



TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

**„Einfluss der Reduktionsmitteleinbringung auf die
Harnstoffgleichverteilung bei selektiver katalytischer Reduktion in
einer Diesellabgasanlage“**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Univ. Prof. Dr. techn. Bernhard Geringer

und

Dipl.-Ing. Mattias Mayer

E315

Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Sabrina Auer BSc

0725139

Flachgasse 41/2, 1150 Wien

Frau Sabrina Auer BSc, Matr. Nr. 0725139 wird folgende Diplomaufgabe gestellt:

„Einfluss der Reduktionsmitteleinbringung auf die Harnstoffgleichverteilung bei selektiver katalytischer Reduktion in einer Diesellabgasanlage“

Im Einzelnen sind folgende Punkte zu behandeln:

1. Literaturrecherche zum Themenbereich
 - 1.1. Abgasnachbehandlungssysteme im Diesel - KFZ
 - 1.2. Selektive Katalytische Reduktion mittels AdBlue® - Dosierung
 - 1.3. Ammoniakgleichverteilung
2. Modifikationen an vorhandenen Diesellabgasanlagen zur Beurteilung
 - 2.1. Reduktionsmittelgleichverteilung und der
 - 2.2. Konvertierungsverteilung über dem SCR-Katquerschnitt
3. Durchführung von Messreihen zur Untersuchung der Adblue-Aufbereitung
 - 3.1. hinsichtlich der Tropfengrößenverteilung verschiedener Injektoren
 - 3.2. sowie der Auswirkungen des Spraytargeting
4. Durchführung von Messreihen zur Untersuchung der Ammoniakgleichverteilung hinsichtlich
 - 4.1. Auswirkung verschiedener Mischerkonfigurationen
 - 4.2. Einfluss verschiedener Injektorpositionen
 - 4.3. Auswirkungen verschiedener Injektorkonfigurationen
5. Analyse und Beurteilung der Messergebnisse mit dem Ziel einer optimalen Gleichverteilung. Empfehlungen
6. Zusammenfassung und Ausblick

Ein gebundenes Exemplar, das ungebundene Original und eine Version der Diplomarbeit auf Datenträger sind am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der Technischen Universität Wien abzugeben.

Die Diplomarbeit beginnt im August 2014 und ist bis Ende Februar 2015 zu beenden.

Die Ergebnisse der Arbeit sind vertraulich zu behandeln und dürfen nur mit schriftlicher Genehmigung des Institutsvorstandes weitergegeben bzw. veröffentlicht werden.

Die Benutzung der Versuchseinrichtungen des Institutes hat in den Dienststunden und unter Anleitung des Betreuers zu erfolgen. Dabei dürfen alle Arbeiten nur unter besonderer Beachtung der geltenden Sicherheitsvorschriften durchgeführt werden.

Einverstanden:

Sabrina Auer BSc

Betreuer am Institut:

Dipl.-Ing. Mattias Mayer

.....
Prof. Dr. Bernhard Geringer
Institutsvorstand

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Zeitraum von August 2014 bis Februar 2015 während meiner Tätigkeit als Diplomandin am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der Technischen Universität Wien.

Ich danke dem Institutsvorstand Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernhard Geringer für das Ermöglichen und Fördern dieser Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Mattias Mayer für die Betreuung dieser Diplomarbeit und die Unterstützung in allen Belangen.

Auch gilt mein Dank sämtlichen Mitarbeitern am Institut für die freundliche Zusammenarbeit. 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 Prüfstandsbetrieb zum Erliegen kommen.

Herzlichen Dank gebührt meinen Freunden, die mich in meiner Studienzeit unterstützt haben. Mein besonderer Dank geht an Jürgen, Petra, Paulina, Daniela und Manuel für die Unterstützung in den unterschiedlichsten Lebenslagen, Rückhalt, die gute Zusprache und eure langjährige Freundschaft, auf die ich mich stets verlassen konnte.

Ganz besonders danken möchte ich meinem Lebensgefährten für die Unterstützung in allen Lebenslagen, für die Geduld und das Verständnis für die fehlende gemeinsame Zeit.

Wien, am 22. März 2015

Auer Sabrina

Eidesstattliche Erklärung

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

„Einfluss der Reduktionsmitteleinbringung auf die Harnstoffverteilung bei selektiver katalytischer Reduktion in einer Diesellabgasanlage“

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin. Ich erkläre an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Arbeiten selbständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Ich erkläre, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher, weder im In- noch im Ausland, (einer Beurteilerin/ einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, am 22. März 2015

Name

Sperrvermerk:

Ich weise darauf hin, dass die Diplomarbeit vertrauliche Informationen und unternehmensinterne Daten beinhaltet. Daher ist eine Veröffentlichung oder Weitergabe von Inhalten an Dritte, ohne die vorherige Einverständniserklärung des Instituts für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, nicht gestattet.

Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit behandelt die möglichst ideale Aufbereitung und Gleichverteilung, des in den Abgasstrang eingebrachten, Reduktionsmittels AdBlue. Verschiedene Aspekte sind für die Gestaltung von Diesellabgasanlagen zur selektiven katalytischen Reduktion (SCR) von Stickoxiden für den Fahrzeugeinsatz zu beachten. Die Notwendigkeit zur Implementierung des SCR-Systems im PKW-Bereich ergibt sich aus den immer strenger werdenden Anforderungen der Abgasgesetzgebung und der angestrebten Senkung der Emissionswerte aus Gründen des Umweltschutzes.

Um gute Stickoxid-Umsatzraten im SCR-System zu gewährleisten, ist ausreichende Gleichverteilung des Reduktionsmittels über den SCR-Katalysator erforderlich. Eine hohe Homogenisierung des Gemisches wird bereits mit ausreichender Mischstreckenlänge (dabei handelt es sich um die Abgasstrecke zwischen der Einspritzstelle des Reduktionsmittels und dem SCR-Katalysator) und dem Einsatz von Mischelementen ermöglicht.

Jedoch sind ausreichende Mischstreckenlängen, aufgrund nur beschränkt vorhandener Bauräume im Fahrzeug, nicht immer möglich und es kommt zu einer schlechteren Gleichverteilung des Reduktionsmittels. Eine besondere Herausforderung für die Gleichverteilung stellt somit der beengte Bauraum dar. Begründet sind diese Bauraumeinschränkungen durch kürzere Fahrzeuge, durch Packaging-Gründe und durch Allradkonzepte. Das Ziel die Light-off Temperatur schneller zu erreichen, ist ein weiterer Grund für die Verwendung von kurzen Anlagen.

Aus diesem Grund wurde im Laufe dieser Diplomarbeit eine Vielzahl von unterschiedlichen Variationen an Mischelementen und Injektoren untersucht und verglichen, und aus den Ergebnissen, Maßnahmen zur Optimierung der Gleichverteilung bezüglich der reduzierten Mischstreckenlänge gesetzt. Diese Untersuchungen wurden bei unterschiedlichen Betriebspunkten durchgeführt, um einen Großteil des Motorkennfeldes abzudecken. Des Weiteren wurden sie bei einer Instrom- und einer Gegenstrom-Anlage angewendet.

Abstract

This diploma thesis discusses the ideal degree of reduction processing and uniformity of the reducing agent (AdBlue), which is injected into the exhaust system branch. Various aspects are to be considered for the configuration of diesel-exhaust-gas systems for selective catalytic reduction (SCR) of nitrogen oxide for the usage in diesel powered vehicles.

The rigorous exhaust gas legislation and the intended reduction of emission values for environmental protection, make it necessary to implement the SCR-system in the automotive branch.

In order to guarantee good nitrogen oxide conversion rates, uniform distribution of the reducing agent in the SCR-catalyst is required. Sufficiently high homogenization can already be achieved by using proper mixing pipe length (this regards the distance between the dosing point and the SCR-catalyst) and blenders. Due to compact car sizes, packaging reasons and all-wheel drive concepts, installation space is becoming rare, which makes it harder to fit big SCR-systems with enough length into the exhaust system, what makes urea-uniformity more and more challenging. Another motive to use shorter exhaust systems is to obtain the SCR-catalysts light-off temperature faster.

That's the reason why optimization measures for shorter mixing pipe lengths are required. During this diploma thesis, a multitude of different varieties of blenders and injectors were researched and compared. These researches were made during various engine operating points, to conceal the majority of the engine map. Further on they were applied with in-flow- and counter-flow-systems. The goal is to optimize short mixing pipe length systems to achieve similar uniformity results as with sufficient mixing pipe length systems.

Abkürzungen & Symbole

Abkürzungen

α_{Pedal}	Fahrpedalstellung
AC	Ammoniumcarbamat
AGR	Abgasrückführung
ATL	Abgasturbolader
BP	Betriebspunkt
C	Kohlenstoff
CH ₄ N ₂ O	Harnstoff
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLD	Chemolumineszenzdetektor
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
COHb	Kohlenmonoxidhämoglobin
DCU	Dosing Control Unit
D _i	Tropfendurchmesser
DOC	Dieseloxidationskatalysator
DPF	Dieselpartikelfilter
EKE	Entkoppelement
GuFo	Guanidiniumformiat
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
HC	Kohlenwasserstoffe
HD	High density
HCN	Blausäure
HNCO	Isocyansäure
HWL	Harnstoff-Wasserlösung
MeO	Metalloxide
MoO ₃	Molybdäntrioxide
N ₂	Stickstoff

N ₂ O	Distickstoffmonoxid
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NFZ	Nutzfahrzeug
NH ₃	Ammoniak
NH ₄	Ammonium
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO ₂ *	energetisch angeregtes Stickstoffdioxid
NO _x	Stickoxide
NSK	NO _x -Speicherkatalysator
O ₂	Sauerstoff
O ₃	Ozon
OT	Oberer Totpunkt
PKW	Personenkraftwagen
PM	Partikelmasse (engl. particulate matter)
SCR	Selektive katalytische Reduktion
SMD	Mittlerer Sauter-Durchmesser
SO _x	Schwefeloxide
THC	Masse der gesamten Kohlenwasserstoffe
TiO ₂	Titandioxid
V ₂ O ₅	Vanadiumpentoxid
VTG	Variable Turbinengeometrie
WO ₃	Wolframtrioxid

Symbole

α	-	Dosierverhältnis
SMD	µm	mittlerer Sauter-Durchmesser
ci	ppm	NH ₃ -Konzentrationen
\bar{c}	-	arithmetischer Mittelwert der NH ₃ -Konzentration
D ₅	µm	Durchmesser bei einer kumulierten Häufigkeit von 5%
D ₅₀	µm	Durchmesser bei einer kumulierten Häufigkeit von 50%

D_{90}	μm	Durchmesser bei einer kumulierten Häufigkeit von 90%
D_{mean}	μm	Mittlerer Durchmesser nach Rosin-Rammler
D_{Tr}	μm	Tropfendurchmesser
λ	-	Luftzahl
γ	-	Gleichverteilungszahl
γ_{rel}	%	relative Gleichverteilung
ρ_{N}	kg/m^3	Normdichte (Normzustand: 273K und 101325 Pa)
\dot{m}_{Abgas}	kg/h	Abgasmassenstrom
\dot{m}_{AdBlue}	kg/h	dosierter AdBlue-Massenstrom
$\dot{m}_{\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}}$	mg/s	Harnstoff – Massenstrom
\dot{m}_{HWL}	mg/s	Harnstoff-Wasser-Lösung-Massenstrom
\dot{m}_{NO}	g/s	NO – Massenstrom
\dot{m}_{NO_2}	g/s	NO ₂ – Massenstrom
$M_{\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}}$	g/mol	Molmasse von Harnstoff
M_{NO}	g/mol	Molmasse von NO
M_{NO_2}	g/mol	Molmasse von NO ₂
M_{v}	$\text{m}^3/\text{kmol}_{\text{N}}$	Molvolumen für ideale Gase
n	min^{-1}	Drehzahl
\dot{n}_{NO}	mol/s	NO – Stoffmengenstrom
\dot{n}_{NO_2}	mol/s	NO ₂ – Stoffmengenstrom
\dot{n}_{NH_3}	mol/s	Ammoniak - Stoffmengenstrom
$\dot{n}_{\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}}$	mol/s	Harnstoff – Stoffmengenstrom
n_{spread}	-	Gleichförmigkeitszahl nach Rosin-Rammler
NO_{xvSCR}	ppm	Stickstoffoxide vor SCR-Katalysator
NO_{xnSCR}	ppm	Stickstoffoxide nach SCR-Katalysator
p	bar	HWL-Einspritzdruck
T_{vSCR}	$^{\circ}\text{C}$	Abgastemperatur vor SCR
T_{nSCR}	$^{\circ}\text{C}$	Abgastemperatur nach SCR
T_{vDPF}	$^{\circ}\text{C}$	Abgastemperatur vor DPF
T_{nDPF}	$^{\circ}\text{C}$	Abgastemperatur nach DPF
Y_{D}	-	kumulierte Häufigkeit einer Tropfengröße

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	1
1.1	Aufgabenstellung und Methodik	2
2	Theoretische Grundlagen.....	3
2.1	Entstehung von Dieselaabgas.....	5
2.1.1	Entstehung von Kohlenmonoxid CO	5
2.1.2	Entstehung von unverbrannte Kohlenwasserstoffe HC.....	5
2.1.3	Entstehung von Partikelemissionen	6
2.1.4	Entstehung von Stickstoffoxide NO _x	6
3	Maßnahmen zur Erfüllung der Emissionsgesetze bei Dieselmotoren.....	9
3.1	Innermotorische Maßnahmen.....	9
3.1.1	Variationen des Einspritzzeitpunkts	9
3.1.2	Abgasrückführung.....	11
3.2	Außermotorische Maßnahmen	13
3.2.1	Dieseloxidationskatalysator DOC.....	13
3.2.2	Dieselpartikelfilter DPF	14
3.2.3	NO _x -Speicher-katalysator.....	15
4	Selektive katalytische Reduktion.....	17
4.1	Adblue	19
4.1.1	Aufbereitung des Reduktionsmittels.....	20
4.1.2	Alternative Reduktionsmittel	22
4.2	NH ₃ Schlupf.....	23
4.3	Gleichverteilung des eingebrachten Reduktionsmittelsprays	24
4.3.1	Stand der Technik.....	24
4.3.2	Mischelement zur Reduktionsmittel-Aufbereitung.....	25
4.3.3	HWL-Injektor	27

5	Spezifikationen der verwendeten Versuchsträger und Messmethodik.....	31
5.1	Prüfstands Aufbau	31
5.1.1	Motordaten.....	32
5.2	Messgeräte.....	32
5.2.1	Chemolumineszenzdetektor CLD	32
5.2.2	Druck- und Temperatursensoren	33
5.3	Prüfstandssteuerung	34
5.3.1	Motorsteuergerät.....	34
5.3.2	Steuerung Wirbelstrombremse	35
5.3.3	Anbindung Verbrennungsmotor	36
5.3.4	Reduktionsmittelsteuerung	36
5.4	Messmethodik	37
5.4.1	Gleichverteilungsuntersuchungen am offenen Katalysator	37
5.4.2	Betriebspunkte zur Untersuchung der Gleichverteilung	39
5.4.3	Berechnung der Gleichverteilungszahl	40
5.4.4	Graphische Auswertung der Gleichverteilung	41
5.4.5	Bestimmung des Dosierverhältnisses	43
6	Ergebnisse der Referenzuntersuchungen	46
6.1	Abgasanlage mit langer Mischstreckenlänge	46
6.2	Ausgangsmessung ohne Mischelement	49
6.2.1	Instrom	49
6.2.2	Gegenstrom	51
6.3	Variation der Mischelemente	58
6.3.1	Mischelementlänge	59
6.3.2	Position des Mischelements.....	62
6.4	Sauter-Durchmesser des Injektoren-Sprays.....	65
6.4.1	Laserdiffraktometrie	65
6.4.2	Messdurchführung und Messergebnisse	67
6.5	HWL-Einspritzdruckvariation	72

6.6	Dosiermengenvariation.....	73
6.7	Variationsmöglichkeiten der Injektoren.....	77
6.7.1	Injektorversatz.....	77
7	Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Optimierung der Gleichverteilung bei kurzen Mischstreckenlängen	80
7.1	Kurze Abgasanlage - Instromdosierung	80
7.1.1	Mischelementsvariation	80
7.1.2	Injektorvariation.....	82
7.1.3	Mischelementspositionsvariation	84
7.1.4	Zusammenfassung kurze Instrom-Anlage	85
7.2	Kurze Abgasanlage - Gegenstromdosierung.....	88
7.2.1	Vormischervariation	88
7.2.2	Mischelementsvariation	91
7.2.3	Rohrverlängerung	93
7.2.4	Injektorvariation.....	96
7.2.5	Zusammenfassung Gegenstrom-Anlage	98
8	Resümee	101
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	103
10	Literaturverzeichnis	106

1 Einleitung und Motivation

Durch die immer strenger werdenden Emissionsgrenzwerte, vor allem mit Eintritt der Euro 6 Norm für PKW und leichte Nutzfahrzeuge im September 2014, erhält die Abgasnachbehandlung immer höheren Stellenwert [1].

Bei Verbrennungsmotoren, mit Diesel als Kraftstoff, hat sich mittlerweile die SCR-Technologie nicht nur in Nutzfahrzeugen, sondern auch bei PKW, vor allem im höheren Gewichtssegment, durchgesetzt. Das SCR-System ist die effektivste Methode für die außermotorische Stickoxidreduktion, um der Emissionsgesetzgebung gerecht zu werden. Die größten Anforderungen der SCR-Thematik sind die Harnstoffaufbereitung durch geeignete Mischgeometrie und die Reduktionsmittelgleichverteilung über den Katalysatorquerschnitt. Eine ausreichende Mischstreckenlänge (dabei handelt es sich um die Abgasstrecke zwischen Dosierstelle und SCR-Katalysator), gewährleistet zusätzliche Verbesserung der Gleichverteilung des Reduktionsmittels.

Durch die lange Mischstreckenlänge geht jedoch viel Abwärme, des schon relativ kühlen Dieselaabgases, verloren und das Abgas benötigt längere Zeit den Katalysator auf seine Anspringtemperatur, die auch Light-off Temperatur genannt wird, zu bringen. [2]

Aufgrund der Light-off-Temperatur und Einschränkungen im Bauraum der Fahrzeuge durch Allradkonzepte, kürzere Fahrzeuge oder aus Packaginggründen kommt es zu geringeren Mischstreckenlängen und somit zu einer Verschlechterung der Verteilung des Reduktionsmittels über dem SCR-Katalysator.

Um die Verringerung der Homogenisierung des Gemisches, aufgrund kürzerer Mischstreckenlänge zu verbessern, sollen Maßnahmen, wie zum Beispiel unterschiedliche Mischelementgeometrien, Variationen an Mischelementen, bezüglich deren Einbauposition durch Verschiebung und Mischelementlänge, sowie unterschiedliche Injektoren, zur Optimierung der Gleichverteilung, in einer Instrom-Anlage (Eindosierung des Reduktionsmittels in Strömungsrichtung) und in einer Gegenstrom-Anlage (Eindosierung des Reduktionsmittels gegen die Strömungsrichtung) angewandt werden.

Das Ziel ist es, mit diesen Optimierungsmaßnahmen, ähnliche Gleichverteilungsergebnisse bei kurzen Mischstreckenlängen zu erhalten, wie bei ausreichend langen Mischstreckenlängen. Es wird ein guter Gleichverteilungswert von mindestens 0,98 angestrebt, da die langjährige Erfahrung des Instituts für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik gezeigt hat, dass dieser Wert bei guten langen Abgasanlagen ohne Probleme erreicht werden kann.

1.1 Aufgabenstellung und Methodik

Um das Ziel, eines guten Gleichverteilungswerts (mindestens $\gamma=0,98$) bei Anlagen mit kurzer Mischstreckenlänge, zu erhalten, soll zuerst eine Literaturrecherche durchgeführt werden. Dies soll dem Zweck dienen, den Stand der Technik bezüglich der Entstehung des Dieselaabgases und dessen Abgasemissionsminderung, vor allem die selektive katalytische Reduktion und welche Einflussfaktoren ausschlaggebend für hohe Gleichverteilung des Reduktionsmittels sind, zu eruieren.

Des Weiteren soll der Prüfstands Aufbau, die verwendeten Messgeräte und die Durchführung der jeweiligen Messungen genauer erörtert werden.

Zuerst soll eine Untersuchung mit einer Anlage gezeigt werden, welche allein aufgrund der entsprechenden Mischstreckenlänge, eine sehr gute Gleichverteilung erzielt. Als weitere Ausgangslage soll eine kurze Anlage ohne Mischelement untersucht werden. Des Weiteren sollen Variationen der Mischelemente, die im Rahmen der Diplomarbeit zur Verfügung gestellt werden, ebenfalls zu Referenzuntersuchungen herangezogen werden. Anschließend sollen Gleichverteilungsuntersuchungen bezüglich, der verwendeten Injektoren, des Einspritzdruckes und der Dosiermengen durchgeführt werden.

Dadurch sollen die Einflüsse auf die Gleichverteilung dargestellt werden, um diese im Anschluss an einer ausgeführten Instrom- und Gegenstrom-Anlage anwenden zu können, um eine Gleichverteilung von mindestens 0,98 zu erhalten.

2 Theoretische Grundlagen

Es entstehen keine Schadstoffe bei der idealen motorischen Verbrennung, neben der gewünschten Wärmeenergie werden lediglich Wasser H₂O und Kohlendioxid CO₂ aus den HC-Verbindungen umgewandelt. Das Mengenverhältnis hängt von dem Verhältnis H zu C ab und kann über die Summenformel C_xH_y bei der stöchiometrischen Verbrennung beschrieben werden, siehe Gleichung 2-1 [1]:



Das entstandene Wasser ist umwelttechnisch unbedenklich, jedoch trägt das ungiftige CO₂ maßgeblich zum Treibhauseffekt bei. Da die motorische Verbrennung sowohl bei Diesel- als auch bei Ottomotoren nicht ideal abläuft, entstehen noch weitere, jedoch umweltschädliche, Produkte. Durch die unvollständige Verbrennung entstehen Stickoxide NO_x, unverbrannte Kohlenwasserstoffe HC und Kohlenmonoxid CO. Als weiterer Schadstoff entsteht bei dem typischen inhomogenen Brennverfahren mit einer Luftzahl von $\lambda > 1$ des Dieselmotors, Partikelemissionen. [3]

Hohes Drehmoment bei niedriger Drehzahl und geringer Verbrauch, die Hauptvorteile des Dieselmotors, sind bei abgasturboaufgeladenen Motoren mit Direkteinspritzung am Besten sichtbar. Jedoch wird dieses Brennverfahren durch örtlich schwankende Luftverhältnisse charakterisiert. Der Luftmangel ($\lambda < 1$), bildet sich um die Einspritzstrahlen aus, der Luftüberschuss ($\lambda > 1$), zwischen Brennraumwand und Einspritzstrahlen. [3]

Abbildung 2-1 zeigt, je nach Luftverhältnis die entstehenden Schadstoffe. Die Stickstoffoxide entstehen hauptsächlich in der sehr heißen Flammenfront, Ruß durch den Mangel an Luft [3].

