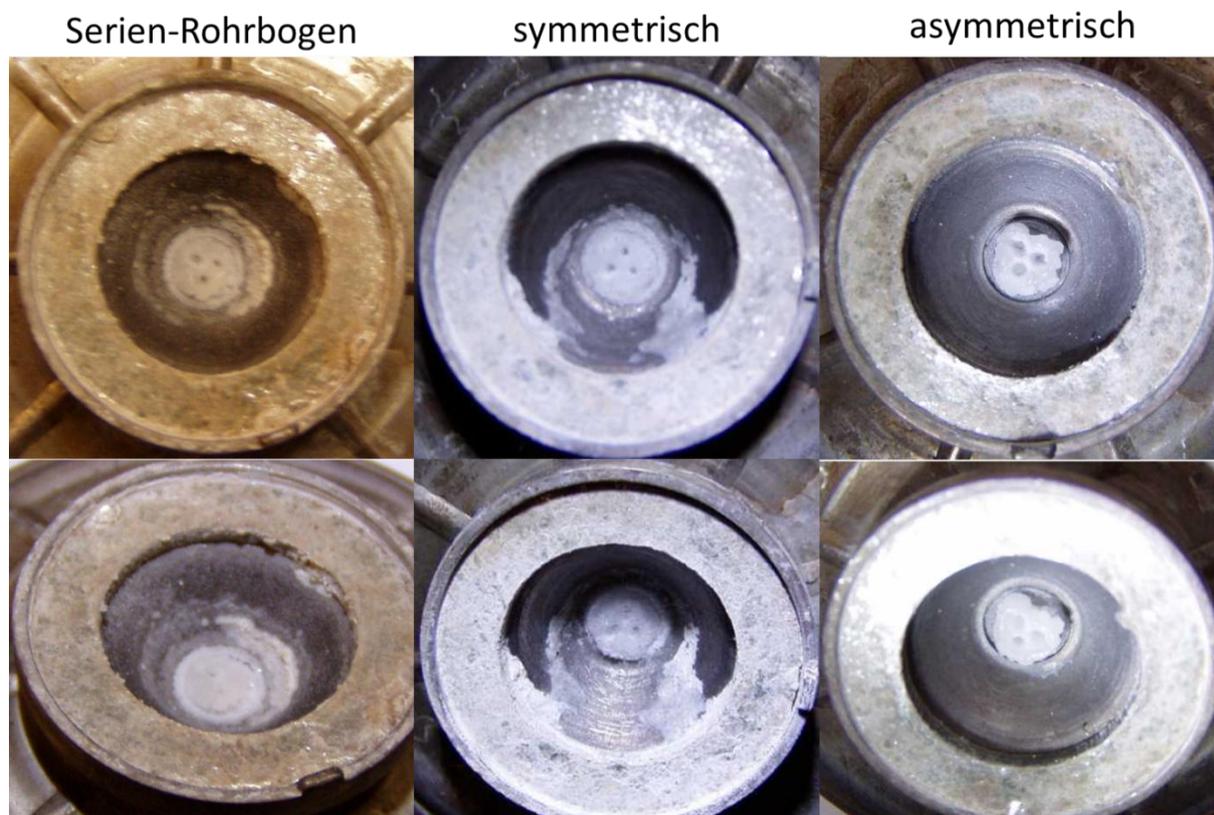


Abbildung 6.40: Ablagerungsbilder nach 30-stündigem Fahrzyklus für drei verschiedene Anströmungsformen des Dosierstutzens.

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe waren in diesem Fall jedoch nicht aussagekräftig genug. So kam im zweiten Schritt der in Kapitel 5.7 - Tabelle 5.5 angegebene Stationärpunkt BPAD für einen 8-Studentest zur Anwendung. Die mit den drei vorgestellten Rohrgeometrien erzielten Ablagerungsbilder sind in Abbildung 6.41 gegenübergestellt.

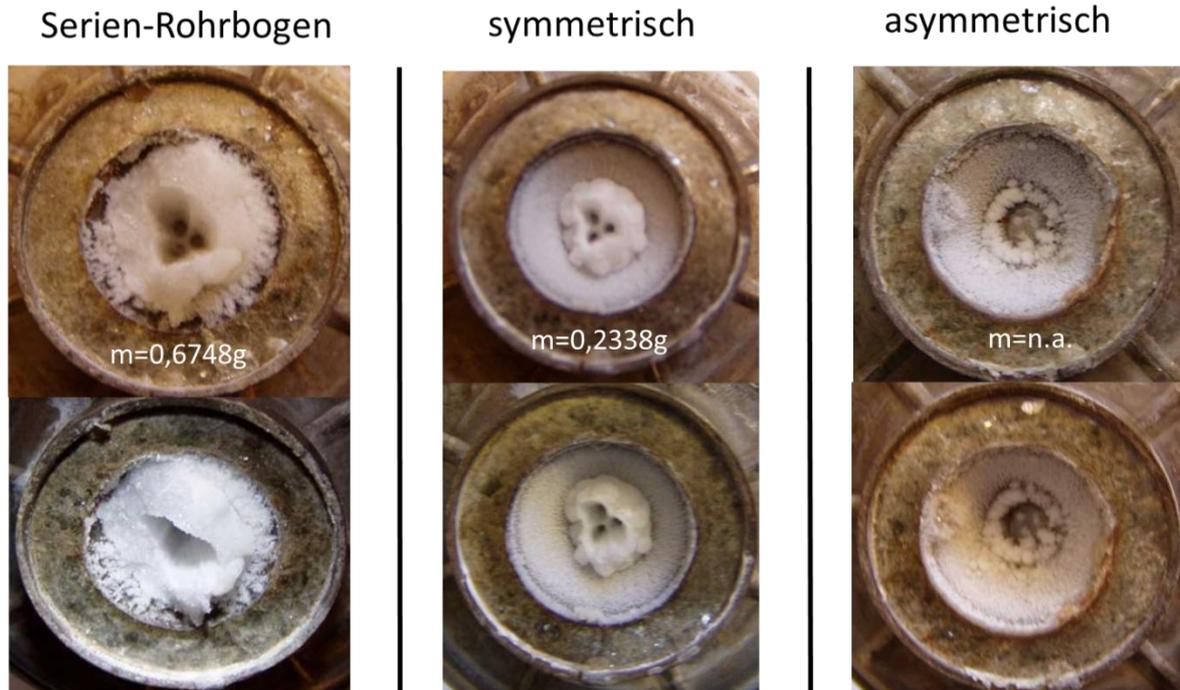


Abbildung 6.41: Ablagerungsbilder nach 8-stündigem Stationärpunkt mit stark überstöchiometrischer Dosierung für drei verschiedene Anströmungsformen des Dosierstutzens.

Durch dieses Verfahren werden die Fortschritte zur Verminderung der Ablagerungsbildung durch die alternativen Rohrgeometrien klar erkennbar. Bei der ursprünglichen Anlage kommt es zu starken Verklebungen der Düsen Spitze mit einer Ablagerungsmasse von 674,8mg. Die gravimetrische Messung erfolgte dabei nach fotografischer Dokumentation und Ausschabung der Probe. Auf der symmetrischen Ersatzgeometrie hingegen wurden nur noch 233,8mg der Ablagerungen festgestellt. Die asymmetrische Anströmung der Düsen Spitze zeigt den größten Erfolg zur Vermeidung der Ablagerungen. Vor allem das wichtige Zentrum der Düsen Spitze mit den Düsenlöchern bleibt hier praktisch frei von Ablagerungen. Die Ablagerungen sind von solch kleiner Masse, dass ein Ausschaben und Abwiegen nicht mehr sinnvoll möglich war.

Die asymmetrische Anordnung führt also zu einem Strömungswirbel, der für einen Abtransport der Tröpfchen mit Potential zur Ablagerungsbildung führt. Da eine Ausführung als Geradrohr mit solch einer asymmetrischen Rohrform nicht für alle Anlagenvarianten realisierbar ist, sollte versucht werden im Inneren des Rohres einen Wirbel zur Spülung der Düsen Spitze zu erzeugen. Dieser darf aber gleichzeitig nicht zu stark sein, da es sonst zu einer Beeinflussung des Sprays bei der Beaufschlagung des Mischelementes kommen kann.

6.3.2 Düsenvergleich im Zuge eines Benchmarks

Im Folgenden werden drei in Serieneinsatz befindliche Abgasanlagen unterschiedlicher Fahrzeughersteller auf ihre Neigung zur Ablagerungsbildung im Bereich des Injektors untersucht.

Da bereits zuvor aussagekräftige Erfahrungen mit dem in Kapitel 6.3.1 angewandten 8-Studentest mit stark überstöchiometrischer Dosierung gemacht wurden, kam dieser auch in diesem Forschungsteil zur Anwendung.

Bei den untersuchten SCR-Abgasanlagen handelt es sich um Serienkomponenten eines BMW E70 (X5 - Abbildung 6.42 und Abbildung 6.43), eines VW Passat (Abbildung 6.44) und eines Daimler X164 (GL-Klasse - Abbildung 6.45).

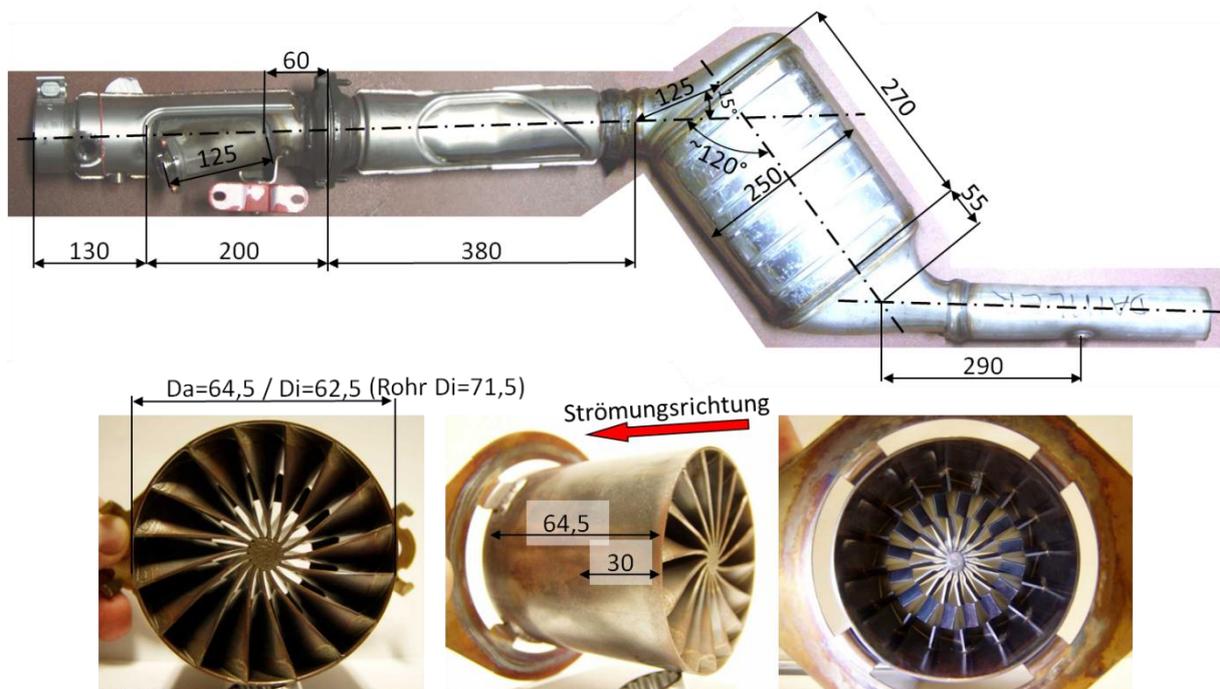


Abbildung 6.42: Abmessungen und Mischergeometrie der SCR-Abgasanlage für einen BMW E70.

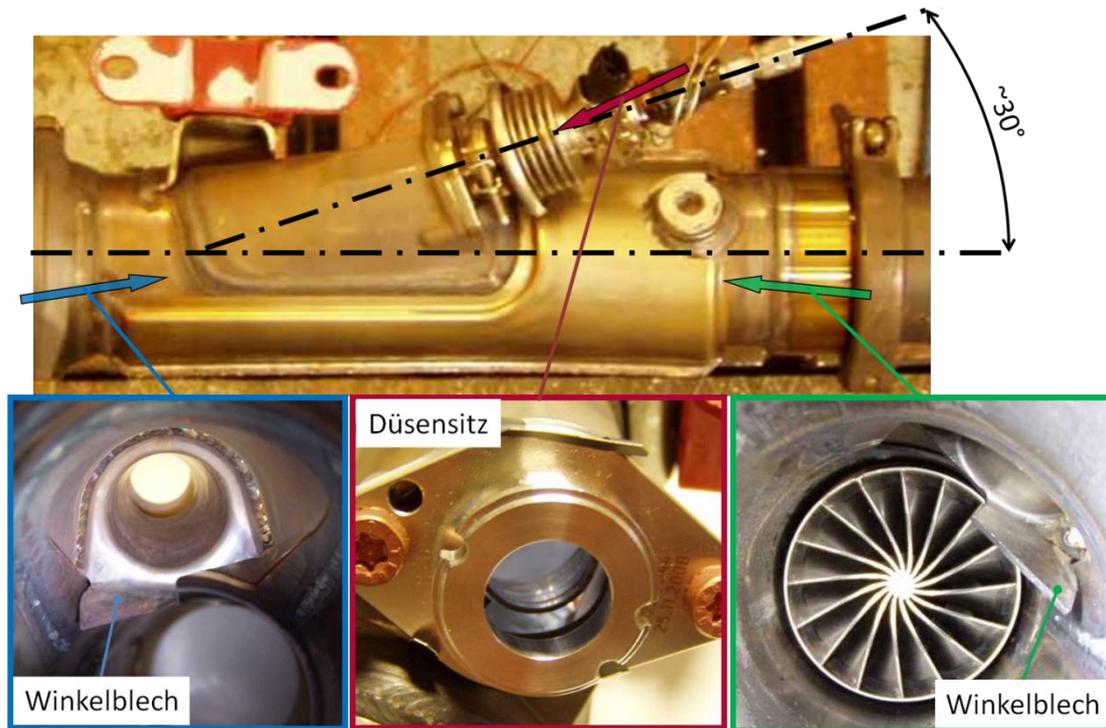


Abbildung 6.43: Detailansichten der SCR-Abgasanlage für einen BMW E70.

Bei der BMW-Abgasanlage sitzt der Injektor auf einem Geradrohr und spritzt unter einem Dosierwinkel von etwa 30° in den Abgasstrom ein. Das gerade Mischrohr mündet über einen Fischertrichter in einem Winkel von etwa 120° in den SCR-Katalysator. In der Zuströmung zum Injektor steht ein Winkelblech in die Rohrströmung, das einen Teilstrom des Abgases Richtung Düsenspitze lenkt.

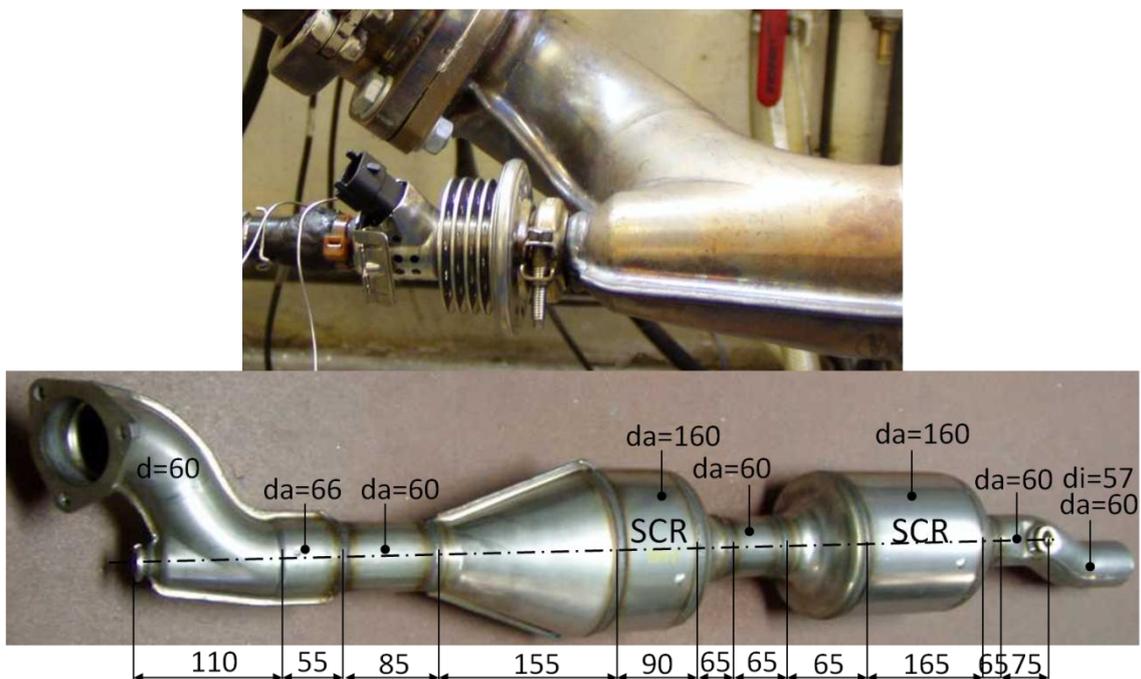


Abbildung 6.44: Abmessungen der SCR-Abgasanlage für einen VW Passat.

Bei der VW-Abgasanlage befindet sich die Dosierstelle am Ende eines S-Schlages der Abgasführung. Dies ermöglicht einen Dosierwinkel von 0° und eine frontale Beaufschlagung des Mischers. Das relativ kurze Mischrohr mündet über einen Kegeltrichter im ersten von 2 aufeinanderfolgenden SCR-Katalysatoren. Zwischen den beiden Katalysatoren mit Durchmessern von 160mm verengt sich die Rohrführung auf den Ursprungswert von 60mm.

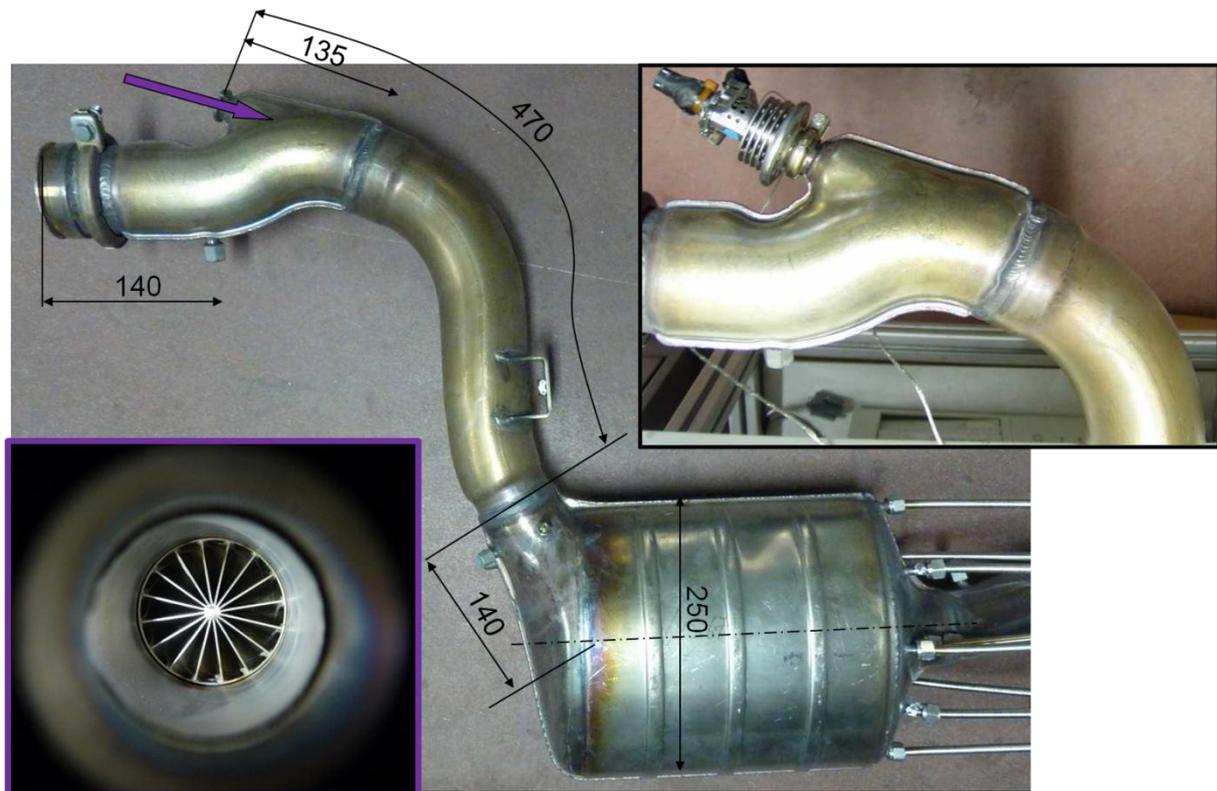


Abbildung 6.45: Gesamtansicht der SCR-Abgasanlage und Detailansicht der Dosierstelle für einen Daimler X164.

Bei der Daimler-Abgasanlage befindet sich die Dosierstelle am äußeren Radius eines Rohrbogens. Hiermit ist ein Dosierwinkel von 0° realisierbar und der Mischer kann direkt beaufschlagt werden. Das Mischrohr wird weiter als Bogen bis zu einem Fischertrichter geführt, der im SCR-Katalysator in Racetrack-Form mündet.

Die drei Abgasanlagen verwenden somit drei unterschiedliche Anordnungen des Dosierstutzens. Entsprechend ihrer Serienausführung wird bei der Daimler-Abgasanlage eine Düse mit 16° Spraykegelwinkel verwendet. Die beiden anderen Modelle verwenden einen Spraykegelwinkel von 14° . In [Abbildung 6.46](#) sind die Ergebnisse der jeweils 8-stündigen Ablagerungsuntersuchungen zu sehen.

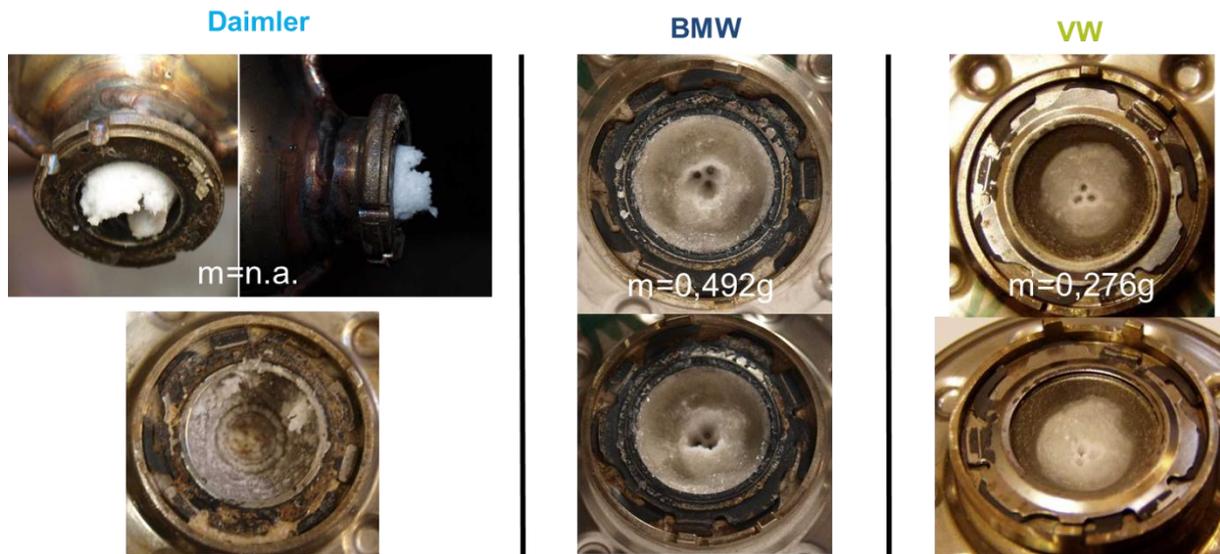


Abbildung 6.46: Ablagerungsbilder im Bereich der Düsen Spitze nach 8-stündigem Ablagerungstest einer Daimler-, einer BMW- und einer VW-Abgasanlage.

Bei der Daimler-Abgasanlage haben sich so viele Ablagerungen gebildet, dass diese bis in den Düsensitz des Abgasrohres ragen und mit diesem verklebt sind. Bei Demontage des Injektors lösten sie sich von der Düse und blieben in der Abgasanlage stecken. Beim Versuch die Ablagerungen aus dem Düsensitz zu lösen, gingen Teile davon in der verschlossenen Anlage verloren. Eine Wiegung konnte deshalb nicht durchgeführt werden. Es kann aber auch ohne Wiegung festgestellt werden, dass die Daimleranlage in diesem Versuch die meisten Ablagerungen aufweist.

Die BMW-Abgasanlage verursacht ebenfalls massive Ablagerungen im Kegel des Injektors. Einzig die drei Düsenlöcher liegen auf Grund der stetigen Dosierung weiterhin frei und sind in dieser Darstellung klar zu erkennen. Die Ablagerungen ragen bei der BMW-Abgasanlage nach 8 Betriebsstunden jedoch nicht bis in den Montagestutzen des Abgasrohres. Die Wiegung der Probe ergab eine Ablagerungsmasse von 492mg.

Bei der untersuchten VW-Abgasanlage haben sich die eindeutig wenigsten Ablagerungen gebildet. Die Wiegung ergab eine Ablagerungsmasse von nur 276mg nach dem 8-stündigen Versuch. Der Grund des Düsenkegels ist jedoch ebenfalls mit einer Ablagerungsschicht überdeckt. Auch hier bleiben die drei Spray-Öffnung frei und sind deutlich zu erkennen.

Die Anhaftung der Ablagerungen am Düsensitz im Falle der Daimleranlage könnte auch dem größeren Spraykegelwinkel in Verbindung mit einem längeren Dosierstutzen geschuldet sein. Dieser Winkel wurde für eine optimale Bedeckung des Mischerquerschnittes gewählt (siehe Kap. 6.1.6 – Abbildung 6.25). In einer konstruktiven Überarbeitung der Abgasanlage müsste somit der Innendurchmesser des Düsensitzes weiter ausgeführt werden.

Bei der allgemeinen Betrachtung der drei verschiedenen Dosierpositionen fällt jedenfalls auf, dass im Falle der VW-Abgasanlage die Düse am nächsten zum Abgasstrom angeordnet ist. Die Düse der Daimler-Anlage hingegen wird am geringsten vom Abgasstrom umspült. Man kann also von einem direkten Zusammenhang zwischen Distanz Düsenspitze-Abgasstrom und Neigung zur Ablagerungsbildung ausgehen.

Es zeigt sich also wie bereits zuvor, dass mit ausreichender Spülung der Düsenspitze mit vorbeiströmendem Abgas die Neigung zur Bildung von Verklebungen an den Injektoröffnungen verringert werden kann.

Die Spülung des Düsensitzes mit heißem Abgas bringt jedoch ein neues Problem. Durch den erhöhten Massenstrom wird auch mehr Wärme in den Düsenkörper eingebracht. Um klären zu können wie stark dieser Einfluss zum Tragen kommt wurden die drei Anlagen mit einer speziellen Düse mit Thermoelementen (siehe Kapitel 5.7.1) für weitere Untersuchungen herangezogen.

Da die höchsten Abgastemperaturen und somit die höchste Belastung für den Injektor während der Regeneration des Dieselpartikelfilters auftreten, wurden die Temperaturen an der Düsenspitze (T_{tip}) und am AdBlue®-Eingang des Injektors (T_{inlet}) gemessen. Die DPF-Regeneration wurde 11 Minuten lang betrieben. Die sich dabei einstellende Abgastemperatur nach dem Partikelfilter liegt bei 725 bis 735°C. Die sich bei diesen Untersuchungen einstellenden Temperaturverläufe für die jeweiligen Abgasanlagen sind in [Abbildung 6.47](#), [Abbildung 6.48](#) und [Abbildung 6.49](#) dargestellt. Aus Gründen des Bauteilschutzes wurde während der Regeneration eine Dosiermenge von 15mg/s eingestellt.

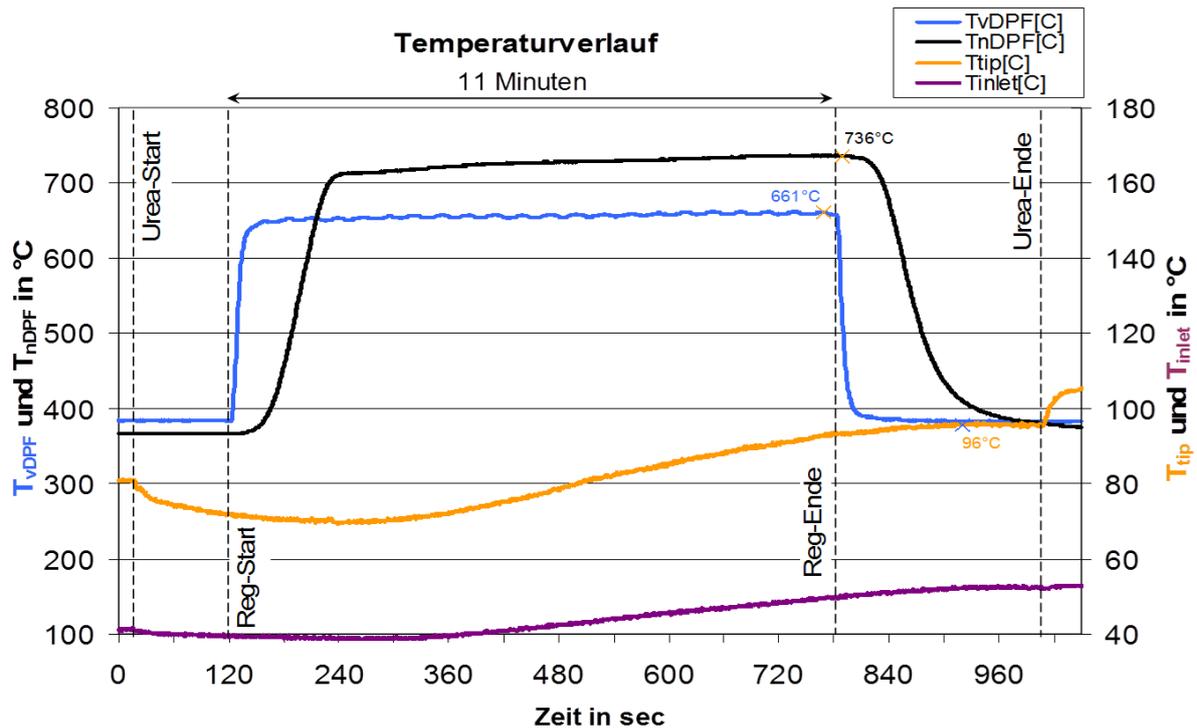


Abbildung 6.47: Temperaturverlauf im AdBlue®-Injektor bei DPF-Regeneration der untersuchten Daimler-Abgasanlage.

In Abbildung 6.47 ist die Phase der DPF-Regeneration über die Temperatur vor DPF klar zu identifizieren. Auf Grund der exothermen Verbrennung der Dieselpartikel steigt die Temperatur nach dem Filter über die Eingangstemperatur hinaus. So erreicht die Abgastemperatur nach DPF ein Maximum von 736°C und erwärmt dabei die Injektorspitze auf bis zu 96°C. Am Eingang zum Injektor steigt die Temperatur auf lediglich 55°C. Es kommt daher nicht zum Sieden des Reduktionsmittels in der Düsenspitze. Auf diesen Effekt mit starker Schädigungswirkung für die Düse wird später in Kapitel 6.3.4 eingegangen. Die Injektorerwärmung kann im Falle der Daimler-Abgasanlage somit als unkritisch eingestuft werden. Die große Entfernung der Düsenspitze zum Abgasmassenstrom begünstigt die Ablagerungsbildung, schützt aber vor einer Überhitzung des Injektors.

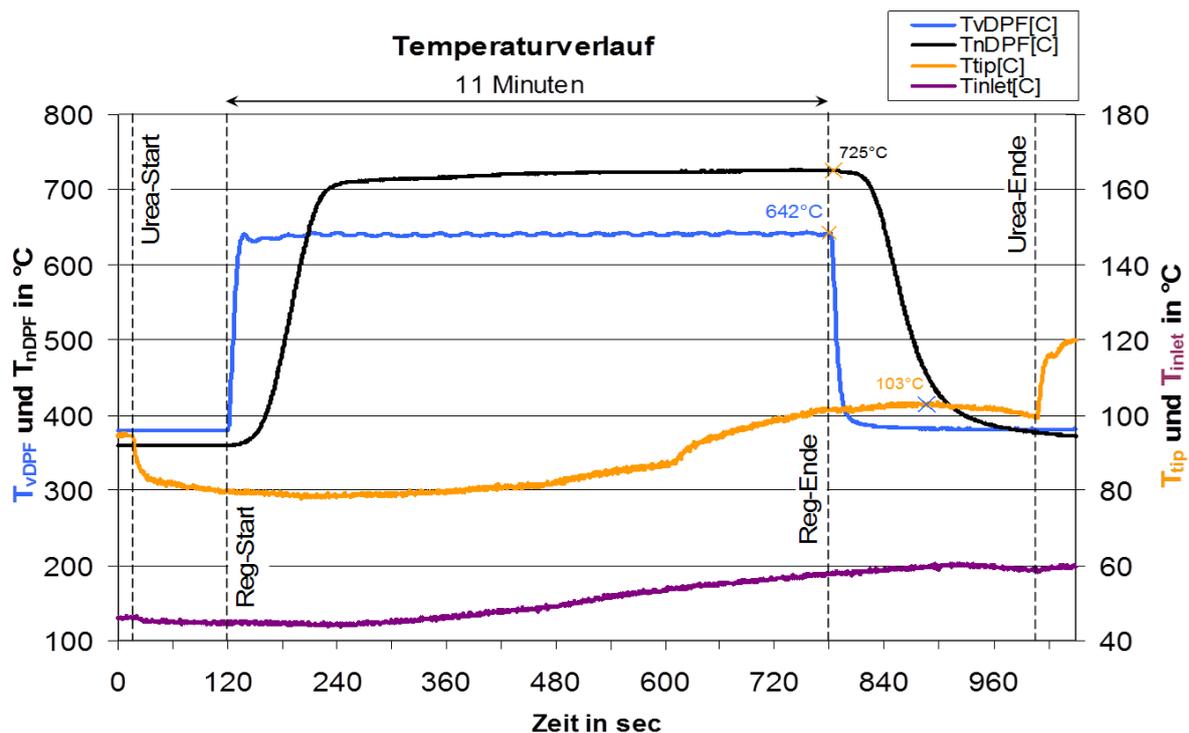


Abbildung 6.48: Temperaturverlauf im AdBlue®-Injektor bei DPF-Regeneration der untersuchten BMW-Abgasanlage.

Die etwas nähere Anordnung der Düse am Abgasmassenstrom in der BMW-Ausführung führt bei Abgastemperaturen von bis zu 725°C zu Düsentemperaturen von 103 bzw. 60°C (Abbildung 6.48).

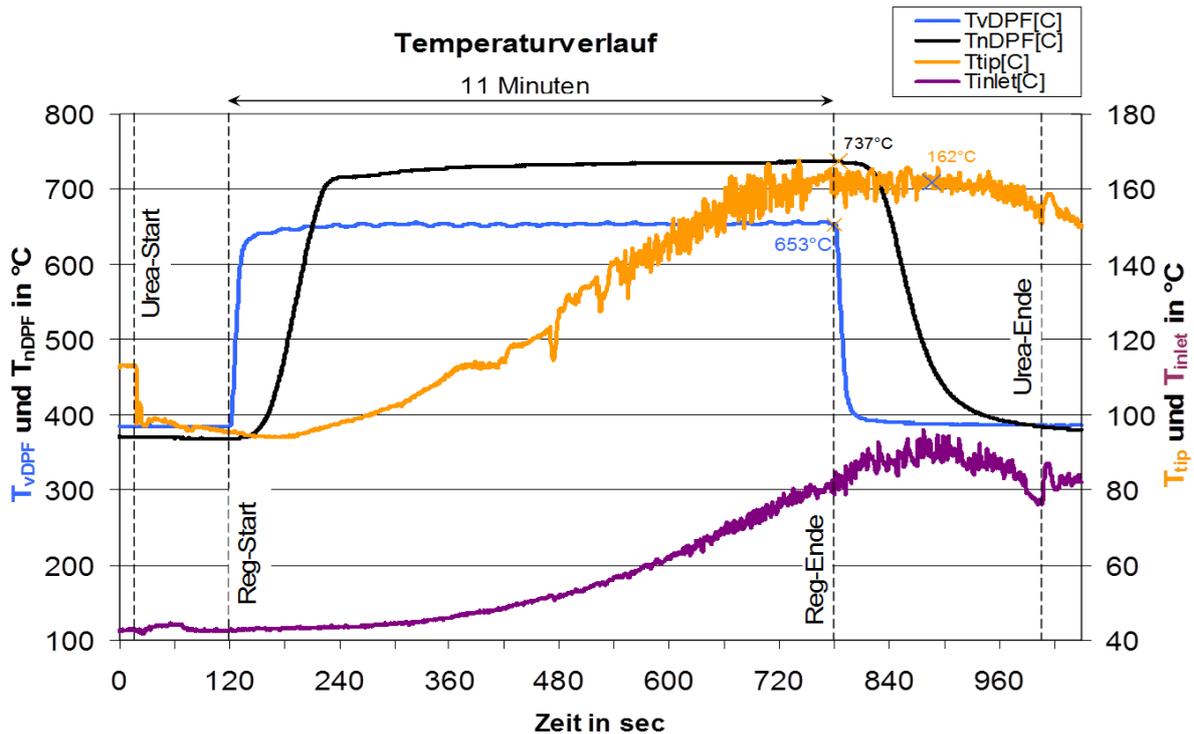


Abbildung 6.49: Temperaturverlauf im AdBlue®-Injektor bei DPF-Regeneration der untersuchten VW-Abgasanlage.

Die sehr nahe Anordnung der Düse zum Abgasstrom der VW-Abgasanlage bewirkt einen massiven Temperaturanstieg der Düse während der DPF-Regeneration (Abbildung 6.49). Die Düsenspitze erreicht dabei Temperaturen von $T_{tip}=162^{\circ}\text{C}$. Selbst am AdBlue®-Eintritt in die Düse kommt es zu einer Erhitzung auf über 90°C . Diese Temperaturbereiche wirken sich sehr negativ auf die Lebensdauer des Injektors aus.

Während dieser Messung wurden auch die Stickoxidemissionen vor ($\text{NO}_{x\text{VSCR}}$) und nach dem SCR-System (NO_x) aufgezeichnet. Da während der Regeneration eine konstante Dosiermenge von 15mg/s eingestellt war, ist es in Abbildung 6.50 möglich die Stickoxidreduktion während der DPF-Regeneration zu analysieren.

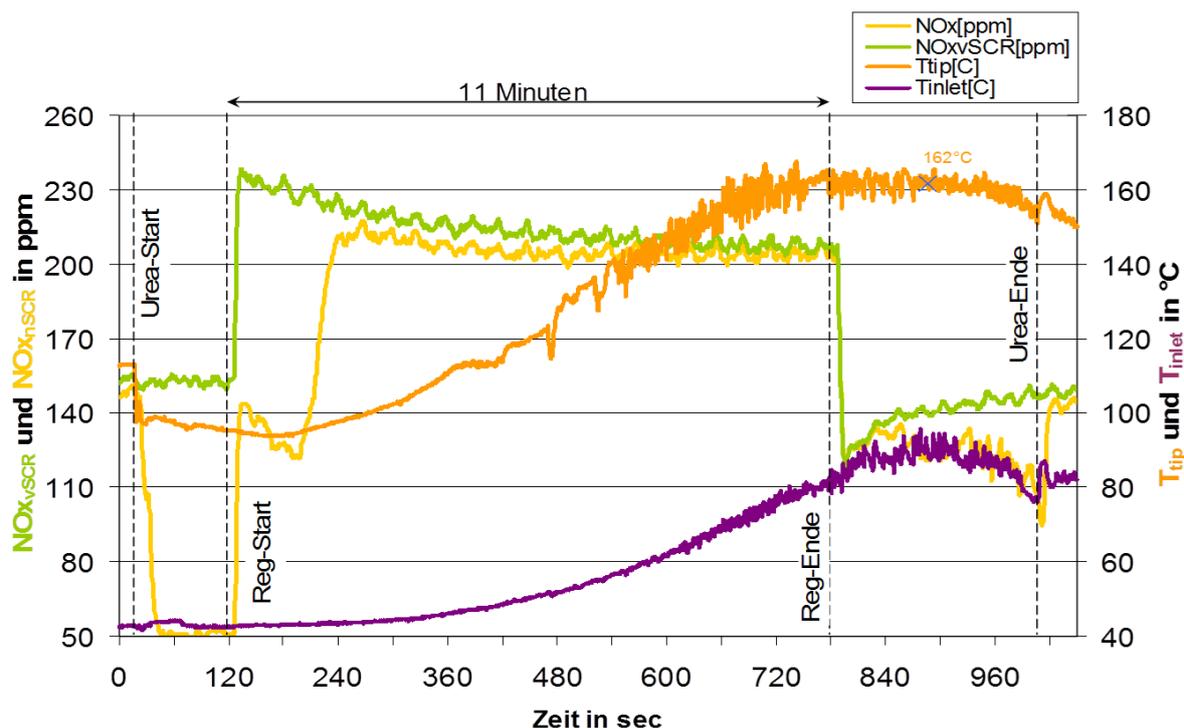


Abbildung 6.50: NO_x- und Temperaturverlauf im AdBlue®-Injektor bei DPF-Regeneration der untersuchten VW-Abgasanlage.

Mit Dosierstart ist eine Reduktion von 150ppm NO_x auf 50ppm ersichtlich. Mit Aktivierung der Regeneration steigt das Stickoxidniveau um etwa 90ppm. Dies ist durch die veränderte Dieseleinspritzung zu erklären. Etwa 130 Sekunden nach dem Regenerationsstart lässt der Umsatzgrad des SCR-Systems stark nach und geht schließlich gegen 0. Die Stickoxidwerte vor und nach dem SCR-System befinden sich schließlich auf gleichem Niveau, was auf fehlende Harnstoffdosierung hinweist. Es muss davon ausgegangen werden, dass durch die starke Erwärmung des Düsenkörpers ein Ausfall des Injektors verursacht wird. Die Wirkung des Abgasnachbehandlungssystems ist zu diesem Zeitpunkt nicht gegeben. Erst während der Abkühlphase des Injektors bei 960 Sekunden ist langsam wieder eine Reduktion der NO_x-Emissionen zu erkennen.

Da die DPF-Regeneration je nach Betriebsstrategie ein sehr häufiger Vorgang sein kann, ist die Belastung des Injektors erheblich und kann die Lebensdauer drastisch reduzieren. Abhilfe kann eine erhöhte Dosiermenge zum Bauteilschutz bringen. Dies kann jedoch zu Ammoniakslupf führen, der auf Grund seiner gesundheitsschädlichen Wirkung nicht zulässig ist. Einen weiteren Lösungsansatz bieten wassergekühlte Injektoren ([Abbildung 6.51](#)).

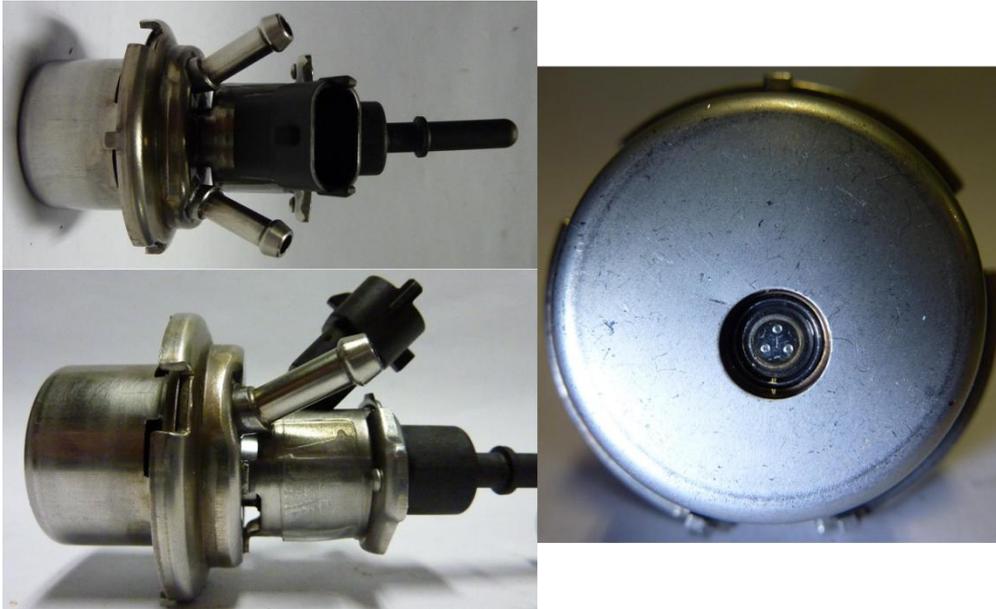


Abbildung 6.51: Beispiel für einen wassergekühlten Injektor der Firma Bosch aus einem Forschungsprojekt am IFA.

Diese können über das Motorkühlsystem gespeist werden. Durch die konstante Versorgung mit einer Kühlwassertemperatur von etwa 80°C kann ein relativ konstantes Temperaturniveau der Düse gehalten werden. Je nach Positionierung des Injektors am Abgasstrang kann sich jedoch die bauliche Gestaltung der Wasserversorgung problematisch darstellen.

Die Neigung zur Ablagerungsbildung bei wassergekühlten Injektoren unter realen Bedingungen konnte in dieser Arbeit nicht näher untersucht werden.

6.3.3 Detaillierte Untersuchung des Aufbaus von Ablagerungen an der Spitze des Harnstoffinjektors

Um die Ablagerungen an luftgekühlten Injektoren qualitativ zu erfassen und einen ersten Eindruck vom Entstehungsverlauf zu erhalten, wurden an einer weiteren Abgasanlage Zeitrafferaufnahmen der Ablagerungsbildung an der Düsen Spitze gemacht. Folgende Messungen erfolgten bei stöchiometrischer Dosierung mit Betriebspunkt 180a (siehe Kapitel 5.7). Die Ablagerungen wurden jeweils nach 2, 5, 10, 20, 30, 60 und 120 Minuten beobachtet. In [Abbildung 6.52](#) ist dieser zeitliche Verlauf jeweils ausgehend von einem saubereren Injektor dargestellt. Es fällt dabei auf, dass bereits nach wenigen Minuten erste Ablagerungserscheinungen um die Düsenlöcher zu beobachten sind.



Abbildung 6.52: Ablagerungen am Injektor bei BP180 und $\alpha=1$ am Motorprüfstand.

Des Weiteren ist Abbildung 6.52 zu entnehmen, dass nach rund 10 Minuten am Rand des Injektorgrundes erste feine Ablagerungen zu erkennen sind. Mit zunehmender Injektionsdauer führen diese zu einer vollständigen Bedeckung der Grundfläche. Rund eine Stunde nach Injektionsbeginn tritt eine weitere Erscheinung auf. Eine Bedeckung des Injektorkonus, die durch Rezirkulation von Sekundärtropfen begründet sein könnte.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass auch nach Beendigung der Injektion und Ausbau des Injektors innerhalb weniger Minuten ohne Anliegen des Betriebsdrucks ein Austreten von Reduktionsmittel an der Düse beobachtet werden konnte. Dieser Effekte verstärkt sich, wenn die Düse über mehrere Tage unbenützt bleibt, wobei Einflüsse durch Betriebsdruck oder Schwerkrafteinflüsse zur Gänze ausgeschlossen werden können. Hierbei handelt es sich um ein Ausblasen des Reduktionsmittels nach dem Abschalten der nach innen öffnenden Injektoren. Dies bewirkt einen Schutz der Systemkomponente im Falle eines Einfrierens des AdBlue® vor Beschädigungen. Bauartbedingt ergibt sich bei nach innen öffnenden Ventilen ein Totvolumen zwischen Sitzfläche und Sprayaustrittsöffnung. Dieser nicht rücksaugbare Teil des Totvolumens wird ausgeblasen und verhindert so ein

Gefrieren, führt aber in der Abkühlphase des Motors bei noch erhöhten Düsen spitzen-Temperaturen möglicherweise zu festen Ablagerungen. [127]

Um ein besseres Verständnis über die Entstehungsursachen der Ablagerungen an der Düsen spitze zu erhalten, wurde der in Kapitel 5.7.1 beschriebene Injektorprüfstand eingesetzt.

Im Gegensatz zu den Messungen am Motorenprüfstand, bei denen die Ablagerungsbildung am Injektor immer wieder unterbrochen und wieder neu aufgenommen werden musste um die Zeitrafferreihe erstellen zu können, erlaubt der Injektorprüfstand eine durchgehende Beobachtung des stetigen Aufbaus.

Zu Beginn der Injektorprüfstand-Untersuchungen wurde erneut die Ablagerungsbildung in BP180 bei einer 2-stündigen stöchiometrischen Dosierung beobachtet. Abbildung 6.53 zeigt die Ergebnisse dieser Zeitrafferaufnahmen jeweils nach 2, 5, 10, 20, 30, 60 und 120 Minuten.

Ein Vergleich mit Abbildung 6.52 zeigt, dass die Ergebnisse am Injektorprüfstand bis auf wenige Ausnahmen die Messungen am Motorprüfstand widerspiegeln können. Es fällt auf, dass die zeitliche Abfolge der Ablagerungsbildung am Injektorprüfstand etwas verzögert einsetzt. Während sich feine Strukturen am äußeren Ring des Düsensitzes am Motorprüfstand schon nach 20 Minuten Dosierung zeigten, waren diese am Injektorprüfstand erst nach 30 Minuten zu beobachten.

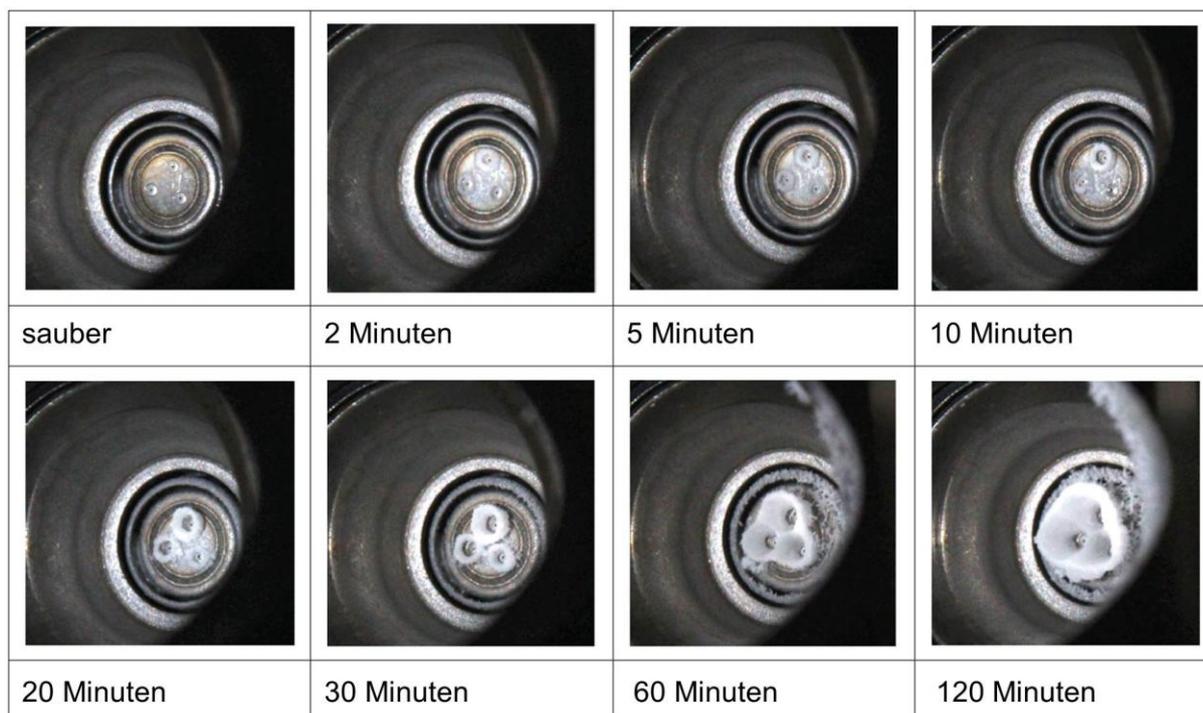


Abbildung 6.53: Ablagerungen am Injektor bei BP180 und $\alpha=1$ am Injektorprüfstand.

In [Abbildung 6.54](#) sind die Unterschiede bei der Ablagerungsentstehung im Bereich des Injektors am Motorprüfstand (links) im Vergleich zum Injektorprüfstand (rechts) in Betriebspunkt BP180a nach 2-stündiger Dosierung dargestellt.

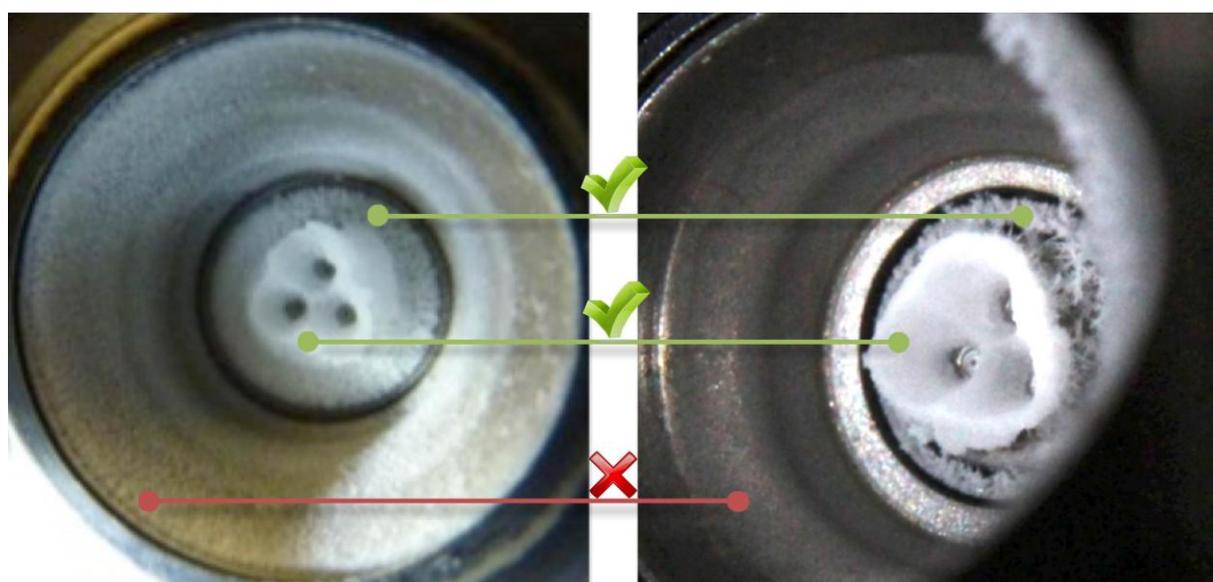


Abbildung 6.54: Vergleich der Ablagerungen am Motorprüfstand (links) und Injektorprüfstand (rechts) nach 2-stündiger stöchiometrischer Dosierung

Bei genauer Betrachtung der beiden Aufnahmen ist zu erkennen, dass sich die beiden Bilder nur in dem Fehlen der sehr feinen Ablagerungen am Konus des Injektors unterscheiden. Ein Grund dafür dürfte sein, dass die Verwirbelungen in der Gasströmung in Folge des Totwassergebietes im Nahbereich des Injektors fehlen. Diese sind für die Rezirkulation von feinsten Sekundärtropfen zum Injektor hin verantwortlich. (siehe Kapitel 4.5.3 – Hypothese II)

Eine weitere Ursache für diesen feinen Unterschied stellt der umgekehrte Temperaturgradient dar. Somit tritt die Thermophorese nicht in der gleichen Form auf, sodass kleine Sekundertröpfchen nicht zum Injektorkonus gelangen. Unter Thermophorese ist die Bewegung von Teilchen innerhalb einer Gasphase, bei Auftreten von Temperaturgradienten zu verstehen. Abhängig vom Größenbereich der Partikel bewegen sich diese von heißeren zu kühleren Bereichen [128]. Um diese Theorie zu untermauern wurde eine thermographische Aufnahme des untersuchten Dosierstutzens in BP180 gemacht (Abbildung 6.55).