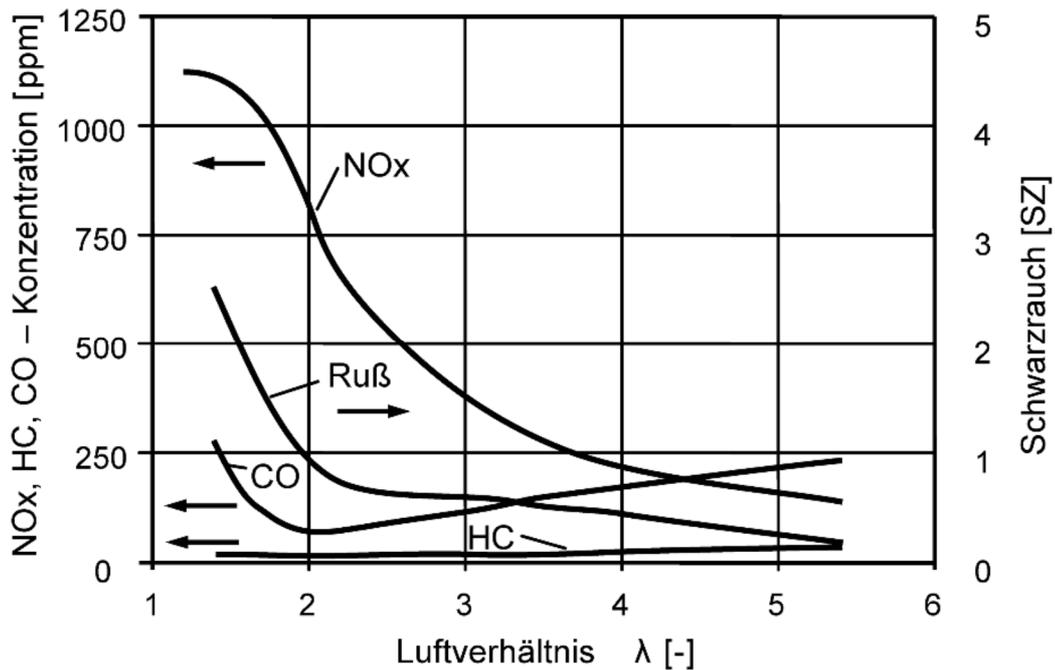


Abbildung 2-1: Schadstoffkonzentration im Abgas eines Dieselmotors bei Variation des Luftverhältnisses λ [3]

Um die strengen Emissionsgrenzwerte zu erfüllen, müssen innermotorisch und außermotorisch Maßnahmen ergriffen werden [3]. Für Pkw und leichte NFZ trat am 1. September 2014 die Emissionsnorm Euro-6 für Typzulassungen ein. Am 1. September 2015 wird diese für die Zulassung und den Verkauf von neuen Fahrzeugtypen in Kraft treten. [1]

In Tabelle 2-1 sind die Grenzwerte Euro-5 und Euro-6 für Selbstzündungsmotoren aufgelistet. Die Emissionsgrenzwerte der Stickstoffoxide werden bei der Euro-6-Norm im Vergleich zur Euro-5-Norm um 55% gesenkt.

Tabelle 2-1: Emissionsgrenzwerte Euro-5 und Euro-6-Norm für Pkw-Selbstzündungsmotoren [4]

Emissionsgrenzwerte					
	CO [mg/km]	NOx [mg/km]	THC + NOx [mg/km]	PM [mg/km]	PN [1/km]
Euro-5-Norm	500	180	230	5	$6 \cdot 10^{11}$
Euro-6-Norm	500	80	170	5	$6 \cdot 10^{11}$

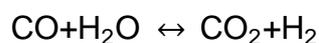
2.1 Entstehung von Dieselabgas

Um einen Überblick über die gesetzlich limitierten Schadstoffkomponenten zu geben, werden diese in den folgenden Unterkapiteln erklärt. Da sich die Diplomarbeit vorwiegend mit der Stickoxidreduzierung beschäftigt, wird aus diesem Grund besonders auf die Entstehung der Stickoxide eingegangen.

2.1.1 Entstehung von Kohlenmonoxid CO

Kohlenmonoxid CO ist ein gasförmiges, geruch- und farbloses Toxin. Die Sauerstoffversorgung des Körpers wird durch die festere Bindung des CO an das Hämoglobin im Blut gegenüber dem Sauerstoff beeinträchtigt. Die Sauerstoffsättigung wird, durch die starke Anreicherung des Kohlenmonoxid in Form von COHb, vermindert. Auswirkungen auf den Menschen sind Sehschwäche, leichte Benommenheit, Übelkeit, Bewusstseinstörungen, Atemstörungen, Kreislaufkollaps und Minderversorgung des Gehirns und Herzens. [5]

Kohlenmonoxid entsteht bei Sauerstoffmangel, durch die unvollständige Verbrennung. Aufgrund der instationären Charaktere der Dieselerbrennung, kommt es bei Luftüberschuss jedoch auch zur CO-Bildung. Gründe dafür sind die Inhomogenität der Ladung und der Wandfilmeffekt. Während der Verbrennung sind die Konzentrationen am höchsten und werden mit der folgenden Gleichung 2-2, unter Reduktion von Wasserdampf, zu CO₂ oxidiert. [5]



Gleichung 2-2

2.1.2 Entstehung von unverbrannte Kohlenwasserstoffe HC

Wie der Name des Schadstoffes schon beinhaltet, entstehen HC durch unvollständige Verbrennung der Moleküle des Kraftstoffes. Die unverbrannten und teilverbrannten Kohlenwasserstoffe steigen bei Luftmangel an. Bei Dieselmotoren sind meist höhermolekulare Verbindungen im Abgas zu finden. Je nach Tropfengröße werden die

Kohlenwasserstoffkomponenten als blauer oder weißer Rauch sichtbar, wenn die Temperatur des Abgases die der Sättigung unterschreitet. [5]

Die negativen Auswirkungen auf den menschlichen Organismus abhängig von dem chemischen Aufbau sind Schleimhautreizungen oder krebsfördernde Wirkungen [5].

2.1.3 Entstehung von Partikelemissionen

Partikel ist ein Sammelbegriff für alle flüssigen und festen Bestandteile (Aerosole), die so wie unverbrannte HC, bei der unvollständigen Verbrennung entstehen. Ein unverbrannter, elementarer und fester Kohlenstoff ist Ruß, dieser entsteht bei örtlichem Luftmangel und bei hohen Temperaturen. Kohlenwasserstoffe, welche zum Teil aus dem Kraftstoff und zum Teil aus dem Schmieröl stammen kondensieren an diesen Rußpartikeln. Sulfate SO_x , die aus nicht gasförmigen unverbrannten Kohlenwasserstoffen bestehen sind ebenfalls enthalten. Diese sind toxisch und entstehen aus der Reaktion des im Kraftstoff befindlichen Schwefels. Schwarzrauch kann bei Volllastbetrieb von Dieselmotoren entstehen. Dies geschieht trotz Luftüberschuss, wenn lokale Luftmangelgebiete auftreten, in denen verstärkt Ruß entsteht. [5]

Bedenklich für den Menschen sind die toxischen Kohlenstoffe die an dem Ruß angelagert sind, da diese zum Teil als krebserregend eingestuft werden. Des Weiteren spielt die Partikelgröße noch eine wichtige Rolle, da sogenannte Nano-Partikel in das menschliche Atemsystem eindringen können. [5]

2.1.4 Entstehung von Stickstoffoxide NO_x

Bis auf wenige Ausnahmen (N_2O , ...) wird die Summe des Stickstoffmonoxid NO und Stickstoffdioxid NO_2 meist mit der Bezeichnung NO_x für Stickoxide abgekürzt [3].

Unter Einwirkung von UV-Licht wird das in die Umwelt abgegebene NO zu einem erheblichen Anteil in NO_2 umgewandelt. Das NO_2 , ein hochgiftiges Reizgas, kann aufgrund seiner geringen Wasserlöslichkeit, tief in die Lungenperipherie eindringen und Lungenfunktion und Infektionsresistenz beeinträchtigen. In der Troposphäre begünstigen die Stickoxide die Bildung von bodennahem Ozon und fotochemischem Smog, welche Schädigungen in der Pflanzenwelt hervorrufen können. [5]

Die Abbildung 2-2 zeigt die Entstehungsbereiche von Ruß und NO_x-Emissionen in Abhängigkeit der lokalen Flammentemperatur.

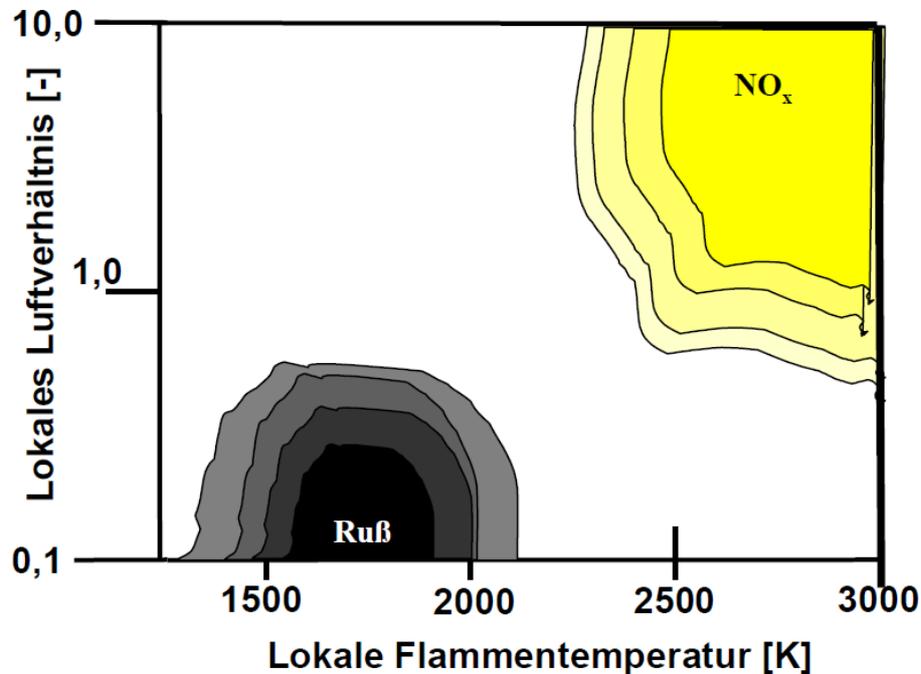


Abbildung 2-2: Entstehungsbereich Ruß- und NO_x-Emissionen [6]

Beide Emissionen werden bei unterschiedlichen Temperaturen gebildet, somit ist es leider nicht möglich beide gleichzeitig zu reduzieren, da die Reduzierung der NO_x-Emissionen bei niedrigeren Flammentemperaturen möglich wäre, wodurch im Gegenzug die Rußbildung erhöht werden würde. [6]

Es gibt zwei wesentliche Bildungsmechanismen von NO, thermisch gebildetes NO und die Prompt-NO.

Bildung des Thermischen NO

Bei mageren Bedingungen und hohen Flammentemperaturen entstehen die sogenannten thermischen NO oder *Zeldovich*-NO durch die drei Reaktionen Gleichung 2-3 bis Gleichung 2-5. Gleichung 2-3 beschreibt die erste Reaktion, die aufgrund der hohen Aktivierungsenergie und der starken N₂-Dreifachbindungen erst bei sehr hohen

Temperaturen ausreichend schnell abläuft und dadurch die Geschwindigkeit der Stickoxid-Bildung bestimmt. [7]



Bei Temperaturen oberhalb von 2200 K entsteht aus molekularem Sauerstoff atomarer Sauerstoff, dies ist die Grundbedingung für den Start der *Zeldovich*-Reaktion (Gleichung 2-4 und Gleichung 2-5). Die hohen Temperaturen sind lokale Spitzentemperaturen im Brennraum. Eine weitere Grundvoraussetzung ist ein lokaler Luftüberschuss. Bei Dieselmotoren ist das NO_x -Konzentrationsmaximum zu etwas höheren Luftverhältnissen verschoben. Wie in Abbildung 2-1 ersichtlich ist, weisen die NO_x -Konzentrationen für fallendes λ einen kontinuierlichen wachsenden Verlauf auf, dies ist auf die steigende Abgastemperatur zurückzuführen. Die steigende Temperatur begünstigt, bis zu einem Wert von $\lambda=2$, die Zunahme der NO_x -Konzentration trotz abnehmendem Sauerstoffgehalts. [3]

Bildung des Prompt-NO

Aufgrund des Zusammenhangs der Bildung der CH-Radikale und der NO-Entstehung, ist die Bildung von Prompt-NO, auch *Fenimore*-NO genannt, wesentlich komplizierter als die des thermischen NO. Dieses Stickstoffmonoxid bildet sich derart deutlich schneller, da hier die Temperaturabhängigkeit deutlich geringer ausfällt und diese schon bei niedrigen Temperaturen von circa 1000 K gebildet werden. Mit Hilfe von Luftstickstoff und den CH-Radikalen reagieren diese unter Bildung von Blausäure (HCN) zu NO, siehe Gleichung 2-6. [8]



3 Maßnahmen zur Erfüllung der Emissionsgesetze bei Dieselmotoren

Im folgenden Abschnitt sollen die innermotorischen und außermotorischen Maßnahmen für die Reduzierung der Schadstoffemissionen erläutert werden.

3.1 Innermotorische Maßnahmen

Die Verbrauchs- und Emissionsminderung stellen die wichtigsten Ziele bei der Optimierung von Dieselmotoren dar. Einige Zusatzmaßnahmen erlauben eine gleichzeitige Verbesserung der beiden Ziele. Diese Diplomarbeit behandelt vorrangig das Thema externe SCR-Abgasnachbehandlung, weshalb dieser Abschnitt nur kurz behandelt wird.

3.1.1 Variationen des Einspritzzeitpunkts

Die Gemischbildung aus Luft und Kraftstoff hängt auch von dem Einspritzbeginn ab, da die momentane Lage des Kolbens zum oberen Totpunkt, die Bewegung der Luft im Brennraum, sowie deren Dichte und Temperatur beeinflusst. Je nach Motorlast, Drehzahl und Motortemperatur sind die Sollwerte für den Einspritzbeginn verschieden und werden für jeden Motor ermittelt und in einem Spritzbeginnkennfeld gespeichert. [9]

Früherer Einspritzbeginn

Kurz vor dem oberen Totpunkt (OT) des Kolbens stellt sich die höchste Kompressionstemperatur ein. Der Verbrennungsdruck steigt steil an, wenn die Verbrennung weit vor OT eingeleitet wird. Der Wirkungsgrad des Motors wird aufgrund der dabei abgegebenen Wärmemenge verschlechtert und der Kraftstoffverbrauch somit erhöht. Daher steigen die Brennraumtemperatur und somit auch die NO_x-Emissionen bei verringertem HC-Ausstoß. Bei kaltem Motor reduziert der frühe Spritzbeginn und/oder eine Voreinspritzung den Blau- und Weißrauch. [9]

Später Einspritzbeginn

Da die Brennraumtemperatur wieder sinkt kann es bei einem späteren Einspritzbeginn bei geringer Last zu unvollständiger Verbrennung kommen. Dies führt zu höheren HC- und Kohlenmonoxid CO-Emissionen. [9]

Aufgrund der Trade-offs zwischen Kraftstoffverbrauch, HC-, Ruß- und NO_x -Emissionen werden bei der Anpassung des Einspritzbeginns Kompromisse und enge Toleranzen bei jedem Motor verlangt [9].

In Abbildung 3-1 werden die Streubänder der NO_x - und HC-Emissionen in Abhängigkeit vom Einspritzbeginn dargestellt, wobei a_N den optimalen Einspritzbeginn bei Nulllast und a_V den optimalen Einspritzbeginn bei Volllast bezeichnet.

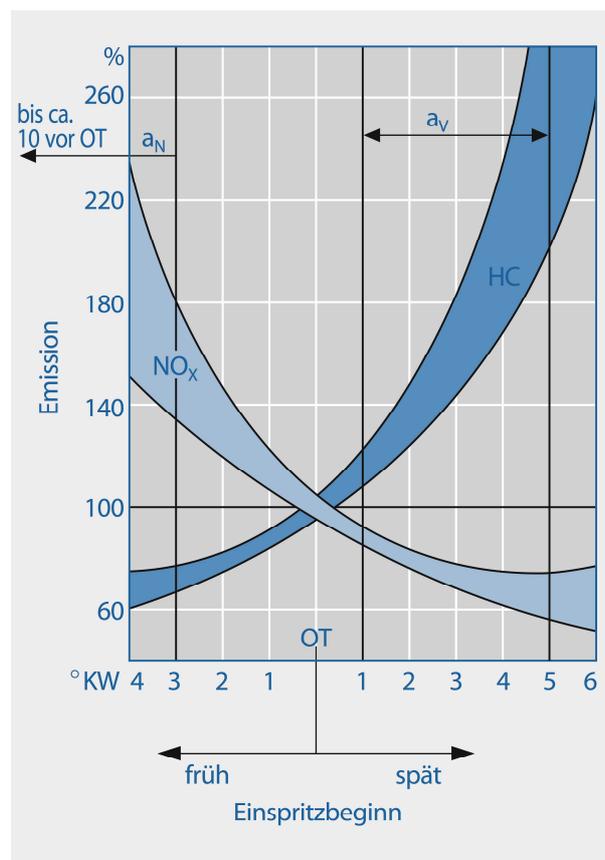


Abbildung 3-1: Streubänder der NO_x - und HC-Emissionen in Abhängigkeit vom Spritzbeginn [9]

3.1.2 Abgasrückführung

Eine sehr wirksame Methode NO_x -Emissionen zu reduzieren ist die Abgasrückführung AGR. Durch die Rückführung eines Teils des Abgasmassenstroms erfolgt zunächst eine Absenkung der Brenngeschwindigkeit. Des Weiteren erfolgen durch den erhöhten Inertgasanteil im Brennraum eine Reduzierung der lokalen Spitzentemperaturen sowie eine Verringerung des Sauerstoffpartialdrucks, wodurch die NO_x -Emissionen signifikant reduziert werden können. Es gibt zwei unterschiedliche AGR-Systeme, die Hoch- und Niederdruck Abgasrückführung. [10]

In Abbildung 3-2 wird das Prinzip der Hochdruck-AGR dargestellt.

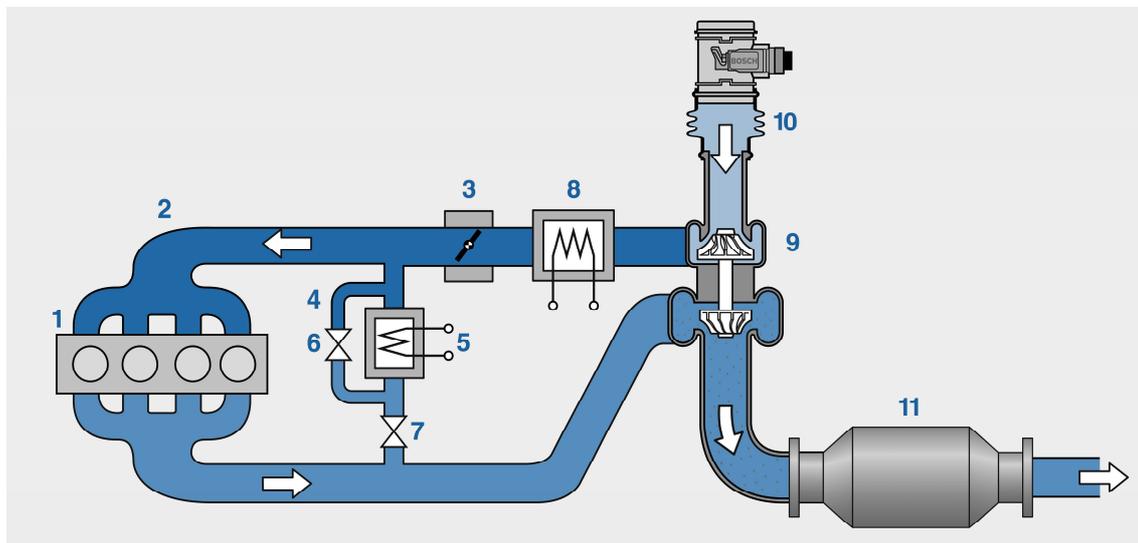


Abbildung 3-2: Prinzip der Hochdruck-AGR [10]

In Abbildung 3-2 bezeichnen die Nummerierungen 1-11 den Motor (1), das Saugrohr (2), die Drossel (3), den Bypass (4), den AGR-Kühler (5), das Bypass-Ventil (6), das AGR-Ventil (7), den Ladeluftkühler (8), den Abgasturbolader (9), den Luftmassenmesser (10) und den Oxidationskatalysator (11) [10].

Bei der Hochdruck-AGR wird vor der Turbine des Abgasturboladers das Abgas abgezweigt und vor dem Luftsammler mittels einer Mischeinrichtung dem Motor zugeführt. Die Differenz des Druckes zwischen Abgasgedruck vor der Turbine, dem

Saugrohrdruck und die Stellung des AGR-Ventils sind für die AGR-Menge zuständig. Über die Messung der Luftmasse kann die Regelung der AGR durch die Lambda-Regelung präzisiert werden. [10]

Das Prinzip der Niederdruck-AGR wird in Abbildung 3-3 dargestellt.

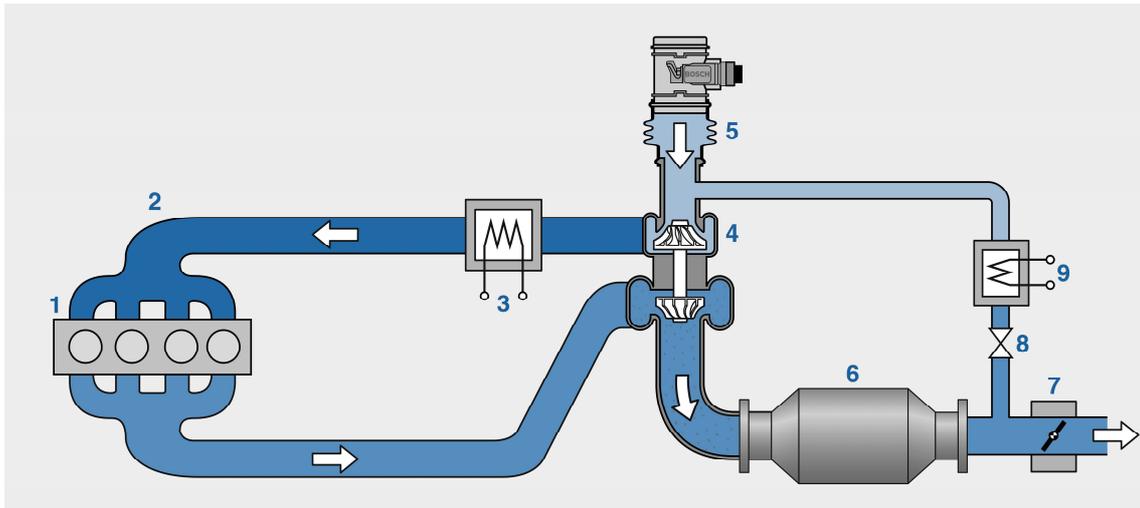


Abbildung 3-3: Prinzip der Niederdruck-AGR [10]

Die Nummerierungen in Abbildung 3-3 bezeichnen den Motor (1), das Saugrohr (2), den Ladeluftkühler (3) den Abgasturbolader (4), den Luftmassenmesser (5), den Oxidationskatalysator (6), die Drossel (7), das AGR-Ventil (8) und den AGR-Kühler (9) [10].