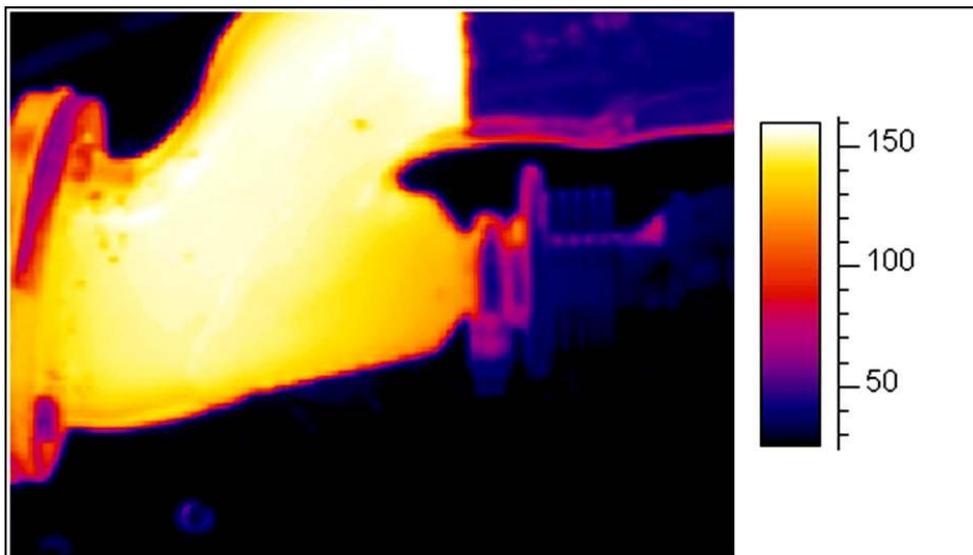


Abbildung 6.55: Temperaturverteilung im Bereich des Injektorsitzes in BP180

Es ist deutlich ein Temperaturunterschied von ca. 130°C im Totwassergebiet bzw. ca. 155°C im direkten Strömungsfeld der SCR-Strecke zu erkennen. Am Injektorprüfstand hingegen ist der Temperaturgradient genau entgegengesetzt. Der Injektorsitz und der Hitzeschild sind heißer als die umgebende Luft im Bereich der Düsen spitze. Somit werden keine Tröpfchen zurückgetragen.

Zur Bestimmung der Grenztemperatur bei der Ablagerungsentstehung am Injektor wurde eine Temperaturvariation am Düsensitz ausgehend von 160°C durchgeführt. Bei einem Dosiermittelstrom von 13gm/s wurden über eine Stunde lang Zeitrafferaufnahmen durchgeführt. In Abbildung 6.56 sind die Ergebnisse nach dieser Stunde für 160, 180, 200 und 220°C dargestellt. Es ist eine drastische Änderung der Ablagerungserscheinungen mit jeder Temperaturerhöhung um 20°C erkennbar. Ein Vergleich der Ablagerungen bei Düsenspitzentemperatur von 160°C mit den Ergebnissen von BP180 (entspricht 140°C Düsenspitzentemperatur) nach 60 Minuten zeigt, dass sie noch einen ähnlichen Aufbau aufweisen. Die hier typische Ausbildung eines kegelförmigen Türmchens erfolgt mit zunehmender Temperatur allerdings nicht mehr. Vielmehr erfolgt eine flächigere Verteilung der Ablagerungen über den Düsensitz. Des Weiteren zeigt sich eine Änderung der Struktur. Während bei 160 und 180°C die Ablagerungen noch fest und weiß sind, ist ab 200°C ein Wechsel zu eher gräulich, durchsichtigen Ablagerungen festzustellen. Zudem zeigt sich, dass erstmals ab 200°C der Düsensitz selbst beinahe frei von Ablagerungen ist. Lediglich am äußeren Rand verbleiben hier Ablagerungen. Ab 200°C sind die Temperaturen am Injektorsitz ausreichend hoch, um permanente Wandfilmbereiche am Injektor zu bilden. Diese sind als Schatten am unteren Rand des Düsensitzes zu erkennen.

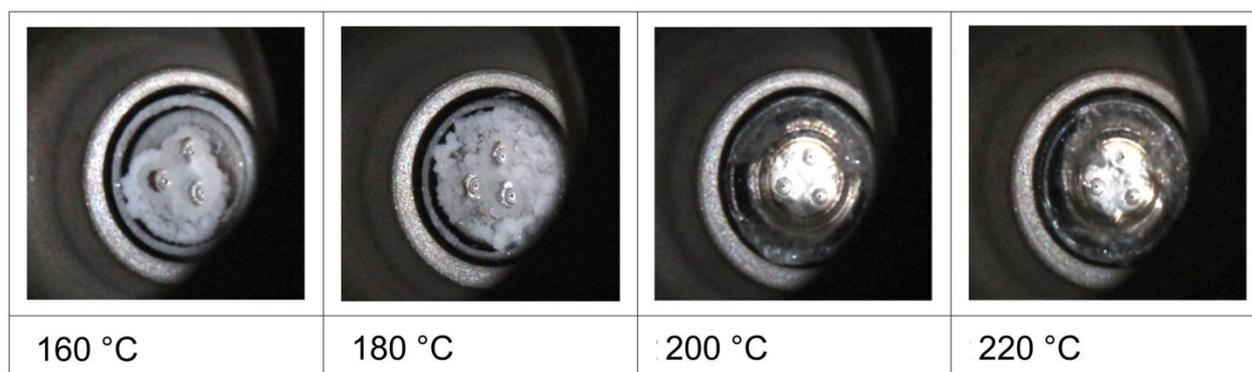


Abbildung 6.56: Untersuchungen zur Ablagerungsbildung am Injektor bei 4 verschiedenen Düsenspitzentemperaturen unter einstündigem AdBlue®-Massenstrom von 13mg/s.

Auf Grund des einseitigen Wärmeeintrages in die Düse ergibt sich eine ungleichmäßige Temperaturverteilung über den Düsensitz. Somit kann nur eine Abschätzung der Grenztemperatur nach Abbildung 6.56 erfolgen, die zwischen 180 und 200°C liegt.

Um noch näher an die Entstehung der Ablagerungen um die Düsenlöcher heran zu kommen wurden am Injektorprüfstand Highspeed-Aufnahmen von Dosierevents und darauf folgenden Effekten gemacht, auf die in Folge näher eingegangen werden soll. Auch hierfür wurden die Temperaturen am Düsensitz variiert.

6.3.4 Highspeed-Aufnahmen des Injektors

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde immer wieder zwischen $T_{\text{AdBlue-Sitz}} > 106^{\circ}\text{C}$ und $T_{\text{AdBlue-Sitz}} < 106^{\circ}\text{C}$ unterschieden. Diese Einteilung basiert auf der Siedetemperatur der Harnstoffwasserlösung bei Normaldruck von 106°C [129]. Entsprechend des Versuchsaufbaues am Injektorprüfstand konnte mit hier verwendetem Injektor nur eine grobe Unterteilung zwischen $< 106^{\circ}\text{C}$ (mit Düsenkühlung) und $> 106^{\circ}\text{C}$ (ohne Düsenkühlung) erfolgen.

Filmbildung an der Düsen Spitze

Abbildung 6.57 zeigt eine Bildserie in 7ms-Schrittweite. Die innere Düsensitztemperatur $T_{\text{AdBlue-Sitz}}$ beträgt über 106°C . Ausgehend vom unteren rechten Düsenloch zeigt sich innerhalb von wenigen Millisekunden die Ausbildung eines Wandfilms am Düsensitz. Um die Bedingungen herzustellen wurde die Düsenkühlung ausgeschaltet und somit liegt auch die Temperatur am Düsensitz $T_{\text{Düsensitz-Abgas}}$ oberhalb der Harstoffzersetzungstemperatur. Somit dürfte es sich beim Wandfilm lediglich um Biuret handeln (siehe Kapitel 4.5.1).

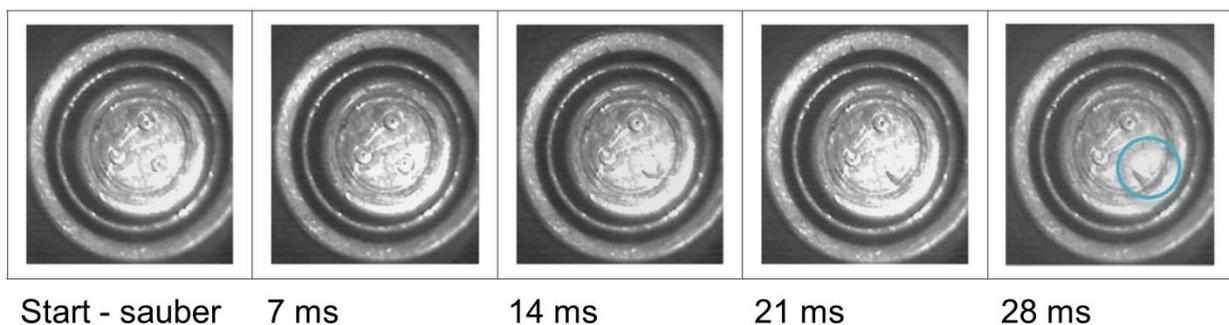


Abbildung 6.57: Filmbildung an der Injektorspitze bei $T_{\text{AdBlue-Sitz}} > 106^{\circ}\text{C}$.

Eine solche Filmbildung ist potentieller Ausgangspunkt für Ablagerungen.

Ablagerungsbildung in Sekunden

Abbildung 6.58 zeigt eine Bildserie in 5-Sekunden-Schritten. Die innere Düsensitztemperatur $T_{\text{AdBlue-Sitz}}$ beträgt unter 106°C . Bereits nach 4 aufeinanderfolgenden Dosierevents in Betriebspunkt BP180, bei einer Dosiermenge von 13mg/s , ist die Entstehung der typischen ringförmigen Ablagerungen um die Düsenlöcher zu erkennen. Ausgehend von einer sauberen Düse bilden sich innerhalb von nur 20 Sekunden feste Ablagerungen um die Düsenlöcher.

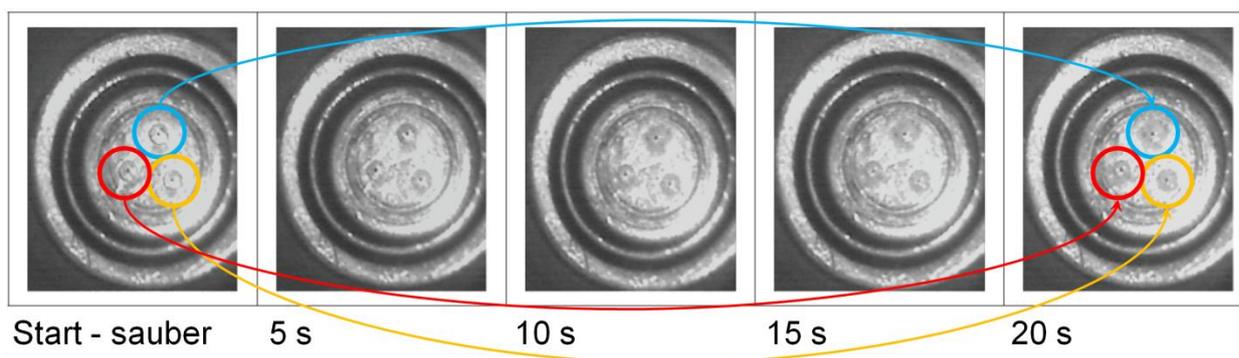


Abbildung 6.58: Ablagerungsbildung an der Injektorspitze nach Dosierung bei BP180 und $T_{\text{AdBlue-Sitz}} < 106^{\circ}\text{C}$.

Wie bereits in Kapitel 6.3.3 erwähnt, kommt es nach Beendigung der Dosierung zu einem Ausblasen des im Totvolumen der Düsenlöcher enthaltenen AdBlue®. Dies vermeidet eine Beschädigung des Injektors durch den Eisdruck (8%-ige Volumenzunahme bei AdBlue® zwischen Flüssig- und Gasphase [127]). Auf Grund der ausreichend hohen Temperatur von $T_{\text{Düsensitz-Abgas}}=137^{\circ}\text{C}$ am Düsensitz verdampft, bei dem auf diese Weise an den Düsensitz des Injektor gelangte AdBlue®, der Wasseranteil des Reduktionsmittels. So verbleibt nur Harnstoff, der feste Ablagerungen am Düsenloch bildet. Die turmartige Ausbreitung vom Düsensitz weg kann dabei näherungsweise mit der Stalagmit-Bildung verglichen werden. Nachgeschobenes AdBlue® sorgt an der Oberfläche der bereits vorhandenen Ablagerung für eine weitere Ausbildung.

An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass auch völlig verschlossene Düsenlöcher bei erneuter Dosierung problemlos wieder frei gelegt werden konnten. Der verwendete Dosierdruck von 5bar war hierzu ausreichend. Nach langen Stillstandszeiten von mehreren Wochen kann es allerdings zu einer Verfestigung der Verklebung des Injektors kommen, womit eine Veränderung des Spraybildes und der Düsenfunktion nicht mehr auszuschließen ist.

Nachdem die Bildung von Ablagerungen im Detail gezeigt wurde, interessiert natürlich auch der Zersetzungsprozess von bestehenden Substanzen an der Düsen Spitze.

Ablagerungszersetzung

Abbildung 6.59 zeigt eine Bildserie zur Zersetzung von Ablagerungen am Düsensitz.

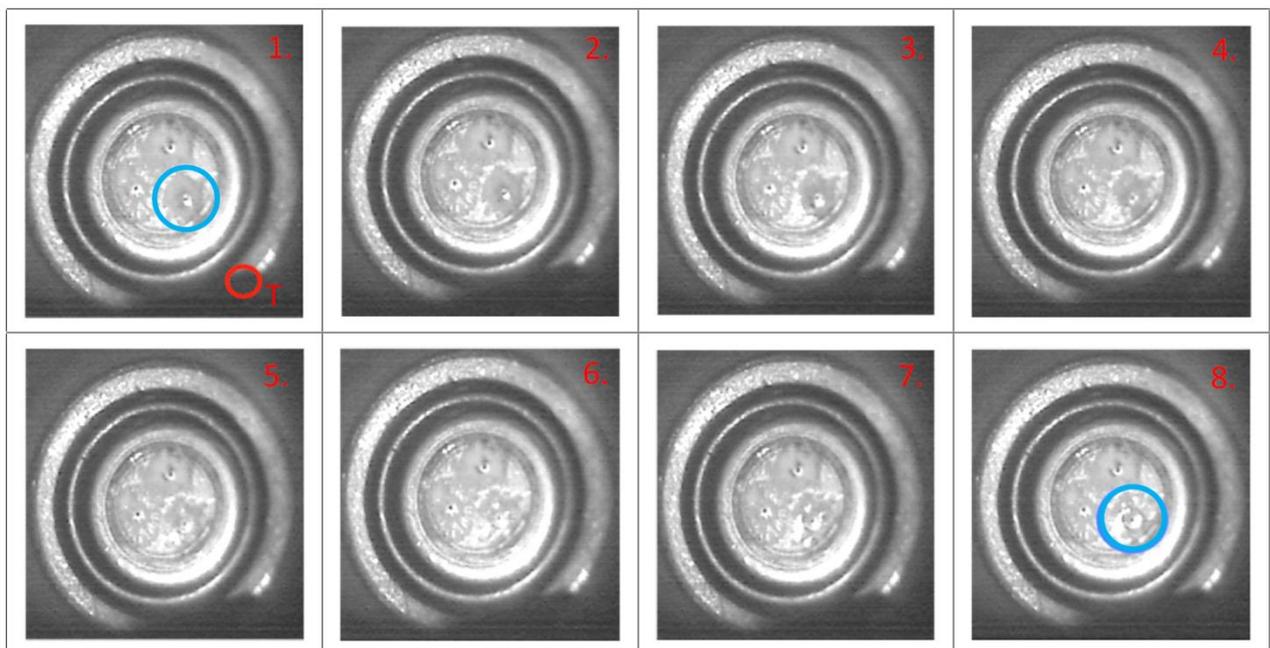


Abbildung 6.59: Verlauf des Zersetzungsprozesses von Ablagerungen am Düsensitz

Ausgehend von typischen ringförmigen Ablagerungen um die Düsenlöcher ist am rechten unteren Düsenloch die Zersetzung zu beobachten. Die Zersetzung erfolgt von außen nach innen zu den Düsenlöchern hin, bis schließlich annähernd die gesamten Ablagerungen am rechten unteren Düsenloch zersetzt sind. Dabei ist eine teilweise Rückbildung zu flüssigen Wandfilm (blaue Markierung) zu erkennen.

Zur genauen Aufbereitung der Messreihe wurde bei dieser Untersuchung am Düsensitz ein Thermoelement angebracht um weiteren Aufschluss über die vorherrschenden Temperaturen bei beginnender Ablagerungszersetzung zu bekommen. In Abbildung 6.59 ist in der ersten Aufnahme rechts unterhalb des Düsensitzes (rote Markierung) das angebrachte Thermoelement zu erkennen. Dem aufgezeichneten Temperaturverlauf (Abbildung 6.60) ist zu entnehmen, dass ab

einer Temperatur von ca. 148°C (orangene Markierung) erste Änderungen an den Ablagerungserscheinungen zu beobachten sind.

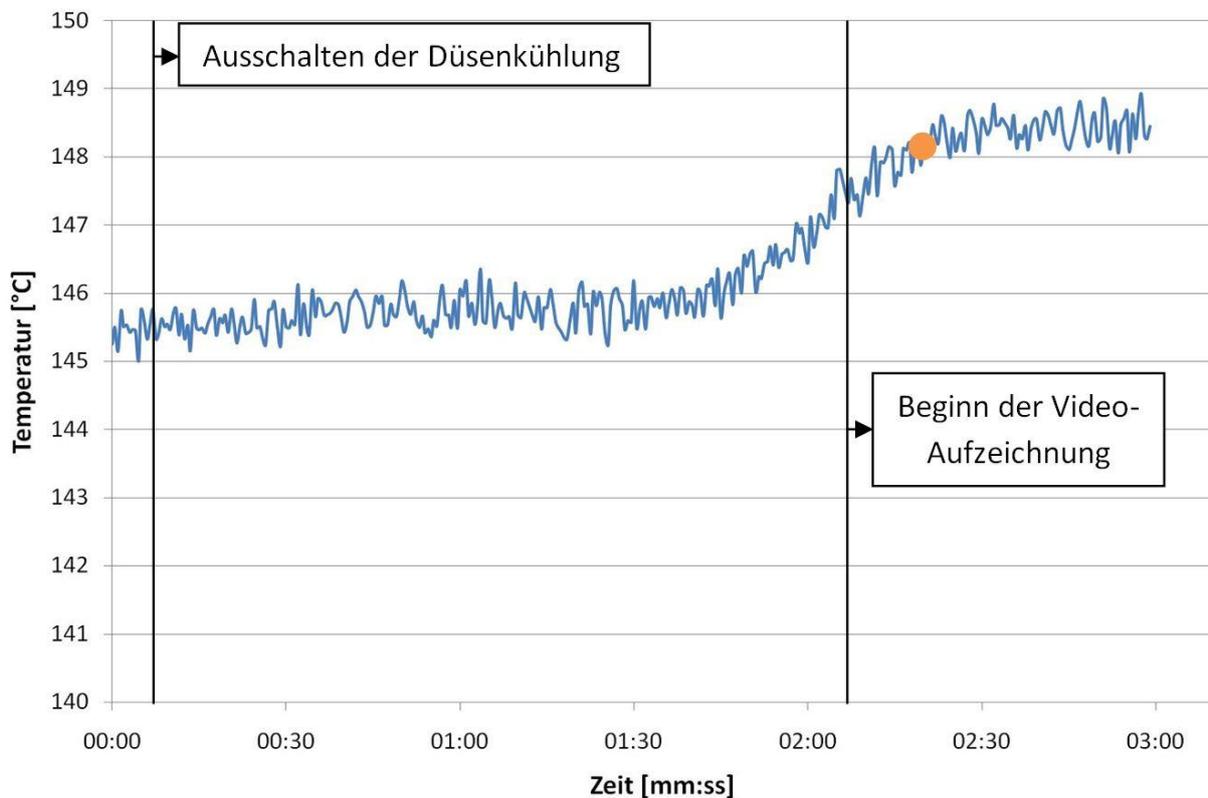


Abbildung 6.60: Temperaturverlauf während der Ablagerungszersetzung an der Düsen Spitze.

Entsprechend der Anordnung der Wärmequelle zur Düse ist davon auszugehen, dass die Temperatur direkt am Düsensitz noch geringfügig höher ist. Somit stimmt diese Temperatur ziemlich genau mit der Harnstoffzersetzungstemperatur von ca. 152°C überein (Abbildung 5.18). Daraus folgt, dass bei der Ablagerungsbildung keine Thermolyse-Reaktion erfolgte und es sich bei den zersetzenden Ablagerungen zur Gänze um nicht aufbereiteten Harnstoff handeln sollte.

Bei den Aufzeichnungen mit der Highspeed-Kamera gab es mit nachdampfender Düse und Tropfenbildung beim Schließen des Injektors zwei erwähnenswerte Phänomene zu beobachten.

Nachdampfen

In [Abbildung 6.61](#) ist ein Phänomen nach dem Schließen des Injektors dargestellt. Der Injektor dampft nach.

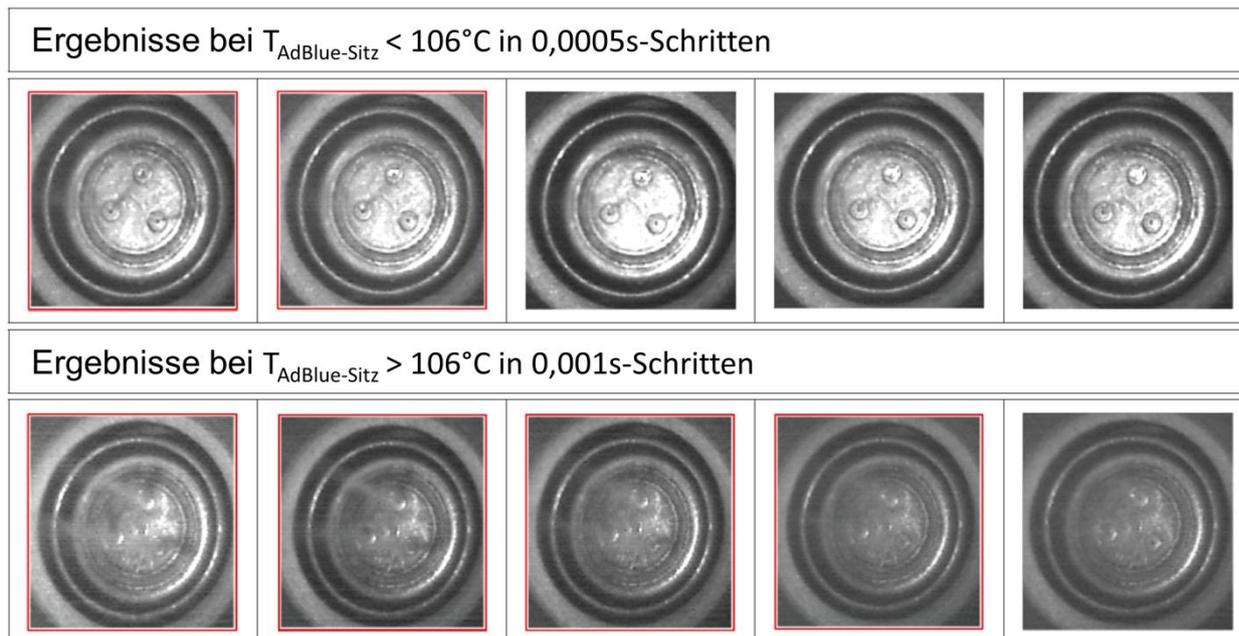


Abbildung 6.61: Vergleich des Nachdampfens des Injektors für $T_{\text{AdBlue-Sitz}} < 106^\circ\text{C}$ und $T_{\text{AdBlue-Sitz}} > 106^\circ\text{C}$. (Effekt rot gerahmt)

Im jeweils ersten Bild (ganz links) erfolgt jeweils das Schließen des Injektors. Die Serie der oberen Bildhälfte ist mit einer Schrittweite von 0,5ms sehr fein aufgelöst und wurde bei einer Temperatur von $T_{\text{AdBlue-Sitz}} < 106^\circ\text{C}$ aufgezeichnet. Die Serie der unteren Bildhälfte wurde mit einer Schrittweite von 1ms bei einer Temperatur von $T_{\text{AdBlue-Sitz}} > 106^\circ\text{C}$ aufgezeichnet. Bei der höheren Temperatur zeigt sich nicht nur eine deutlich stärkere Ausprägung des auftretenden Dampfes nach dem Schließen, sondern der Vorgang hält auch doppelt so lange an. Dieser Effekt ist als unerwünscht einzustufen, da er die vorgegebene Dosiermenge verfälschen kann. In Bezug auf die Neigung zu Ablagerungsbildung ist er jedoch als weniger kritisch zu sehen, da er nicht direkt für eine Benetzung der Düsenlöcher sorgt.

Tropfenbildung

Das Auftreten von Tropfen ist ein weiteres Phänomen, das nach dem Schließen des Injektors beobachtet werden konnte. Dieser Effekt ist kritischer zu betrachten, da die Tropfen durchaus Ausgangspunkt für Ablagerungen sein können. Während der Aufzeichnungen traten verschiedene Varianten, von einem Tropfen bis hin zu gleichzeitig drei Tropfen nach dem Schließen, auf und bewegten sich zum Teil willkürlich entlang des Düsensitzes. In [Abbildung 6.62](#) sind 2 Beispiele für dieses Phänomen dargestellt. Es macht dabei keinen Unterschied, ob die

Düsensitztemperatur $T_{\text{AdBlue-Sitz}}$ größer (rechts – 1 Tropfen) oder kleiner (links – 3 Tropfen) als 106°C war.

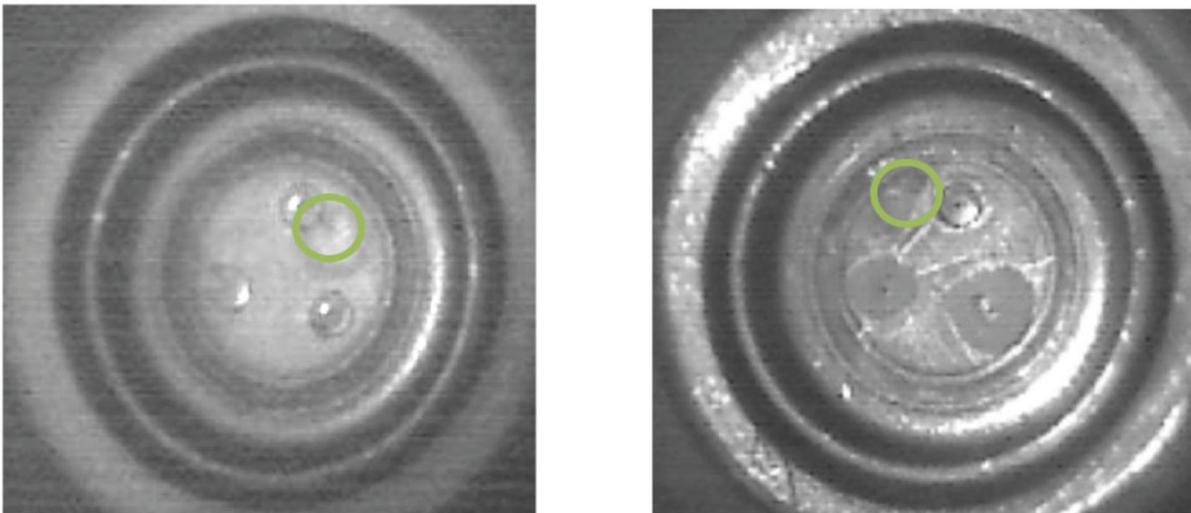


Abbildung 6.62: Tropfen nach dem Schließen des Injektors bei $T_{\text{AdBlue-Sitz}} < 106^{\circ}\text{C}$ (links) und $T_{\text{AdBlue-Sitz}} > 106^{\circ}\text{C}$ (rechts).