Im Gegensatz zu der Hochdruck-AGR wird bei der Niederdruck-AGR das zurückgeführte Abgas erst nach der Turbine beziehungsweise nach DPF der Abgasnachbehandlung entnommen und luftseitig vor dem Verdichter zugeführt. Vorteile dieses Systems sind unter anderen die optimale Gleichverteilung zwischen den einzelnen Ventilen, sowie die intensivere Kühlung des Abgas-Frischluft-Gemisches. Des Weiteren wird der gesamte Abgasmassenstrom durch die Turbine geleitet und somit die Erhöhung und weitgehende Entkopplung des möglichen Ladedrucks von der AGR-Rate ermöglicht. Jedoch ist die Niederdruck-AGR bei dynamischem Betrieb ungünstiger. Grund dafür ist das größere mit Abgas kontaminierte Volumen. [10]

Das zurückgeführte Abgas wird in einem Wärmetauscher mit Motorkühlmittel gekühlt, was zu einem Anstieg der Dichte im Saugrohr führt und eine niedrigere Verdichtungstemperatur zur Folge hat. Die AGR-Verträglichkeit steigt an und somit führen die höheren AGR-Raten zu deutlich niedrigeren NO_x-Emissionen. Dies führt jedoch bei den ohnehin niedrigen Abgastemperaturen des Dieselmotors, zu einer instabilen Verbrennung, wodurch die HC- und CO-Emissionen signifikant ansteigen. Aus diesem Grund ist ein abschaltbarer AGR-Kühler, bis der Oxidationskatalysator seine Anspringtemperaturen erreicht hat, sehr wirkungsvoll. [10]

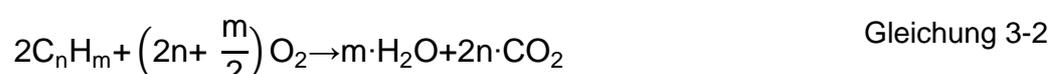
3.2 Außermotorische Maßnahmen

Als außermotorische Maßnahmen werden externe Maßnahmen zur Emissionsreduktion bezeichnet. In den weiterführenden Abschnitten werden der Oxidationskatalysator DOC, Dieselpartikelfilter DPF und die zur Stickstoffreduzierung verwendeten Systeme, wie der NO_x-Speicherkatalysator NSK und die Selektive Katalytische Reduktion SCR beschrieben. Da das SCR-System das Hauptthema dieser Diplomarbeit darstellt, wird dieses System in einem eigenen Kapitel (siehe Kapitel 4) im Detail beschrieben.

3.2.1 Dieseloxidationskatalysator DOC

Die Umsetzung von Kohlenmonoxid CO und unverbrannten Kohlenwasserstoffen zu CO₂ und H₂O zählt zu den Hauptaufgaben des Dieseloxidationskatalysators. Des Weiteren kann er die Partikelmasse vermindern, da der DOC in der Lage ist, die Oxidation der an Partikeln adsorbierten Kohlenwasserstoffe zu katalysieren. Für die Abgasmachbehandlungsteilen, wie den NO_x-Speicherkatalysator oder den SCR-Katalysator kann der DOC die Erhöhung des Anteils an NO₂ gegenüber der Menge an NO in Dieselabgasen ermöglichen. [11]

Die Oxidation wird mit den Gleichungen Gleichung 3-1 bis Gleichung 3-2 beschrieben [12]:



3.2.2 Dieselpartikelfilter DPF

Die Partikelemissionsreduktion wird seit Jahren in der Automobilbranche durch den Partikelfilter ermöglicht. Die festen Partikel werden im Abgas an den Wänden des DPF abgeschieden [13].

Es wird zwischen geschlossenen und offenen Partikelfiltern unterschieden [9]. Der geschlossene Partikelfilter besteht aus einem Wabenkörper aus Siliziumkarbid oder Cordierit [9]. Aluminiumtitanat ist ebenfalls ein gebräuchliches Material für Dieselpartikelfilter [14]. Die meist quadratischen Kanäle weisen eine Dicke von 300 bis 400 μm auf [9].

In Abbildung 3-4 ist der Aufbau eines geschlossenen Partikelfilters dargestellt.

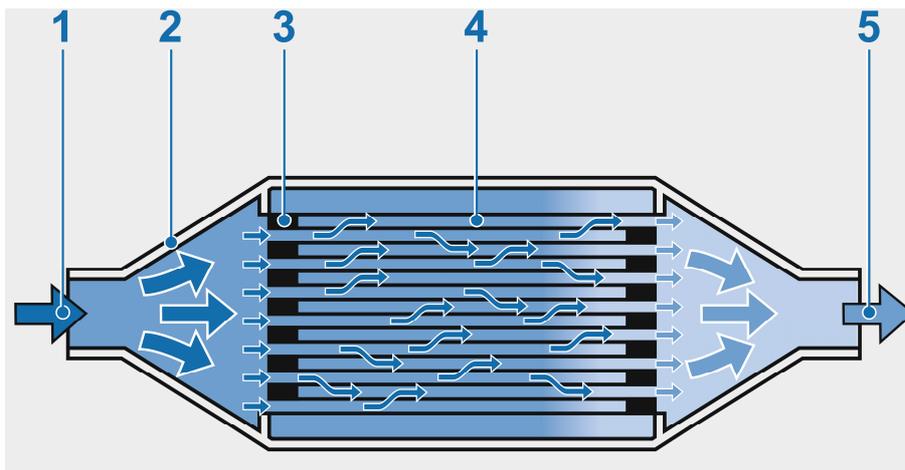


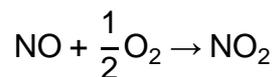
Abbildung 3-4: Keramischer Partikelfilter [9]

In Abbildung 3-4 bezeichnen die Nummerierungen 1-5 das eingeströmte Abgas (1), das Gehäuse des Dieselpartikelfilters (2), die Keramikstopfen (3), die Wabenkeramik (4) und das ausströmende Abgas (5). Des Weiteren ist ersichtlich, wie das Abgas durch die porösen Keramikwände durchströmen muss, da die Seiten mittels der Keramikstopfen wechselseitig verschlossen sind. Durch Diffusion werden die Partikel zuerst zu den Porenwänden transportiert und bleiben anschließend durch Tiefenfilterung haften. Des Weiteren bildet sich bei zunehmender Beladung des Filters auch eine Rußschicht auf den

Oberflächen der Kanalwände. Dies bewirkt eine Oberflächenfilterung. Im Gegensatz zu Wall-Flow-Filtern lagern auf der Oberfläche der Keramikwände die Partikel an (Oberflächenfilterung). Nur ein Anteil des Abgases wird durch eine Filterwand bei den offenen Partikelfiltern geleitet, wobei der Rest des Abgases ungefiltert vorbeiströmt. Der Abgasgedruck steigt bei beiden Arten von Partikelfiltern mit der Anzahl der anhaftenden Partikeln an und das Beschleunigungsverhalten des Fahrzeuges wird beeinträchtigt, wodurch in regelmäßigen Abständen der Partikelfilter regeneriert werden muss. [9]

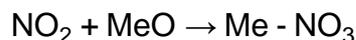
3.2.3 NO_x-Speicherkatalysator

Das Prinzip des NO_x-Speicherkatalysators kann in vier grundlegende Schritte gegliedert werden. Gleichung 3-3 beschreibt bei Magerbetrieb des Motors die Oxidation des enthaltenen NO im Abgas mit Sauerstoff am Edelmetall des Katalysators. [15]



Gleichung 3-3

Wie aus Gleichung 3-4 ersichtlich, reagiert das gebildete NO₂ mit den im Katalysator eingelagerten Metalloxiden MeO weiter zu einem entsprechenden Nitrat. Die Metalloxide werden als Speichermaterial verwendet. Dieses wird verbraucht, da die Reaktion nicht katalytisch sondern stöchiometrisch verläuft. [15]

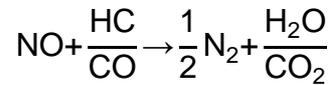


Gleichung 3-4

Die Effektivität der Nitratbildung sinkt dadurch mit der gespeicherten NO₂-Menge ab. Daher muss zur Aufrechterhaltung der NO_x-Reduktion, nachdem der Sättigungszustand erreicht worden ist, das Speichermaterial periodisch regeneriert werden. Diese Regeneration wird durch den kurzfristigen unterstöchiometrischen Motorbetrieb ermöglicht. Die Temperaturstabilität des Nitrates ist unter diesen Bedingungen geringer als im Magerbetrieb und somit kommt es zum Zerfall des Nitrates in NO und MeO. Mithilfe der in fetten Betriebsbedingungen vorhandenen HC und CO wird das freigesetzte NO in N₂ konvertiert (siehe Gleichung 3-5 und Gleichung 3-6).



Gleichung 3-5



Gleichung 3-6

Die vier Grundreaktionen und somit auch das Funktionsprinzip des NO_x -Speicherkatalysators sind in Abbildung 3-5 dargestellt.

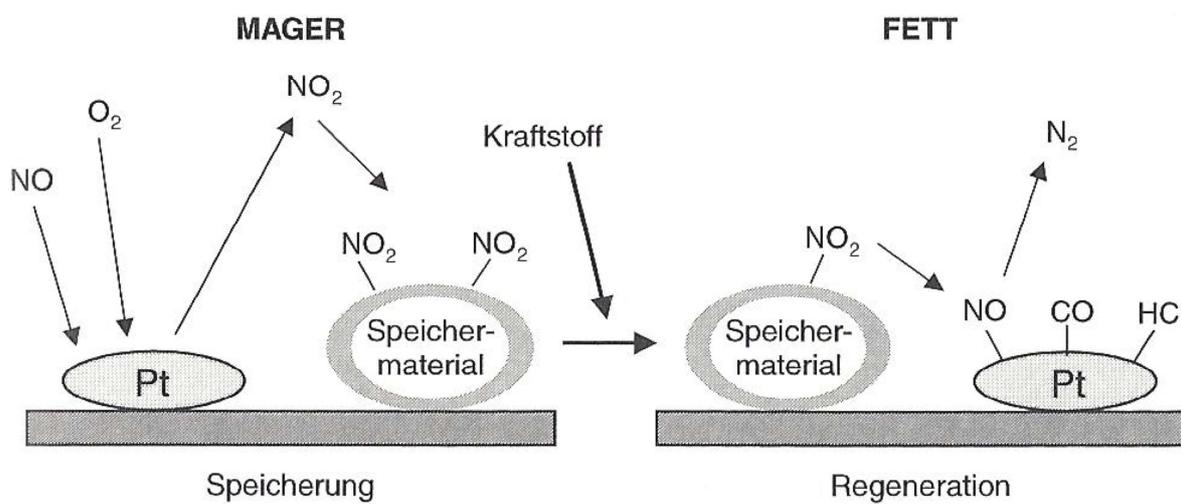


Abbildung 3-5: Modellbeispiel der NO_x -Speicherung und Regeneration [15]

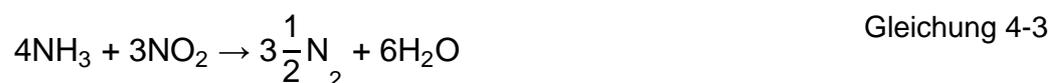
Die Anwendbarkeit von NO_x -Speicherkatalysatoren im Automobilbereich stellt Anforderungen wie NO_x -Speicherfähigkeit, Regenerationsfähigkeit und Arbeitstemperaturbereich hinsichtlich seiner Konvertierungsleistung im Neuzustand dar [15].

4 Selektive katalytische Reduktion

Nach den Grundlagen, soll nun das Hauptthema der Diplomarbeit in einem gesonderten Kapitel behandelt werden. Zusätzlich zur Erklärung der selektiven katalytischen Reduktion von Stickoxiden, mittels Ammoniak NH_3 in einem SCR (selektive katalytische Reduktion)-System, soll des Weiteren das verwendete Reduktionsmittel AdBlue und seine Alternativen ausführlich beschrieben werden.

Da die Oxidation des Reduktionsmittels trotz der Gegenwart von molekularem Sauerstoff mit dem Sauerstoff der Stickoxide erfolgt, wird der Begriff selektiv verwendet. Als Reduktionsmittel wird Ammoniak eingesetzt, da nur dieses einer selektiven Umsetzung der Stickoxide gerecht werden kann [16].

In dem nachfolgenden SCR-Katalysator der Abgasnachbehandlung werden die Stickoxide NO_x unter der Verwendung des entstandenen Ammoniaks reduziert. Der Ablauf der dabei entscheidenden Reaktionen kann den nachfolgenden Gleichungen (Gleichung 4-1 bis Gleichung 4-3) entnommen werden [16]:



Bei Gleichung 4-1 handelt es sich um die Standard-SCR Reaktion. Hier werden Stickstoffmonoxid und das Ammoniak 1:1 umgesetzt [17].

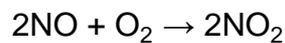
Eine wesentlich raschere Reaktion (Gleichung 4-2) läuft hingegen ab, wenn im Abgas ein äquimolares Verhältnis zwischen NO und NO_2 vorliegt. Diese Reaktion wird aufgrund ihrer zehnfachen höheren Reaktionsgeschwindigkeit zu der Standard-SCR Reaktion als Fast-SCR-Reaktion benannt [18]. Mithilfe eines vorgeschalteten Oxidationskatalysators

kann bewusst dieses äquimolare Verhältnis von NO zu NO₂ beeinflusst werden. Dieser oxidiert NO zu NO₂. [17]

Die geringste Reaktionsgeschwindigkeit weist die Gleichung 4-3 auf. Diese Reaktion wird NO₂-Reaktion genannt, da in diesem Falle von Stickstoffreduktion in einem SCR-Katalysator der Anteil an NO₂ den NO-Anteil übersteigt. [17]

Oxidation von NO zu NO₂

Bei Luftüberschuss entstehen Stickstoffmonoxid und -dioxid in einem gewissen thermodynamischen Gleichgewicht zueinander. Die Oxidation von NO zu NO₂ ist gleichgewichtslimitiert und die Gleichung 4-4 zeigt die trimolekulare NO-Oxidation. [19]



Gleichung 4-4

Je nach Konzentration der Reaktionspartner liegt die Limitierung der NO_x-Oxidation durch das thermodynamische Gleichgewicht bei Temperaturen von 200-280°C. Dieses thermodynamische Gleichgewicht (Punkt-Linie) wird für verschiedene Sauerstoffkonzentrationen (1, 5, 10% O₂) in Abbildung 4-1 dargestellt. Nach dem Prinzip von *Le Chatelier* verschiebt sich das Gleichgewicht bei Erhöhung der O₂-Konzentration zu Gunsten des NO₂-Anteils und dies ist in Abbildung 4-1 zu erkennen. [19]

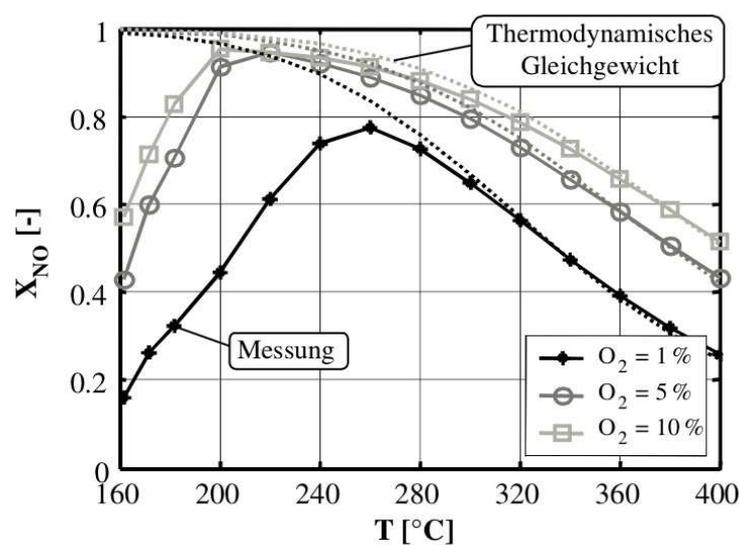


Abbildung 4-1: NO-Oxidation bei konstanten NO-Zulauf von NO=550ppm [19]

Der Anteil an NO₂ im dieselmotorischen Abgas ist betriebspunktabhängig und liegt zwischen 5 und 50% der gesamten NO_x-Konzentration [3].

4.1 Adblue

AdBlue ist eine klare farblose Flüssigkeit, mit einem schwachen ammoniakalischen Geruch. Es handelt sich dabei um eine 32,5 prozentige Harnstoffwasserlösung. Da es sich dabei nicht um einen Gefahrenstoff handelt, ist es leicht zu handhaben. [20]

Das Reduktionsmittel ist in einer technischen Norm (Qualitätsanforderungen) festgehalten: „DIN 70070 NO_x-Reduktionsmittel AUS 32“. Der Grund dafür liegt nicht nur darin, dass unterschiedliche Harnstofflösungen zu unterschiedlichen Werten bei der Stickstoffreduktion führen, sondern auch zu einer Schädigung des Abgasnachbehandlungssystems führen würden. [21]

In Tabelle 4-1 werden die wichtigsten Eigenschaften von AdBlue aufgelistet.

Tabelle 4-1: Produkteigenschaften von AdBlue [20], [22]

Wichtige Eigenschaften von AdBlue	
Summenformel	CH ₄ N ₂ O
Harnstoffgehalt	31,8 - 33,2 Gew.-%
Dichte bei 20°C	1,0870-1,0930 g/cm ³
Viskosität bei 25°C	1,4mPa s
Kristallisationsbeginn	-11,5°C
Aussehen	klare farblose Flüssigkeit, kein bis schwacher Geruch nach Ammoniak
Löslichkeit	mit Wasser in jedem Verhältnis mischbar
Besondere Gefahren	Keine bekannt. Produkt ist nicht brennbar

In Österreich produziert die Borealis Agrolinz Melamine GmbH AdBlue [20].

4.1.1 Aufbereitung des Reduktionsmittels

Das AdBlue wird mittels eines Injektors in den Abgasstrang eidosiert, wodurch dieses sich durch physikalische und chemische Prozesse in gasförmiges Ammoniak umwandelt. Zu einer Verdampfung des Wasseranteils in den Tropfen, auch als Trocknung bezeichnet, kommt es aufgrund der aerodynamischen Kräfte und Wärme von der turbulenten Abgasströmung auf die Tropfen des eidosierten Sprays. Bei der sogenannten Thermolyse schmilzt, verdampft und dissoziiert der verbleibende Harnstoff zu Ammoniak und Isocyan säure (siehe Gleichung 4-5). [23]



Unter Aufnahme von Wasser reagiert die entstandene Isocyan säure zu Ammoniak und Kohlendioxid. Dieser Vorgang wird als Hydrolyse bezeichnet und in Gleichung 4-6 dargestellt. [23]



Es ist erforderlich, dass die zweite Reaktion durch die Wahl geeigneter Katalysatoren und genügend hoher Temperatur (ab 250°C) ausreichend schnell erfolgt, um feste Ausscheidungen zu vermeiden [9].

In Abbildung 4-2 sind die einzelnen physikalischen und chemischen Teilschritte der Reduktionsmittelaufbereitung, von der Dosierstelle bis zum Eintritt in den Katalysator, dargestellt.

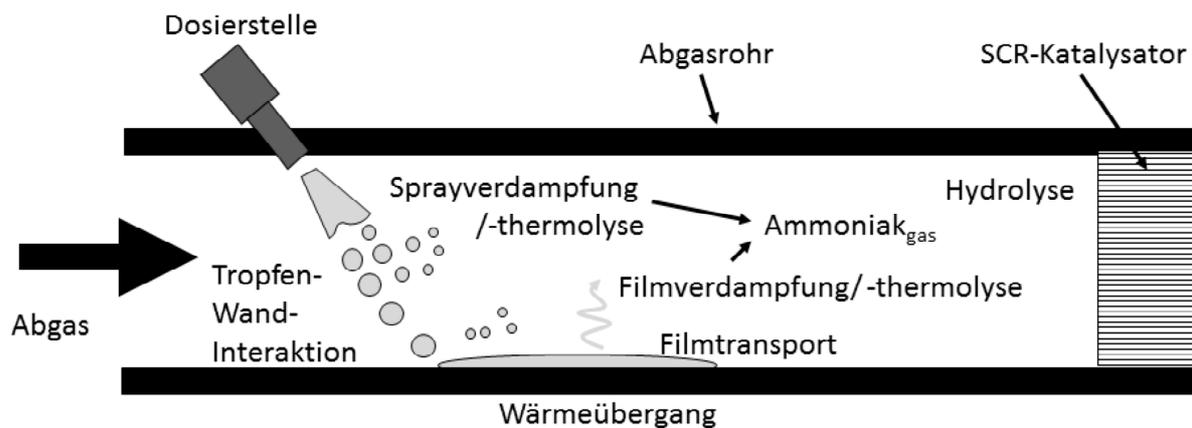


Abbildung 4-2: Prozesskette der Ammoniakzubereitung [24]

An den SCR-Katalysatoren werden Trägermaterialien angebracht. Typische Materialien sind Vanadiumpentoxid V_2O_5 und Wolframtrioxid WO_3 , die an das Trägermaterial Titandioxid TiO_2 angebracht werden. Es können anstelle von WO_3 auch Molybdäntrioxide MoO_3 angebracht werden. Die Zusammensetzung der SCR-Katalysatoren besteht aus 0,5-3% Vanadiumpentoxid als Aktivkomponente und 5-10% Molybdän- bzw. Wolframoxid als Promoter. Da sich Vanadiumpentoxid bereits bei Temperaturen von circa $660^\circ C$ zu verflüchtigen beginnt, wird, obwohl dieses einen hervorragenden Katalysator darstellt, nach alternativen Katalysatoren gesucht. Diese Temperaturen können bei der unkontrollierten Regeneration des vorgeschalteten DPF im SCR-System auftreten und somit zum Austrag des V_2O_5 führen. Der Katalysator wird dadurch deaktiviert. Aus diesem Grund wird vermehrt an Zeolith-SCR-Katalysatoren ohne Vanadium gearbeitet. [25]

In [Abbildung 4-3](#) wird ein heute übliches SCR-System für PKW dargestellt. Zuerst kommen ein Oxidations-Katalysator und ein Dieselpartikelfilter zum Einsatz. Danach wird AdBlue mittels eines Injektors in den Abgasstrang eidosiert, welches im darauffolgenden SCR-Katalysator reagieren kann. [26]

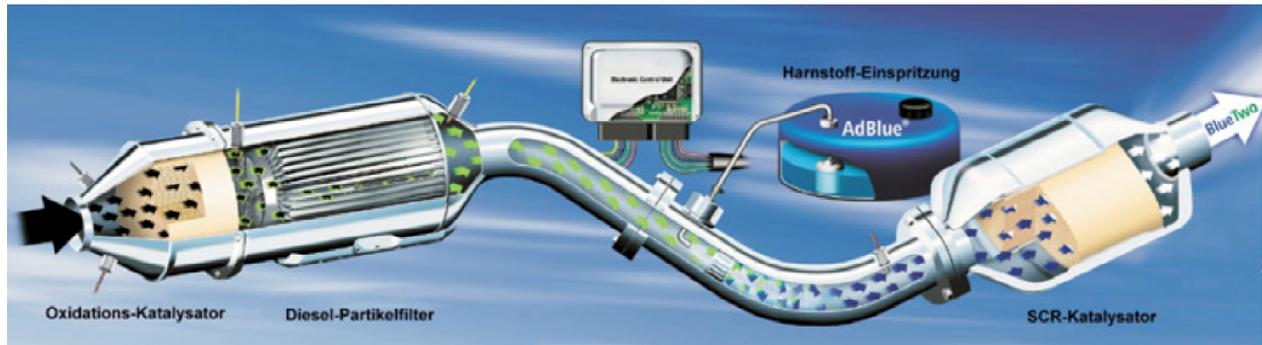


Abbildung 4-3: Schematische Darstellung eines SCR-Systems für PKW [26]

4.1.2 Alternative Reduktionsmittel

Da AdBlue einige Nachteile aufweist, sollen hier kurz alternative Reduktionsmittel erwähnt werden.

Die Nachteile von AdBlue sind:

- der Gefrierpunkt von $-11,5^{\circ}$ [20]
- feste Zersetzungsprodukte, die entstehen, wenn die Harnstofflösung auf kühle Flächen auftrifft [27]
- Wärmestabilität, da oberhalb einer bestimmten Temperatur eine Abspaltung von Ammoniak entsteht [27]
- Ammoniakfreisetzungspotential ist mit $0,2 \text{ kg/l}$ relativ gering [28]

Mögliche alternative Reduktionsmittel sind alle Ammoniakvorläufersubstanzen [27].