Die Highspeed-Aufnahmen am Injektorprüfstand bei unterschiedlichen Temperaturen zeigten zudem eine Änderung des Spraybildes.

Sprayvergleich

Den Vergleich des Spraybildes in Betriebspunkt BP180 bei einem Dosiermittelstrom von 13mg/s und AdBluetemperaturen von $T_{\text{AdBlue-Sitz}} < 106^{\circ}\text{C}$ (links) bzw. $T_{\text{AdBlue-Sitz}} > 106^{\circ}\text{C}$ (rechts) zeigt Abbildung 6.63.

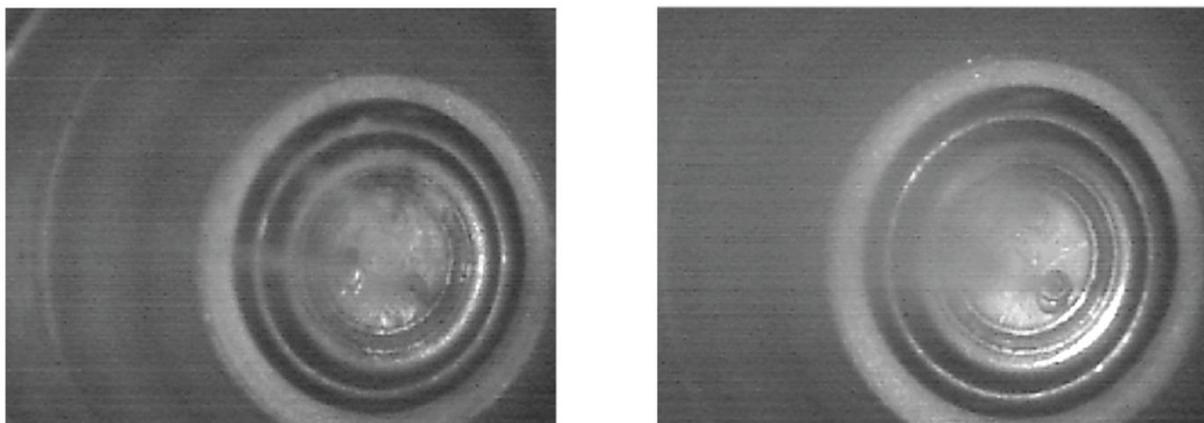


Abbildung 6.63: Sprayvergleich in Betriebspunkt BP180 bei $T_{\text{AdBlue-Sitz}} < 106^{\circ}\text{C}$ (links) und $T_{\text{AdBlue-Sitz}} > 106^{\circ}\text{C}$ (rechts).

Mit dieser Gegenüberstellung wird deutlich, dass durch die höheren Temperaturen in der AdBlue®-Düse beim Dosierevent ein plötzlicher Phasenübergang erfolgt. Die

dabei gebildeten Dampfblasen führen zu einem Aufplatzen des Sprays. Dies ist in Abbildung 6.63 rechts durch den zur Unschärfe führenden Nebel zu erkennen. Während dieser Effekt hier für Betriebspunkt BP180 nur schematisch dargestellt ist, liegen bei BPJ3 und BPJ4 die Temperaturen unmittelbar vor dem Düsensitz tatsächlich weit über 106°C (siehe Tabelle 5.8). Durch höhere Dosiermengen kann die AdBlue®-Temperatur wieder fallen. Kurzzeitig kann dieses Aufplatzen des Dosierstrahls Auswirkungen auf die Gleichverteilung haben.

Dieses Phänomen tritt zum Beispiel auch bei der Kraftstoffinjektion moderner direkteinspritzender Ottomotoren auf und wird als *flash boiling* bezeichnet [130]. Durch den anliegenden Druck in der Dosierleitung (5bar) stellt sich ein Siedeverzug ein. Mittels Gleichung 6.5 lässt sich der Dampfdruck von AdBlue® näherungsweise bestimmen [129]. Dabei ist T die Fluidtemperatur in °C.

$$\ln(p[\text{bar}]) = 13,9461 - \frac{5198,36}{273,15 + T} \quad \text{Gleichung 6.5}$$

Somit lässt sich bei 5bar (6bar Absolutdruck) im geschlossenen Leitungssystem eine Siedtemperatur von näherungsweise 150-155°C bestimmen. Beim Öffnen des Ventils bzw. während der Injektion kommt es zu einem abrupten Druckabfall und es erfolgt ein schlagartiger Phasenübergang von flüssig zu gasförmig. Ein Strahlaufbruch stellt sich ein.

Abbildung 6.64 zeigt schematisch das Phänomen des flash boiling. Außerdem sind die einzelnen Schritte des Phasenübergangs (1-4) angeführt. Zunächst entstehen innerhalb der einzelnen Tropfen Dampfblasen. Die Blasen wachsen an bis die Tropfen aufbrechen und es zur Verdampfung des ganzen Tropfens kommt.

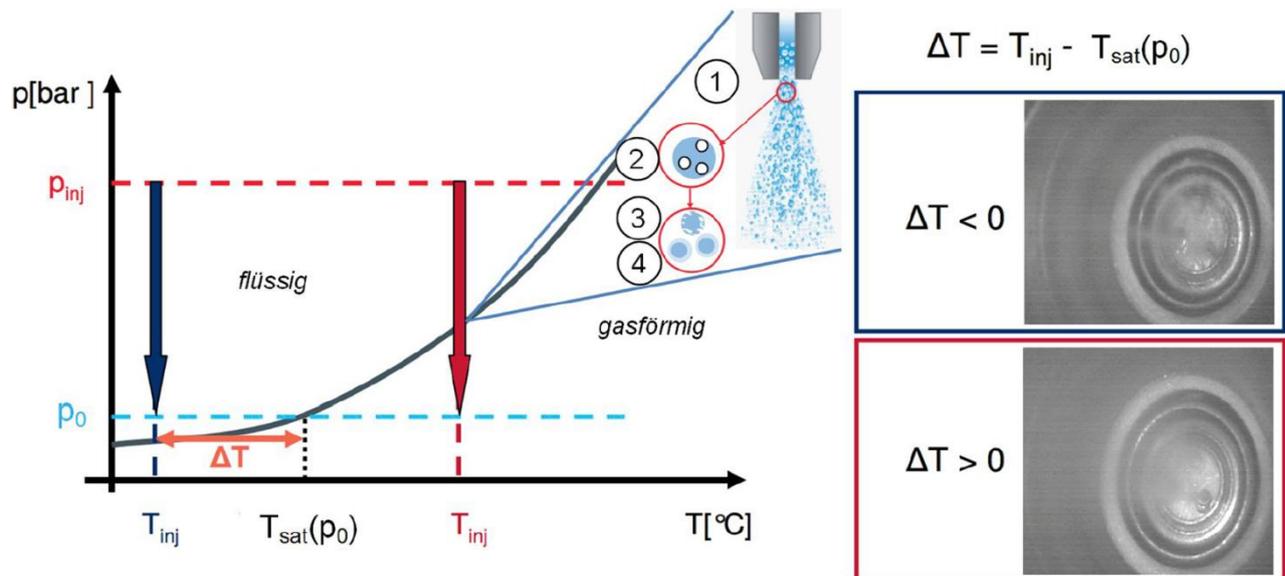


Abbildung 6.64: „Flash boiling“-Phänomen an Hand der Dampfdruckkurve [131]

Flash boiling führt zu folgenden Änderungen des Spraybildes [131]:

- Abnahme der Tropfendurchmesser
- Vergrößerung des Spraywinkels
- Verringerung der Tropfengeschwindigkeit und somit
- Verringerung der Strahlausbreitung

Um diesem Phänomen am Injektorprüfstand weiter nachzugehen, wurden sechs verschiedene AdBlue®-Temperaturen von $T_{\text{AdBlue-Sitz}} = 55, 80, 97, 115, 130$ und 150°C realisiert. Bei diesen Temperaturen wurden neben den Highspeed-Aufnahmen des Sprays auch mittels Spraytec der mittlere Sauterdurchmesser und die Tropfenverteilung bestimmt.

Abbildung 6.65 zeigt die näherungsweise nach Gleichung 6.5 berechnete Dampfdruckkurve. Die Highspeed-Aufnahmen für die verschiedenen AdBlue®-Temperaturen $T_{\text{AdBlue-Sitz}}$ sind darüber gelegt. Es wird deutlich, dass bis zu 97°C (3. Versuch) kein Phasenübergang während der Injektion erfolgt. Der Dampfdruck liegt hier noch unterhalb des Umgebungsdrucks. Dazu passend ist bis zu dieser Messung keine qualitative Änderung des Spraybildes zu erkennen. Bei AdBlue®-Temperaturen von $T_{\text{AdBlue-Sitz}} = 115$ und 130°C erfolgt erstmals in dieser Messreihe flash boiling. Dies zeigt sich in einem sichtbaren Aufplatzen des Sprays unmittelbar nach Injektionsbeginn. Bei 150°C tritt im Gegensatz zu bisherigen Untersuchungen

der Fall ein, dass bereits vor Injektionsbeginn das AdBlue® gasförmig vorliegt. Eine großräumige nebelartige Injektion des Reduktionsmittels ist die Folge.

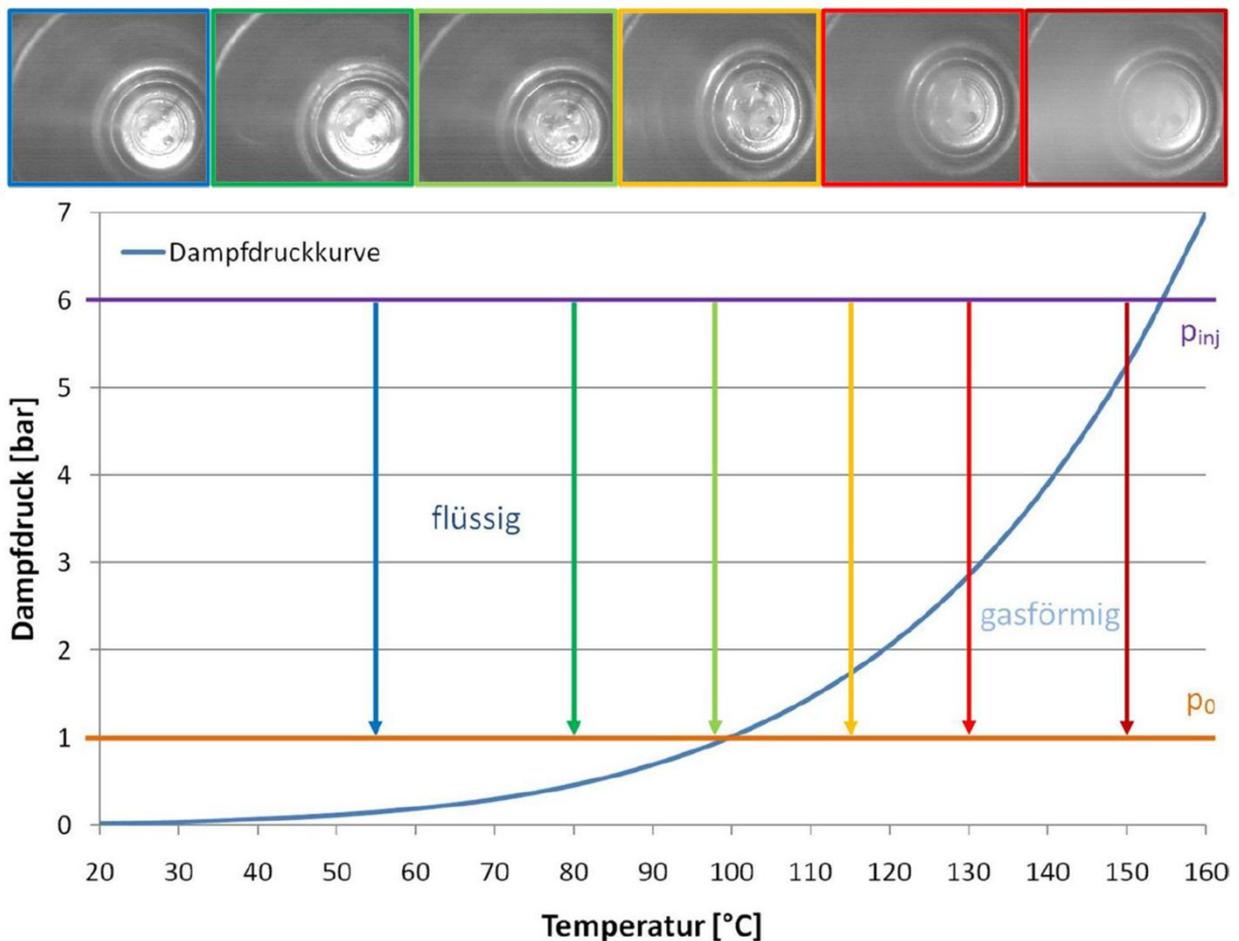


Abbildung 6.65: Ergebnisse der Highspeed-Aufnahmen bei verschiedenen AdBlue®-Temperaturen im Kontext zur Dampfdruckkurve [117].

Während es sich in Abbildung 6.65 um theoretisch mögliche Effekte bei Reduktionsmitteldosierung handelt, wurde im nächsten Schritt überprüft, ob mit diesen Erscheinungen auch im realen Fahrbetrieb gerechnet werden muss. Zu diesem Zweck wurde am Motorenprüfstand bei einer Motordrehzahl von 2000min^{-1} eine Lastrampe beginnend bei 10% Pedalwert durchgeführt. Der Pedalwert wurde innerhalb einer Stunde auf 100% gesteigert. In [Abbildung 6.66](#) sind die auftretenden Temperaturen über der Zeit dargestellt. Daraus kann man die jeweiligen Düsenstizentemperaturen bei von uns verwendeten Betriebspunkten zur Gleichverteilungsmessung auslesen um sich ein Bild über die dabei herrschenden Bedingungen zu machen.

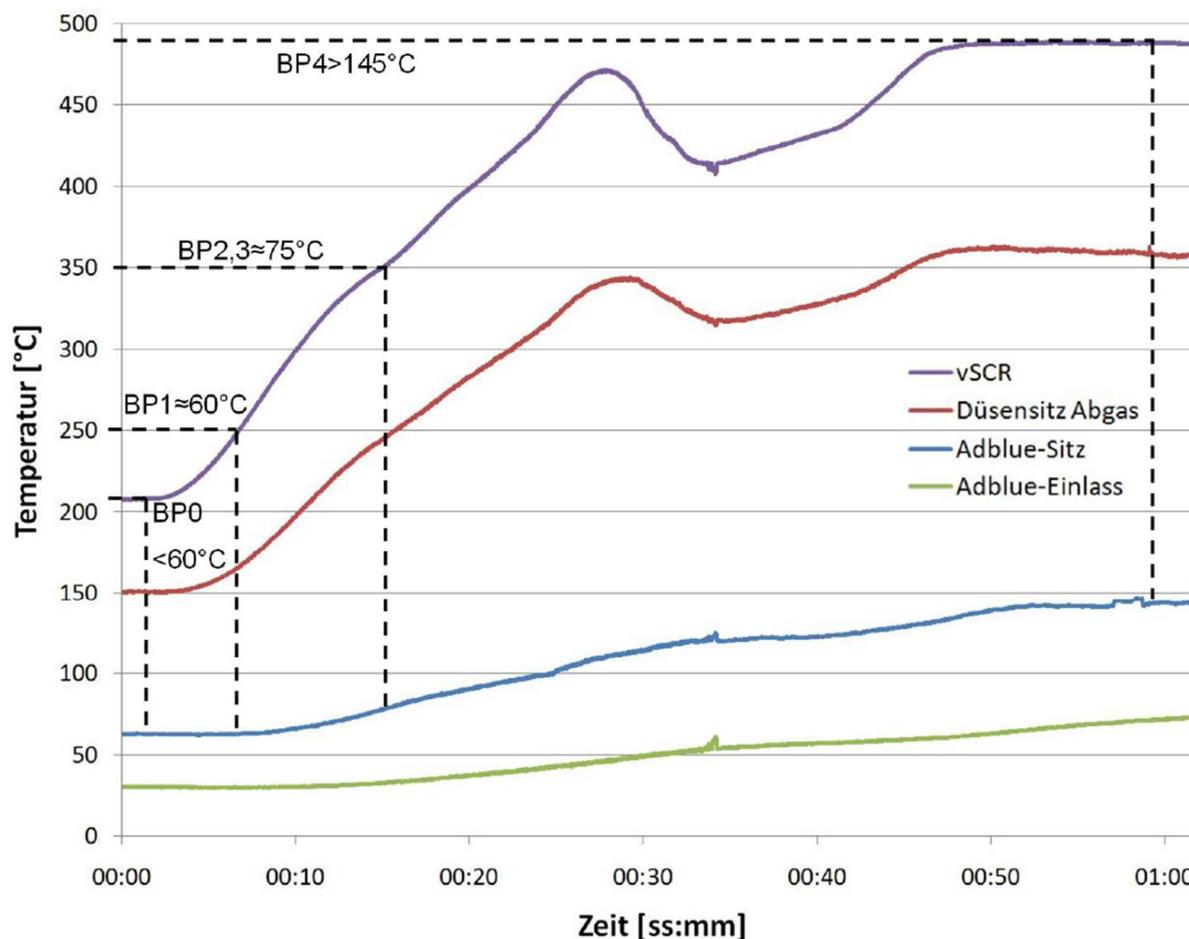


Abbildung 6.66: Temperaturverläufe im Bereich der Düse bei einer Lastrampe über eine Stunde von 10-100% Pedalstellung unter 2000min⁻¹ bei einem AdBlue®-Massenstrom von 13mg/s.

Den Temperaturverläufen kann man entnehmen, dass die Düsenspitzentemperatur ($T_{\text{AdBlue-Sitz}}$) nach einer Stunde bei SCR-Katalysator-Eintrittstemperatur von etwa 500°C trotz Dosiermenge von 13mg/s annähernd 150°C erreicht. Somit ist davon auszugehen, dass sich bei der Dosierung am Motorprüfstand ähnlich wie bei den Untersuchungen am Injektorprüfstand flash boiling-Effekte zeigen.

Da während der Lastrampe auch der Abgasmassenstrom und NO_x-Rohemissionen gemessen wurden, konnte der notwendige Dosiermittelmassenstrom für stöchiometrische Dosierung berechnet werden (siehe Kapitel 5.1.1). Der AdBlue®-Massenstrom hätte sich demnach zwischen 6,9 und 335mg/s belaufen müssen. Es ist also davon auszugehen, dass entsprechend der höheren Massenströme bei höherer Last eine stärkere Kühlung des Injektors stattfindet. Durch stark instationäres Verhalten im realen Fahrbetrieb kann eine niedrige Dosiermenge auf Grund entsprechender Kennfeldvorgaben zur Vermeidung von NH₃-Schlupf jedoch durchaus zu einer Überhitzung der Düse und somit flash boiling kommen. Ein

entsprechender Bauteilschutz der Düse ist somit einerseits durch die Applikation, als auch schon konstruktiv vorzusehen.

Die Ergebnisse der Spraytec-Untersuchungen wurden neben den erwähnten Temperaturen zwischen 55 und 150°C durch eine Messung bei Umgebungstemperatur (20°C) ergänzt. In Tabelle 6.5 sind die resultierenden Sauterdurchmesser (SMD) sowohl für die erste, als auch für die ersten 9 aufeinander folgenden Injektionen dargestellt.

$T_{\text{AdBlue-Sitz}} [^{\circ}\text{C}]$	20	55	80	97	115	130	150
SMD der 1. Injektion [μm]	116,4	111,2	104,6	95,1	129,3	37,9	16,5
SMD der Injektionen 1-9 [μm]	100	100,5	96,6	82,7	108,6	40,3	22,6

Tabelle 6.5: SMD-Ergebnisse der flash boiling – Untersuchungen bei sieben verschiedenen AdBlue-Temperaturen.

Ergänzend dazu sind die relative (Abbildung 6.67) bzw. kumulierte (Abbildung 6.68) Häufigkeitsverteilung der Tröpfchengröße der jeweils ersten Injektion für die verschiedenen AdBlue®-Temperaturen $T_{\text{AdBlue-Sitz}}$ dargestellt.

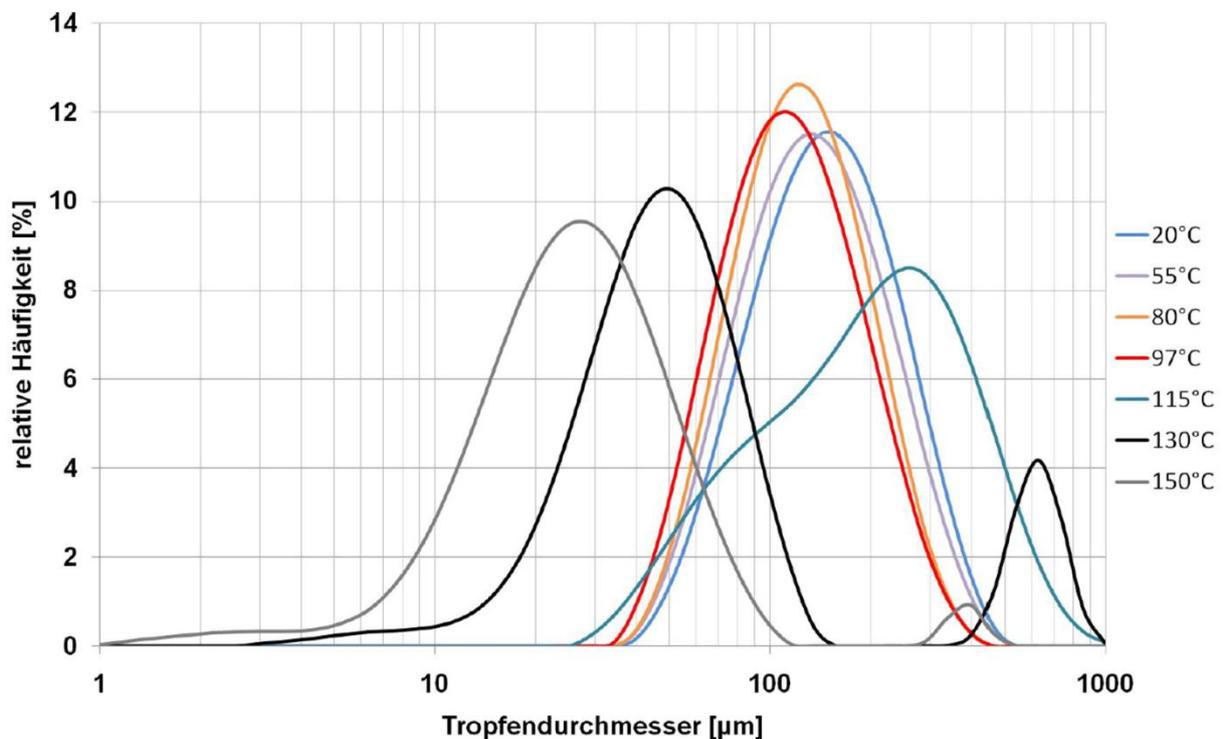


Abbildung 6.67: Relative Häufigkeitsverteilung der jeweils ersten Injektion des eindosierten Spray bei unterschiedlichen AdBlue®-Temperaturen (20-150°C).

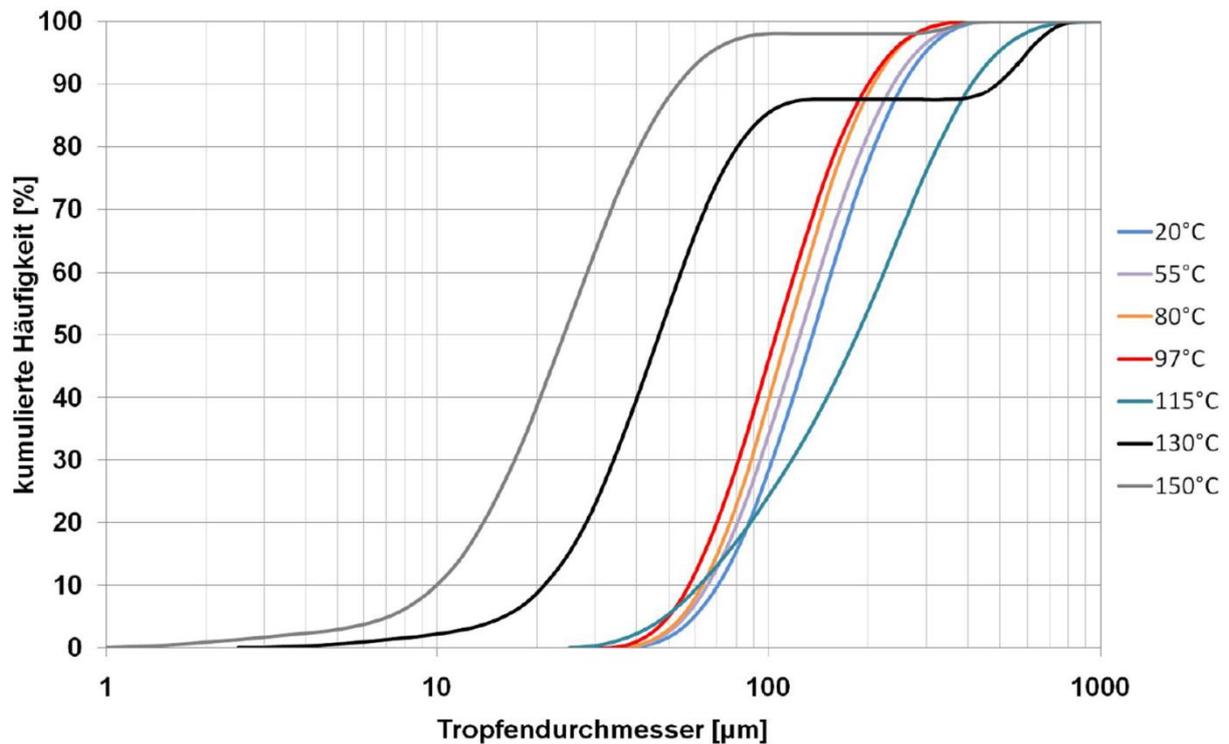


Abbildung 6.68: Kumulierte Häufigkeitsverteilung der jeweils ersten Injektion des eindosierten Spray bei unterschiedlichen AdBlue®-Temperaturen (20-150°C).

Abbildung 6.67 ist zu entnehmen, dass der Sauterdurchmesser bis zu einer Temperatur von 97°C stetig abnimmt. Bei 115°C ist schließlich ein deutlicher Anstieg des SMD zu beobachten. Der größte mittlere Sauterdurchmesser dieser Messreihe ergibt sich bei AdBlue®-Temperaturen von $T_{\text{AdBlue-Sitz}} = 115^{\circ}\text{C}$, obwohl bei diesen Temperaturen entsprechend der Dampfdruckkurve für AdBlue® mit flash boiling zu rechnen ist. Um diese Abläufe näher zu beleuchten wurden in 5°C-Schritten von 105-130°C weitere Untersuchungen des Tropfenspektrum gemacht. Schließlich ist in Abbildung 6.67 für 130 bzw. 150°C ausgeprägtes flash boiling zu entnehmen, das erhebliche Auswirkungen auf das Tropfenspektrum hat. In beiden Fällen treten neben sehr vielen kleinen auch große Tropfen ($>400\mu\text{m}$) auf. Abbildung 6.68 bestätigt diese Analyse. Mit steigender Temperatur erhöht sich der Anteil an kleinen Tropfen im Spektrum. Einzig der Kurvenverlauf von 115°C zeigt eine Unregelmäßigkeit, der nun auf den Grund gegangen wird.

Die relative Häufigkeitsverteilung der Tröpfchengrößen der jeweils ersten Injektion des eindosierten Sprays speziell im Bereich des einsetzenden Phasenübergangs des AdBlue® ist in [Abbildung 6.69](#) dargestellt.