Ammoniumformiat

Ammoniumformiat hat sich als geeignetes Additiv für die Absenkung des Gefrierpunktes herausgestellt. Denoxium -30, ist eine Lösung von 24% Ammoniumformiat und 20% Harnstoff in Wasser, die unter diesem Namen im Handel erhältlich ist. Der Gefrierpunkt kann dadurch auf -30° abgesenkt werden. [27]

Jedoch kann unter 300°C die Bildung von Methanamid und Blausäure (HCN), die als giftig eingestuft sind, festgestellt werden [28].

Guanidiniumformiat (GuFo)

Die extrem hohe Löslichkeit von 6,1 kg pro Liter Wasser bei 20° ist bemerkenswert und eine Kristallisation, wie bei eingetrocknetem AdBlue, ist nicht möglich. Des Weiteren kann ein Gefrierpunkt von -28°C erreicht werden. Wie auch bei Ammoniumformiat, werden auch bei diesem Ammoniakvorläufer, Methanamid und Blausäure (HCN) unter 220°C vorgefunden. [27]

Somit erschließt sich, dass Ammoniumformiate und Guanidiniumformiate nicht für die Eindosierung in den Abgasstrang geeignet sind [27].

4.2 NH₃ Schlupf

Für Pkw existieren bis zum heutigen Tag hinsichtlich NH₃-Emissionen, aus Automobilabgasen, keine Grenzwerte. Jedoch gibt es seit der Euro VI Norm einen Grenzwert von 10 ppm für schwere Nutzfahrzeuge [29]. Die Geruchsschwelle von Ammoniak in der Luft, liegt zwischen 5 und 40 ppm [30].

Der Anteil des eindosierten Reduktionsmittels der nicht an einer NO_x-Reduktion im SCR-Katalysator reagiert, wird als Ammoniakschlupf (NH₃-Schlupf) bezeichnet. Die Absorptionsfähigkeit des Katalysators wird bei längerer Eindosierung mit $\alpha > 1$ überschritten und das nicht umgesetzte NH₃ verlässt den SCR-Katalysator. Als α wird hierbei das „Feed-Verhältnis“ oder auch Dosierverhältnis bezeichnet. Dies ist definiert als das molare Verhältnis von zudosiertem NH₃-Äquivalent zu dem im Abgas vorhandenen NO_x. Da die theoretische maximal mögliche NO_x-Minderung dem Dosierverhältnis α entspricht, ist eine vollständige Beseitigung der NO_x-Emissionen bei $\alpha = 1$ theoretisch möglich. Jedoch kann nicht nur bei $\alpha > 1$ ein Ammoniakschlupf auftreten, sondern auch bei $\alpha < 1$, wenn es bei unzureichender Homogenisierung des AdBlue-Lösungsgemischs im Abgas zu einer inhomogenen Reduktionsmittelkonzentration am Eintritt der SCR-Katalysators führt. Somit muss neben der Umsatzoptimierung, die durch möglichst

großes Dosierverhältnis ermöglicht werden kann, auch auf einen möglichst kleinen Ammoniak schlupf geachtet werden. Als weitere Möglichkeit, neben einem geringen Dosierverhältnis, kann nach dem SCR-Katalysator noch ein Oxidationskatalysator als Sperrkatalysator angebracht werden. Dieser oxidiert NH_3 zu N_2 und H_2O . [3]

Im folgenden Abschnitt soll näher auf die Homogenisierung der AdBlue-Lösung im Abgasstrom eingegangen werden.

4.3 Gleichverteilung des eingebrachten Reduktionsmittelsprays

Die effektive Aufbereitung und Gleichverteilung des eindosierten AdBlue im Abgastrang ist erforderlich, um eine gute Stickoxidreduktion über den gesamten SCR-Katalysatorquerschnitt zu erhalten. Um diese Gleichverteilung zu verbessern ist die Wahl des richtigen Injektors, der das Reduktionsmittel in den Abgasstrang eindosiert, und ein Durchmischen des Abgasmassenstromes durch ein Mischelement erforderlich. Für die Aufbereitung des eingespritzten AdBlue ist auch die strömungsführende Geometrie und die Mischstreckenlänge von großer Bedeutung. [31]

4.3.1 Stand der Technik

Sowohl am Motorprüfstand, als auch auf Seiten der CFD-Simulation wurde auf dem Gebiet der Gleichverteilung des eingebrachten Reduktionsmittels, am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, aufwendige Forschungsarbeit geleistet. Es soll nun näher auf diese Arbeit eingegangen werden.

Fischer [32] adaptierte ein komplexes Tropfen-Wand-Interaktionsmodell für das HWL-Spray (CFD Modell). Simuliert wurden mit diesem Modell, die Tröpfchen-Wand-Wechselwirkungen, der Langzeit-Wandfilm, der Rohrwandkühlprozess durch eingespritztes HWL, Speicherung von Ammoniak aufgrund des Wandfilms, sowie die Zusammensetzung des Wandfilms.

Möltner [24] zeigte, bei einer einfachen Geometrie der Mischstrecke, sowohl experimentelle, als auch simulierte Untersuchungen bezüglich der Reduktionsmittelaufbereitung von AdBlue. Insbesondere wurde bei Möltner auf die Tropfen/Abgas- und Tropfen/Wandinteraktionen eingegangen.

Eine ideale Aufbereitung und Gleichverteilung, durch verschiedene Dosierwinkel und Abgasrohrführungen, sowie der Einfluss eines Mischelements, vor allem bezüglich deren Gegendruckverhalten, sowie Ablagerungserscheinungen wurde in der Arbeit von Bitto [2] behandelt. Die Gleichverteilungsuntersuchungen wurden sowohl an einem offenen (wie in dieser Arbeit) als auch an einem geschlossenen Katalysatorquerschnitt durchgeführt.

Smith et al. [33], zeigte basierend auf dem Modell von Fischer, Gleichverteilungsuntersuchungen mittels CFD Simulation. Wie in dieser Diplomarbeit, wurde der Einfluss der Gleichverteilung bei einer langen und einer kurzen SCR-Abgasanlage mit Mischelement dargestellt.

4.3.2 Mischelement zur Reduktionsmittel-Aufbereitung

Mischelemente werden bei der Abgasnachbehandlung nach der Dosierstelle des Injektors eingesetzt, um die Gleichverteilung der NH_3 -Konzentrationen zu verbessern [34].

In Abbildung 4-4 wird die Verbesserung der NH_3 -Verteilung aufgrund eines Mischelements im Abgasstrang dargestellt.

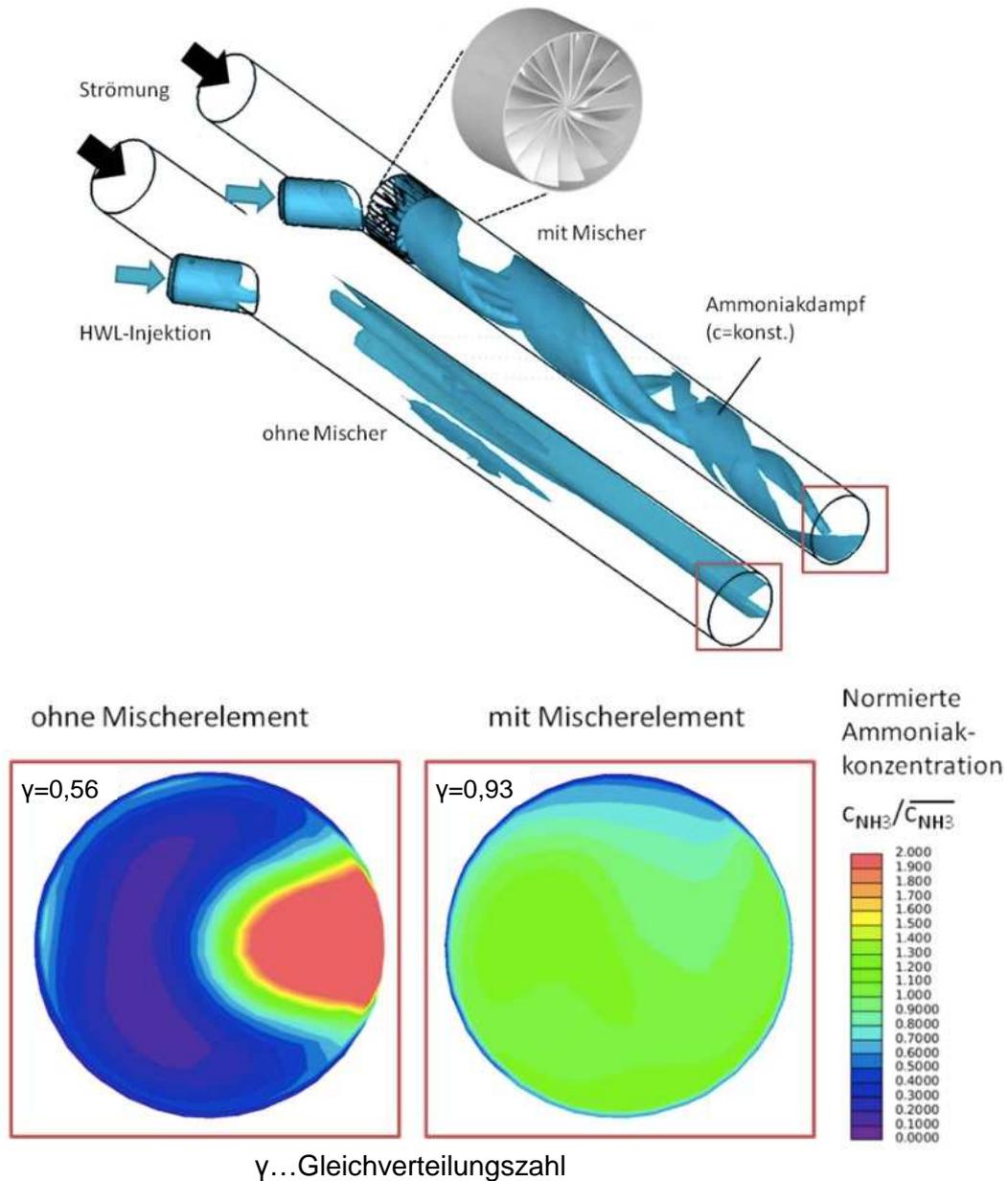


Abbildung 4-4: NH₃-Gleichverteilungverbesserung durch den Einsatz eines Mischelements: Flächen konstanter Ammoniakdampf-Konzentration (oben) und Gleichverteilung im Rohrquerschnitt (unten) [35]

Der Einbau eines Mischelements ist für eine gute Gleichverteilung des Reduktionsmittels im Abgasstrang unumgänglich. Die wesentlichen Funktionen des Mischelements sind Zerstäubung, Verdampfung und Durchmischung des Abgasmassenstromes. [34]

Zerstäubung

Auftreffende Tropfen des eindosierten AdBlue zerplatzen zu kleineren Tropfen. Aufgrund des günstigeren Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen, verdampfen kleinere Tropfen wesentlich schneller. Um diesen Vorgang zu realisieren dienen die Mischelementbleche als Prallfläche. [34]

Verdampfung

Das Mischelement nimmt die Temperatur des Abgasmassenstroms an. Somit heizt sich dieser auf und unterstützt die Verdampfung sowie das Zersetzen des Reduktionsmittels [34].

Durchmischung

Um eine optimale Gleichverteilung des Reduktionsmittels zu erhalten ist großflächiges Mischen, zum Ausgleich lokaler Konzentrationsunterschiede (Maxima und Minima des eindosierten AdBlue), erforderlich [34].

4.3.3 HWL-Injektor

Die Spraycharakteristik des Injektors ist für die effektive Aufbereitung und Gleichverteilung des eindosierten AdBlue-Sprays, ausschlaggebend [31]. Das Spraybild eines HWL-Injektors wird in Abbildung 4-5 dargestellt. An den drei Strahlen ist zu erkennen, dass es sich um einen Drei-Loch-Injektor handelt. In der Abbildung 4-5 bezeichnen die Winkel β den Umfangsverteilungswinkel, δ den Strahlwinkel und ε den Spraywinkel des Sprays [36].

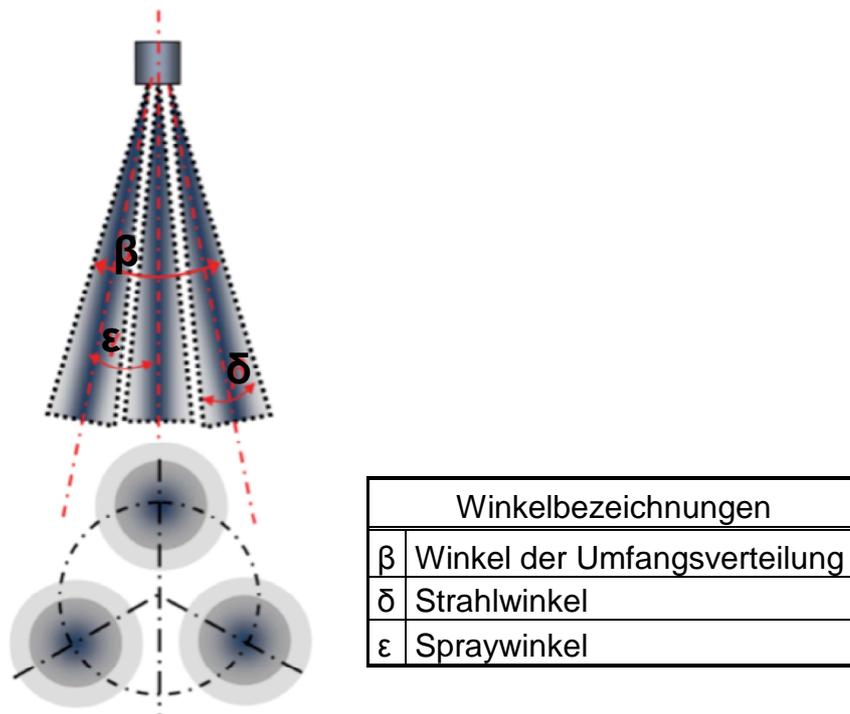


Abbildung 4-5: HWL-Injektor Spraybild [36]

Die Anzahl der Düsenlöcher und der Sprühwinkel sind Unterscheidungsmerkmale bei serienreifen, oder noch in der Entwicklung befindlichen Injektoren. Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf die Gleichverteilung des eindosierten Sprays, ist die Tropfengrößenverteilung. [24]

Die wichtigsten Kenngrößen der Tropfengrößenverteilung eines HWL-Injektors werden in Abbildung 4-6 beispielhaft dargestellt.

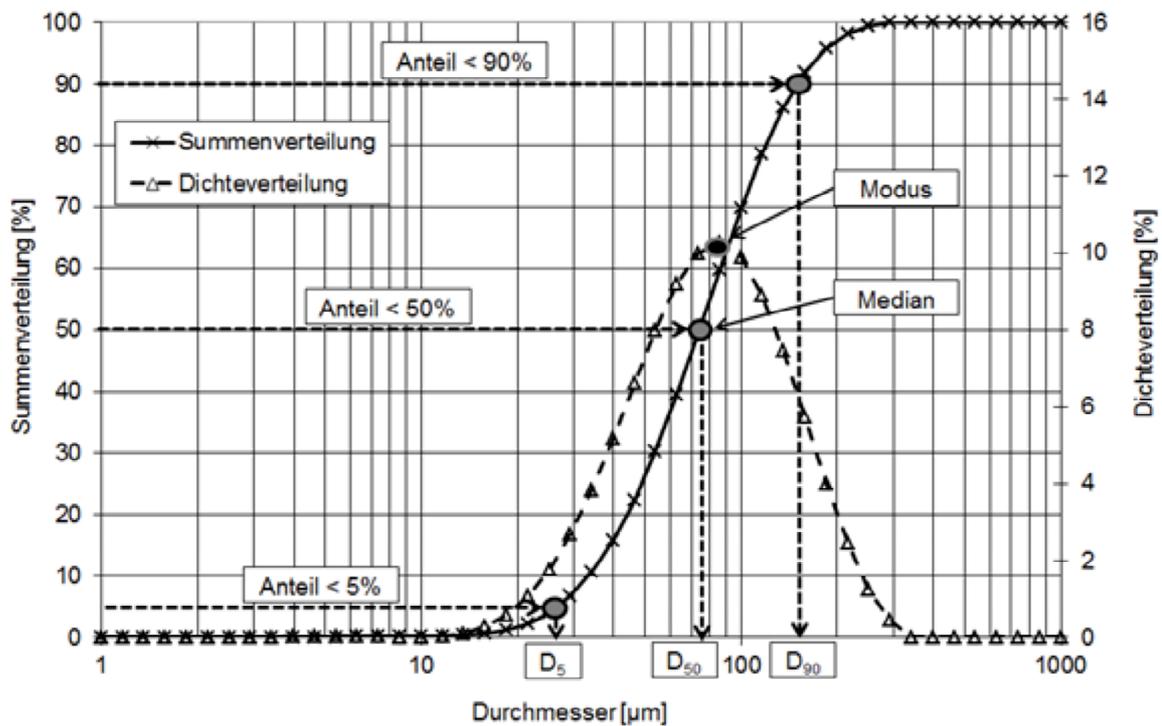


Abbildung 4-6: Summen- und Dichteverteilung eines Sprays mit den wichtigsten Kenngrößen [24]

Die einzelnen Messpunkte der Dichteverteilung beschreiben die absolute Häufigkeit einer bestimmten Durchmesserklasse. Als Modus wird die am häufigsten vorkommende Durchmesserklasse bezeichnet. Die Summenverteilung lässt sich mit Hilfe der Verteilungsfunktion nach Rosin-Rammler, Gleichung 4-7, aus der Dichteverteilung berechnen [24].

$$Y_d = e^{-\left(\frac{D_{Tr}}{D_{mean}}\right)^{n_{spread}}}$$

Gleichung 4-7

- Y_d ... kumulierte Häufigkeit einer Tropfengröße
 D_{Tr} ... Tropfendurchmesser in μm
 D_{mean} ... Mittlerer Durchmesser nach Rosin-Rammler in μm
 N_{spread} ... Gleichförmigkeitszahl nach Rosin-Rammler

Die Rosin-Rammler-Verteilungsfunktion, basiert auf der Annahme, dass eine exponentielle Korrelation zwischen dem Tropfendurchmesser D_{Tr} und dem Massenanteil Y_d von Tropfen mit einem Durchmesser $> D$ existiert [24].

Die Durchmesser D_5 -, D_{50} - und D_{90} -, bei denen der Anteil unter einer bestimmten kumulierten Häufigkeit liegt, für 5%, 50% und 90% aller erfassten Tropfen, lassen sich aus der Summenverteilung bestimmen [24].

Die Verteilung im Rohr wird somit von dem Sprühwinkel, der Tropfengröße und der Tropfengrößenverteilung beeinflusst. Die Auslegung der Position und die Ausrichtung des Injektors bestimmen, ob das Reduktionsmittel der Strömung folgt oder innerhalb des Abgasstranges zu verstärkten Ablagerungen führt. [34]

Die Vermeidung von Ablagerungen und dessen Folgeprodukten wie Biuret, Cyansäure oder Cyamelid ist ein weiteres wichtiges Kriterium bei der Harnstoffaufbereitung. Harnstoff der abgelagert wird steht zur SCR-Reaktion nicht zur Verfügung und führt somit zu einem Umsatzratenrückgang. Ablagerungsstellen beeinflussen die Strömungsverhältnisse innerhalb der gesamten Mischstreckenlänge und somit auch die Harnstoffaufbereitung. Diese Ablagerungen können zwar durch erhöhte Temperaturen beseitigt werden, jedoch führt dies zu einem Freisetzen von Ammoniak. [34]

Auf Ablagerungen wird bei den Untersuchungen dieser Diplomarbeit nicht eingegangen.

5 Spezifikationen der verwendeten Versuchsträger und Messmethodik

In diesem Kapitel wird der zur Verfügung gestellte Motorprüfstand, auf dem im Rahmen dieser Diplomarbeit die Messungen durchgeführt wurden, genau beschrieben. Zusätzlich zu den grundlegenden Motordaten werden die eingesetzten Messgeräte beschrieben, die für die Gleichverteilungsuntersuchungen benötigt werden, sowie die verwendeten Messmethoden.

5.1 Prüfstands Aufbau

Eine schematische Darstellung des Prüfstandes mit den wichtigsten Temperatur (T)- und Druckmessstellen (p) ist in Abbildung 5-1 ersichtlich. Auskunft über den Beladungs- zustand des DPFs gibt die Differenzdruckmessung. Die Entnahmestellen des in Kapitel 5.2.1 näher beschriebene Chemilumineszenz-Detektor (CLD), sind nach DPF und nach SCR-Katalysator erwähnenswert und in der Abbildung gekennzeichnet.

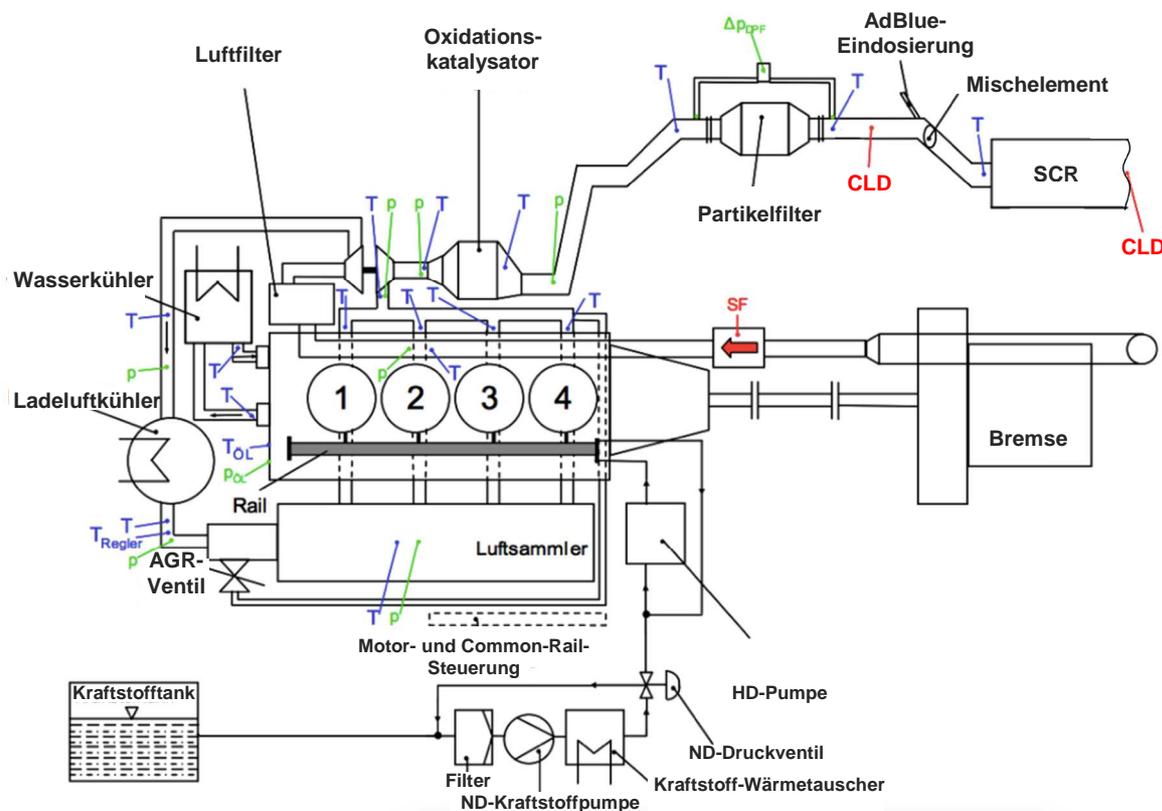


Abbildung 5-1: Schematische Darstellung des Prüfstandes

5.1.1 Motordaten

In der Tabelle 5-1 sind die technischen Daten des Motors aufgelistet. Da der Motor bei den vorliegenden Untersuchungen der Abgasnachbehandlung lediglich als Antriebsaggregat und Abgaslieferant dient, wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht näher auf diesen eingegangen.