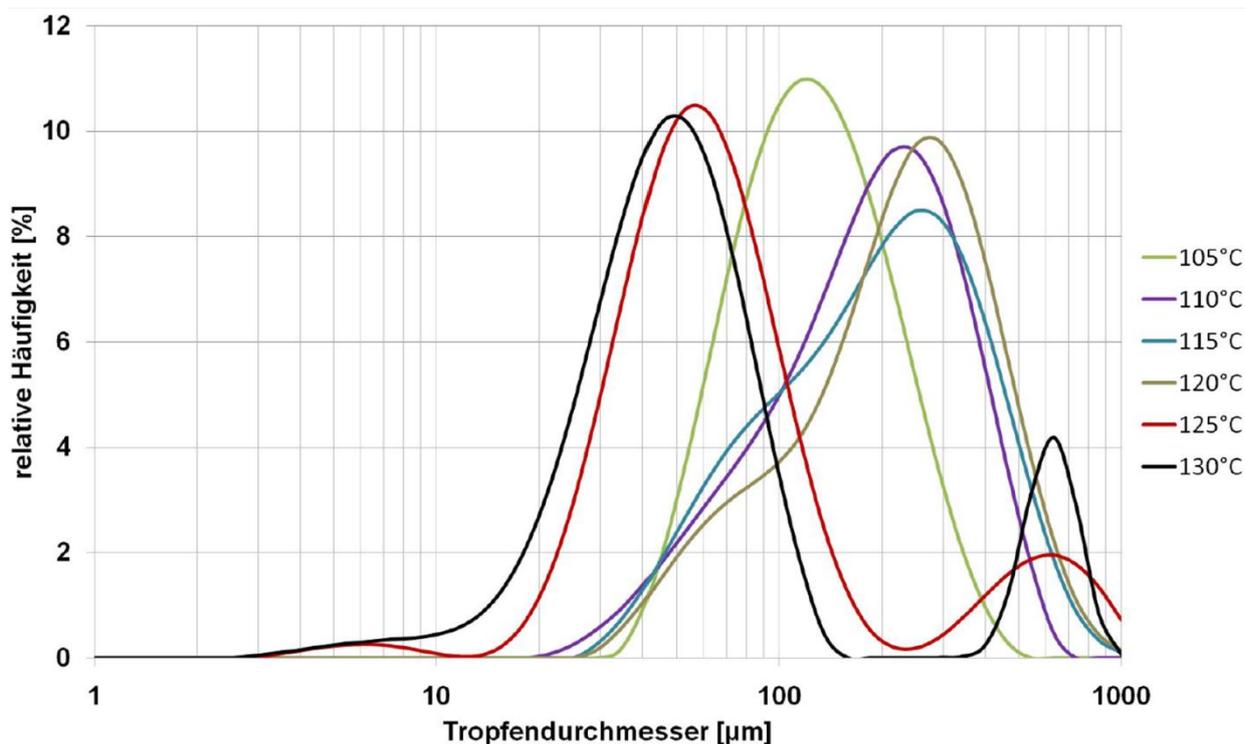


Abbildung 6.69: Relative Häufigkeitsverteilung der jeweils 1. Injektion des eindosierten Spays speziell bei AdBlue®-Temperaturen von 105-130°C.

Ausgehend vom Tropfenspektrum bei 105°C zeigt sich mit steigender Temperatur eine Erhöhung des SMD.

Tabelle 6.6 zeigt die SMD-Ergebnisse der Untersuchungen des Tropfenspektrums für die AdBlue®-Temperaturen im speziellen Bereich des Phasenübergangs bei beginnendem flash boiling.

$T_{\text{AdBlue-Sitz}} [^{\circ}\text{C}]$	105	110	115	120	125	130
SMD der 1. Injektion [μm]	101,5	128,5	129,3	149,5	46,4	37,9
SMD der Injektionen 1-9 [μm]	99,8	118,7	108,6	59,0	48,3	40,3

Tabelle 6.6: SMD-Ergebnisse der flash boiling – Untersuchungen bei AdBlue®-Temperaturen nahe dem Phasenübergang.

Der maximale Sauterdurchmesser von 149,5 μm wird bei der ersten Injektion mit 120°C erreicht. Darüber zeigen sich durch eine starke Reduzierung des SMD deutliche Auswirkungen des flash boiling. Genauere Betrachtung der Tabelle zeigt, dass bei 120°C der mittlere Sauterdurchmesser der ersten neun aufgezeichneten Injektionen kleiner ist, als jener des ersten Events. Eine Erklärung hierfür sind nur wenige ganz kleine Tropfen während der ersten Injektion im Bereich beginnenden flash boilings. Wenn diese noch verdampfen, bevor sie mittels Spraytec detektiert werden können, resultiert ein deutlich größerer SMD, da mehrheitlich größere

Tropfen verbleiben. Durch kontinuierliche Dosierung wird dieser Zustand ausgeglichen. Ein deutlich feineres Tropfenspektrum resultiert und wird auch detektiert.

Abbildung 6.70 zeigt den Verlauf des Sauterdurchmessers der ersten Dosierung für die jeweiligen AdBlue®-Temperaturen unmittelbar vor Düsensitz von 20 bis 150°C.

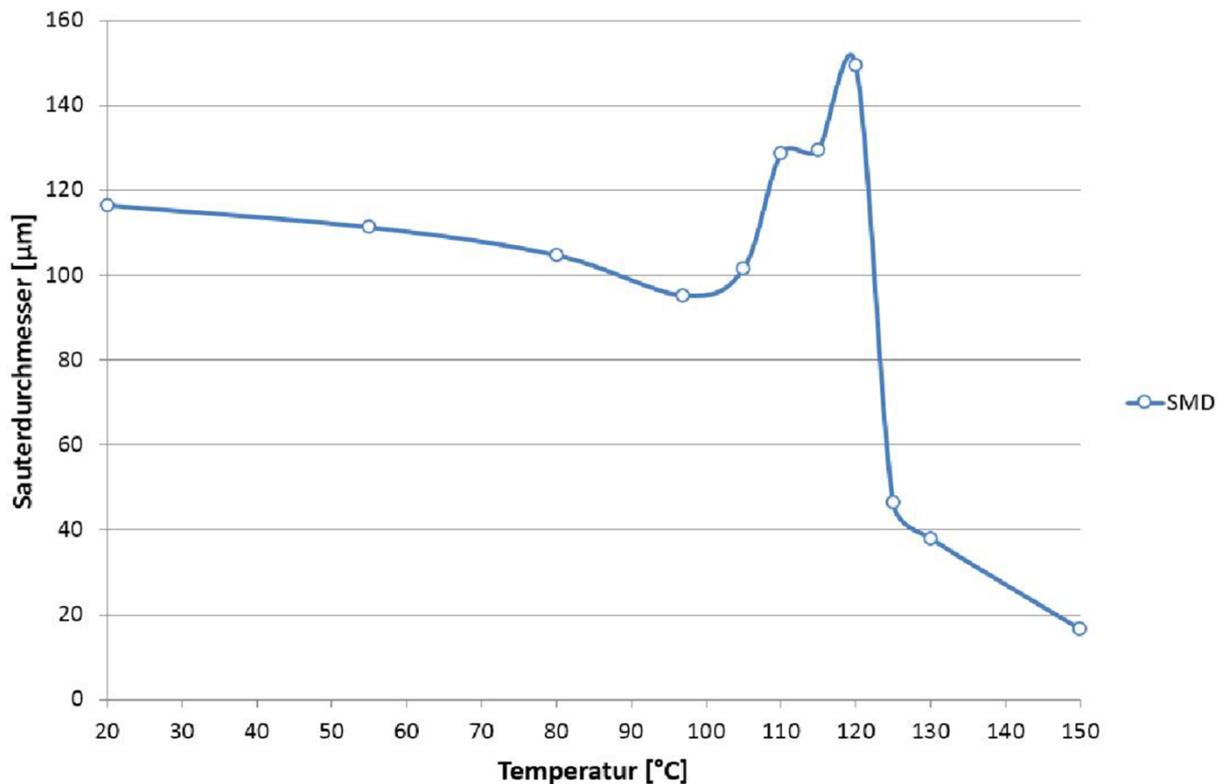


Abbildung 6.70: Verlauf des Sauterdurchmessers der 1. Injektion des eindosierten Sprays bei AdBlue®-Temperaturen von 20-150°C.

Die Flash Boiling – Untersuchungen zeigen, dass eine Temperaturerhöhung nahe der Dampfdruckkurve zunächst eine Reduzierung des SMD zur Folge hat. Im Temperaturbereich von 110-120°C ist durch einen SMD-Anstieg ein gegensätzliches Verhalten zu beobachten. Ab einer Temperatur von 125° schlägt dieses Verhalten um und es zeigen sich die zu erwartenden Auswirkungen des flash boiling anhand deutlicher Reduzierung des SMD.

Abschließend zeigt Abbildung 6.71 die kumulierte Häufigkeitsverteilung der Tröpfchengrößen der jeweils ersten Dosierung des Reduktionsmittels speziell für die verschiedenen AdBlue®-Temperaturen $T_{\text{AdBlue-Sitz}}$ im Bereich des einsetzenden Phasenüberganges.

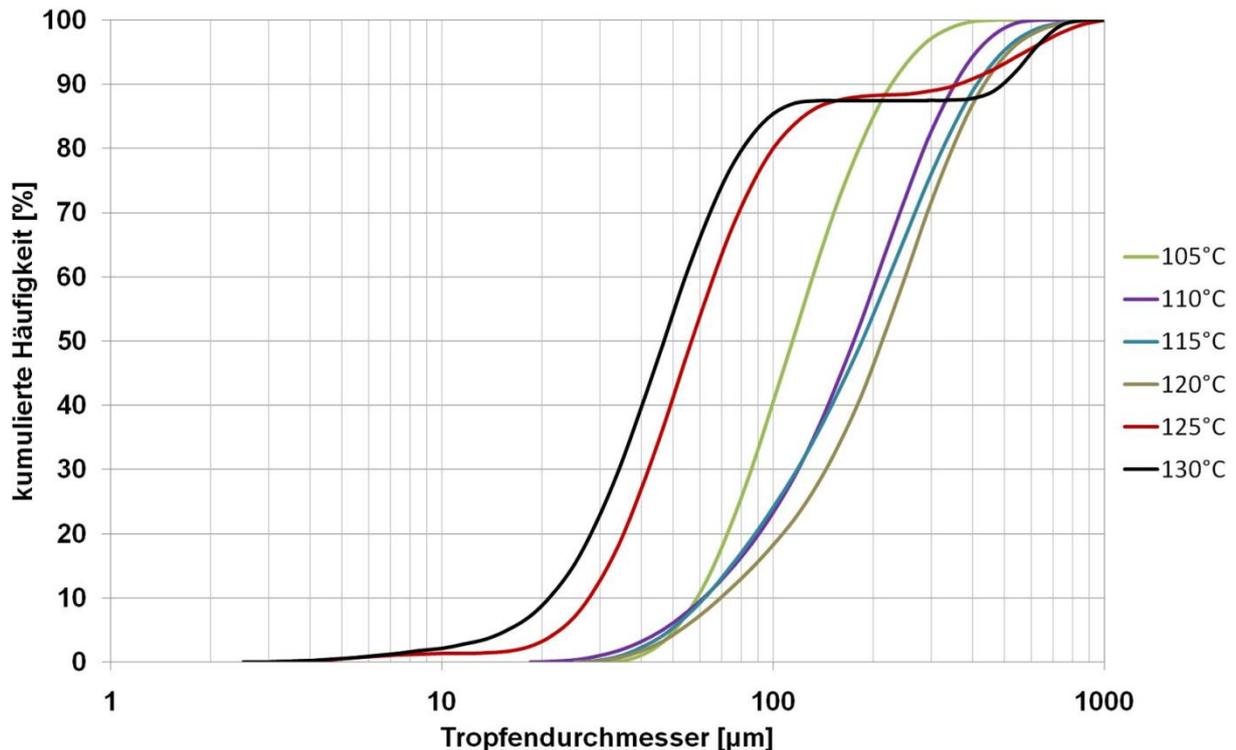


Abbildung 6.71: Kumulierte Häufigkeitsverteilung der jeweils ersten Injektion des eindosierten Spray speziell bei den AdBlue®-Temperaturen von 105-130°C.

Fazit: Die Untersuchung der Einflussgrößen zur Ablagerungsbildung am Düsensitz hat gezeigt, dass die Temperatur an der Düsenspitze und damit verbunden die Abgasströmungsführung von großer Bedeutung ist. Je stärker die Injektionsstelle mit Abgas gespült wird, desto geringer ist die Ablagerungsmenge. Dies kann sowohl durch asymmetrische Strömungsführung, als auch durch Einbauten wie Winkelbleche (Abbildung 6.43) realisiert werden. All diese Maßnahmen bezwecken eine Erhöhung der Düsenspitzentemperatur um eine Zersetzung der bereits nach wenigen Sekunden gebildeten Ablagerungserscheinungen zu bewirken. Ragt die Düsenspitze jedoch zu weit in die Abgasströmung, kann es in hohen Betriebspunkten zu einer Überhitzung des Injektors kommen. Dies führt nicht nur zum gezeigten Effekt des flash boiling, sondern auch zu Materialermüdung und in Folge zu irregulären Phänomenen wie Tropfenbildung und Nachdampfereignissen, die Ursprung für neue Ablagerungen sein können. In Anbetracht möglicher künftiger Dosierpositionen (siehe Kap. 7) mit noch höheren Abgastemperaturen ist daher eine Wasserkühlung des Injektors (Abbildung 6.51 - Kap. 6.3.2) anzustreben. Damit kann die Düse trotz tiefer Positionierung im Abgas vor Überhitzung geschützt werden.

6.4 Möglichkeiten zur Ablagerungsreduktion in Entkoppellelementen

Wie bereits in Kapitel 5.7.3 beschrieben wurde können Ablagerungen in einem Entkoppellelement die Lebensdauer dieses Elements erheblich herabsetzen bzw. zum Bruch führen. Es muss somit ein Weg gefunden werden Ablagerungen in diesem Bauteil so gut wie auszuschließen bzw. so gering wie möglich zu halten. Zu diesem Zweck wurden mehrere Baugruppen auf ihre Funktion untersucht. Diese Baugruppen können sich beispielsweise aus 3 Elementen zusammensetzen. Dazu gehört neben dem Entkoppellelement und dem Mischer auch ein Verdampfer, welcher zwischen Dosierstelle und Mischer angeordnet wird. Der Aufbau einer solchen Versuchsanlage ist in Abbildung 6.72 – links dargestellt. Der Verdampfer (rechts) besteht aus einer beschichteten oder unbeschichteten Metallfolie, die in unterschiedlicher Form zu verschiedenen Zelldichten verbaut ist. Eine Auswahl an Verdampfer-Versionen ist in Abbildung 6.72 – unten zu sehen.

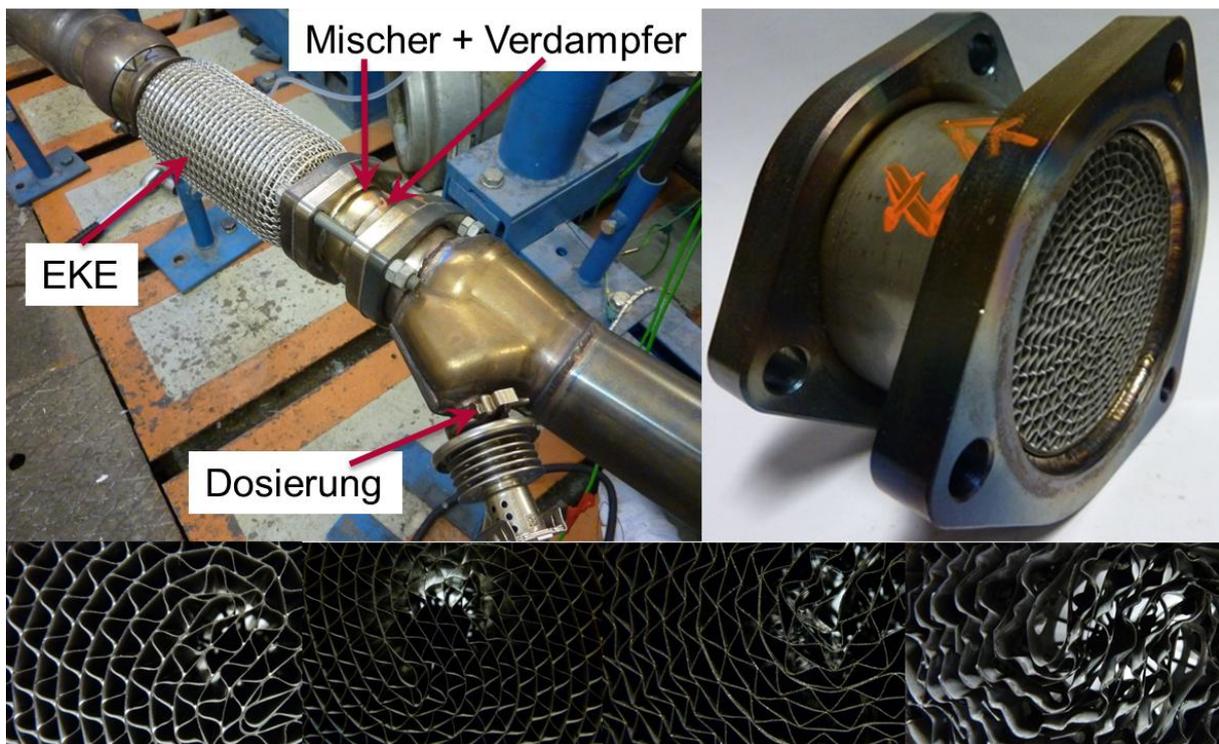


Abbildung 6.72: Anordnung und Bauformen von Verdampfern in der Abgasanlage zur Vermeidung von Ablagerungen in Entkoppellelementen.

Der Verdampfer soll bewirken, dass zu viel flüssiges Reduktionsmittel in das Entkoppellelement (EKE) gelangt und dort Ablagerungen bildet. Mit der in Abbildung 6.72 gezeigten Anordnung wurden Ablagerungsversuche am Motorenprüfstand

durchgeführt. Dabei kam ein spezieller Betriebspunkt zur Anwendung, der in Tabelle 6.7 angegeben ist.

$T_{\text{Abgas}} [^{\circ}\text{C}]$	$m_{\text{Abgas}} [\text{kg/h}]$	$m_{\text{Urea}} [\text{mg/s}]$	Dauer [h]
225	150	78,8	10

Tabelle 6.7: Betriebspunkt zur Untersuchung der Ablagerungsbildung in Entkoppelelementen.

Dieser Betriebspunkt zeichnet sich durch eine sehr hohe Dosiermenge aus, der eine etwas höhere Abgastemperatur entgegengehalten wird. Mit diesen massiven AdBlue®-Mengen kommt es zu Ergebnissen, wie sie beispielhaft in Abbildung 6.73 zu sehen sind.

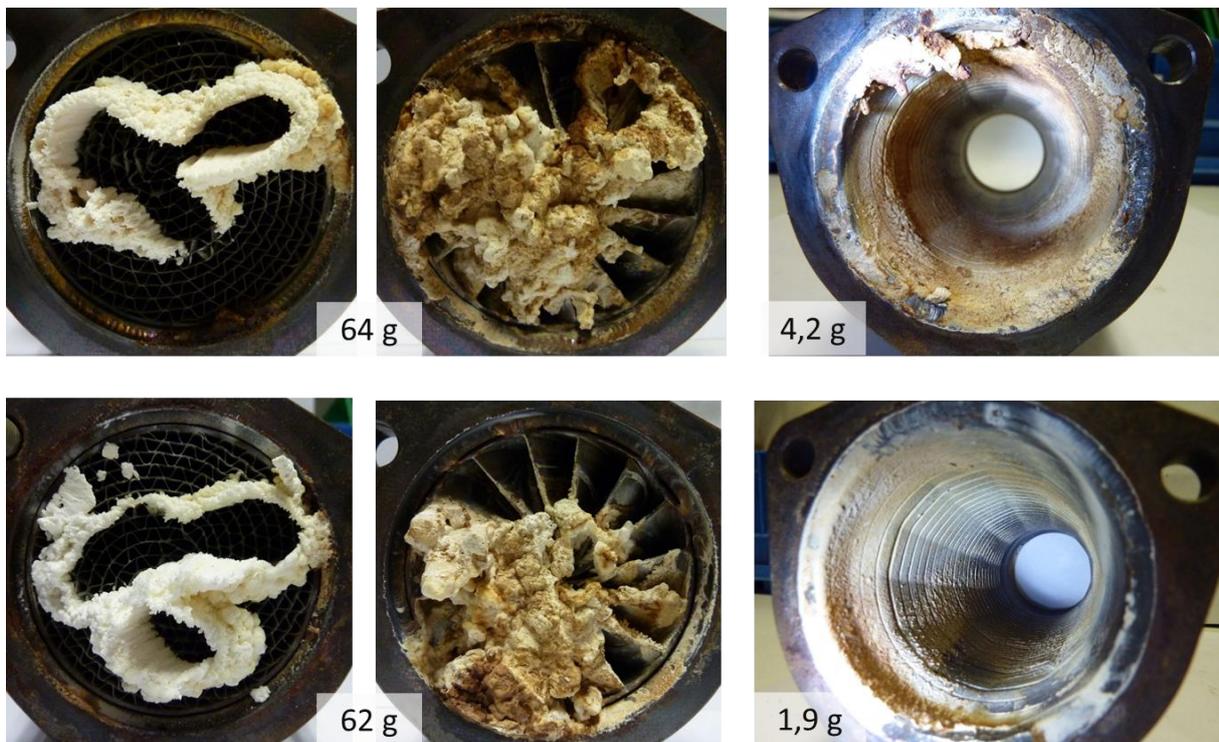


Abbildung 6.73: 2 Beispiele für Ablagerungsergebnisse nach 10 stündigem Testlauf.

Zum einen bildet sich an der Eingangsseite des Verdampfers eine turmförmige Ablagerung, welche langsam Richtung Injektor wächst. Die Auftreffpunkte des Sprays sind klar zu erkennen. Rund um die Auftreffpunkte wachsen durch die feineren Tropfen des Sprays die Ablagerungen an. Durch die großen Harnstoffmassen bildet sich ein Wandfilm, der auf Grund des Abgasmassenstroms

durch den Verdampfer und schließlich auch durch den daran anschließenden Mischer geschoben wird. So kommt es auch im EKE noch zu klar erkennbaren Ablagerungen an den Rohrwänden. Dieser Flüssigkeitstransport kann in einer Zeitrafferaufnahme des Vorganges nach 45, 90 und 135 Minuten in Abbildung 6.74 nachvollzogen werden.

Der kontinuierliche Aufbau der Ablagerungen konnte mit Thermoelementen im Verdampfer veranschaulicht werden. Abbildung 6.75 zeigt eine kontinuierliche Abkühlkurve der Messstelle in den Ablagerungen (rote Markierung). Die Ablagerung bildet dabei eine konstant wachsende Isolationsschicht. Die Temperatur im nicht beaufschlagten Gebiet des Verdampfers bleibt wie die Abgastemperatur über 10 Stunden konstant. Durch die Verklebung der Zellen kommt es des Weiteren zu einer Reduktion des Strömungsquerschnittes, was einen drastischen Gegendruckanstieg von 10 auf 120mbar mit sich bringt.

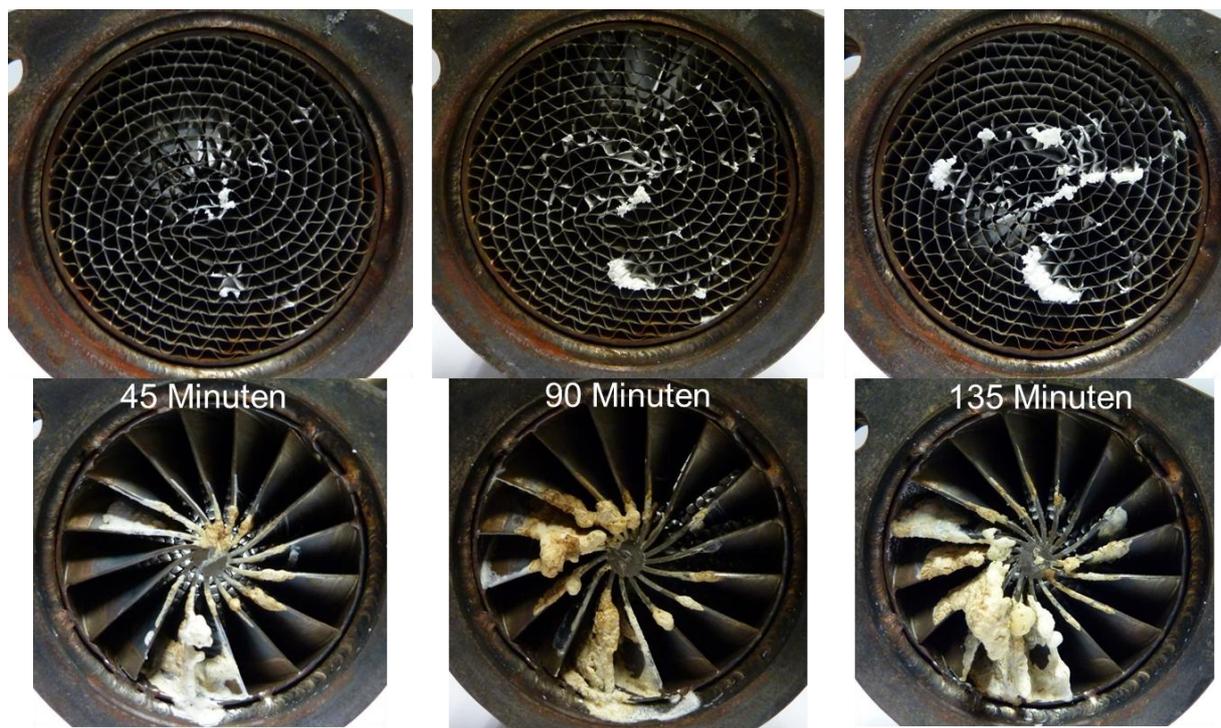


Abbildung 6.74: Zeitrafferaufnahmen nach 45/90/135 Minuten zur Veranschaulichung des Wandfilmtransportes durch das Verdampfer-Mischer-Element.

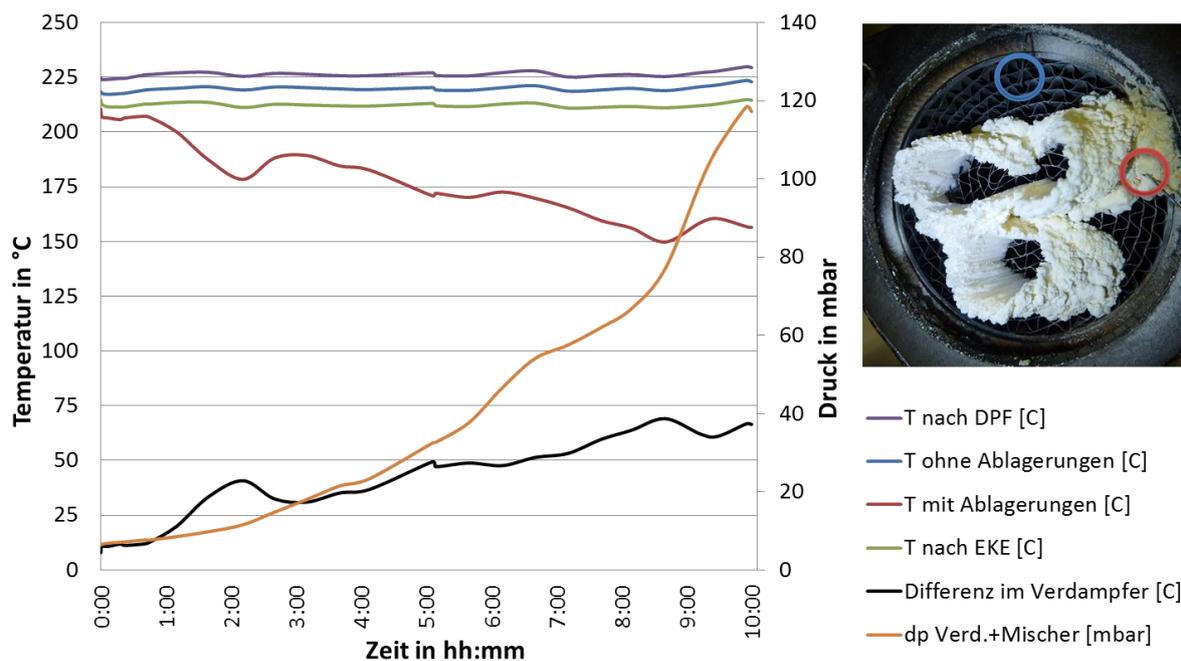


Abbildung 6.75: Temperaturen und Gegendruckverhalten am Verdampfer während des 10-stündigen Testlaufs.