Tabelle 5-1: Technische Daten des Versuchsmotors

Versuchsträger	
Hubraum [cm ³]	2148
Bohrung [mm]	88
Hub [mm]	88,4
Zylinderanzahl / Anordnung	4 Reihe
Ventilanzahl / Zylinder	4
Verdichtungsverhältnis	18,0:1
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

5.2 Messgeräte

Es sollen nun die verwendeten Messgeräte zur Durchführung der Diplomarbeit, näher beschrieben werden.

5.2.1 Chemolumineszenzdetektor CLD

Bei den Gleichverteilungsuntersuchungen wurde ein CLD der Serie CLD700 EL ht von Eco Physics verwendet. In diesem Kapitel soll kurz das Prinzip eines Chemolumineszenzdetektors erklärt werden. Es werden sowohl die Roh-NO_x-

Konzentrationen unmittelbar nach dem DPF, als auch die NO_x -Konzentrationen im Abgas nach dem SCR-Katalysator gemessen.

Das Messprinzip des CLD basiert auf dem Chemolumineszenz-Effekt. Durch eine chemische Reaktion wird NO und O_3 zu NO_2 umgewandelt. Dabei entsteht ungefähr 20% energetisch angeregtes NO_2^* . Jedoch geht dieses NO_2^* unter Emission von elektronischer Strahlung, die im Wellenbereich von 600 – 3000 nm mit einem Intensitätsmaximum bei circa 1200 nm, in den Grundzustand über. Diese Chemolumineszenz wird photoelektrisch detektiert und ist proportional zum NO -Stoffmengenanteil im Probengas.

Aufgrund des 2-Kammer-Prinzips des Chemolumineszenzdetektors, kann gleichzeitig eine NO - und NO_x -Messung durchgeführt werden, da die Probenluft in zwei gleiche Massenströme aufgeteilt wird. Der erste Gasstrom fließt direkt über den NO -Messkanal in die NO -Messkammer und der zweite Gasstrom gelangt durch den NO_x -Messkanal über einen Konverter in die NO_x -Messkammer. Durch die Differenzbildung $\text{NO}_x - \text{NO}$ kann der NO_2 Gehalt berechnet werden. [37]

5.2.2 Druck- und Temperatursensoren

Zusätzlich zu den bereits integrierten Temperatur- und Drucksensoren werden zur Überwachung der wichtigsten Funktionen des Motors Thermoelemente (Typ K – Klasse 2) und Drucksensoren an verschiedenen Stellen der Luftzuführung und der Abgasanlage angebracht. Diese werden mit Hilfe des Motorsteuergerätes eingebunden. Ausgleichsbehälter sind zwischen den Drucksensoren und dem Messsystem geschaltet, um Druckpulsationen zu reduzieren.

Es wird eine gänzliche Temperaturüberwachung der Abgasanlage mit den Temperaturen vor/nach DPF und vor/nach SCR durchgeführt, da diese sowohl für die DPF-Regeneration als auch für die Wirksamkeit des SCR-Katalysators entscheidend sind.

5.3 Prüfstandssteuerung

Die Steuerung des Prüfstandes erfolgt über die folgenden Programme:

- Messwertaufnahme mittels LAbVIEW 2013, National Instruments
- Zugriff auf das Motorsteuergerät über INCA 5.3, ETAS
- Steuerung der Wirbelstrombremse durch Tornado 3.0, Kristl & Seibt Co

Der Bedienraum (links) und der Prüfstandsraum (rechts) am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der TU Wien werden in Abbildung 5-2 dargestellt.

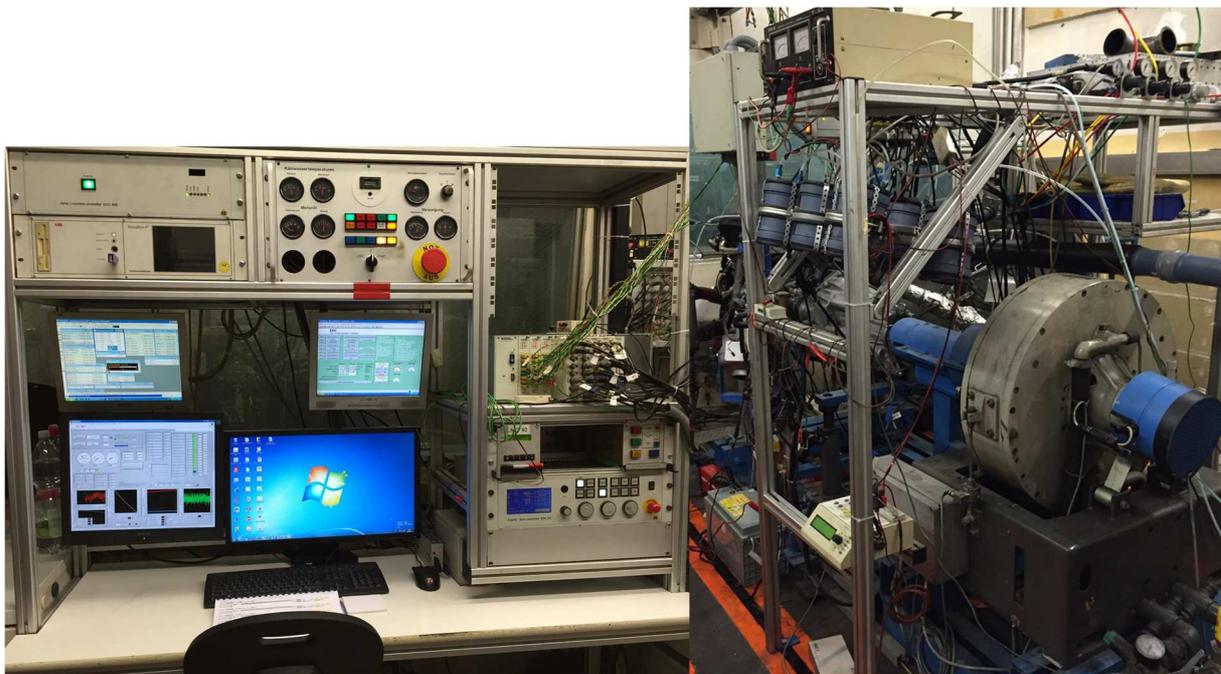


Abbildung 5-2: Bedien- (links) und Prüfstandsraum (rechts) am IFA der TU Wien

5.3.1 Motorsteuergerät

Durch die Applikationssoftware INCA erfolgt der Zugriff auf die wesentlichen Motorparameter. Das Motorsteuergerät wird über einen Emulatortastkopf an das

Applikationssystem gekoppelt [38]. Diese Software erlaubt somit den Eingriff in die Motorsteuerung während des Betriebes. Folgende Parameter wurden für die Abstimmung der wesentlichen Betriebspunkte adaptiert:

- Abgasrückführrate
- Verstellung der Leitschaufelgitter des VTG-Laders
- Nacheinspritzmengen zur DPF-Regeneration
- Dosiermenge

Um die gewünschte Abgastemperatur sowie die entsprechenden Abgasmassenströme einzustellen wird während des Betriebes vorrangig die AGR-Rate sowie der gewünschte Ladedruck adjustiert. Im Abschnitt 5.4.2 Betriebspunkte sind zusätzliche Details angeführt.

5.3.2 Steuerung Wirbelstrombremse

Die Last für den Verbrennungsmotor stellt die Wirbelstrombremse im Prüfstandbetrieb dar. Über folgende Parameter erfolgt die Steuerung der Last der Wirbelstrombremse:

- Drehzahl
- Drehmoment
- Pedalwert

Für die eindeutige Lastbestimmung müssen jeweils zwei von drei Parametern vorgegeben werden. In der Regel werden die Kombinationen Drehzahl/Drehmoment oder Drehzahl/Pedalwert verwendet. Es können sowohl stationäre Lastpunkte als auch verschiedene Lastprofile über die Wirbelstrombremse dargestellt werden.

5.3.3 Anbindung Verbrennungsmotor

Als starre Einheit sind der Verbrennungsmotor und das Wechselgetriebe elastisch in drei Punkten gelagert. Die Schaltstufe mit der direkten Verbindung der Eingangs- und der Ausgangswelle ist im Getriebe eingelegt. Die Verbindung zur Lastmaschine wird durch eine Gelenkwelle realisiert. Mittels eines frischwassergekühlten Wasser-Wasser-Wärmetauschers wird die Abwärme des Systems abgeführt. Die Ladeluft wird in gleicher Form über einen Luft-Wasser-Wärmetauscher gekühlt. Als Lastmaschine dient eine wassergekühlte Wirbelstrombremse vom Typ Schenk W230 („Bremse“ in Abbildung 5-1). Auf einem entkoppelten Maschinenfundament befindet sich der Maschinensatz.

5.3.4 Reduktionsmittelsteuerung

Zur Eindosierung des Reduktionsmittels werden der AdBlue-Tank inklusive integrierter Förderpumpe, eine Pumpensteuerung, SCR-Injektor und Versorgungsleitungen benötigt. Der Tank inklusive Förderpumpe ist in Abbildung 5-3 dargestellt. Des Weiteren werden noch NO_x-Sensoren benötigt, welche direkt mit dem Motorsteuergerät verbunden werden.



Abbildung 5-3: AdBlue-Tank inklusive integrierte Förderpumpe

Die Dosing Control Unit DCU wird über das Motorsteuergerät angesteuert. Die DCU dient als Bindeglied zwischen Motorsteuergerät und Reduktionsmitteldosierung.

Sowohl die Pumpe, die in den AdBlue-Tank integriert ist, als auch der Injektor, entsprechend der Einspritzmenge, der Einspritzfrequenz und des Einspritzdruckes, werden auf Grundlage der Informationen des Motorsteuergerätes durch das DCU angesteuert.

5.4 Messmethodik

Bevor im nächsten Abschnitt auf die Ergebnisse der Gleichverteilungsuntersuchungen im Detail eingegangen wird, sind zuerst die zugrunde liegenden Messmethoden und Betriebspunkte beschrieben.

5.4.1 Gleichverteilungsuntersuchungen am offenen Katalysator

Im Zuge der Diplomarbeit wurden die Gleichverteilungsuntersuchungen an einem offenen Katalysator durchgeführt. Direkt nach dem Katalysator (in Strömungsrichtung) wurde das Gehäuse abgeschnitten.

In Abbildung 5-4 wird der offene Katalysator mit den Achsen des Roboters und aufgeschweißtem Metallband dargestellt.

Für die einzelnen Messpunkte wurde ein Drei-Achsen-Roboter verwendet, der die Messgassonde über den gesamten Querschnitt bewegt. Die horizontale und vertikale Bewegung der Sonde ermöglichen die Vermessung des Katalysatorquerschnitts durch die Achsen x und y. Die Zustellbewegung gegen die Strömungsrichtung ermöglicht die z-Achse. Somit kann ein minimaler Abstand der Sonde zum Katalysatorquerschnitt gewährleistet werden. Bei den Untersuchungen für diese Diplomarbeit wurden 65 Messpunkte gleichmäßig über den Querschnitt verteilt. [2]

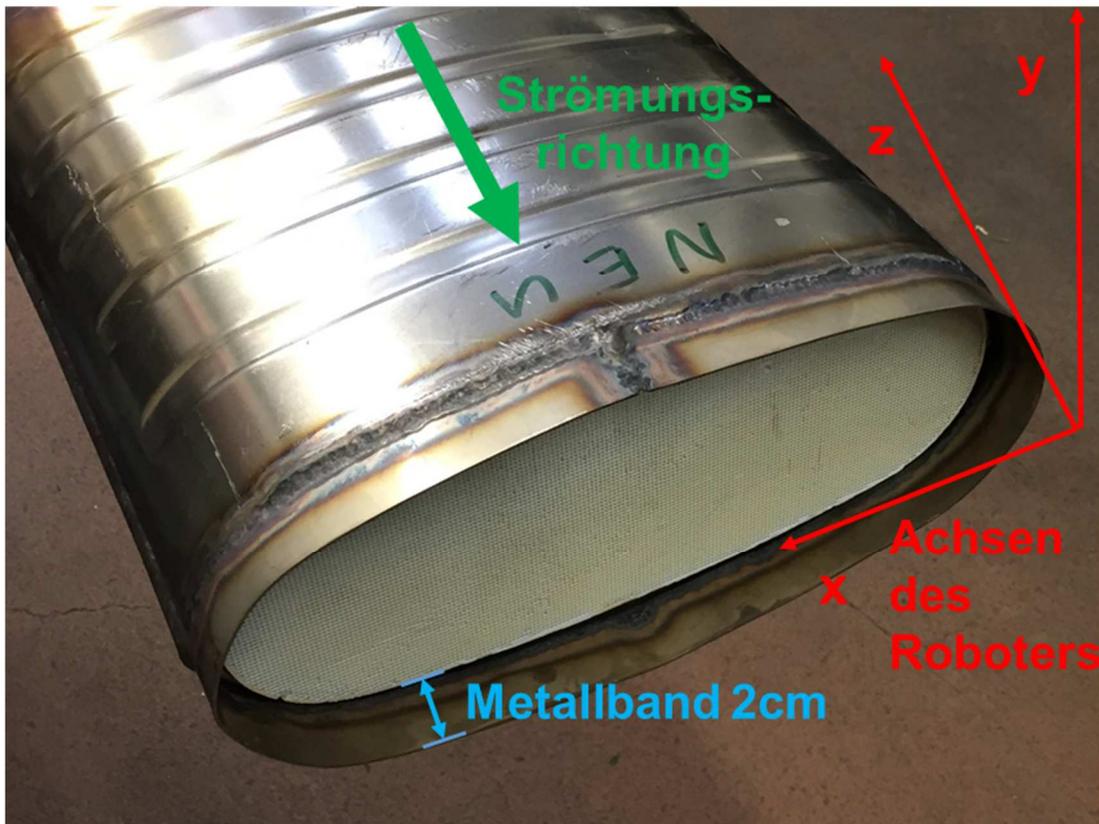


Abbildung 5-4: Offener Katalysator mit Roboterachsen und aufgeschweißtem Metallband

Das Abgas wird direkt nach der Messvorrichtung in die der Abgasabsaugung geführt. Bei den Gleichverteilungsuntersuchungen besteht keine Möglichkeit den Ammoniakschlupf zu messen, da nach dem Katalysator kein NH_3 -Sensor verfügbar ist. Um Verwehungen oder Durchmischung mit der Umgebungsluft an den Randgebieten des Katalysators auszuschließen, fährt die Sonde in einem Abstand von 5 mm zum Querschnitt des Katalysators. Des Weiteren wurde noch ein Metallband am Rand aufgeschweißt um diesem Effekt entgegenzuwirken und somit keine zu niedrigen Konzentrationen, sowie kein verfälschtes Messergebnis zu erhalten. [2]

Zu jeder Messung am offenen Katalysator wurde eine Korrekturmessung ohne Adblue - Eindosierung vorgenommen. Bei diesen Messungen werden die Roh- NO_x -Emissionen und deren Verteilung über dem Katalysatorquerschnitt bestimmt. Die Emissionen vor dem Katalysator sollten daher den Emissionen nach dem Katalysator entsprechen. Bei Abweichungen können in den jeweiligen Messpunkten Korrekturfaktoren ermittelt werden

und anschließend bei der eigentlichen Gleichverteilungsmessung angewendet werden. [2]

5.4.2 Betriebspunkte zur Untersuchung der Gleichverteilung

Bei der Wahl der Betriebspunkte (BP) wurde auf die jahrelange wissenschaftliche Erfahrung im Bereich der selektiven katalytischen Reduktion des IFA zurückgegriffen. Die Motorbetriebspunkte wurden so gewählt, dass diese einen Großteil des Motorkennfeldes abdecken. Die drei verwendeten Betriebspunkte sind in Tabelle 5-2 angeführt. In der Tabelle 5-2 bezeichnen die Abkürzungen n die Drehzahl, α_{Pedal} den Fahrpedalstellung, T_{VSCR} die Temperatur vor dem Eintritt in den SCR Katalysator, \dot{m}_{Abgas} den Abgasmassenstrom, NO_x die NO_x -Emissionen vor der Reduktionsmitteldosierung und \dot{m}_{AdBlue} den eindosierten Reduktionsmittelmassenstrom. [2]

Tabelle 5-2: Betriebspunkte (BP) der Gleichverteilungsuntersuchungen [2]

Betriebspunkte						
BP	n [min^{-1}]	α_{Pedal} [%]	T_{VSCR} [$^{\circ}\text{C}$]	\dot{m}_{Abgas} [kg/h]	NO_x [ppm]	\dot{m}_{AdBlue} [mg/s]
0	1500	11	200	75	ca. 150	5,6
1	1850	14	250	100	ca. 150	5,6
23	3100	30	350	350	ca. 500	35

Die Abgastemperatur vor SCR-Katalysator T_{VSCR} und der Abgasmassenstrom \dot{m}_{Abgas} werden als Hauptkriterium herangezogen. Um diese Kriterien zu erfüllen, wurde bei den gegebenen Drehzahlen n , nicht nur der Fahrpedalstellung α_{Pedal} sondern auch die Abgasrückführrate und der Ladedruck variiert. Die Variation der Abgasrückführventilstellung wurde über das Motorsteuergerät angesteuert. Durch Verstellung des Leitschaukelgitters des VTG-Abgasturboladers kann die Änderung des Ladedrucks realisiert werden. [2]

Alle Gleichverteilungsuntersuchungen werden mit einem HWL-Einspritzdruck von 6 bar eindosiert. Ausnahme: Kapitel 6.5 bei der HWL-Einspritzdruckvariation.

5.4.3 Berechnung der Gleichverteilungszahl

Die ermittelten Stickoxidwerte (NO und NO₂) an den einzelnen Messpunkten des Katalysatorquerschnittes können mit dem aus dem Abgasrohr nach DPF verglichen werden. Diese Werte wurden mit Hilfe eines Chemolumineszenzdetektors ermittelt.

Auf die Reduktion und somit auf die Verteilung des Reduktionsmittels kann über eine Differenzbildung geschlossen werden. Es wird dabei eine NO_x-Gleichverteilung vor der AdBlue - Eindosierung vorausgesetzt.

Um die untersuchten Anlagen zu vergleichen wird mit Hilfe der Gleichung 5-1 bis Gleichung 5-3 die Gleichverteilungszahl γ , auch Uniformity - Index genannt, berechnet [2].

$$\gamma = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |(c_i - \bar{c})|}{2 \cdot N \cdot \bar{c}} \quad \text{Gleichung 5-1}$$

$$c_i = \text{NO}_{\text{xvSCR}} - \text{NO}_{\text{xnSCR}} \quad \text{Gleichung 5-2}$$

$$\bar{c} = \frac{\sum_{i=1}^N c_i}{N} \quad \text{Gleichung 5-3}$$

N ...	Anzahl der Messpunkte
c _i ...	NH ₃ – Konzentrationen in ppm
\bar{c} ...	arithmetischer Mittelwert der NH ₃ -Konzentration
NO _{xvSCR} ...	Stickstoffoxide vor SCR-Katalysator
NO _{xnSCR} ...	Stickstoffoxide nach SCR-Katalysator

Die Gleichverteilungszahl gibt Auskunft wie effektiv der Ammoniak über den Katalysatorquerschnitt verteilt worden ist und liefert Werte zwischen 0 (schlechtester Fall) und 1 (idealer Fall).

Würde die Gleichverteilungszahl 0,5 betragen, wäre bei der Hälfte der Messstellen keine Reduktion feststellbar, während an der anderen Hälfte jeweils der doppelte Mittelwert messbar ist.

In den einzelnen Messpunkten lässt sich die relative Gleichverteilung mit Hilfe der Gleichung 5-4 ermitteln. Die Werte der einzelnen Messpunkte werden des Weiteren auch für Gleichverteilungsdiagramme herangezogen.

$$Y_{\text{rel}} = \frac{c_i}{c} \cdot 100$$

Gleichung 5-4

5.4.4 Graphische Auswertung der Gleichverteilung

Wie in Kapitel 5.4.1 schon erwähnt, werden bei jedem Betriebspunkt zwei Messdurchgänge durchgeführt. Der erste Durchgang wird ohne AdBlue - Eindosierung durchgeführt. Da die unbehandelten Emissionen den Katalysator ohne stattfindende Reduktion durchqueren, sollten die Emissionen nach dem Katalysator den Emissionen vor dem Katalysator entsprechen. Der bei Abweichung ergebende Korrekturfaktor der einzelnen Messstellen wird auf die eigentliche Messung mit Dosierung angewendet und somit kann eine vollkommene Gleichverteilung angenommen werden. [2]

In Abbildung 5-5 wird eine graphische Auswertung der Gleichverteilung dargestellt.

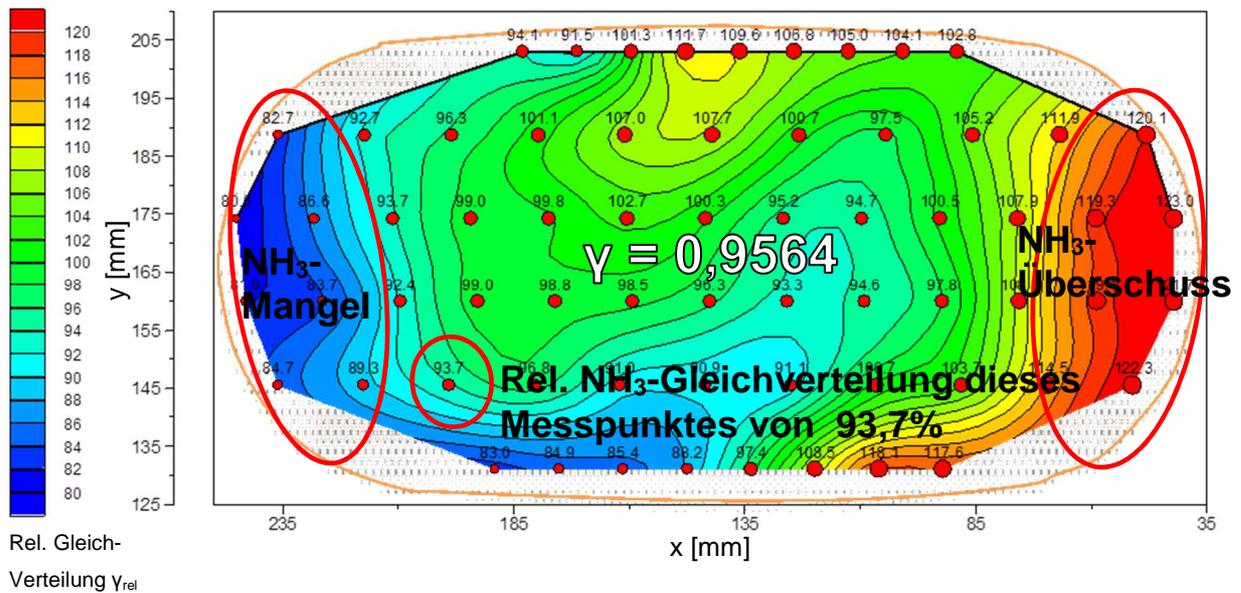


Abbildung 5-5: Graphische Auswertung der Gleichverteilungsuntersuchung mit Gleichverteilungszahl y

Die Diagramme der jeweiligen Messungen sind als Blick auf den SCR-Katalysator gegen die Strömungsrichtung zu sehen. Die Ergebnisse der Gleichverteilungsuntersuchungen im Zuge der Diplomarbeit werden sowohl graphisch dargestellt, als auch über die Gleichverteilungszahl y zum Ausdruck gebracht.

Die vertikale Achse y ist die Höhe des Katalysatorquerschnittes und die horizontale Achse x ist die Breite des Katalysatorquerschnittes. Die jeweiligen x - und y -Werte ergeben sich von der Roboterposition, der in Ruhe in allen Achsen in Position Null verharrt und sich außerhalb des Katalysatorquerschnittes befindet. Der Wert in der Mitte des jeweiligen Diagrammes ist die Gleichverteilungszahl. Die roten Punkte kennzeichnen die 65 Messpunkte die bei den folgenden Gleichverteilungsuntersuchungen für die Diplomarbeit verwendet wurden. Die relativen Gleichverteilungszahlen sind bei den jeweiligen Messpunkten angegeben.

Die Isolinien, auch Isarithmen genannt, sind Linien an denen jeder Punkt den gleichen Wert besitzt [39].

In den blauen Bereichen des Diagrammes herrscht eine Unterversorgung an Reduktionsmittel, somit NH_3 -Mangel. Im Gegensatz zu den roten Bereichen, in denen Reduktionsmittelüberschuss und somit eine hohe NH_3 -Konzentration gemessen wurde.

5.4.5 Bestimmung des Dosierverhältnisses

Das Dosierverhältnis gibt den Zusammenhang zwischen der vorhandenen NO_x-Menge und der eindosierten Ammoniakmenge an. Dies ergibt sich aus dem gewünschten Dosierverhältnis α , auch Feedverhältnis genannt (siehe Gleichung 5-5 bis Gleichung 5-12). [2]

Die Dosierung erfolgt unterstöchiometrisch im Wertebereich $0 < \alpha < 1$ und überstöchiometrisch bei $\alpha > 1$.

$$\alpha = \frac{\dot{n}_{\text{NH}_3}}{\dot{n}_{\text{NO}_x}} = \frac{\dot{n}_{\text{NH}_3}}{\dot{n}_{\text{NO}} + \dot{n}_{\text{NO}_2}} \quad \text{Gleichung 5-5}$$

$$\dot{n}_{\text{NH}_3} = \dot{n}_{\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}} \cdot 2 \quad \text{Gleichung 5-6}$$

$$\dot{n}_{\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}} = \frac{\dot{m}_{\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}}}{M_{\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}}} \cdot \frac{1}{1000} \quad \text{Gleichung 5-7}$$

$$\dot{m}_{\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}} = \dot{m}_{\text{HWL}} \cdot 0,325 \quad \text{Gleichung 5-8}$$

$$\dot{m}_{\text{NO}} = \frac{M_{\text{NO}}}{M_v} \cdot \text{NO} \cdot \frac{\dot{m}_{\text{Abgas}}}{\rho_N} \cdot \frac{1000}{10^6 \cdot 3600} \quad \text{Gleichung 5-9}$$

$$\dot{m}_{\text{NO}_2} = \frac{M_{\text{NO}_2}}{M_v} \cdot \text{NO}_2 \cdot \frac{\dot{m}_{\text{Abgas}}}{\rho_N} \cdot \frac{1000}{10^6 \cdot 3600} \quad \text{Gleichung 5-10}$$

$$\dot{n}_{\text{NO}} = \frac{\dot{m}_{\text{NO}}}{M_{\text{NO}}} \quad \text{Gleichung 5-11}$$

$$\dot{n}_{\text{NO}_2} = \frac{\dot{m}_{\text{NO}_2}}{M_{\text{NO}_2}} \quad \text{Gleichung 5-12}$$

\dot{n}_{NO} ... NO – Stoffmengenstrom in mol/s

\dot{n}_{NO_2} ...	NO ₂ – Stoffmengenstrom in mol/s
\dot{n}_{NH_3} ...	Ammoniak - Stoffmengenstrom in mol/s
$\dot{m}_{\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}}$...	Harnstoff – Massenstrom in mg/s
$\dot{n}_{\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}}$...	Harnstoff – Stoffmengenstrom in mol/s
\dot{m}_{HWL} ...	Harnstoff-Wasser-Lösung – Massenstrom in mg/s
\dot{m}_{NO} ...	NO – Massenstrom in g/s
\dot{m}_{NO_2} ...	NO ₂ – Massenstrom in g/s
\dot{m}_{Abgas} ...	Abgasmassenstrom in kg/h
NO ...	Stickstoffmonoxid vor SCR in ppm
NO ₂ ...	Stickstoffdioxid vor SCR in ppm
M_v ...	Molvolumen für ideale Gase in m ³ /kmol _N
M_{NO} ...	Molmasse von NO in g/mol
M_{NO_2} ...	Molmasse von NO ₂ in g/mol
$M_{\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}}$...	Molmasse von Harnstoff in g/mol
ρ_N ...	Normdichte (Normzustand: 273K und 101325 Pa)

In Tabelle 5-3 werden die notwendigen Normwerte für die Dosiermengenberechnung angeführt.

Tabelle 5-3: Normwerte [40]

Normwerte für Dosiermengenberechnung		
Normdichte	ρ_N [kg/m ³]	1,293
Molvolumen	M_v [m ³ /kmol _N]	22,414
Molmasse NO	M_{NO} [g/mol]	30,01
Molmasse NO₂	M_{NO_2} [g/mol]	46,005
Molmasse Harnstoff	$M_{\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}}$ [g/mol]	60,06

Es stellt sich eine gewisse NO_x-Konvertierungsverteilung ein. Wird mit einem Dosierverhältnis $\alpha=1$ eindosiert und beträgt der Gleichverteilungswert $\gamma=1$ (ideale Homogenisierung und Gleichverteilung des Reduktionsmittels) wären keine NO_x-Konzentrationen nach SCR messbar.

Da bei den Gleichverteilungsuntersuchungen mit einem Dosierverhältnis $\alpha < 1$, also understöchiometrisch eindosiert wird, wird die Konvertierungsverteilung hier nie eine gesamte Reduktion der NO_x -Konzentration über den Katalysatorquerschnitt ergeben.

6 Ergebnisse der Referenzuntersuchungen

In diesem Kapitel wird zuerst eine Untersuchung der Gleichverteilung einer Abgasanlage mit ausreichender Mischstreckenlänge dargestellt, um zu zeigen, welchen Einfluss die Mischstreckenlänge auf die Homogenisierung, des eindosierten AdBlues und dadurch auch auf die Gleichverteilungszahl ausübt.

Als Ausgangslage werden die kurzen Abgasanlagen (Instrom- und Gegenstrom-Anlage) ohne Mischelement untersucht, um die Notwendigkeit eines Mischelements aufzuzeigen. Anschließend wird der Einfluss der Mischelementlänge und die Position des Mischelements auf die Gleichverteilung untersucht.

Da nicht nur das Mischelement einen Einfluss auf die Gleichverteilung ausübt, sondern auch der verwendete HWL-Injektor, werden auch bezüglich des Injektors Untersuchungen durchgeführt. Da schon im Kapitel 4.3.3 erwähnt wurde, dass die Tropfengröße ein Unterscheidungsmerkmal des HWL-Injektors ist, wird aus diesem Grund, bei den verwendeten Injektoren dieser Arbeit, die Tropfengröße mittels Laserdiffraktometrie vermessen. Des Weiteren werden auch die Einflüsse des HWL-Einspritzdrucks und die der Dosiermenge untersucht. Abschließend wird auch der Sitz des Injektors versetzt, um auch diesen Einfluss zu erfassen.

All diese gewonnenen Einflüsse und Erkenntnisse der Referenzuntersuchungen werden im Anschluss in Kapitel 7, an einer kurzen Instrom- und Gegenstrom-Anlage, angewendet, um eine Gleichverteilungszahl von 0,98 zu erhalten.

Alle Gleichverteilungsuntersuchungen werden mit einem HWL-Einspritzdruck von 6 bar eindosiert. Die einzige Ausnahme ist in Kapitel 6.5 bei der HWL-Einspritzdruckvariation.

6.1 Abgasanlage mit langer Mischstreckenlänge

Eine gute Homogenisierung des Gemischs aus Abgas und Harnstoff ist durch eine ausreichende Mischstreckenlänge gegeben und somit ein gewisser Bauraum im Unterboden unumgänglich.

Jedoch können ausreichend lange Mischstreckenlängen bei kürzeren Abgasanlagen nicht realisiert werden. Gründe für die Verkürzung der Abgasanlagen sind einerseits die

Notwendigkeit der Implementierung der SCR-Technik bei hubraumschwächeren Motoren, die die Emissionsgrenzwerte der Euro-5-Norm noch ohne SCR-Technik erreichen konnten, die viel niedrigeren Grenzwerte der strengeren, neuen Euro-6-Norm aber ohne die SCR-Technik nicht erreichen. Solche Motoren werden allerdings vor allem bei viel kleineren und damit auch kürzeren Fahrzeugen eingesetzt, bei denen lange Abgasanlagen schlicht unmöglich sind.

Die Hersteller sind durch den steigenden Wettbewerbsdruck auch immer öfter gezwungen Fahrzeuge mit individuellen Antriebssträngen wie zum Beispiel Allradantrieb anzubieten. Allerdings machen solche Antriebsstränge den Einsatz von zusätzlichen Bauteilen wie zum Beispiel Kardanwellen und Ausgleichsgetrieben notwendig, die dann den für das Abgasnachbehandlungssystem zur Verfügung stehenden Bauraum unter dem Fahrzeug einschränken.

Auch die immer weiter fortschreitende Hybridisierung der Fahrzeugflotten bringt durch den notwendigen Einsatz von immer größer werdenden Batterien, die für den Schwerpunkt und die Sicherheit besonders vorteilhaft tief und in der Mitte des Fahrzeugs untergebracht werden sollten, die Einschränkung des Bauraums unter dem Fahrzeug mit sich.

Nachteilig wirkt sich die weite Wegstrecke bis zum Katalysator aus. Dadurch geht viel Wärme, des schon relativ kühlen Dieselabgases, verloren, wodurch das Abgas nach dem Kaltstart länger braucht, um den Katalysator auf seine Light-off-Temperatur zu bringen, wodurch über diese Dauer hohe NO_x-Emissionen gemessen werden. Die negative Auswirkung auf das Ansprungsverhalten der Abgasanlage reduziert die Denoxierungszeit des Katalysators des Abgasnachbehandlungssystems während gesetzlicher Prüfzyklen wie dem NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus).

In Abbildung 6-1 sind die Ergebnisse der Gleichverteilungsuntersuchung einer Abgasanlage, welche allein aufgrund der entsprechenden Mischstreckenlänge von 800 mm, eine sehr gute Gleichverteilung erzielt. Die Untersuchung wurde mit dem Injektor A durchgeführt, der in Kapitel 6.4 auf seine Tropfengröße untersucht wird.

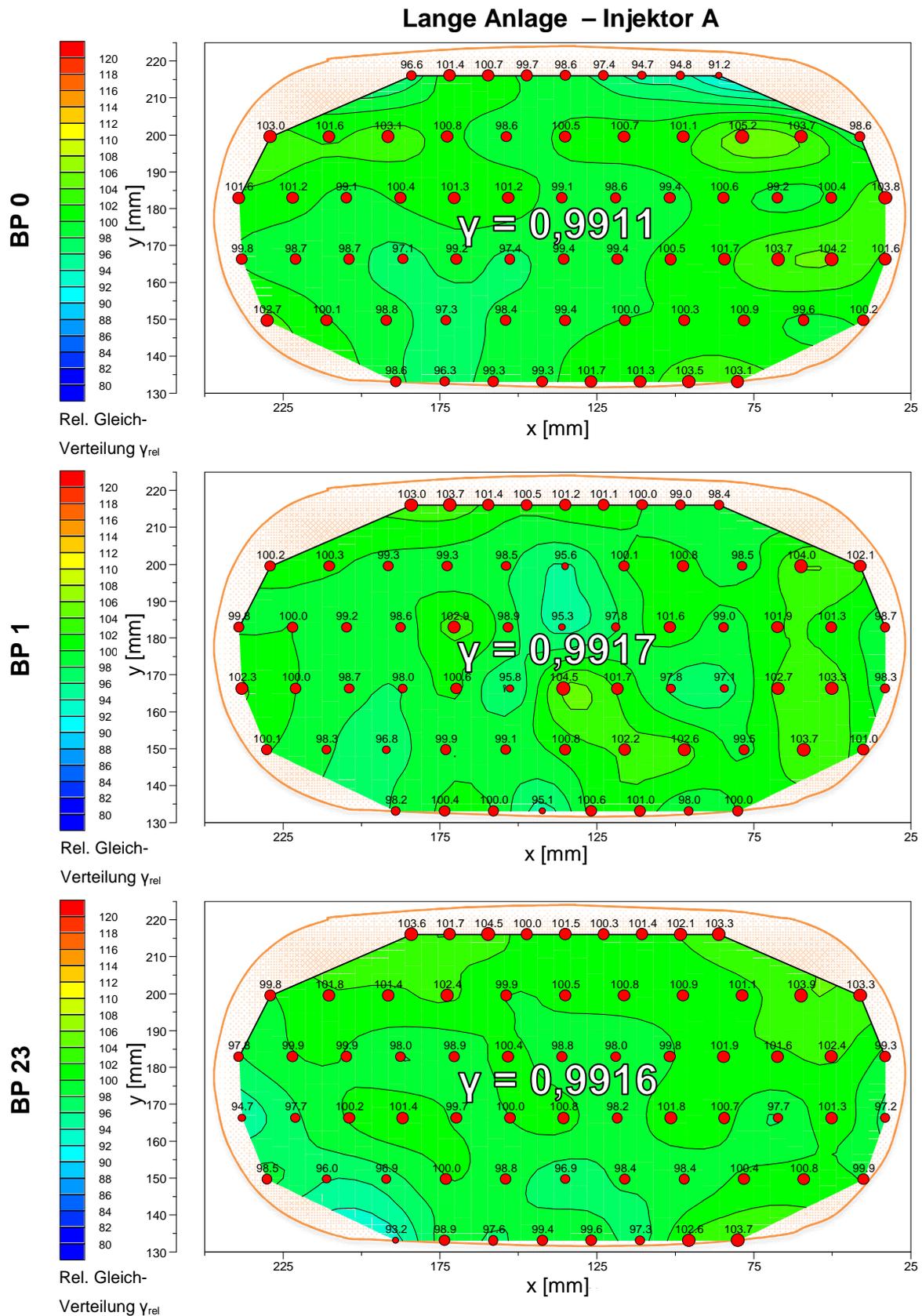


Abbildung 6-1: Gleichverteilungsergebnisse einer Instrom-Anlage mit einer Mischstreckenlänge von 800 mm (BP 0 oben, BP 1 Mitte, BP 23 unten)

Durch eine lange Mischstrecke kann somit, wenn der nötige Platz vorhanden ist, eine sehr gute Gleichverteilungszahl erzielt werden. Die Gleichverteilungszahl ist in allen drei verwendeten Betriebspunkten über 0,9910.

6.2 Ausgangsmessung ohne Mischelement

Um Aussagen über etwaige Mischelemente und Variationen der Instrom- und Gegenstrom-Anlage treffen zu können, werden als Ausgangslage die jeweiligen Gleichverteilungsuntersuchungen ohne Mischelement durchgeführt.

6.2.1 Instrom

Eine Abgasanlage, bei der die Eindosierung des AdBlue in Richtung des Abgasstromes erfolgt, wird als Instrom-Anlage bezeichnet und in [Abbildung 6-2](#) schematisch dargestellt.

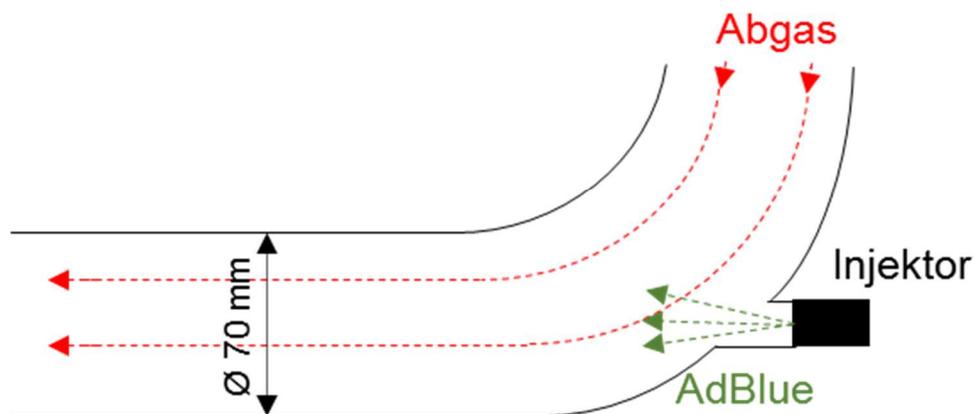


Abbildung 6-2: Schematische Darstellung einer Instrom-Anlage ohne Mischelement mit einem Abgasrohrdurchmesser von 70 mm

Die Mischstreckenlänge der Instrom-Anlage beträgt 440 mm und wird in dieser Arbeit als kurze Anlage bezeichnet, da diese um 45% kürzer ist, als die lange Abgasanlage mit einer Mischstreckenlänge von 800 mm (siehe Kapitel 6.1).

Bei der kurzen Instrom-Anlage wurde eine Gleichverteilungsuntersuchung ohne Mischelement mit dem Injektor B durchgeführt. Die Ergebnisse sind in [Abbildung 6-3](#) dargestellt.

Kurze Instrom-Anlage ohne Mischelement – Injektor B

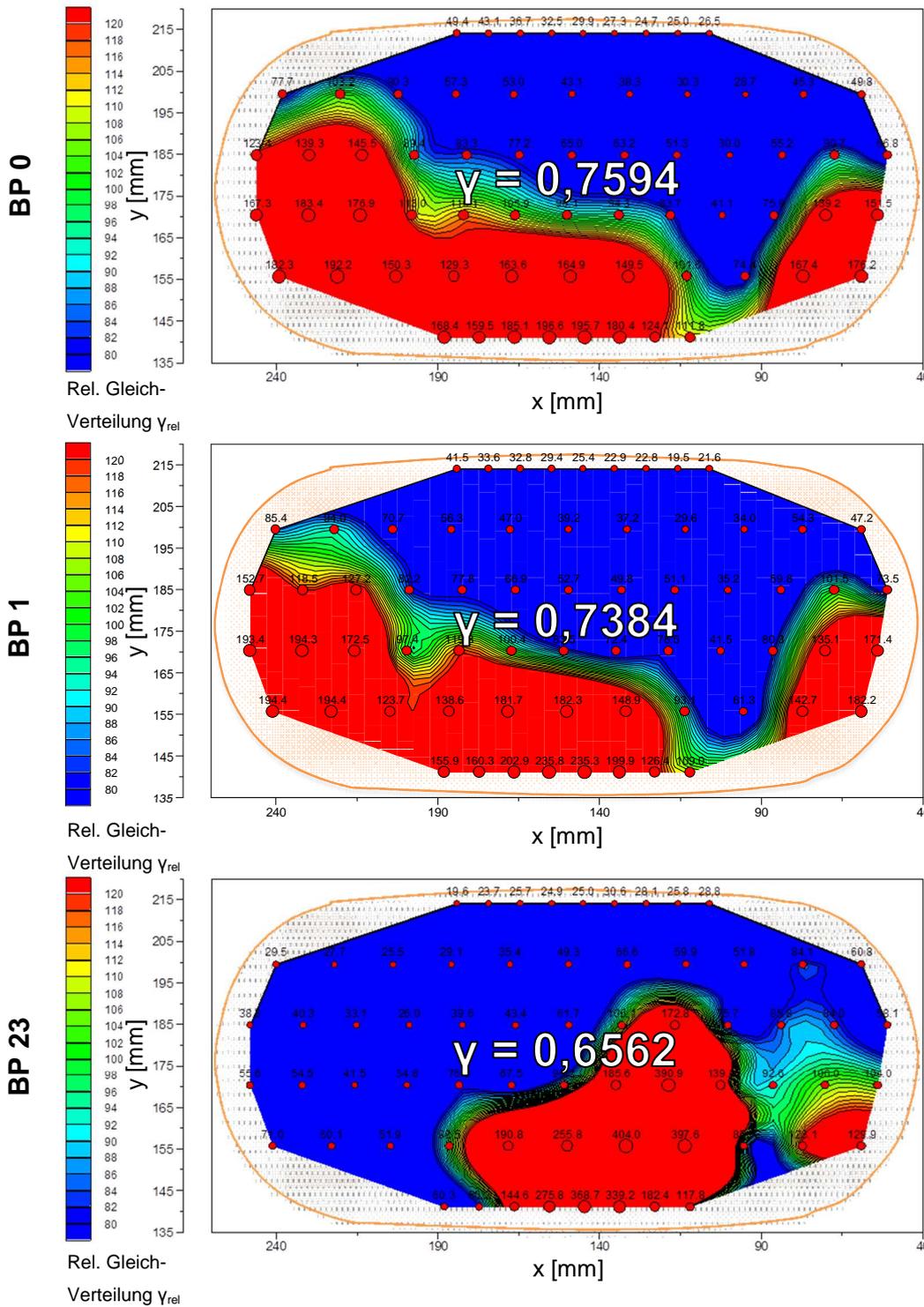


Abbildung 6-3: Gleichverteilungsergebnisse der Instrom-Anlage mit einer Mischstreckenlänge von 440 mm, mit Injektor B ohne Mischelement (BP0 oben, BP1 Mitte, BP23 unten)

Je nach Betriebspunkt und somit abhängig von dem jeweiligen Abgasmassenstrom (siehe Kapitel 5.4.2 Tabelle 5-2), wird das Spray des eindosierten AdBlue in Richtung der unteren Rohrwand verlagert.

Aufgrund der Gleichverteilungsuntersuchungen wird ersichtlich, dass ein Mischelement nicht nur für die gleichmäßige Verteilung des AdBlue benötigt wird, sondern auch um die schlechtere Gleichverteilungszahl von 0,6562 bei Betriebspunkt 23 (im Gegensatz zu Betriebspunkt 0 mit einer Gleichverteilungszahl von 0,7594 und Betriebspunkt 1 mit einer Gleichverteilungszahl von 0,7384) auszugleichen.

Es wird ersichtlich, dass der Einbau eines Mischelements unumgänglich ist, da dieser zur Zerstäubung, Verdampfung und Durchmischung benötigt wird (siehe Kapitel 4.3.2).

Fazit

Bei Instrom-Anlagen ohne Mischelement wird es bei der untersuchten Anordnung nicht zu einer gleichmäßigen Verteilung des eindosierten AdBlue kommen. Das Mischelement wird vor allem für die Betriebspunkte mit höherem Abgasmassenstrom ($\dot{m}_{\text{Abgas}}=350 \text{ kg/h}$) benötigt, da sich das eindosierte AdBlue ohne Mischelement bei diesem Betriebspunkt wesentlich schlechter verteilt.

6.2.2 Gegenstrom

Bei der Gegenstrom-Anlage, wird wie der Name schon besagt, entgegen des Abgasstromes eindosiert. Eine schematische Darstellung der Gegenstromanlage wird in Abbildung 6-4 dargestellt.