Da sich zeigte, dass der Einsatz eines Verdampfers nur bedingt geeignet ist um Ablagerungen in Entkoppellelementen zu verhindern, wurden weitere Maßnahmen auf Ihre Tauglichkeit untersucht. Diese betreffen das EKE selbst und sind in Abbildung 6.76 zu sehen.

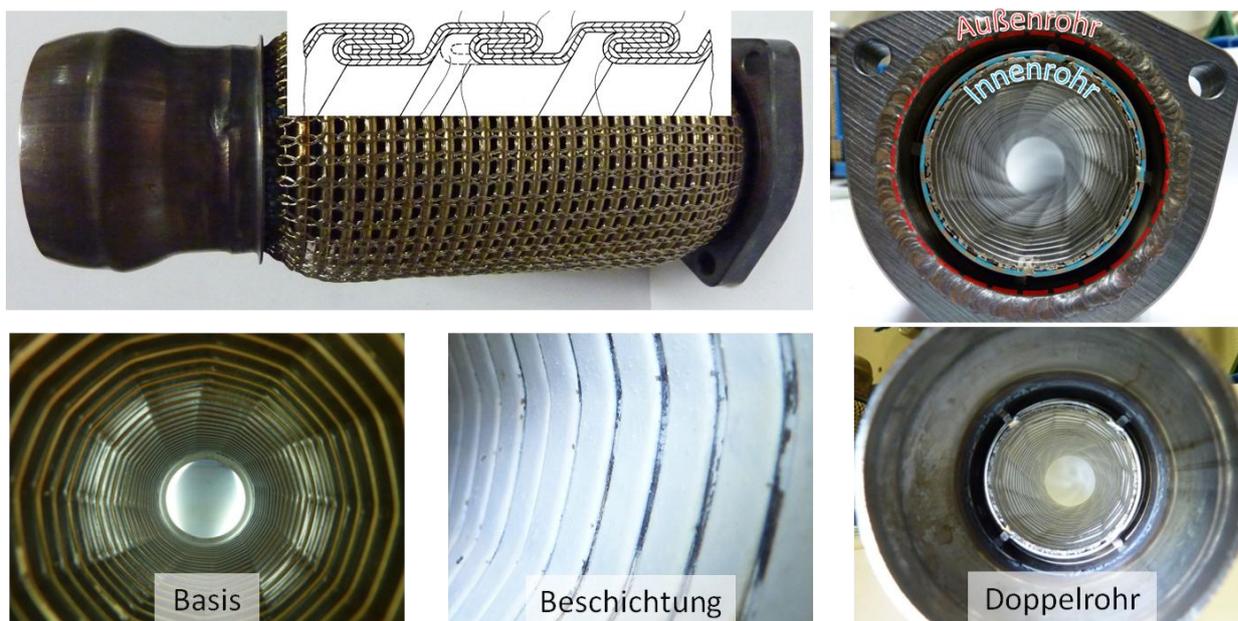


Abbildung 6.76: Konstruktive Maßnahmen am Agraftschlauch zur Reduktion der Ablagerungsbildung im EKE.

Diese konstruktiven Maßnahmen betreffen zum einen eine Hydrolyse-Beschichtung der Innenwand und zum anderen eine Ausführung als Doppelrohr.



Abbildung 6.77: Ablagerungen (rot gerahmt) in einem EKE mit Hydrolyse-Beschichtung.

Die Hydrolyse-Beschichtung hätte zudem, wie auch der in Kapitel 6.1.2 beschriebene Mischer, den Vorteil die chemische Reaktion zur Ammoniakumwandlung zu beschleunigen. Ihr Erfolg eine Ablagerungsbildung zu unterbinden hält sich aber, wie in Abbildung 6.77 zu sehen, in Grenzen. Da bei diesem Versuch auf einen Verdampfer verzichtet wurde, kam es am Mischer nur zu geringen Ablagerungen von etwa einem Gramm im Vergleich zu etwa 60g in vorher gezeigten Ergebnissen (Abbildung 6.73). Die Reduktionsmittelmassen kamen daher bis in das EKE und lagerten sich dort mit 9g stärker an, als bisher. Negativ hinzu kommt, dass bereits nach einem 10-stündigen Versuchslauf die Hydrolysebeschichtung von der Agraffschlauch-Oberfläche losgelöst wird (Abbildung 6.77 - blaue Markierung). Die Standfestigkeit der Beschichtung ist daher nicht gegeben und bestätigt die Befürchtungen aus Kapitel 6.1.2.

Das Doppelrohr wurde ebenfalls ohne Verdampfer untersucht. Es weist zwar im EKE ebenfalls Ablagerungen von 18g auf, diese befinden sich jedoch nur im inneren Rohr. Der Spalt zwischen den Rohren (Abbildung 6.78 – grüne Markierung) ist frei von Ablagerungen. Er kann aber von heißem Abgas durchströmt werden. Dies führt zu höheren Temperaturen des Innenrohrs bei Hochlastpunkten, als es an der

Außenwand möglich wäre. Somit ist ein Abbau der Ablagerungen im Doppelrohr-EKE leichter möglich.

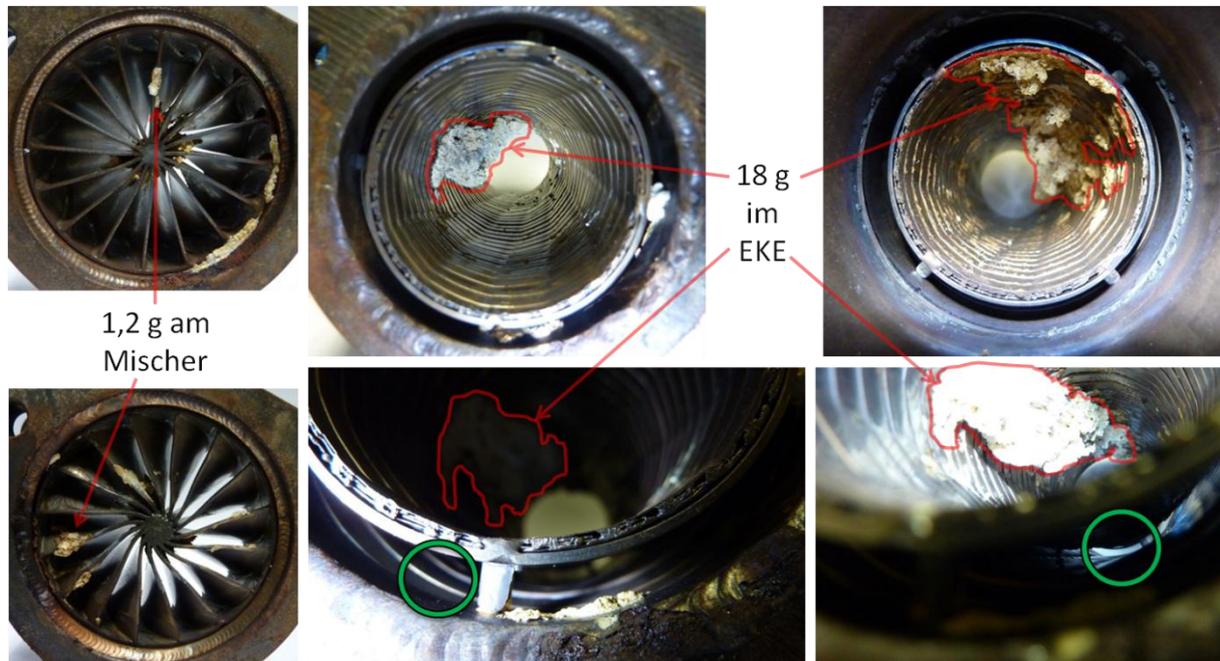


Abbildung 6.78: Ablagerungen (rot gerahmt) in einem als Doppelrohr ausgeführten EKE.

Es ist somit kein reibungsverstärkender Harnstoffsand im Entkoppelelement zu erwarten. Die Lebensdauer des Bauteils kann verlängert werden.

Des Weiteren konnten Ergebnisse aus Kapitel 6.1.4 mittels Gleichverteilungsmessungen bestätigt werden. Der engere Innenrohrdurchmesser verbessert die Durchmischung von Abgas und Reduktionsmittel. Gleichzeitig bleibt der Druckanstieg auf Grund des weiterhin anströmbaren Außenringes in akzeptablen Größen. Während in einem Hochlastpunkt der Mischer in Kombination mit dem Basis-EKE (Abbildung 6.76 – links unten) 130mbar Abgasgegendruck erzeugt, kommt die Kombination mit dem Doppelrohr-EKE auf 160mbar.

Diese Bauform ist auch für die in Kapitel 6.1.7 vorgestellte Abgasanlage zu empfehlen. Der darin gezeigte Lösungsansatz mit Verlegung der Dosierposition nach EKE und Gegenstromdosierung auf Prallbleche zeigte zu viele Nachteile, die mit einem Doppelrohr-EKE zu kompensieren sind. Da beide Varianten ein ähnliches Abgasgegendruckniveau aufweisen, lässt auch die in Kapitel 6.2.1 definierte Abwertung der Gleichverteilung für diesen Fall keine Nachteile der Doppelrohrkonstruktion erkennen.

Fazit: Zur Vermeidung von Ablagerungen und damit verbundenen Schäden in Entkoppelementen kommt der Einbau eines Verdampfers wie gezeigt nicht in Frage. Die Maßnahme der Hydrolysebeschichtung stellt derzeit aus Standfestigkeitsgründen (wie bereits in Kap. 6.1.2 angedeutet) auch keine Alternative dar. Das Doppelrohr stellt durch der Ablagerungsvermeidung im Außenrohr und erwähnte Vorteile in der Gleichverteilung die beste konstruktive Lösung dar. Ob alternative kostengünstigere konstruktive Maßnahmen am Entkoppelement auf geringerem Gegendruckniveau ähnlich erfolgreich sein können, sollte in weiteren Forschungsarbeiten geprüft werden.

6.5 Konstruktive Maßnahmen zur schnelleren Erreichung der Betriebstemperatur des SCR-Systems

Neben den bisher gezeigten Problemstellungen der guten Gleichverteilung des Reduktionsmittels in der Abgasanlage und der Neigung zur Ablagerungsbildung, ist vor allem die Erreichung der Start-Temperatur für das SCR-System von großer Bedeutung. Dies beschränkt sich nicht nur auf die Light-Off-Temperatur des SCR-Katalysators. Diese kann durch unterschiedliche Beschichtungen beeinflusst werden. Auch die Abgastemperatur in der Mischstrecke ist von großer Bedeutung. Messungen zeigten, dass bei Abgastemperaturen unter 180°C auch die Verdampfung des Reduktionsmittels für Probleme sorgt. Daher erfolgt die Dosierfreigabe bei vielen SCR-Systemen erst ab einer Abgastemperatur von etwa 180°C. Die Auswirkung dieser Temperaturschwelle auf Testläufe wie den Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) lässt sich aus Abbildung 6.79 erahnen. Dargestellt ist ein am Motorenprüfstand aufgezeichneter NEFZ aus einem Projekt am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik. In schwarz ist das Geschwindigkeitsprofil des Fahrzyklus zu erkennen. Die grüne Linie zeigt den Temperaturverlauf nach DPF. Hier würde in aktuellen SCR-Systemen der Injektor des SCR-Systems untergebracht werden. In den später folgenden Abgasanlagenkomponenten liegt die Abgastemperatur entsprechend tiefer.

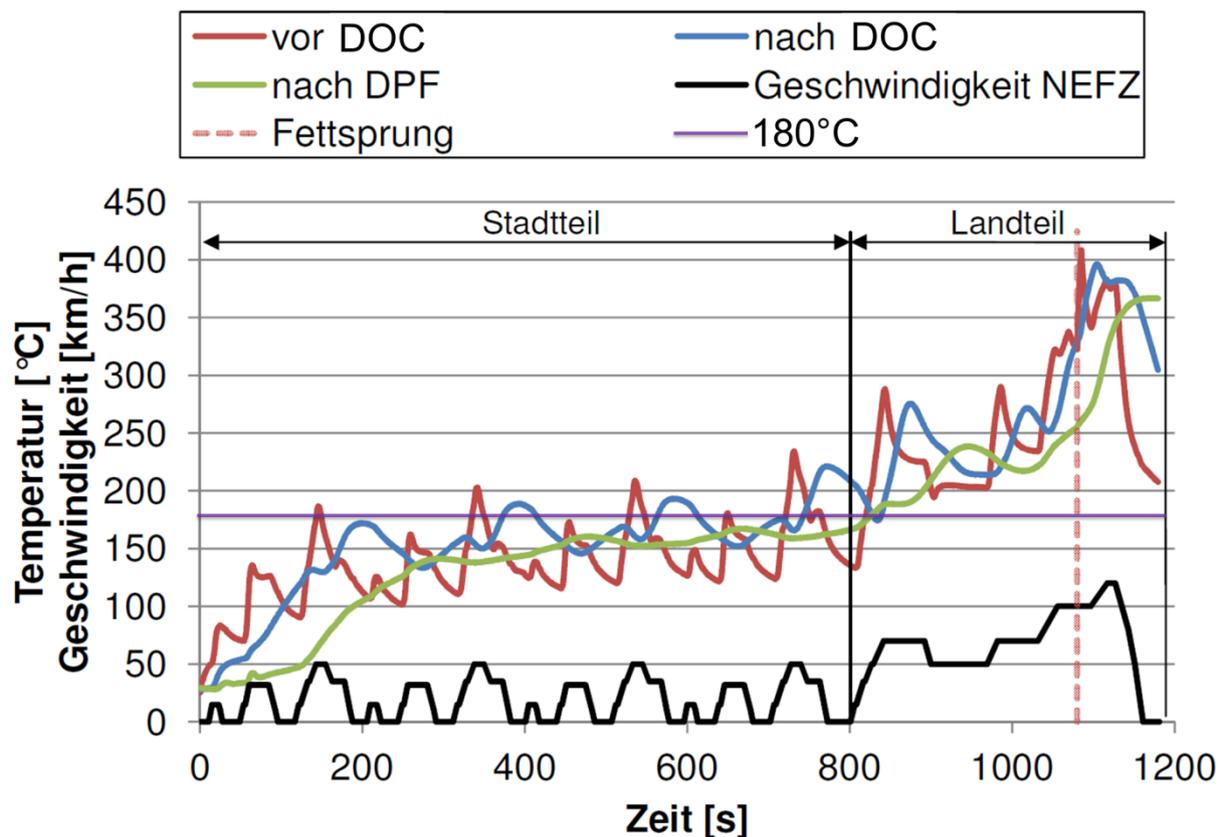


Abbildung 6.79: Temperaturverlauf in einer Dieslabgasanlage während eines NEFZ. [132]

Durch die thermisch trägen Massen von DOC und DPF wird die Temperatur nach DPF stark geglättet. Der oben erwähnte Freibewert von 180°C nach DPF wird erst nach etwa 820 Sekunden erreicht. Die Dosierung und folglich erste Reduktion der Stickoxide kann daher erst im außerstädtischen Bereich des NEFZ erfolgen. Auch wenn moderne Strategien zur Erhöhung der Abgastemperatur angewendet werden können, bringen diese einen Kraftstoffverbrauchsnechtel mit sich. Die Funktion des aufwendigen und teuren SCR-Systems setzt somit erst sehr spät ein.

Auf Grund dieser Problematik wird angestrebt das SCR-System näher zum Motor zu bringen. Dabei behilflich ist die neue technologische Möglichkeit Dieselpartikelfilter mit einer selektiven katalytischen Beschichtung (SDPF) zu versehen. Im Vergleich zur bisherigen Anordnung des SCR-Katalysators im Unterboden des Fahrzeuges führt dies zu einem Temperaturvorteil von zirka 30°C [86]. Dies bedeutet aber auch, dass die Dosierstelle zwischen Oxidationskatalysator und SDPF angeordnet werden muss. (Die hier untersuchten Anlagen weichen daher vom in Kapitel 5.1 gezeigten Prüfstandschemata ab.) Da auch der Partikelfilter aus Temperaturgründen nicht zu weit vom Motor entfernt werden sollte, bewirkt dies eine starke Reduktion der Mischstrecke. Dies ist jedoch, wie in Kapitel 6.1.4 gezeigt, einer guten

Durchmischung nicht zuträglich. In [Abbildung 6.80](#) und [Abbildung 6.81](#) ist jeweils eine Möglichkeit der Dosierung vor dem SDPF dargestellt.

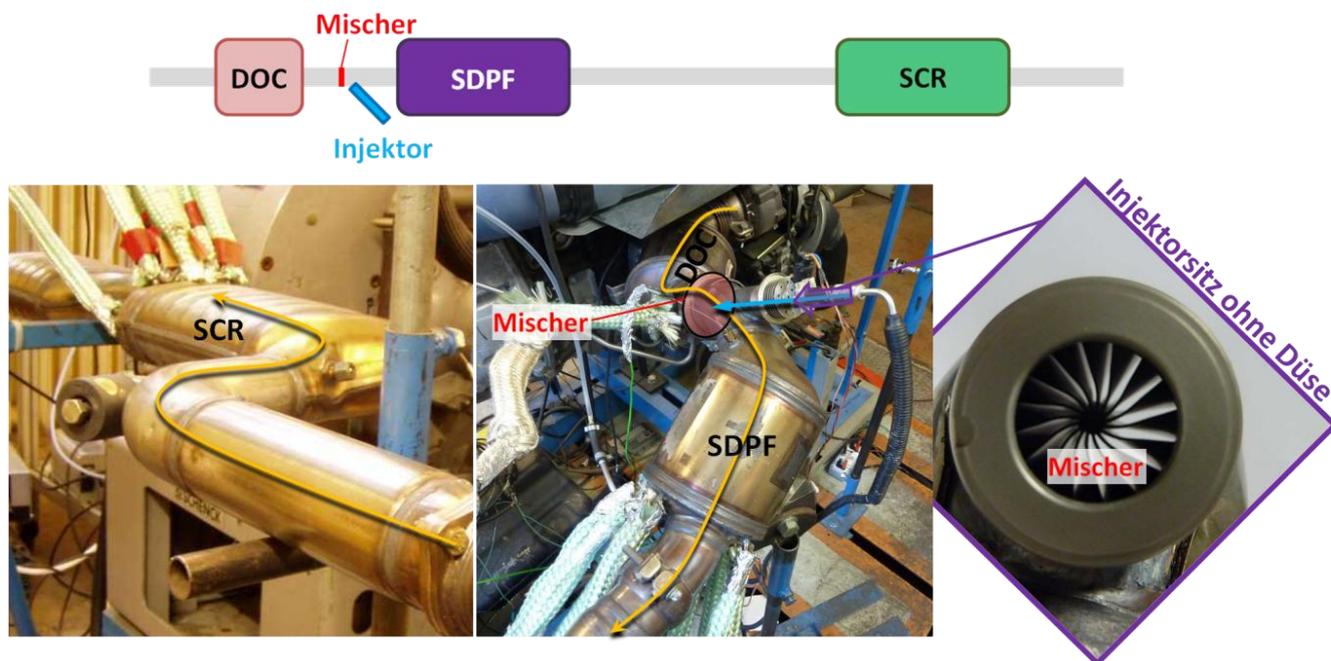


Abbildung 6.80: AdBlue®-Dosierung vor SDPF an einer X204-Abgasanlage.

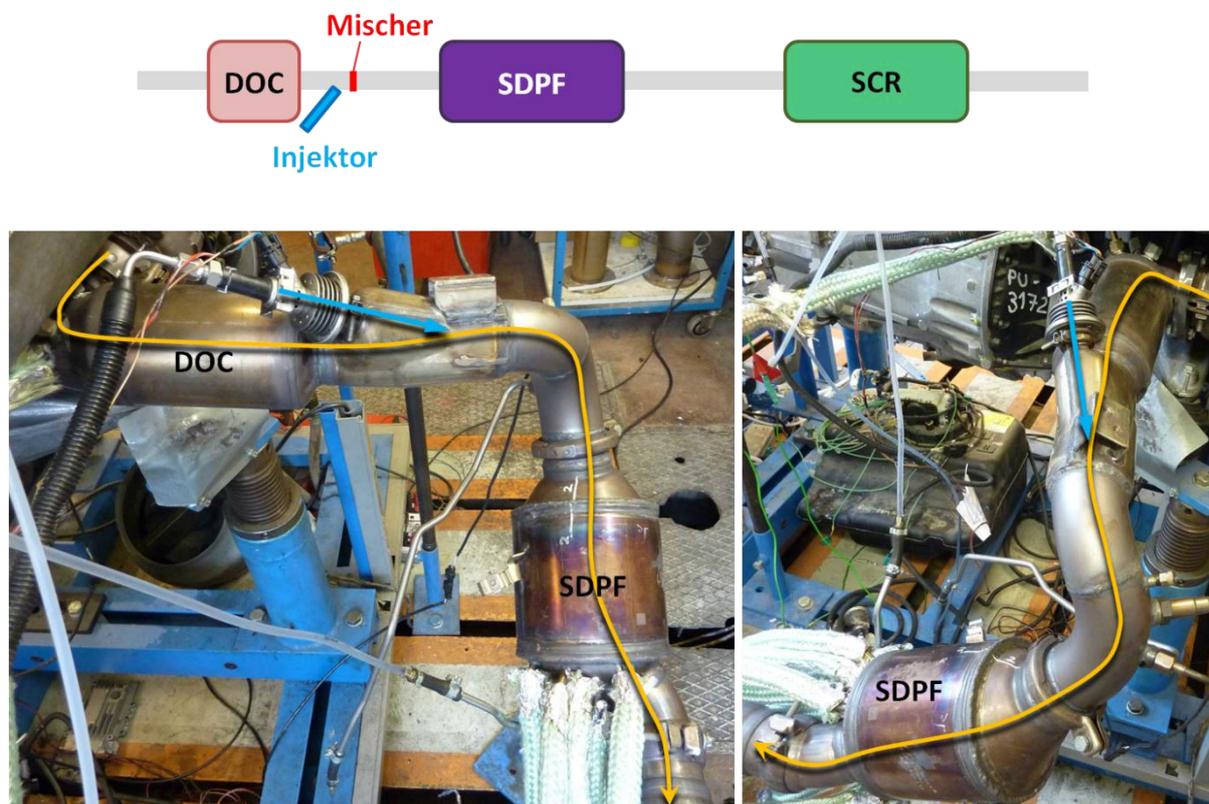


Abbildung 6.81: AdBlue®-Dosierung vor SDPF an einer W212-Abgasanlage.

Beide Anlagen wurden nach dem SDPF mit einem weiteren SCR-Katalysator ausgeführt, um das eher geringe Volumen des SDPF für die selektive katalytische Reaktion zu vergrößern und möglichen auftretenden Ammoniakslupf durch den SDPF in einem späteren Unterbodenkat zu weiterer NO_x-Reduktion zu nutzen.

Die Abgasanlage in Abbildung 6.80 dosiert das Reduktionsmittel gegen die Strömungsrichtung um die Mischstreckenlänge bis zum Eintritt in den SDPF theoretisch zu verlängern. Das Spray benetzt dabei die Rückseite eines Mischers. Die in anderen Kapiteln negativ beurteilte Gegenstromdosierung hat hier jedoch gleichsam Gültigkeit. Darüber hinaus wird die Düse auf Grund der Anordnung vor dem DPF verstärkter Verschmutzung ausgesetzt. Rußpartikel können in die Düse vordringen und zu einem Defekt führen.

Um diesen ungünstigen Bedingungen entgegenzuwirken und die Harnstoffdosierung in Strömungsrichtung ausführen zu können, musste die Mischstrecke verlängert werden. Dies entfernt den SDPF etwas weiter vom Motor (Abbildung 6.81).

Da in beiden Fällen auch ein Unterbodenkatalysator zum Einsatz kommt, kann die Gleichverteilung sowohl nach SDPF, als auch nach dem Unterbodenkat ermittelt werden. In Abbildung 6.82 ist daher neben den Gleichverteilungsergebnissen nach SDPF auch das Ergebnis nach dem Unterbodenkat der X204-Abgasanlage (Abbildung 6.80) angegeben.

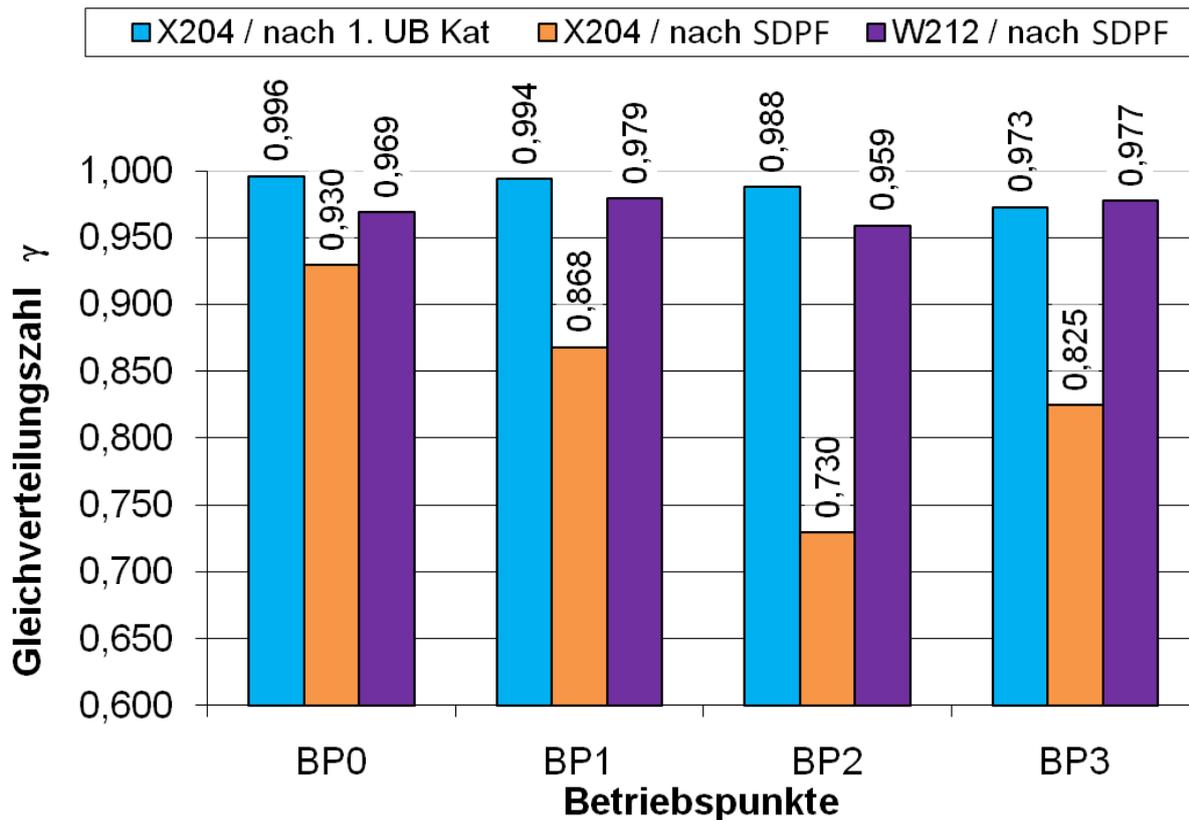


Abbildung 6.82: Gleichverteilungsergebnisse bei Dosierung vor SDPF in 2 unterschiedlichen Anlagenkonzepten zur AdBlue®-Einbringung.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei kurzer Dosierstrecke und Gegenstromdosierung auch vor SDPF keine gute Durchmischung für den SDPF erfolgen kann. Erst nach dem Unterbodenkat ergeben sich gute Gleichverteilungswerte. Die Anlage mit der etwas längeren Einlaufstrecke vor dem Partikelfilter ermöglicht eine erheblich bessere Benetzung des SDPF und somit effektivere Nutzung der selektiven katalytischen Beschichtung. Die Gleichverteilungswerte dieser Anlage entsprechen bereits nach dem SDPF jenen nach dem Unterbodenkat der anderen.