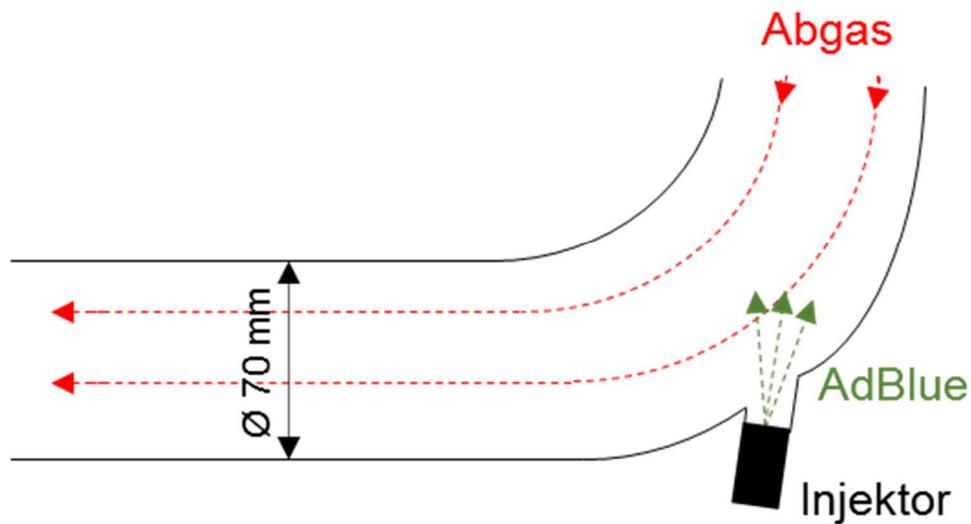


Abbildung 6-4: Schematische Darstellung einer Gegenstrom-Anlage ohne Mischelement mit einem Abgasrohrdurchmesser von 70 mm

Wie bei der Instrom-Anlage wurde auch bei der Gegenstrom-Anlage eine Messung ohne Mischelement durchgeführt.

In [Abbildung 6-5](#) sind die Gleichverteilungsergebnisse der Gegenstrom-Anlage ohne Mischelement mit Injektor B dargestellt. Die Mischstreckenlänge der Gegenstrom-Anlage beträgt 300 mm und ist um 140 mm kürzer als die der Instrom-Anlage.

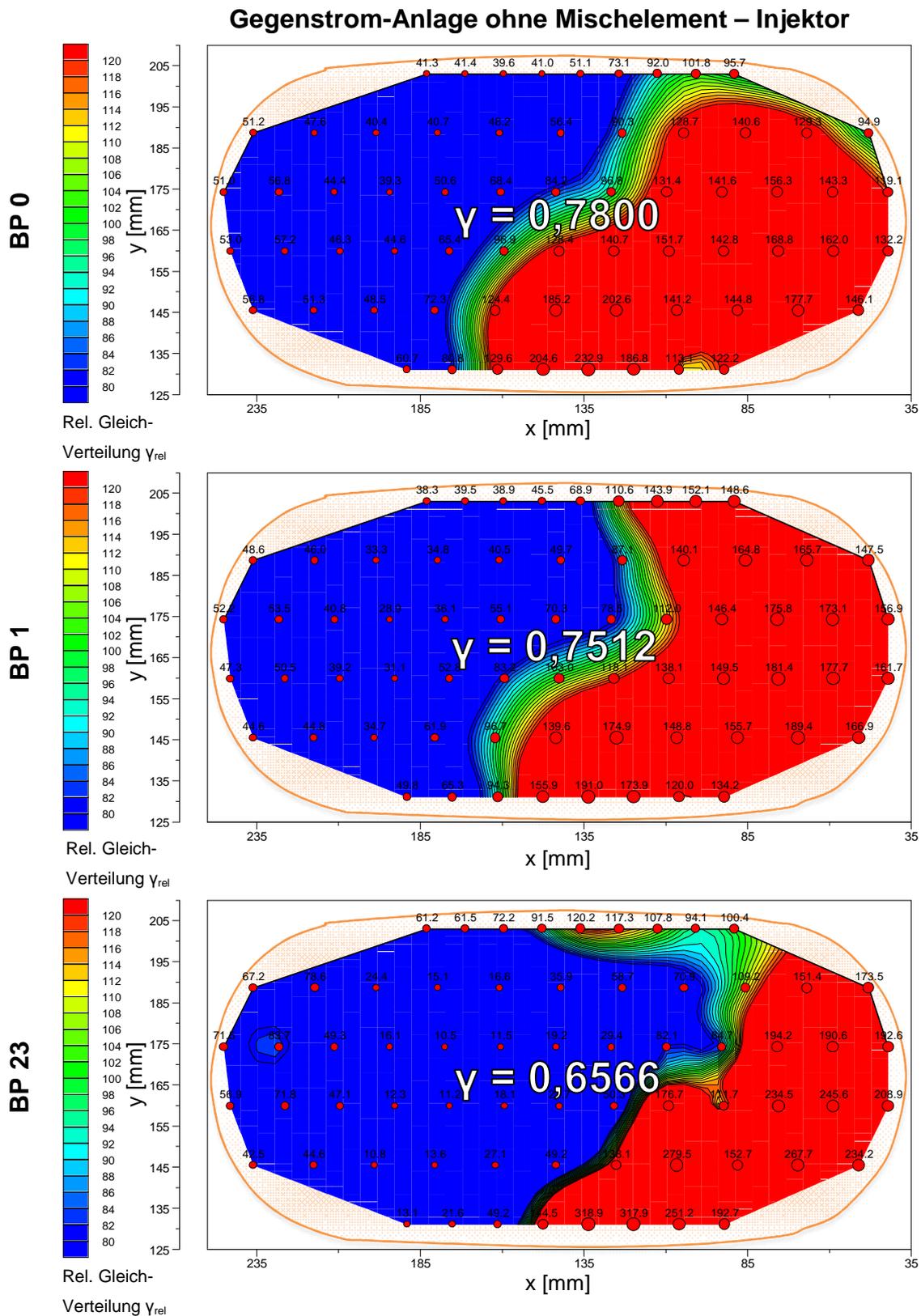


Abbildung 6-5: Gleichverteilungsergebnisse der Gegenstrom-Anlage mit einer Mischstreckenlänge von 300 mm mit Injektor B ohne Mischelement (BP0 oben, BP1 Mitte, BP23 unten)

Bei Betriebspunkt 0 wurde eine Gleichverteilungszahl von 0,7800, bei Betriebspunkt 1 eine Gleichverteilungszahl von 0,7512 und bei Betriebspunkt 23 eine Gleichverteilungszahl von 0,6566 gemessen.

Vergleicht man die graphische Auswertung der Instrom-Anlage mit der Gegenstrom-Anlage, wird ersichtlich, dass der NH_3 -Überschuss nicht im unteren Teil des Katalysators, sondern im rechten Teil auftritt. Grund dafür ist die Lage der Dosierstelle. Im Gegensatz zu der Instrom-Anlage, wo die Dosiereinheit das Mittel zentral in Stromrichtung einspritzt und es ohne Krümmung des Rohres direkt in den Katalysator gelangt, wird bei der Gegenstrom-Anlage, in einer leichten Krümmung in die Abgasführung eindosiert. Bei allen drei Betriebspunkten wird das NH_3 rechtslastig verteilt und es kommt somit zu nahezu keiner Reduktion im linken Bereich des Katalysators. Bei Betriebspunkt 23 kann das eindosierte AdBlue offensichtlich aufgrund des hohen Abgasmassenstroms nicht so tief vordringen und somit einen viel schlechteren Gleichverteilungswert im Vergleich zu den Betriebspunkten 0 und 1 mit niedrigen Abgasmassenstrom erzielen.

Bei allen Abgasanlagen wird ein Entkoppelement EKE im Abgasstrang eingebaut. Diese Elemente entkoppeln die Abgasanlage weitgehend von den Bewegungen und Schwingungen des Motors. Ohne Entkoppelemente würde es zu einer Verringerung der Lebensdauer der Abgasanlage kommen. Eine weitere Folge wären Komforteinbußen durch Vibrationen, wenn die Schwingungen und Bewegungen an die Fahrzeugkarosserie weitergeleitet werden. [41]

In Abbildung 6-6 wird links der Aufbau eines Entkoppelements im Abgasstrang dargestellt und rechts ein Bild des Entkoppelements der Instrom-Anlage. Das dargestellte Entkoppelement besteht aus einem gasdichten mehrlagigen Metallbalg (1) zur Begrenzung der Zugbelastung, einem Metallgeflecht (2) und einem im Balg angeordneten Liner (3) [41].



Abbildung 6-6: Aufbau eines Entkoppellementes im Abgasstrang [41] (links) und ein Bild des Entkoppellementes der Anlage (rechts)

Da bei der Gegenstrom-Anlage die Eindosierung gegen die Strömungsrichtung erfolgt und somit hin zu dem Entkoppellement erfolgt, wird bei dieser Art von Anlage ein Mischelement im Abgasstrang eingebaut, um etwaige Ablagerungen in dem Entkoppellement zu verhindern. Dieses Mischelement, welches als Prallblech dient, wird als Vormischer bezeichnet, da es vor der Dosierstelle eingebaut wird. In [Abbildung 6-7](#) wird der Einbau des Vormischers schematisch dargestellt.

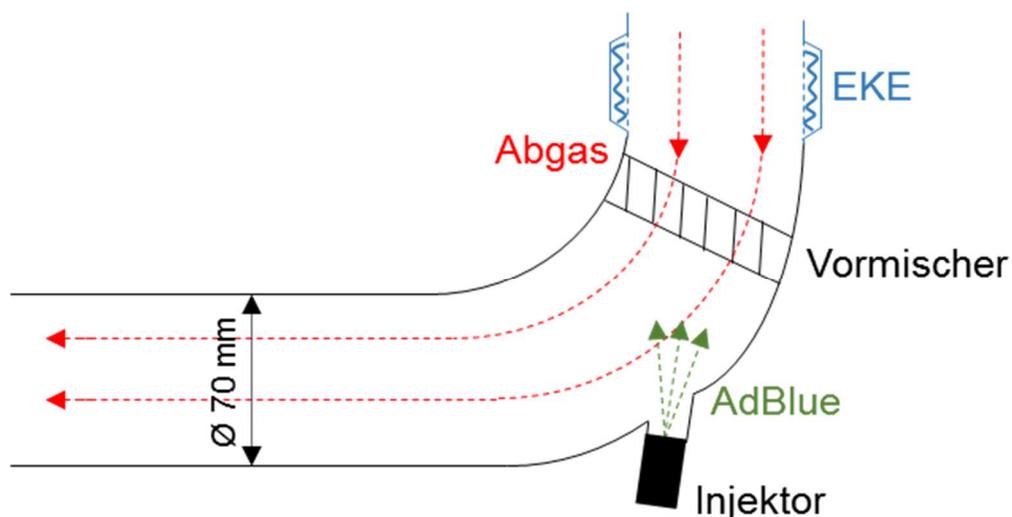


Abbildung 6-7: Schematische Darstellung einer Gegenstrom-Anlage mit Vormischer und einem Abgasrohrdurchmesser von 70 mm

Die Gleichverteilungsergebnisse der Gegenstrom-Anlage mit Vormischer sind in Abbildung 6-8 dargestellt. Die Untersuchung wurde mit dem Injektor B durchgeführt.

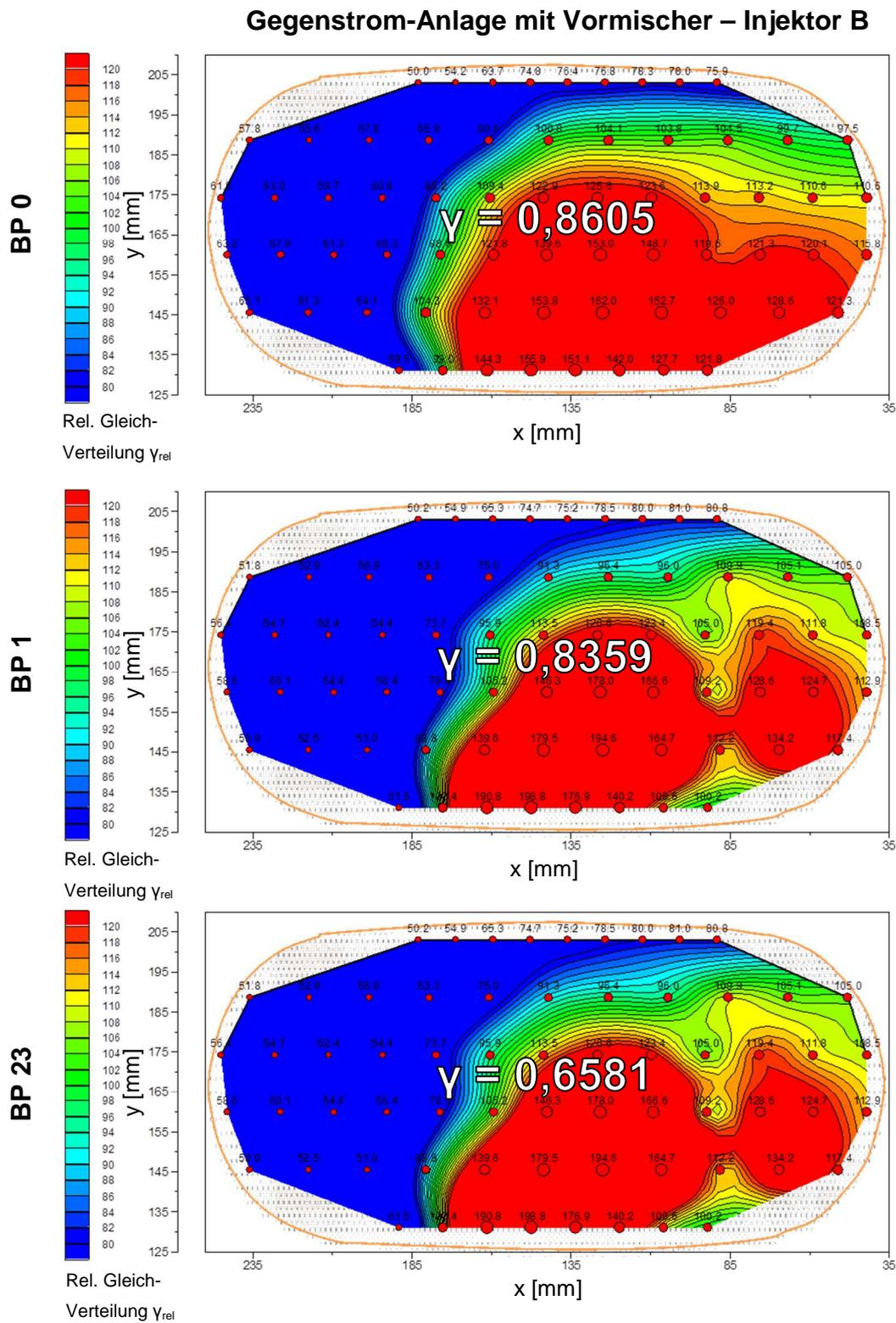


Abbildung 6-8: Gleichverteilungsergebnisse der Gegenstrom-Anlage mit einer Mischstreckenlänge von 300 mm, mit Injektor B und Vormischer (BP0 oben, BP1 Mitte, BP23 unten)

Der verwendete Vormischer soll etwaige Ablagerungen zwischen den beweglichen Elementen des Innenliners und dem Metallbalg verhindern, da die Temperaturen in dieser Zwischenschicht nie hoch genug werden, um diese Ablagerungen wieder abzubauen. Werden diese Ablagerungen jedoch nicht abgebaut, kommt es zur Reibung und folglich zu erhöhtem Verschleiß im Entkoppелеlement. Dadurch wird die Lebensdauer des Elementes erheblich reduziert und die Abgasstrecke kann undicht werden. Schlimmstenfalls kann es zum Bruch und dadurch zur Beschädigung der gesamten Abgasanlage kommen. [2]

Bei Betriebspunkt 23, dem höheren Abgasmassenstrom ($\dot{m}_{\text{Abgas}}=350 \text{ kg/h}$) kommt es offenbar zu keinem Kontakt der Tropfen mit dem Vormischer. Diese Annahme wird getroffen, da kein signifikanter Unterschied der Gleichverteilungszahl bei der Untersuchung ohne Mischelement ($\gamma=0,6566$) und mit Vormischer ($\gamma=0,6581$) besteht.

Bei Betriebspunkt 0 wurde eine Gleichverteilungszahl von 0,8605 und bei Betriebspunkt 1 eine Gleichverteilungszahl von 0,8359.

Im Vergleich zu den Gleichverteilungsergebnissen der Gegenstrom-Anlage ohne Mischelement (siehe Abbildung 6-5: BP 0 ($\gamma=0,7800$), BP 1 ($\gamma=0,7512$), BP 23 ($\gamma=0,6566$)), wurde bei der Gleichverteilungsuntersuchung mit Vormischer nur bei den Betriebspunkten 0 und 1 eine Verbesserung erzielt. Bei Betriebspunkt 23, dem höheren Abgasmassenstrom kommt es offenbar zu keinem Kontakt der Tropfen mit dem Vormischer, da kein signifikanter Unterschied der Gleichverteilungszahl besteht.

Bei dem Vormischer handelt es sich um einen Plattenvormischer, der wie die graphischen Auswertungen der Gleichverteilungsergebnisse darstellen, das eindosierte Spray etwas mittiger verteilt. Der Plattenvormischer wird in Abbildung 6-9 schematisch dargestellt.

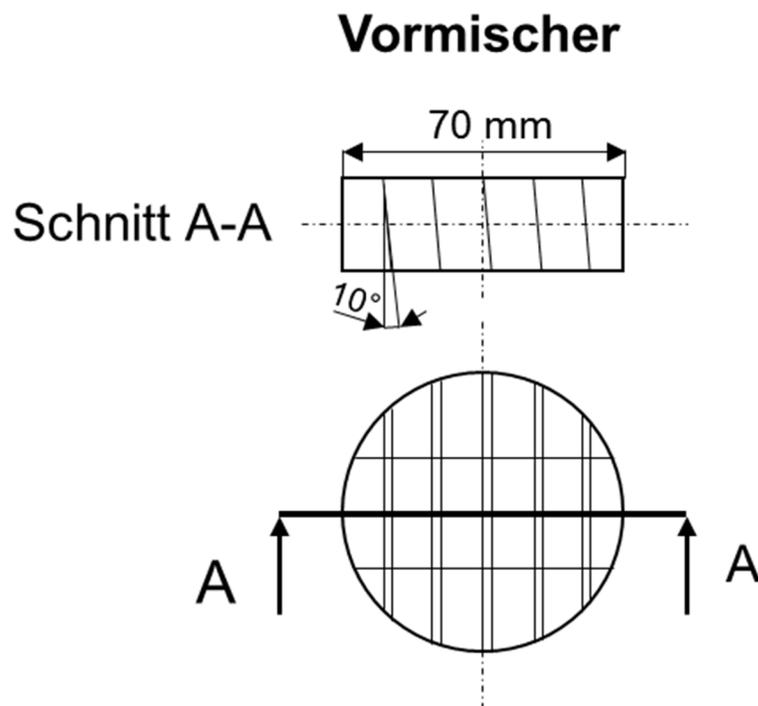


Abbildung 6-9: Schematische Darstellung des Plattenvormischers

Fazit

Ähnlich wie bei der Instrom-Anlage ist auch bei Gegenstrom-Anlagen aus den Gleichverteilungsuntersuchungen hervorgegangen, dass ein Mischelement unumgänglich ist, da es sonst zu keiner gleichmäßigen Verteilung kommt. Des Weiteren ergab sich aus den Referenzuntersuchungen, dass ein Einbau des Vormischers eine Verbesserung bei den Betriebspunkten mit niedrigem Abgasmassenstrom (BP 0 mit $\dot{m}_{\text{Abgas}}=75 \text{ kg/h}$ und BP 1 mit $\dot{m}_{\text{Abgas}}=100 \text{ kg/h}$), erzielt.

6.3 Variation der Mischelemente

Um eine gleichmäßige Durchmischung der eindosierten Harnstofflösung zu erzielen werden unterschiedliche Geometrien von Mischelementen im Abgasstrang eingesetzt. Flügelform, Anzahl der Flügel, deren Anstellwinkel und Überdeckungsgrad sind Unterscheidungsmerkmale bei Mischelementgeometrien. [42]

Nicht nur unterschiedliche Mischelementgeometrien, sondern auch Variationen an einem Mischelement, wie zum Beispiel die Mischelementlänge und die Position des Mischelements, können einen Einfluss auf die Gleichverteilung haben. In den Kapiteln 6.3.1 und 6.3.2 wird der Einfluss auf die Gleichverteilungszahl bei Variation der Mischelementlänge und Position des Mischelements erläutert.

Bei den beiden Anlagen (Instrom- und Gegenstrom-Anlage) wird jeweils ein Mischelement nach der Dosierstelle eingebaut. Bei der Gegenstrom-Anlage jedoch wird aufgrund der Eindosierung gegen die Strömungsrichtung und somit hin zu dem Entkoppelelement EKE, auch zusätzlich ein Vormischer eingebaut, um etwaige Ablagerungen in dem Entkoppelelement zu verhindern (siehe Kapitel 6.2.2).

Der Mischelementeinbau bei beiden Anlagen wird schematisch in Abbildung 6-10 dargestellt.

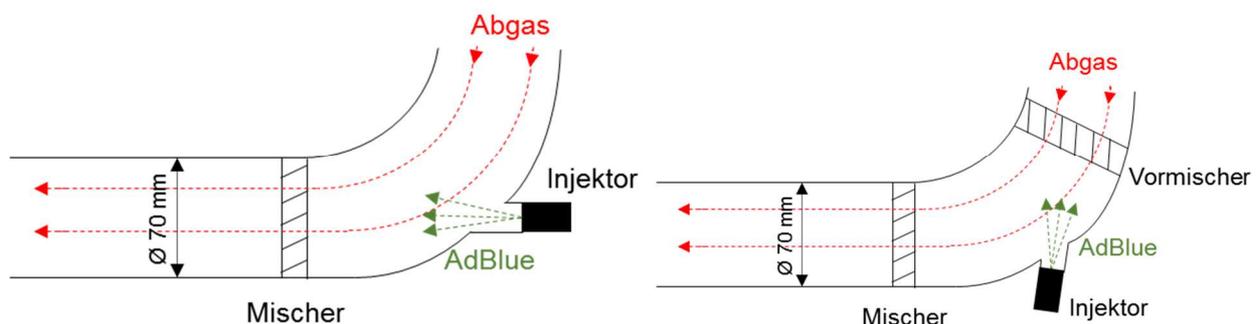


Abbildung 6-10: Schematische Darstellung einer Instrom-Anlage mit Mischelement und einem Abgasrohrdurchmesser von 70 mm (links) und einer Gegenstrom-Anlage mit Mischelement, Vormischer und einem Abgasrohrdurchmesser von 70 mm (rechts)

6.3.1 Mischelementlänge

Eine Variation an Mischelementlängen kann eine Veränderung der Gleichverteilung bewirken.

In Abbildung 6-11 ist die schematische Darstellung der Variation der Mischelementlängen dargestellt. Die Flügelform, die Anzahl der Flügel, deren Anstellwinkel und der

Überdeckungsgrad der beiden Mischelemente sind dieselben, jedoch ist das lange um 10 mm länger als das kurze Mischelement. Die Einbauposition des Mischelements wurde nicht verändert.