Fazit: Es ist also durchaus möglich die Dosierstelle bereits vor dem Partikelfilter anzuordnen um durch die schnellere Erwärmung ein früheres Aktivieren des SCR-Systems sowohl im Fahrzyklus, als auch im Alltagsbetrieb zu realisieren. In aktuellen Entwicklungsarbeiten beschäftigt man sich daher mit der Verbesserung der Eigenschaften von Partikelfiltern mit selektiver katalytischer Beschichtung. Zukünftige SCR-Systeme werden sich dieser Methode bedienen und wahrscheinlich den Standard der PKW-SCR-Systeme darstellen.

6.6 Beurteilung der Alternative NH₃-Gasdosierung

Eine andere Möglichkeit das Reduktionsmittel schon früh nach dem Kaltstart in den Abgasstrang einbringen zu können, stellt die Aufbereitung von Ammoniakvorläufersubstanzen in einem Nebenstromreaktor dar (siehe Kapitel 5.8). Das Ammoniak wird dann gasförmig in die Abgasanlage eingebracht. Um das Potential solcher Systeme abschätzen zu können wurden unterschiedliche Gas-Einbringungsarten auf Ihre Tauglichkeit überprüft.

Als Basis für diesen Vergleich dient die im vorherigen Kapitel vorgestellte W-212-Abgasanlage (Abbildung 6.81).

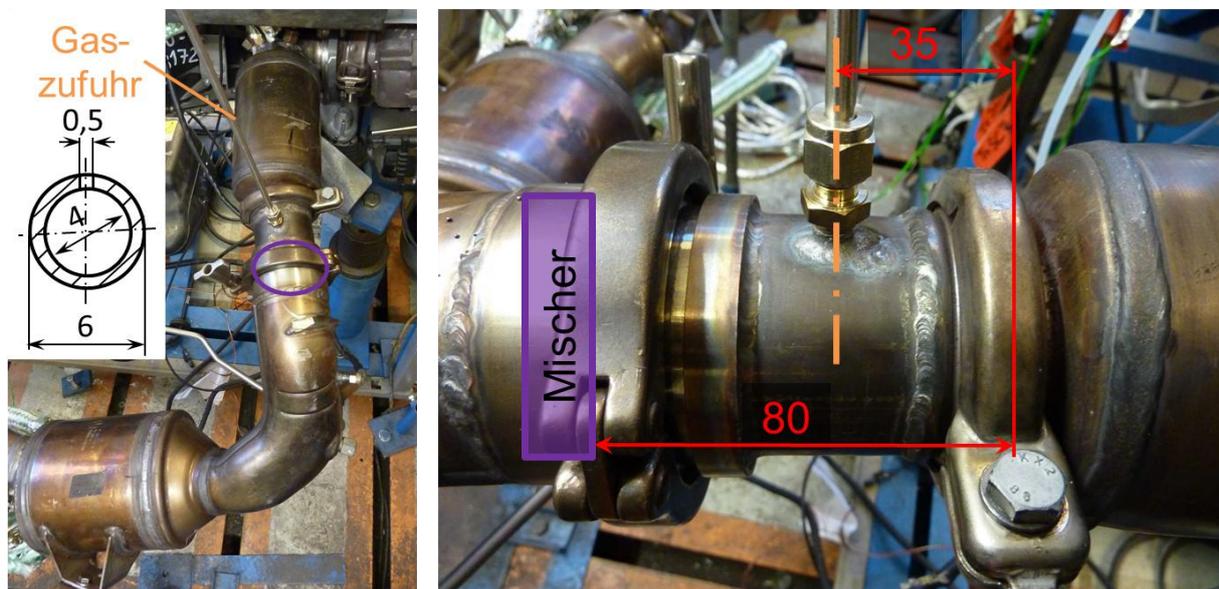


Abbildung 6.83: Gasdosierung über einzelnes Röhrrchen an adaptierter W-212-Abgasanlage.

Im ersten Schritt wurde das Ammoniakgas, wie in Abbildung 6.83 gezeigt, mit einem einzelnen Röhrrchen in das Abgasrohr eingebracht. Das Röhrrchen ist mit 8 wechselseitigen über die Röhrrchenlänge verteilten Bohrungen mit 0,5mm Durchmesser versehen, um das Gas nicht nur punktuell einzubringen. In einer Weiterentwicklung wurde das Einzelrohr durch einen Rohr-Stern ersetzt. Die Konstruktion (Abbildung 6.84) besteht aus 6 Röhrrchen mit jeweils 2 Auslassbohrungen, die in ihrer Anordnung zwei Kreise bilden. Somit kann das Ammoniakgas noch besser im Abgasstrang verteilt werden. Beide Varianten wurden sowohl mit, als auch ohne Mischer in der Zulaufstrecke zum SDPF untersucht. Der Abstand zwischen Gaseinbringung und Eintrittsquerschnitt in den Mischer beträgt jeweils 45mm.

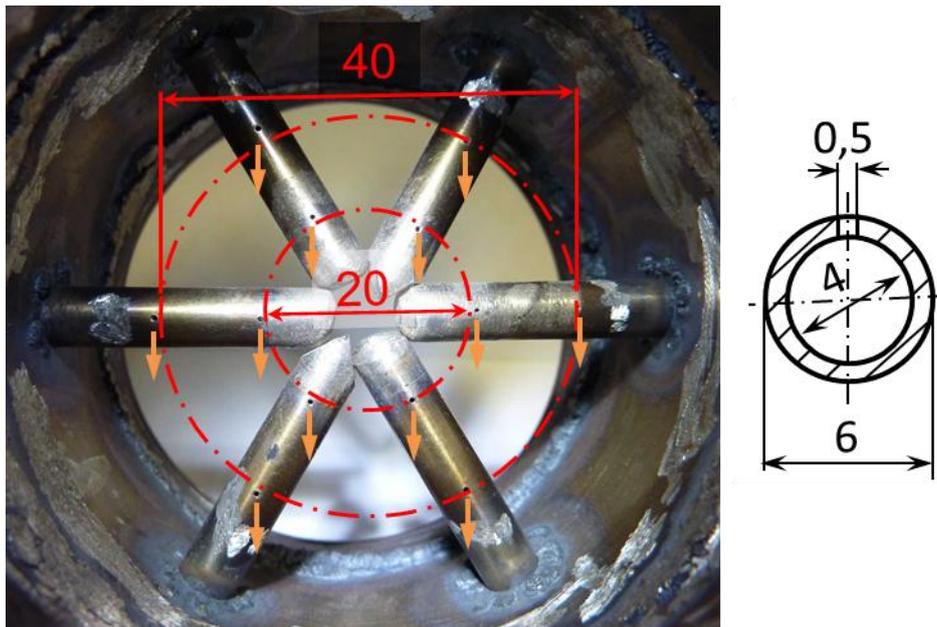


Abbildung 6.84: Gasdosierung über Rohr-Stern an adaptierter W-212-Abgasanlage.

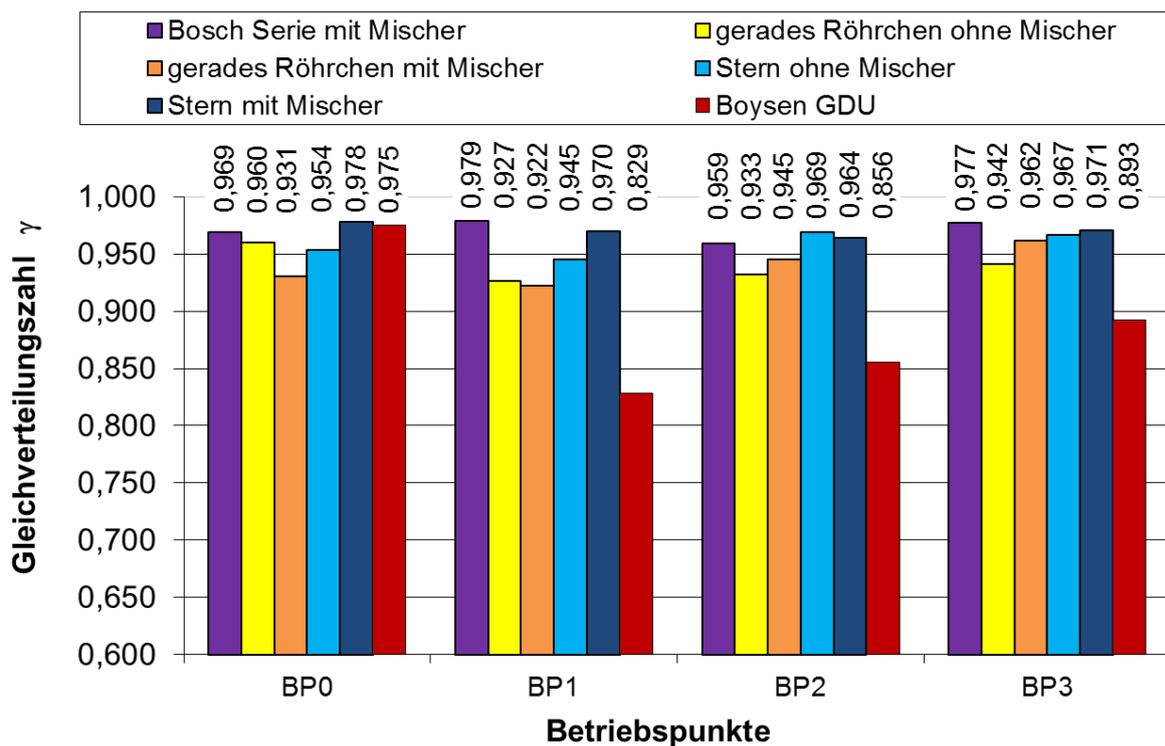


Abbildung 6.85: Gleichverteilungsergebnisse nach SDPF verschiedener Abgasanlagen mit Gasdosierung im Vergleich zu einer AdBlue®-Dosierung.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.85 angegeben. Die 4 beschriebenen Varianten sind dabei der aus Kapitel 6.5 bekannten Abgasanlage W-212 mit AdBlue®-Dosierung mittels Bosch-Seriendüse gegenübergestellt, welche als Basis diente. Des

Weiteren sind die Ergebnisse der Boysen Gas-Dosing-Unit (GDU) aus Abbildung 6.86 angegeben.

Es wird ersichtlich, dass auch die Durchmischung von gasförmigem Ammoniak eine anspruchsvolle Herausforderung darstellt. Das bisher verwendete System der AdBlue®-Dosierung ist in allen Betriebsbereichen ebenbürtig oder überlegen. Auch auf ein Mischelement kann mit der Gasdosierung nicht verzichtet werden. Dies hätte einen großen Vorteil für die Gasdosierung darstellen können. Darüber hinaus erhöht die Konstruktion der Gasdosiereinheit die Komplexität des Systems. Dies gilt vor allem für die Boysen GDU, welche auch von den Gleichverteilungsergebnissen weit hinter ihren Erwartungen bleibt.

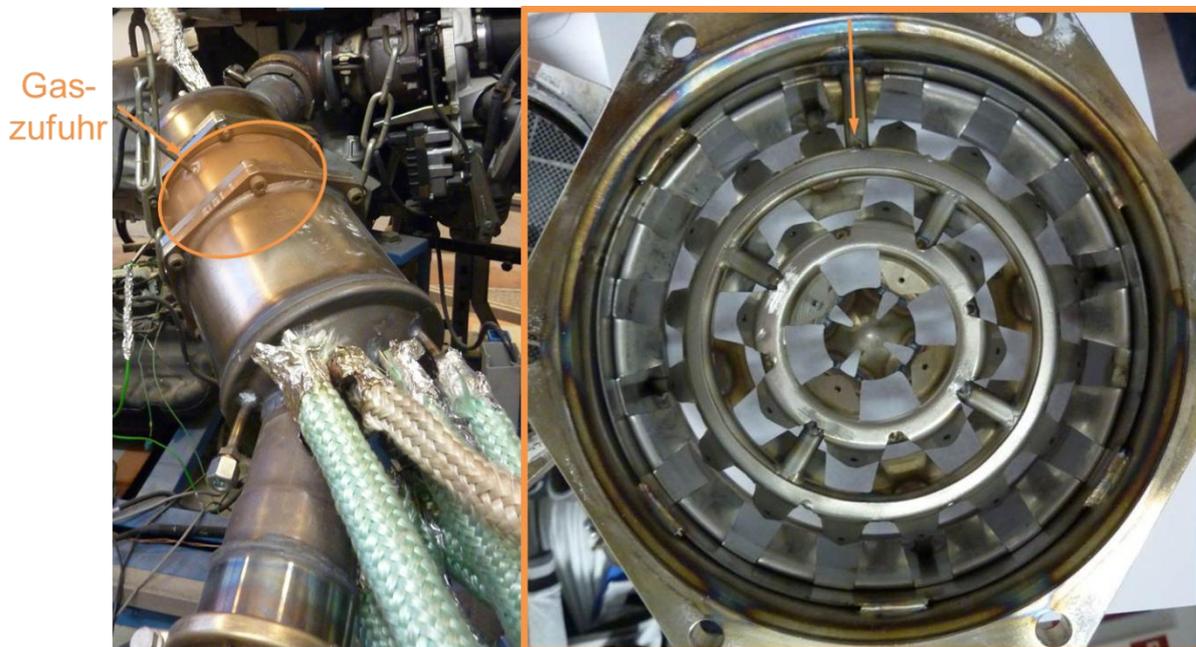


Abbildung 6.86: Aufwendige Konstruktion einer Kombibuchse aus DOC und SDPF mit dazwischengeschalteter Boysen Gas-Dosing-Unit.

Fazit: Unter Berücksichtigung der gleichzeitig sehr hohen Systemkosten für ein in Kapitel 5.8 beschriebenes Aufbereitungssystem stellt die Gasdosierung zum jetzigen Zeitpunkt keine Alternative zur Selektiven Katalytischen Reduktion mit AdBlue® dar. Die wissenschaftliche Untersuchung unterschiedlicher Methoden der Gasdosierung zeigen, dass sich mit dem alternativen Reduktionsmittel kein Vorteil bezüglich Gleichverteilung und in weiterer Folge kein Vorteil im Bereich des Gegendruckverhaltens erzielen lässt.

7 Ausblick

Wirft man einen Blick auf die Zukunft der SCR-Technologie, kann auf Grund der Ergebnisse in Kapitel 6.6 der Einsatz einer Gasdosierung kurzfristig ausgeschlossen werden.

Auf Grund der in Kapitel 6.5 beschriebenen Problematik der späten Erreichung der Light-Off-Temperatur des SCR-Systems wird die Dosierstelle künftig immer näher zum Motor rücken. Die Weiterentwicklung der Variante SDPF ist daher bereits jetzt starker Bestandteil der Vorentwicklung großer Automobilkonzerne. Dies bringt jedoch neue Probleme, die eine Reihe interessanter Forschungsgebiete mit sich bringen.

Ein Hauptpunkt aktueller Forschungsarbeiten stellt die selektive katalytische Beschichtung von Partikelfiltern dar. Die verwendeten Edelmetalle, ihre Mengen und deren Verhältnisse zueinander sind hierbei als Variablen zu sehen. Auch die Form der Strömungskanäle zur Bildung möglichst großer Reaktionsflächen bei gleichzeitig geringem Abgasgedruck wird zwischen quadratisch und hexagonal variiert. Die Aufbringung der Beschichtung auf das Trägermaterial des DPF stellt eine weitere Herausforderung dar. Ziel dieser Arbeiten ist vor allem eine Verbesserung des Instationärverhaltens im PKW-Betrieb. Über eine verbesserte Speicherfähigkeit von Ammoniak im Katalysator kann einerseits Ammoniakschlupf vermieden werden, wenn kurzzeitig zu viel vorhanden ist. Andererseits kann das eingespeicherte Ammoniak wieder freigegeben werden, wenn mehr Stickoxide vorhanden sind. So lassen sich konstant hohe Umsätze erreichen. Doch auch für die Einspeicherung des Reduktionsmittels im SDPF ist eine Gleichverteilung des eingedüsten AdBlue® über den Querschnitt von großer Bedeutung. Durch die kürzeren Mischstreckenlängen zwischen DOC und SDPF wird diese Aufgabe noch komplexer und man muss auf die Erfahrungen bisheriger Gleichverteilungsuntersuchungen – wie in dieser Arbeit – zurückgreifen.

Des Weiteren wird der Injektor durch die neue Positionierung noch höheren Temperaturen ausgesetzt. Dies gilt vor allem in Betriebszuständen wie der Partikelfilterregeneration. Da im Umfeld des Motors aus anderen technischen Gründen eine Kapselung des Gesamtsystems entsteht, wird der Einsatz luftgekühlter Injektoren nicht mehr zu realisieren sein. Der Vorteil der nahen Lage am Motor ist die leichtere Versorgung wassergekühlter Düsen mit Kühlmittel des Motors. Auch hier wird das Packaging über die verwendeten Wassertemperaturen entscheiden. Ob

Effekte wie flash boiling (Kapitel 6.3.4) auch dann noch ein Problem darstellen, oder es zu neuen Erscheinungen kommen wird, müssen weitere Untersuchungen zeigen.

Auch der Einfluss der Rußpartikel in einem SDPF auf das Umsatzverhalten der Stickoxide ist bisher nicht gänzlich geklärt. Können die Partikel bei der Speicherung von Ammoniak behilflich sein, oder kommt es zu ungewünschten chemischen Reaktionen? Wie verhält sich das Umsatzverhalten im Betriebszustand der DPF-Regeneration? Kann es im Partikelfilter langfristig zu einer Ablagerungsbildung kommen, oder wird dies durch die zeitweise hohen Temperaturen unterbunden?

Auch Veränderungen des Gesamtsystems Motor – Abgasanlage stellen die Forschung und Entwicklung vor neue Herausforderungen. So stellt zum Beispiel die Kombination von Hochdruck- und Niederdruck-AGR einen interessanten Baustein künftiger Dieselmotoren dar. Bei der bisher angewendeten Hochdruck-AGR wird das Abgas bereits vor dem Turbolader über einen Kühler zur Ansaugluft zurückgeführt. Der Einsatz eines SCR-Systems hat somit keine direkten Auswirkungen auf den Motor. Bei der Niederdruck-AGR hingegen, wird das Abgas erst nach dem Partikelfilter entnommen. Eine Dosierung von AdBlue® vor dem SDPF bringt somit die Gefahr einer Ammoniakrückführung in den Brennraum. Die Einflüsse auf die Verbrennung, die dabei entstehenden Emissionen und deren Auswirkungen müssen erst untersucht werden.

Im Bereich der Simulationsrechnung wurden mit den angeführten Arbeiten von Fischer [112], Smith [111] und Zöchbauer [113] bereits große Fortschritte bei Prognose der Tropfen-Wand-Interaktion in unterschiedlichen Betriebspunkten und folglich der Abschätzung im Bereich der Reduktionsmittelgleichverteilung erzielt. Die Beurteilung von Wandfilmbildung und damit einhergehender Ablagerungsbildung bedarf hingegen noch weiterer Forschungsarbeit um die Modellbildung zu perfektionieren.

Der Weg zur Entwicklung einer perfekten SCR-Abgasanlage für Personenkraftwagen ist also noch lange nicht zu Ende gegangen. Eine Fülle an Fragestellungen wird die Forscher und Entwickler auch künftig mit dem Thema der selektiven katalytischen Reduktion beschäftigen und die Basis weiterer wissenschaftlicher Arbeiten darstellen.

8 Zusammenfassung

Durch die Entwicklung wissenschaftlich reproduzierbarer Messmethoden zur Untersuchung der Aufbereitungsgüte, des Gegendruckverhaltens und der Ablagerungsneigung von Harnstoff in einer Diesellabgasanlage konnte eine große Anzahl an Untersuchungsergebnissen kreiert werden. Diese Messergebnisse bringen Lösungsansätze zur herausfordernden Gestaltung von Diesellabgasanlagen zur selektiven katalytischen Reduktion hervor.

Um die effektive Nutzung des eingebrachten flüssigen Reduktionsmittels AdBlue® garantieren zu können, ist eine optimale Aufbereitung und Gleichverteilung dieser Harnstoffwasserlösung unumgänglich. Es ist auszuschließen, dass dies künftig ohne die Verwendung eines Mischelementes realisiert werden kann. Über spezielle Eigenschaften wie geometrische Überdeckung, erhöhte Oberflächenrauigkeit und Hydrolysebeschichtungen können dessen positive Wirkung weiter erhöht werden. Einige dieser Maßnahmen wirken sich jedoch, wie beispielsweise die Reduktion des Rohrquerschnittes, negativ auf das Gegendruckverhalten der Abgasanlage aus.

Die unterschiedlichsten Abgasanlagen in verschiedensten geometrischen Kombinationen und Anordnungen zeigen jedoch deutlich, dass nicht nur die Beurteilung einzelner Komponenten sinnvoll ist, sondern nur über die sorgfältige Kombination aller relevanten Bauteile und Feinabstimmung der Parameter das SCR-System perfektioniert werden kann.

Es reicht nicht aus ein gutes Mischelement in eine vorhandene Abgasanlage zu integrieren, ohne auf die Zuströmgeometrie Acht zu geben. Sprayverwehungen in bestimmten Motorbetriebspunkten können beispielsweise mit einer Auslenkung des Dosierwinkels entgegengetreten werden. Das Einhalten einer Mindestmischstreckenlänge ist genauso ausschlaggebend wie die Positionierung des Injektors. Neben dem eben genannten Dosierwinkel ist auch die Distanz zum Mischer mit dem Spraykegelwinkel in Einklang zu bringen, um eine optimale Benetzung des Mischelementes zu gewährleisten. Auch die Spülung der Düsen Spitze mit heißem Abgas zur Minderung der Ablagerungsbildung ist im Fokus zu behalten. Dies kann wiederum ohne Berücksichtigung der Bauteiltemperaturen zu

irregulären Effekten bei den Dosiervorgängen und in späterer Folge zum Ausfall des Systems führen.

Um neben der bereits bekannten Gleichverteilungszahl (Uniformity-Index), als Parameter für die Aufbereitung und Durchmischung des Reduktionsmittels, auch den durch die Mischstrecke verursachten Gegendruck wissenschaftlich mit beurteilen zu können, wurde in dieser Arbeit eine neue Zahl definiert. In der *druckkorrigierten Gleichverteilungszahl nach Bitto* wird daher die Gleichverteilung bei hohen Abgasgegendrücken exponentiell abgewertet. Der negativen Bedeutung des Abgasgegendruckes für das Gesamtsystem wird somit erstmals Rechenschaft getragen.

Als Paradebeispiel für die Komplexität einer SCR-Abgasanlage kann das in Kapitel 6.1.7 vorgestellte Modell genannt werden. Es zeigt all jene Probleme, auf die in dieser Arbeit im Detail eingegangen wurde: Ein schadensanfälliges Entkoppelement in der relativ kurzen Mischstrecke, bauraumbedingt ungünstige Dosierposition, Prallbleche sowie konstruktiv bedingte Neigung zur Ablagerungsbildung an verschiedenen Anlagenkomponenten mit negativen Auswirkungen auf die Gleichverteilung, das Gegendruckverhalten und die Lebensdauer der Komponenten. Diese Abgasanlage könnte mit der Verkürzung des Entkoppelements, gleichzeitiger Verlängerung der Mischstrecke und modifizierter Dosierposition verbessert werden. Alternativ wäre der Einbau eines Doppelrohr-Entkoppelementes mit dadurch möglicher Dosierung vor diesem Bauteil ein Lösungsansatz zur Vermeidung der Schadensfälle und optimierter Gleichverteilung.

Des Weiteren werden mit Dosierpositionen vor dem Partikelfilter Wege des motornahen SCR-Katalysators zur Gestaltung künftiger SCR-Systeme aufgezeigt, die wohl in den nächsten Jahren zum Stand der Technik zählen werden. Effekte wie Ablagerungsbildung an der Düsen spitze und flash boiling bei hoher thermischer Belastung, die in dieser Arbeit beleuchtet und auf ihre Grenztemperatur hin untersucht wurden, werden an dieser Einbaustelle verstärkt von Bedeutung sein.

Der Nutzung alternativer Reduktionsmittel wird hingegen, basierend auf Untersuchungen unterschiedlicher Gasdosierungsvorrichtungen, keine positive Zukunftsaussicht bescheinigt.

Um all die Anforderungen an eine moderne SCR-Abgasanlage erfüllen zu können, ist es erforderlich die Einbindung des SCR-Systems schon frühzeitig bei Konzeptionierung eines neuen Fahrzeuges zu berücksichtigen. So können bauraumbedingte Zwänge so weit als möglich in Grenzen gehalten und nötige Anpassungen im Motorraum und am Fahrzeugunterboden vorgenommen werden.

9 Literaturverzeichnis

- [1] **Reif, K.:** *Diselmotor-Management im Überblick*. [Hrsg.] Robert Bosch GmbH. 1. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2010. ISBN 978-3-8348-1313-8.
- [2] **Europäisches Parlament.:** Richtlinie 70/220/EWG des Rates vom 20. März 1970 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Abgase von Kraftfahrzeugmotoren mit Fremdzündung. In : Amtsblatt der Europäischen Union, 11.4.1970, L81, S15.
- [3] **Europäisches Parlament.:** Richtlinie 91/441/EWG des Rates vom 26. Juni 1991 zur Änderung der Richtlinie 70/220/EWG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen. In : Amtsblatt der Europäischen Union, 30.8.1991, L242, S.1-106.
- [4] **Europäisches Parlament.:** Richtlinie 93/59/EWG des Rates vom 28. Juni 1993 zur Änderung der Richtlinie 70/220/EWG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen. In : Amtsblatt der Europäischen Union, 28.7.1993, L186, S.21-27.
- [5] **Europäisches Parlament.:** Richtlinie 94/12/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. März 1994 über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/220/EWG. In : Amtsblatt der Europäischen Union, 19.4.1994, L100, S.42-52.
- [6] **Europäisches Parlament.:** Richtlinie 96/69/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Oktober 1996 zur Änderung der Richtlinie 70/220/EWG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von KFZ. In : Amtsblatt der Europäischen Union, 1.11.1996, L282, S.64-67. Berichtigung in ABI. L83 vom 25.3.1997,S.23.
- [7] **Europäisches Parlament.:** Richtlinie 98/69/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 1998 über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie

70/220/EWG des Rates. In : Amtsblatt der Europäischen Union, 28.12.1998, L350, S.1-57 Berichtigung in ABl. L104 vom 21.4.1999, S31.

- [8] **Europäisches Parlament.:** Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission vom 18. Juli 2008 zur Durchführung und Änderung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von *leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsarbeiten für Fahrzeuge*. In : Amtsblatt der Europäischen Union, 28.07.2008, L199, S.1-136.
- [9] **Europäisches Parlament.:** Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2007 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen *. (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reperatur- und Wartungsinformation für Fahrzeuge*. In : Amtsblatt der Europäischen Union, 29.06.2007, L171, S.1-16.
- [10] **Europäisches Parlament.:** Richtlinie 2002/80/EG der Kommission vom 3.Oktober 2002 zur Anpassung der Richtlinie 70/220/EWG des Rates über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen an den technischen Fortschritt. In : Amtsblatt der Europäischen Union, 28.10.2002, L291, S.20-56.
- [11] **Tober, W.:** *Entwicklung der Schadstoff- und CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs in Österreich und Deutschland bis 2030 und Ableitung des Handlungsbedarfs*. Wien : Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der TU-Wien, 2012. Dissertation.
- [12] **Dünnebeil, F. und Lambrecht, U.:** *Entwicklung der NO_x- und NO₂-Emissionen im Innerortsverkehr in Baden-Württemberg und Deutschland bis zum Jahr 2015*. Heidelberg : ifeu - Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg GmbH, 2007.
- [13] **Geringer, B.:** *Skriptum zur Vorlesung 315.108 - Verbrennungskraftmaschinen Grundzüge*. Wien : Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau der TU-Wien, 2006. B06006.

- [14] **Müller, W., Lappas, I. und Geißelmann, A.:** *Abgasnachbehandlungssysteme für Nutzfahrzeuge in On- und NonRoad-Anwendungen.* Düsseldorf : VDI-Verlag GmbH, 2009. S. S256-277. Bd. Tagungsband zu 30. Internationales Wiener Motorensymposium. VDI Fortschritt-Bericht Band 697.
- [15] **Zahoransky, R.A.:** *Energietechnik - Systeme zur Energieumwandlung.* Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2009. ISBN: 978-3-8348-0488-4.
- [16] **Calvo Zueco, S., et al.:** *Harnstoff-SCR-Systeme im Focus - Neue Herausforderungen bei der Entwicklung von Abgasanlagen.* Esslingen : J. Eberspächer GmbH & Co. KG, MTZ 09/2007, Jahrgang 68.
- [17] **Frank, W., Hühwohl, G. und Maurer, B.:** *SCR-Technologie für Nutzfahrzeuge.* Unna : Purem Abgassysteme GmbH & Co. KG, MTZ 972004, Jahrgang 65.
- [18] **Bitto, R. und Weissel, W.:** *Unterlagen zur Laborübung Fahrzeugantriebe - Abgas und Energie LVA Nr.315.739.* Wien : Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der TU-Wien, 2012.
- [19] **Basshysen, R. v.:** *Handbuch Verbrennungsmotor. 2. Auflage.* : Vieweg+Teubner Verlag, 2002. ISBN: 3528139331.
- [20] **Weissel, W.:** *Entwicklung von neuen Ansätzen zur On Board Diagnose von Diesel-Abgasnachbehandlungssystemen.* Wien : Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der TU Wien, 2010. Dissertation.
- [21] **Schäfer, F. und van Basshysen, R.:** *Schadstoffreduzierung und Kraftstoffverbrauch von PKW-Verbrennungsmotoren.* Wien, New York : Springer-Verlag, 1993. Bd. 7.
- [22] **Mayer, T.:** *Feststoff-SCR-System auf Basis von Ammoniumcarbamat.* Kaiserslautern : TU Kaiserslautern, 2005. Dissertation.
- [23] **Pschyrembel.:** *Klinisches Wörterbuch. 260. Auflage.* Berlin : de Gruyter, 2004.
- [24] **Merker, G.P. und Stiesch, G.:** *Technische Verbrennung. Motorische Verbrennung.* Stuttgart : Vieweg+Teubner in GWV Fachverlage GmbH, 1999. 978-3-519-06381-0.

- [25] **Schmitz, Th., Hassel, D. und Weber, F.-F.:** *Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffe im Abgas unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte.* 1999. Berichte des Forschungszentrums Jülich.
- [26] **Lacroix, A.:** *Untersuchung eines Harnstoff-SCR-Systems zur Stickoxidminderung im Diesel-PKW-Praxiseinsatz.* Kaiserslautern : TU Kaiserslautern, 2005. Dissertation.
- [27] **Heng, W.K., Hamrin, D. und Heywood, J.B.:** *An Overview of Hydrocarbon Emissions Mechanisms in Spark-Ignition Engines.* 1993. SAE Technical Paper Series. 932708.
- [28] **Stein, S.:** *On-Board-Reduktionsmittelherstellung zur NOx-Emissionsminderung bei Dieselfahrzeugen.* Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. 2005. Dissertation.
- [29] **Eastwood, P.:** *Critical Topics in Exhaust Gas Aftertreatment.* : Wiley and Sons Ltd., 2000.
- [30] **Römpp, H., Falbe, J. und Regitz, M.:** *Römpp Chemie Lexikon. 9. erweiterte und neuüberarbeitete Auflage.* Stuttgart, New York : Georg Thieme Verlag, 1995. ISBN 3131078308.
- [31] **Lavoie, G., Heywood, J.B. und Keck, J.C.:** *Experimental and Theoretical Study of Nitric Oxide Formation in Internal Combustion Engines.* : Combustion Science and Technology, 1970.
- [32] **Pischinger, F.:** *Vorlesungsumdruck Verbrennungsmotoren.* Aachen : Lehrstuhl für Angewandte Thermodynamik der RWTH-Aachen, 1997. Bd. 2, 18. Auflage.
- [33] **Scholz, E.:** *Untersuchungen zur homogenen Dieselerverbrennung bei innerer Gemischbildung.* Karlsruhe : TH Karlsruhe, 2003. Dissertation.
- [34] **Lackner, M.:** *Zündung - Skriptum zur Vorlesung 166.146.* Wien : Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik & Technische Biowissenschaften der TU-Wien, 2012.
- [35] **Thomas, D. und Vanderschuren, J.:** *Nitrogen Oxides Scrubbing with Alkaline Solutions-Analysis and prediction of the liquid phase composition for the*

- absorption of nitrogen oxides into aqueous solutions*. s.l. : Chemical Engineering & Technology Vol.23, 2000.
- [36] **Spurk, P.C., et al.:** *Die NO₂-Bildung am DOC/DPF-System - Eine Systemanalyse*. Ludwigsburg : 6. Int. Forum Abgas- und Partikel-Emissionen, 2010.
- [37] **Philipp, S.:** *Untersuchungen zur NO_x-Einspeicherung an Ceroxid mittels IR-Spektroskopie in diffuser Reflexion*. Darmstadt : TU Darmstadt, 2007. Dissertation.
- [38] **Heywood, J.B.:** *Internal combustion engine fundamentals*. New York : McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [39] **Weissel, W., et al.:** *Herausforderung an zukünftige Abgasnachbehandlung bei PKW-Dieselmotoren*. Dresden : 8. FAD-Konferenz, 2010.
- [40] **Fujdala, K.L., et al.:** *Rational Design of Oxidation Catalysts for Diesel Emission Control*. 2008. SAE Technical Paper Series 2008-01-0070.
- [41] **Wernli, H. und Peter, T.:** *Atmosphäre*. Zürich : Institute for Atmospheric and Climate Science der Eidgenössischen Technische Hochschule Zürich, 2013. Skript zur Vorlesung HS 2013.
- [42] **Crutzen, P.J.:** *Mein Leben mit O₃, NO_x und anderen YZO_x-Verbindungen (Nobel-Vortrag)*. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1996. Bd. Angew. Chem. Vol.108.
- [43] **Frank, E.:** *Modellierung und Simulation der katalysierten Reduktion von NO_x mittels Proben in sauerstoffreichen Abgasen an Wabenkatalysatoren*. Karlsruhe : Universität Karlsruhe, 2002. Dissertation.
- [44] **Porten, G.:** *Darstellung eines Harnstoff-SCR-Systems zur Erfüllung zukünftiger Grenzwerte für Diesel-PKW*. Karlsruhe : Universität Karlsruhe, 2000. Dissertation.
- [45] **Klingenberg, H.:** *Rußpartikel im Dieselmotorabgas - Entstehung und Messung*. s.l. : ACEA Programme on the Emissions of Fine Particles from Passenger Cars, 1999.

- [46] **Peck, R.S.:** *Experimentelle Untersuchung und dynamische Simulation von Oxidationskatalysatoren und Diesel-Partikelfiltern.* Stuttgart : Universität Stuttgart, 2007. Dissertation.
- [47] **Robert Bosch GmbH.:** *Dieselmotor Management 3. Auflage.* Braunschweig, Wiesbaden : Vieweg&Sohn, 2002.
- [48] **Görsmann, C., et al.:** *Nachrüst-SCRT-System mit minimalen Sekundäremissionen (NH₃, NO₂, N₂O).* Dresden : 10. FAD-Konferenz - Herausforderung Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren, 2012. S. 155-171.
- [49] **Wimmer, A.:** *Thermodynamik des Verbrennungsmotors - Skriptum SS 2007.* Graz : TU Graz, 2007.
- [50] **Glensvig, M., et al.:** *Alternative Brennverfahren.* Graz : AVL List GmbH, MTZ 9/2003 Jahrgang 64.
- [51] **Bürgler, L., et al.:** *Fahrzeugapplikation mit alternativer Dieselerbrennung.* Graz : AVL List GmbH, MTZ 11/2005 Jahrgang 66.
- [52] **Bürgler, L., et al.:** *Erfüllung zukünftiger Emissionsanforderungen für Diesel SUVs.* [Hrsg.] AVL List GmbH. Aachen : 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2006.
- [53] **Chmela, F., Piock, W.F. und Sams, T.:** *Potential alternativer Verbrennungsverfahren für Otto- und Dieselmotoren.* Graz : VKM-THD Mitteilungen. Vol 83, TU-Graz, 2003.
- [54] **Johnson, T.V.:** *Diesel Emission Control Technology - 2003 in Review.* SAE Technical Paper Series. 2004-01-0070.
- [55] **Herrmann, H.O., et al.:** *The Potential of Synthetic Fuels to meet Future Emission Regulations.* Wien : 27. Internationales Wiener Motorensymposium, 2006.
- [56] **Geringer, B., et al.:** *Verbesserungspotential alternativer Kraftstoffe an modernen Dieselmotoren.* 2004. VDI-Berichte Nr. 1852.
- [57] **Pflaum, H.:** *Potential von synthetischen Dieselkraftstoffen im motorischen Betrieb unter besonderer Berücksichtigung der Auswirkung alternativer*

- Brennverfahren und Einspritzstrategien auf die Ruß- und Stickoxidbildung.* s.l. : TU-Wien, 2010. Dissertation.
- [58] **Jacob, E.:** *Perspectiven der mobilen SCR-Technik.* Aachen : 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2006.
- [59] **Bögner, W., et al.:** *Removal of nitrogen oxides from the exhaust of a lean-tuen gasoline engine.* s.l. : Catal. B, Environmental, 1995. Bd. 7.
- [60] **Takahashi, N., et al.:** *The new concept 3-way catalyst for automotive lean-burn engine: NOx storage and reduction catalyst.* s.l. : Catalysis Today, 1996. Bd. 27.
- [61] **Mollenhauer, K. und Tschöke, H.:** *Handbuch Dieselmotoren.* 3. Auflage. Berlin Heidelberg New York : Springer, 2007.
- [62] **Johnson, T.V.:** *Diesel Emission Control in Review.* 2006. SAE Technical Paper Series 2006-01-0030.
- [63] **Viola, M. und Brown, D.:** *Emission Performance Improvement on a Light Duty Diesel Engine with an LNT Based Aftertreatment System via use of a POx Reformer System.* Yokohama, Japan : FISITA 2006 World Automotive Congress, 2006.
- [64] **Meunier, F.C., et al.:** *Mechanistic Aspects of the Selective Reduction of NO by Propene over Alumina and Silver-Alumina Catalysts.* s.l. : Journal of Catalysis, 1999. S. 493-505. Bd. 187.
- [65] **Majewski, W.A., Ambs, J.L. und Bickel, K.:** *Nitrogen Oxides Reactions in Diesel Oxidation Catalyst.* 1995. SAE Technical Paper Series 950374.
- [66] **Iwamoto, M.:** *Air pollution abatement through heterogeneous catalysis.* 2000. Studies in Surface Science and Catalysis Vol. 130.
- [67] **Breitbach, H., Schön, C. und Layrer, J.:** *Potenziale und Grenzen der Abgasnachbehandlung durch NOx-Speicherkatalysatoren.* Aachen : 14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2005.
- [68] **Dorenkamp, R.:** *LNT or Urea SCR Technology: Which is the right technology for TIER 2 BIN 5 passenger vehicles?* Detroit, Michigan : 12th Diesel Engine-Efficiency and Emissions Research (DEER) Conference, 2006.

- [69] **Erkfeldt, S., et al.:** *Sulphur Poisoning and Regeneration of NO_x Trap Catalyst for Direct Injected Gasoline Engines*. 1999. SAE Technical Paper Series 1999-01-3504.
- [70] **Fridell, E., et al.:** *Model studies of NO_x storage and sulphur deactivation of NO_x storage catalysts*. 2001. Topics in Catalysis Vols. 16/17.
- [71] **Mahzoul, H., et al.:** *Reduction of NO_x over a NO_x-trap catalyst and the regeneration behavior of adsorbed SO₂*. 2001. Topics in Catalysis Vol. 16/17.
- [72] **Hirata, H., et al.:** *NO_x storage-reduction three-way catalyst with improved sulfur tolerance*. 2001. Topics in Catalysis 16/17.
- [73] **Dou, D. und Bailey, O.H.:** *Investigation of NO_x Adsorber Catalyst Deactivation*. 1998. SAE Technical Paper Series 982594.
- [74] **Uekusa, T., et al.:** *A New NO_x Reduction Catalyst System for Diesel Engine with High Sulfur Tolerance*. 2003. SAE Technical Paper Series 2003-01-3241.
- [75] **Fang, H.L., et al.:** *A Fundamental Consideration on NO_x Adsorber Technology for DI Diesel Application*. 2002. SAE Technical Paper Series 2002-01-2889.
- [76] **Schütte, T.:** *Ablagerungs- und Alterungsverhalten wässriger Harnstofflösung bei selektiver katalytischer Reduktion von Stickoxidemissionen*. Lüneberg : Leuphana Universität Lüneberg, 2010. Dissertation.
- [77] **Klimczak, M.:** *Entwicklung und Anwendung einer Technologie zur Untersuchung der chemischen Desaktivierung von SCR-Katalysatoren durch anorganische Gifte*. Darmstadt : TU Darmstadt, 2010.
- [78] **Sluder, C., et al.:** *Low Temperature Urea Decomposition and SCR Performance*. : SAE Technical Paper Series, 2005.
- [79] **Borealis.:** *Sicherheitsdatenblatt gemäß 1907/2006/EG, Artikel 31*. Linz : Borealis Agrolinz Melamine GmbH, 11.08.2009.
- [80] **DIN 70070, Ausgabedatum 2005-08.:** *Dieselmotoren - NO_x-Reduktionsmittel AUS 32 - Qualitätsanforderungen*. 2005. Norm.
- [81] **OMV, Aktiengesellschaft.:** Was ist AdBlue. [Online] 2012. [Zitat vom: 18. 11. 2012.]

http://www.omv.com/portal/01/com/omv/OMV_Group/Products/AdBlue/What_is_AdBlue_

- [82] **Musmann, L., et al.:** *Entwicklung hochtemperaturstabiler SCR Katalysatoren für zukünftige Konzepte zur Diesel-Abgasnachbehandlung.* [Hrsg.] Automotive Catalysts. s.l. : Umicore AG & Co. KG.
- [83] **Maurer, B., Jacob, E. und Weisweiler, W.:** *Modellgasuntersuchungen mit NH₃ und Harnstoff als Reduktionsmittel für die katalytische NO_x-Reduktion.* Karlsruhe : Institut für Chemische Technik der Universität Karlsruhe, MTZ 06/1999 Jahrgang 60.
- [84] **Kind, W., Jacob, E. und Müller, W.:** *NO_x-Verminderung bei Dieselmotoren.* Kaiserslautern : Institut für Kraft- und Arbeitsmaschinen der Universität Kaiserslautern, MTZ 01/2001 Jahrgang 62.
- [85] **Balle, P.:** *Selektive Katalytische Reduktion von NO_x mittels NH₃ an Fe-modifizierten BEA-Zeolithen.* Karlsruhe : Institut für Technologie, 2011. Dissertation.
- [86] **Neusser, H.J., et al.:** *Die Euro-6-Motoren des modularen Dieselbaukastens von Volkswagen.* Wolfsburg : Volkswagen AG, MTZ 06/2013 Jahrgang 74.
- [87] **Gruden, D.:** *Umweltschutz in der Automobilindustrie.* 1. Auflage. Wiesbaden : Vieweg Teubner, 2008.
- [88] **Europäisches Parlament.:** Richtlinie 1999/96/EG des Europäischen Parlaments und Rates vom 13. Dez. 1999 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Emissionen gasförmiger Schadstoffe und luftverunreinigender Partikel aus Selbstzündungsmotoren. *zum Antrieb von Fahrzeugen und Emission gasförmiger Schadstoffe aus mit Erdgas oder Flüssiggas betriebenen Fremdzündungsmotoren zum Antrieb von Fahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 88/77/EWG des Rates.* In : Amtsblatt der Europäischen Union, 16.2.200, L44, S.1-155.
- [89] **Europäisches Parlament.:** Richtlinie 2005/55/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 28. Sep. 2005 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen über die Emission gasförmiger Schadstoffe

und luftverunreinigender Partikel aus Selbstzündungsmot. zum Antrieb von Fahrzeugen und die Emission gasförmiger Schadstoffe aus Flüssiggas oder Erdgas betriebenen Fremdzündungsmotoren zum Antrieb von Fahrzeugen. In : Amtsblatt der Europäischen Union, 20.10.2005, L275, S.1-163.

- [90] **Gehrlein, J., Lang, A. und Palmer, G.:** *Optimierung von SCR-Systemen durch Integration von Mischelementen.* Edenkoben : Tenneco-Gillet, MTZ 03/2009 Jahrgang 70.
- [91] **Gaiser, G. und Oesterle, J.:** *Drallelemente zur gleichmäßigen Beladung und Regeneration von Partikelfiltern.* Esslingen : J. Eberspächer GmbH & Co. KG, MTZ 5/2005 Jahrgang 66.
- [92] **Brück, R., et al.:** *Die nächste Generation hocheffektiver DeNOx Abgasnachbehandlung - Ultrakompaktes SCR Dosiersystem für motornahe Anwendungen.* Wien : 33. Internationales Wiener Motorensymposium, 2012.
- [93] **Kunz, D.:** *Abgasanalytik bei Dieselmotoren mit Anlagen zur selektiven katalytischen Reduktion (SCR) von Stickoxiden.* Kaiserslautern : Universität Kaiserslautern, 1996. Dissertation.
- [94] **Ullmann, Lützw, D. und Reuss, G.:** *Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie.* 4. Auflage. Weinheim : Verlag Chemie, 1976. Bd. 12.
- [95] **Schaber, P.M., et al.:** *Study of the urea thermal decomposition (pyrolysis) reaction and importance to cyanuric acid production.* Nr. 31. s.l. : American Laboratory, 1999.
- [96] **Jakubke, H.-D. und Jeschkeit, H.:** *Fachlexikon ABC Chemie.* 3. Auflage. Frankfurt : Verlag Harri Deutsch, 1987.
- [97] **Stradella, L. und Argentero, M.:** *A study of the thermal decomposition of urea, of related compounds and thiourea using DSC and TG-EGA.* Nr. 219. s.l. : Thermochemica acta, 1993.
- [98] **Lienhard, E.:** *Beitrag zur Kenntnis der thermischen Zersetzung von Harnstoff.* Zürich : ETH Zürich, 1954. Dissertation.
- [99] **Fang, H.L. und Da Costa, H.F.M.:** *Urea thermolysis and NOx reduction with and without SCR catalyst.* : Applied Catalysis B: Environmental 46, 2003.

- [100] **Das-Cupta, J.:** *Studies on the decomposition and reactions of urea, Part IV: On the mechanism of the formation of ammelide, etc.* : Journal of the Indian Chemical Society, Nr. 10, 1933.
- [101] **Schiltknecht, F.J.:** *Über den Reaktionsmechanismus der Pyrolyse von Harnstoff zu Cyanursäure.* Zürich : ETH Zürich, 1963. Dissertation.
- [102] **Steinbach, S.:** *Einfluss der Transportvorgänge auf die Effizienz von Harnstoffkatalysatoren in SCR-Abgasanlagen.* München : TU München, 2007. Dissertation.
- [103] **Fest-Santini, S.:** *Wärmeübertragung bei der Sprühkühlung mit intermittierenden Sprays oberhalb der Leidenfrosttemperatur.* Magdeburg : Universität Magdeburg, 2009. Dissertation.
- [104] **Seo, J.:** *Aftertreatment Package Design for SCR Performance Optimization.* : SAE Technical Paper Series, 2011.
- [105] **Lieferspezifikation, nach Direktive 2002/80/EG.:** *CEC Prüf-DK S-frei - Kraftstoff für die Prüfung von Dieselmotoren.* Wien : OMV Refining & Marketing GmbH, 2012.
- [106] **Robert Bosch GmbH.:** *Datenblatt SCR-Injektor.* 2012.
- [107] **Herr, A.:** *Thermische Zersetzung von Festharnstoff für mobile SCR-Katalysatoranwendungen.* Kaiserslautern : TU Kaiserslautern, 2004. Dissertation.
- [108] **Weltens, H., et al.:** *Optimisation of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Prediction.* : SAE, 1993. 930780.
- [109] **Geringer, B., Lauer, T. und Möltner, L.:** *Aufbereitung von AdBlue in SCR-Systemen - Abschlussbericht zur Messkampagne in Gaggenau vom 06.10.2008-23.10.2008.* Wien : IFA der TU Wien, 2008. Interner Bericht.
- [110] **Möltner, L.:** *Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Ammoniakaufbereitung aus AdBlue unter besonderer Berücksichtigung der Tropfen/Abgas- und Tropfen/Wandinteraktion.* Inst. f. Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik. Wien : TU Wien, 2014. Dissertation.

- [111] **Smith, H., et al.:** *Optical and Numerical Investigations on the Mechanisms of Deposit Formation in SCR Systems.* Detroit : SAE Technical Paper Series, 2014. 2014-01-1563.
- [112] **Fischer, S.:** *Simulation of the Urea-Water-Solution Preparation and Ammonia-Homogenization with a Validated CFD-Model for the Optimization of Automotive SCR-Systems.* Inst. f. Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik. Wien : TU Wien, 2012. Dissertation.
- [113] **Zöchbauer, M., et al.:** *Validation of Turbulence Models for an Automotive SCR System with Laser Doppler Anemometry Measurements.* Detroit : SAE Technical Paper Series, 2013. 2013-01-1579.
- [114] **Burkhardt, C. und Balmer, B.:** *Entkoppelemente in der Fahrzeugtechnik - Flexible Verbindung zwischen Motor und Abgasanlage.* : Süddeutscher Verlag onpact, 2008. Bd. 237 von Die Bibliothek der Technik. ISBN 9783937889733.
- [115] **Burkhardt, C., et al.:** *Feldanalyse und Korrosionssimulation zur Werkstoffauswahl bei Entkoppelementen.* Pforzheim : Witzemann GmbH, ATZ 01/2008 Jahrgang 110.
- [116] **Dong, H., Shuai, S. und Wang, J.:** *Effect of Urea Thermal Decomposition on Diesel NOx-SCR Aftertreatment Systems.* : SAE Technical Paper Series, 2008.
- [117] **Mayer, M.:** *Ablagerungsphänomene bei der Aufbereitung einer Harnstoffwasserlösung zur Selektiven Katalytischen Reduktion in einer Diesellabgasanlage.* Wien : Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der TU Wien, 2013. Diplomarbeit.
- [118] **Kröcher, O., Elsener, M. und Jacob, E.:** *A model gas study of ammonium formate, methanamide and guanidinium formate as alternative ammonia precursor compounds for the selective catalytic reduction of nitrogen oxides in diesel exhaust gas.* Applied Catalysis B : Environmental 88 (2009) 66-82.
- [119] **Gerhart, C., et al.:** *Selektive Katalytische Reduktion von Stickoxiden - Teil 1: Ammoniak-Speicherverbindungen.* Trostberg : AlzChem AG, MTZ 11/2012 Jahrgang 73.

- [120] **Peitz, D.:** Investigations on the catalytic decomposition of guanidinium formate, ammonium formate and methanamide as NH₃-precursors for the selective catalytic reduction of NO_x. [Online] 2012. [Zitat vom: 27. 08 2013.] www.psi.ch/ene/SHENENOxCatEN/Guanidiniumformiat.pdf.
- [121] **Heubuch, A., et al.:** *Selektive Katalytische Reduktion von Stickoxiden - Teil2: Nebenstromverfahren zur Bereitstellung gasförmigen Ammoniaks*. München : Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der TU München, MTZ 12/2012 Jahrgang 73.
- [122] **Johannessen, T.:** *Compact ammonia storage systems for fuel-efficient NO_x emissions reduction*. Stuttgart : CTI conference on SCR Systems, 2010.
- [123] **Johannessen, T., et al.:** *Improved Automotive NO_x Aftertreatment System: Metal Ammine Complexes as NH₃ Source for SCR Using Fe-Containing Zeolite Catalysts*. s.l. : Springer Science+Business Media, Catal Lett, 2009.
- [124] **Christian, G., Sattelmayer, T. und Plamen, T.:** *Verfahren zur Erzeugung von Ammoniak aus einer Ammoniakvorläufersubstanzen zur Reduzierung von Stickoxiden in Abgasen*. DE201110106233 [Hrsg.] Alzchem AG. Trostberg, Juli 2011.
- [125] **Schade, H. und Kunz, E.:** *Strömungslehre*. Berlin; New York : de Gruyter, 1989. ISBN 3110118734.
- [126] **Hoffmann, K., Klein, N. und Utter, A.:** *Verfahren zur Herstellung eines Abgaseinlaßstutzens für einen Kraftfahrzeug-Katalysator*. DE4444759 [Hrsg.] Eberspächer GmbH & Co.KG. Esslingen, Juli 2004.
- [127] **Liskow, U.:** *Dosiersystem für Abgasnachbehandlung*. Stuttgart : Robert Bosch GmbH, 2009. Patent DE102008010106A1.
- [128] **Kleinwechter, H.:** *Entwicklung einer Messmethode zur Untersuchung des Oxidationsverhaltens submikroner Kohlenstoffpartikel in der Gassuspension*. s.l. : Universität Duisburg, 2001. Dissertation.
- [129] **BASF SE.:** *Adblue - Hochreines NO_x-Reduktionsmittel für Dieselmotoren, die mit SCR-Technologie ausgerüstet sind*. 2006. Technisches Merkblatt.

- [130] **Rakowski, S., Merker, G.P. und Spicher, U.:** *Benzin-Verdampfung als CFD-Modell für Ottomotoren.* Hannover : Institut für Technische Verbrennung der Universität Hannover, MTZ 09/2008 Jahrgang 69.
- [131] **Volkswagen AG.:** Modelling of Flash-Boiling Effects with Vectis. [Online] [Zitat vom: 10. 09 2013.] www.ricardo.com/Documents/Downloads/Software/%20Flyers/Conference/%20Info/EUC/%202011/Presentations/VW-VECTIS-Flash-Boiling.pdf.
- [132] **Gerstl, H.:** *Ermittlung des Emissions- und Umsatzverhaltens von NOx-Speicherkatalysatoren.* Wien : Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der TU-Wien, 2011. Diplomarbeit.

LebenslaufPersönliche Daten

Name	René Bitto
Geburtsdatum	24.09.1979
Geburtsort	Wien
Familienstand	ledig
Anschrift	Thürnlhofstraße 5/8/826 1110 Wien
e-mail	rene.bitto@gmx.at

Beruflicher Werdegang

Seit 2/2008	Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der Technischen Universität Wien Wissenschaftlicher Mitarbeiter – Projektkoordination Diesel
08/2006	Schindler Aufzüge Instandhaltung – Praktikum
07/2006	Delphi Automotiv Systems Vienna Production Control & Logistics - Praktikum
07/2004-12/2005	Flughafen Wien AG Vorfeld - Flugzeugabfertigung
08/2003	Wolfgang Denzel AG Logistikzentrum - Praktikum
08/2002	OMV Forschung Entwicklung Analyse - Praktikum
10/2000-09/2001	Wiener Rotes Kreuz Sanitäter - Zivildienst

Ausbildung

1999-2008	Technische Universität Wien (Dipl.-Ing.) Diplomstudium Maschinenbau <i>„Weiterentwicklung der Harnstoffaufbereitung zur Selektiven Katalytischen Reduktion von Stickoxiden in einer Diesellabgasanlage“ (Diplomarbeit)</i>
1994-1999	Höhere Technische Lehranstalt Wien 10 (Ing.) Allgemeiner Maschinenbau
1990-1994	Bundesgymnasium und Bundesrealgymnasium Schwechat realistischer Zweig

Veröffentlichungen

- 04/2012 SAE 2012 World Congress & Exhibition
Fischer, S.; Bitto, R.; Lauer, T.; Krenn, C.; Tauer, J.; Pessl, G.: "Impact of the
Turbulence Model and Numerical Approach on the Prediction of the
Ammonia Homogenization in an Automotive SCR System" (# 2012-01-1291)
- 10/2010 19. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2010
Bitto, R.; Fischer, S.; Weisse, W.; Keppeler, B.; Beckmann, T.:
„Weiterentwicklung von PKW-SCR-Systemen mit Hilfe von
Motorprüfstandsuntersuchungen und CFD-Simulationsrechnung.“