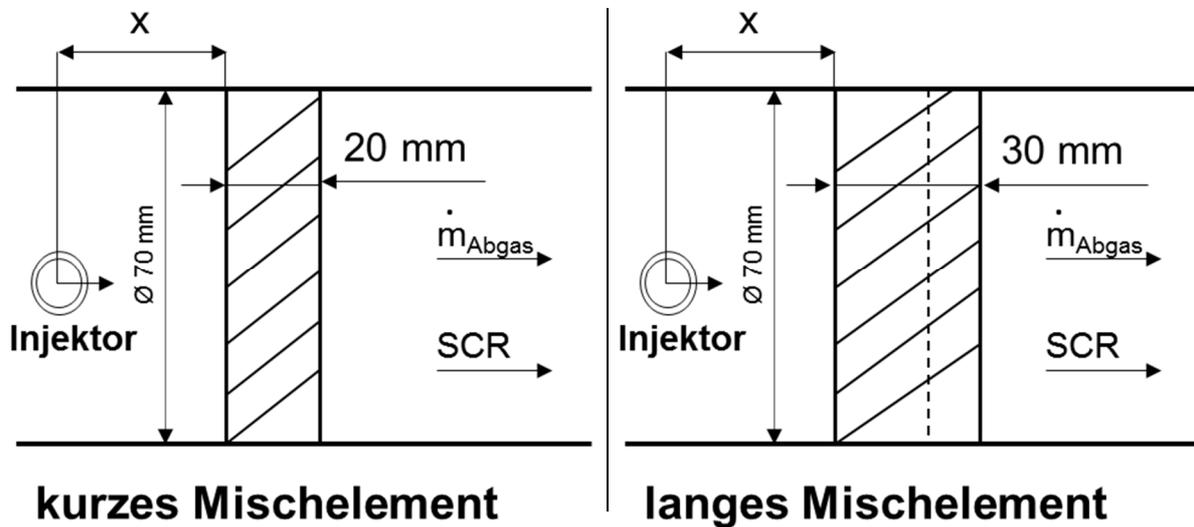


Abbildung 6-11: Schematische Darstellung eines kurzen Mischelements (20 mm) mit 70 mm Abgasrohrdurchmesser (links) und eines langen Mischelements (30 mm) mit 70 mm Abgasrohrdurchmesser (rechts)

Die Gleichverteilungsuntersuchungen von einem kurzen und einem langen Mischelement werden in [Abbildung 6-12](#) dargestellt. Beide Messungen wurden mit dem Injektor B durchgeführt.

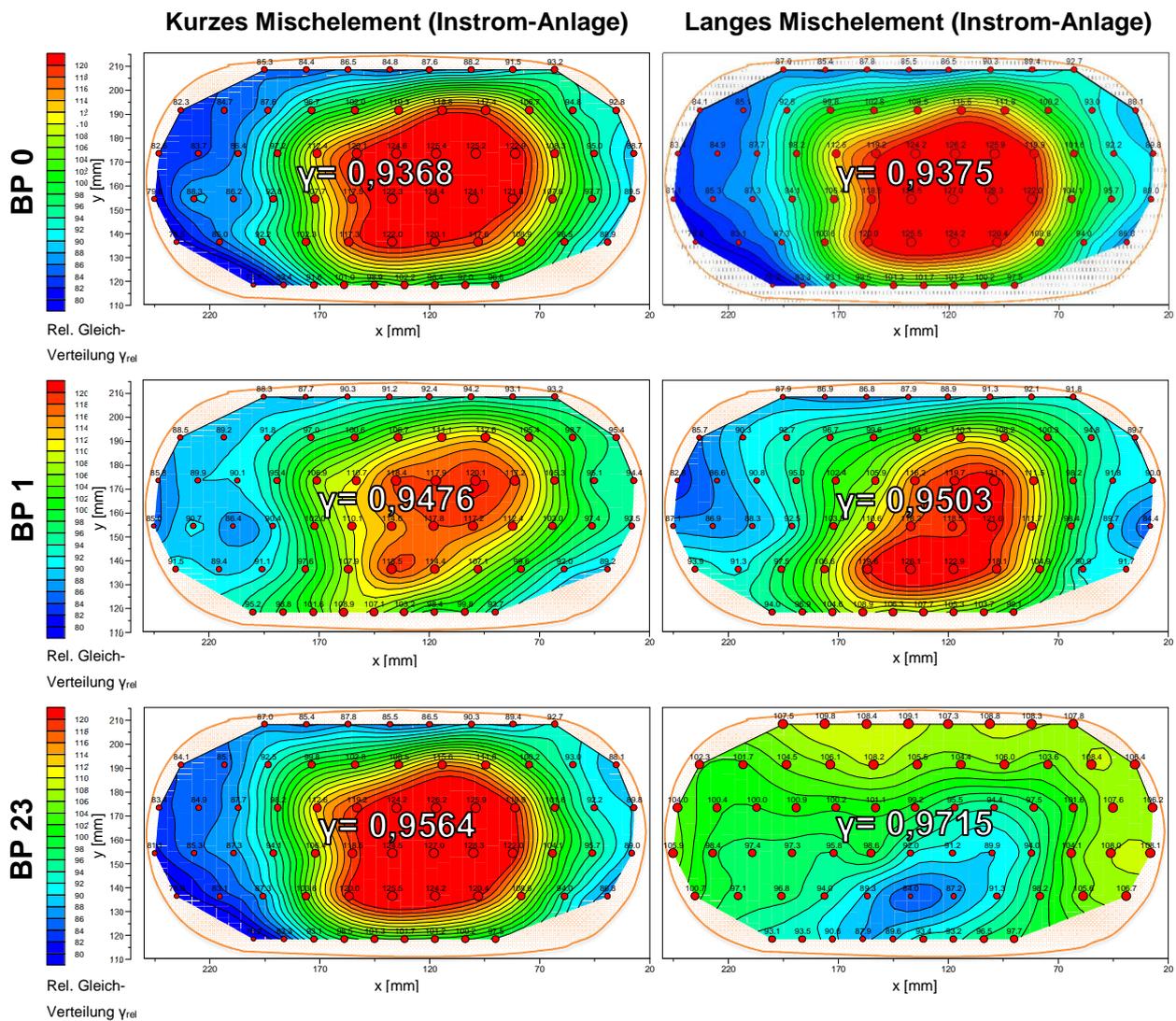


Abbildung 6-12: Gleichverteilungsergebnisse der Instrom-Anlage mit einer Mischstreckenlänge von 440 mm und Injektor B, mit kurzem Mischelement (links) und langem Mischelement (rechts) (BP0 oben, BP1 Mitte, BP23 unten)

Bei Betriebspunkt 0 ist bei beiden Mischelementen links und rechts in den Randgebieten ein NH_3 -Mangel und in der Mitte des Katalysatorquerschnittes ein NH_3 -Überschuss zu erkennen. Die Gleichverteilungszahl bei Betriebspunkt 0 ist beim kurzen Mischelement 0,9368 und beim langen Mischelement 0,9375. Bei den Gleichverteilungszahlen ist ein Unterschied von nur 0,0007 gegeben und auch bei der graphischen Auswertung der Gleichverteilung, ist kein signifikanter Unterschied zu sehen.

Bei Betriebspunkt 1 ist beim langen Mischelement, sowohl bei der Gleichverteilungszahl wie auch in der graphischen Darstellung eine minimale Verbesserung zu erkennen. Bei dem Einsatz des langen Mischelements wurde die Gleichverteilungszahl von 0,9503 erzielt. Im Vergleich dazu wurde bei dem kurzen Mischelement nur eine Gleichverteilungszahl von 0,9476 erreicht. Der NH_3 -Mangel links im Randgebiet bei dem kurzen Mischelement wird reduziert, jedoch im Randgebiet rechts ist ein größerer Bereich an NH_3 -Mangel zu erkennen. Ebenfalls ist in der Mitte des Katalysators mehr Überschuss an NH_3 ersichtlich.

Ein wirklich signifikanter Unterschied ist bei Betriebspunkt 23 zu erkennen. Dort verbesserte sich die Gleichverteilungszahl aufgrund des Einsatzes des längeren Mischelements von 0,9564 auf 0,9715. Bei dem langen Mischer ist kein NH_3 -Überschuss im oberen Randgebiet des Katalysators ersichtlich und der NH_3 -Mangel in der Mitte des Querschnittes wurde verringert.

Fazit

Bei gleichbleibender Flügelform, Anzahl der Flügel, Anstellwinkel und Überdeckungsgrad, jedoch unter Verwendung einer längeren Mischelementlänge, wird die Verteilung des Reduktionmittels bei Betriebspunkten mit hohem Abgasmassenstrom ($\dot{m}_{\text{Abgas}}=350$ kg/h), aufgrund der Verwirbelung und damit verbundenem höheren Turbulenzgrad, verbessert. Bei niedrigerem Abgasmassenstrom (BP 0 mit $\dot{m}_{\text{Abgas}}=75$ kg/h und BP 1 mit $\dot{m}_{\text{Abgas}}=100$ kg/h) bleibt die Gleichverteilungszahl gleich oder nur minimal erhöht.

6.3.2 Position des Mischelements

Neben den unterschiedlichen Mischelementlängen, kann auch die Variation der Position des Mischelements eine Änderung der Gleichverteilung bewirken.

Die schematische Darstellung der Mischelementspositionsänderung wird in Abbildung 6-13 dargestellt.

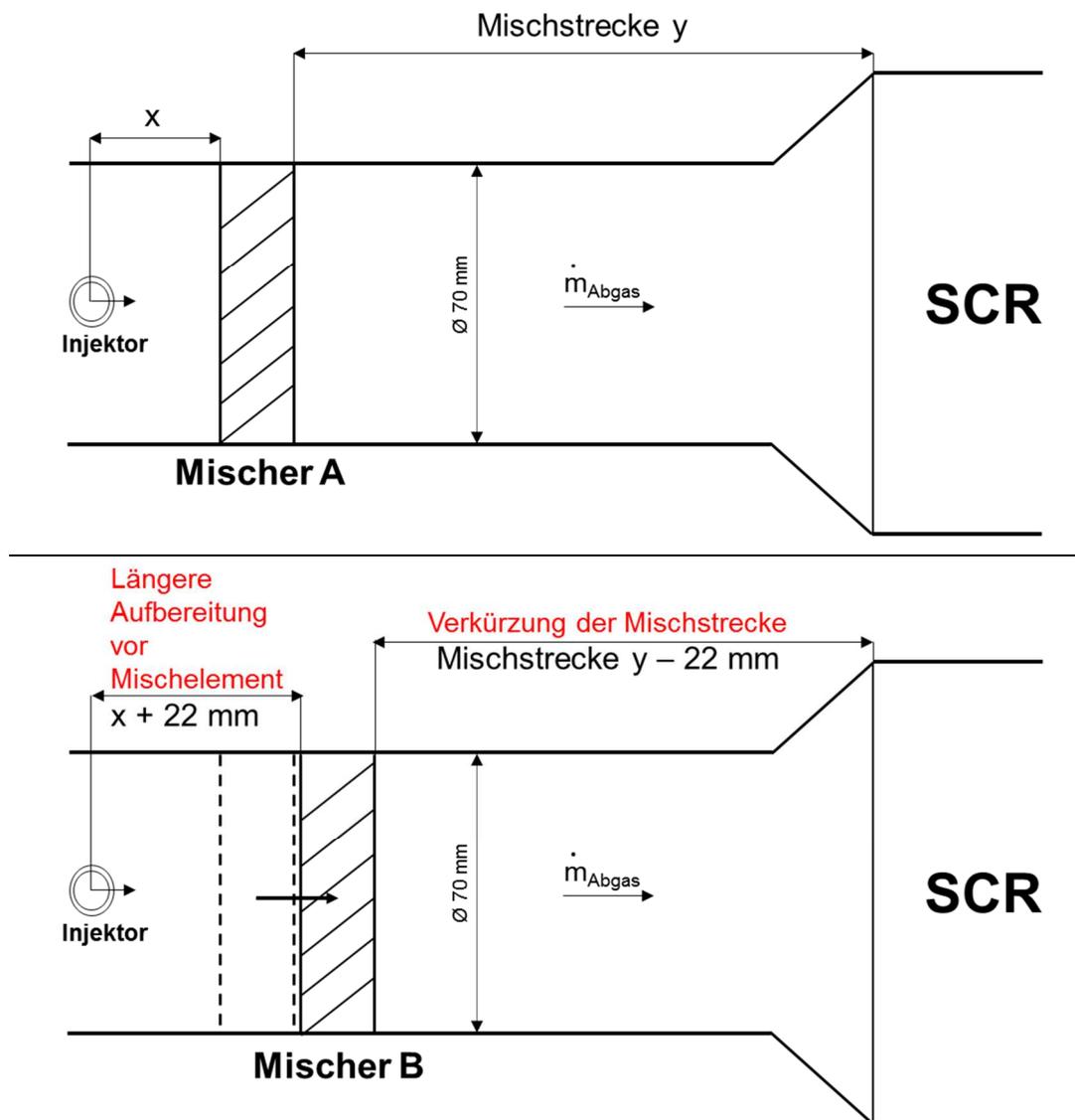


Abbildung 6-13: Schematische Darstellung ohne Mischelementspositionsverschiebung (oben) und mit Mischelementspositionsverschiebung (unten) einer Instrom-Anlage mit Abgasrohrdurchmesser von 70 mm

Mischer B (unten) hat dieselbe Mischelementgeometrie wie Mischer A (oben) jedoch wurde eine Positionsverschiebung von 22 mm vorgenommen. Mischer B wird somit in Richtung des SCR-Katalysators verschoben. Aufgrund dieser Verschiebung wird zwar die Mischstrecke verkürzt, jedoch wird eine längere Aufbereitung des Abgas-AdBlue-Gemisches vor dem Mischer erzielt.

In Abbildung 6-14 sind die Ergebnisse der Gleichverteilungsuntersuchungen mit dem Mischer A (links) und mit einem Mischer B (rechts), die jeweils mit dem Injektor C durchgeführt wurden, dargestellt.

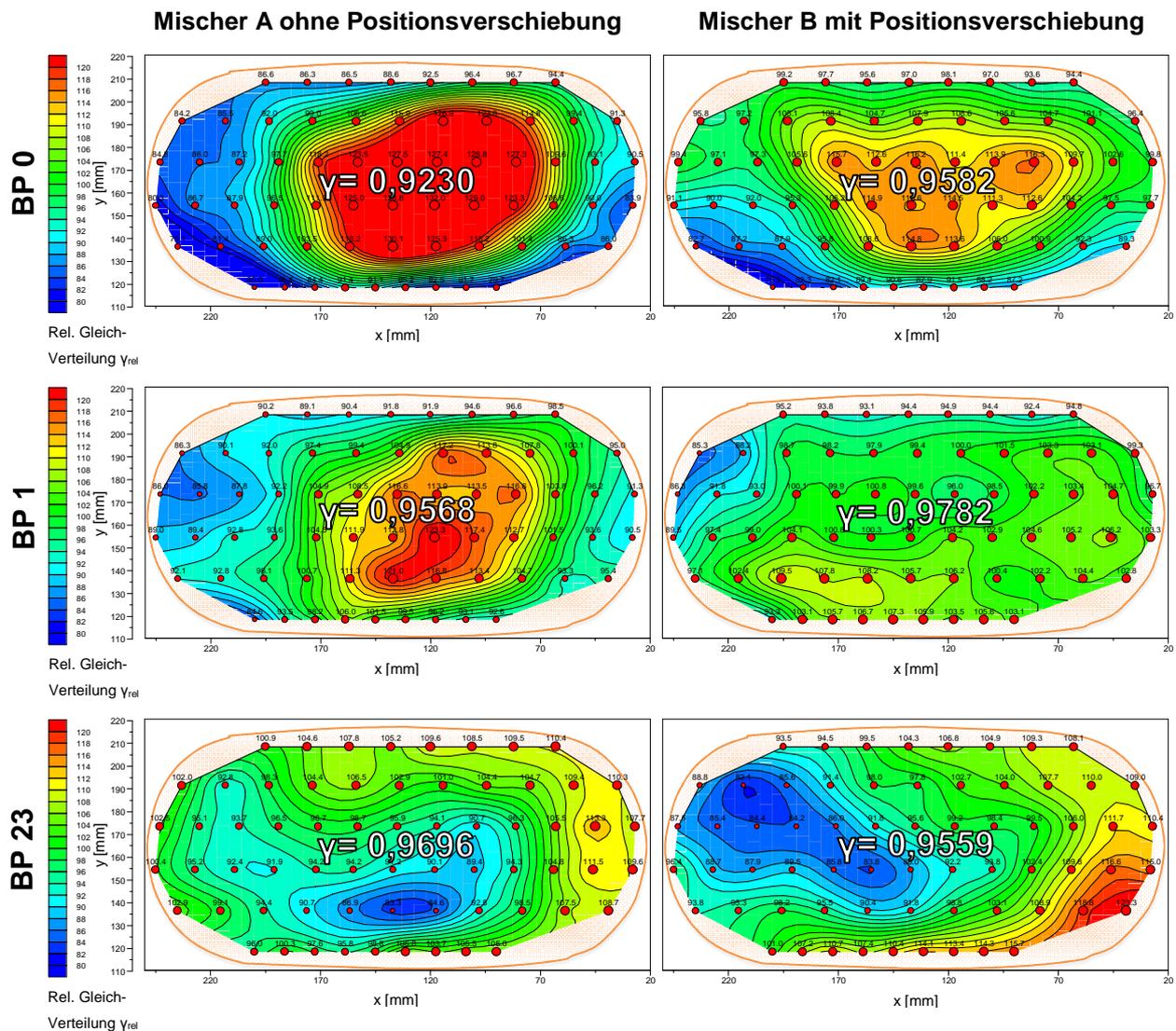


Abbildung 6-14: Gleichverteilungsergebnisse der Instrom-Anlage mit einer Mischstreckenlänge von 440 mm mit Injektor C, mit Mischer A ohne Positionsverschiebung (links) und Mischer B mit Positionsverschiebung (rechts) (BP0 oben, BP1 Mitte, BP23 unten)

Durch den niedrigen Massenstrom des Abgases in Betriebspunkt 0 und 1 (BP 0 mit $\dot{m}_{Abgas}=75$ kg/h und BP 1 mit $\dot{m}_{Abgas}=100$ kg/h) und die spätere Vermischung des Abgases wird nach der Positionsverschiebung (Mischer B), die Gleichverteilung signifikant verbessert. Bei Betriebspunkt 0 wurde durch die Positionsverschiebung die

Gleichverteilungszahl von 0,9230 auf 0,9582 verbessert. Bei Betriebspunkt 1 von 0,9568 auf 0,9782. Im Vergleich zur Gleichverteilungsuntersuchung ohne Verschiebung, wurden sowohl der NH_3 -Überschuss verringert, als auch die Randgebiete des Katalysators mit mehr NH_3 durchströmt.

Im Gegensatz zu den beiden Betriebspunkten mit niedrigerem Abgasmassenstrom wird bei Betriebspunkt 23 (hoher Abgasmassenstrom: $\dot{m}_{\text{Abgas}}=350 \text{ kg/h}$) die Gleichverteilungszahl, bei Positionsverschiebung von 0,9696 auf 0,9559, geringer. Bei Betriebspunkt 23 mit Positionsverschiebung sind ein höherer NH_3 -Überschuß an der rechten Seite und ein größerer Mangel an NH_3 an der linken Seite des Katalysators ersichtlich. Diese Ergebnisse lassen auf den höheren Abgasmassenstrom im Gegensatz zu den Betriebspunkten 0 und 1 schließen.

Fazit

Durch die Positionsverschiebung des Mischelements in Richtung des SCR-Katalysators können Verbesserungen bei den Betriebspunkten mit niedrigerem Massenstrom (BP 0 mit $\dot{m}_{\text{Abgas}}=75 \text{ kg/h}$ und BP 1 mit $\dot{m}_{\text{Abgas}}=100 \text{ kg/h}$) erzielt werden. Der Grund dafür ist die hier erzielte längere und dadurch verbesserte Aufbereitung vor dem Mischelement. Die Gleichverteilung bei höherem Massenstrom (BP 23 mit $\dot{m}_{\text{Abgas}}=350 \text{ kg/h}$) wird jedoch minimal verschlechtert.

6.4 Sauter-Durchmesser des Injektoren-Sprays

Bevor auf den Sauter-Durchmesser der verwendeten Injektoren eingegangen wird, muss zuerst das verwendete Messgerät und die Messdurchführung erörtert werden.

6.4.1 Laserdiffraktometrie

Für die Ermittlung der Tropfengröße der Injektoren wird das Messgerät Spraytec 10K der Firma Malvern Instruments verwendet. Die Messtechnik des Gerätes beruht auf dem Prinzip der Laserbeugung (ISO 13320:2009-10 [43]) und ermöglicht ein Spray oder Aerosol auf seine Tropfengrößenverteilung hin zu spezifizieren. Ein Helium-Neon-Laser

mit einer Wellenlänge von 632,8 nm und einer Ausgangsleistung von 2 mW wird als Lichtquelle verwendet. [44]

Das Arbeitsprinzip des Malvern – Spraytec wird in Abbildung 6-15 dargestellt. In Abbildung 6-15 bezeichnen die Nummerierungen 1-5 die Laserquelle (1), die Linse (2), das zu vermessende Spray (3), die Fourierlinse (4) sowie die 36 Detektoren (5).

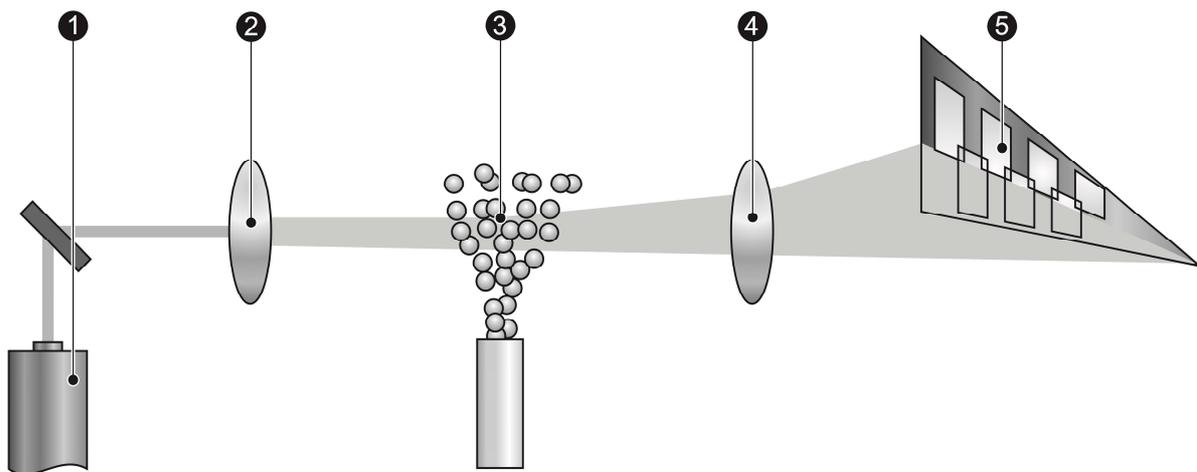


Abbildung 6-15: Funktionsprinzip des Malvern – Spraytec [45]

Der Laserstrahl wird zunächst in einer Optik aufgeweitet. Der Messbereich der zu erfassenden Tropfen liegt bei der verwendeten Optik zwischen 2,25 µm und 1000 µm. Der erweiterte Laserstrahl durchdringt den eidosierten Reduktionsmittel-Spray (Medium) und wird daraufhin am Empfänger durch eine Fourierlinse zentral gebündelt und auf einen Detektor geleitet. Das ausschlaggebende Signal für die Gesamtabschwächung des Laserstrahls (Obscuration) wird durch den zentralen Detektor geliefert. Aufgrund von Tropfen kann der Laserstrahl zwischen dem Sender und Empfänger gestreut werden. Die Fourierlinse bündelt somit das Streulicht außerhalb des Brennpunktes und leitet den Strahl an einen dezentralen Punkt am Empfänger weiter, an welchem sich 36 Detektoren befinden. Einer dieser Detektoren erfasst die Position und Intensität des empfangenen Laserstrahls. Mit einer Wiederholrate von bis zu 10 kHz werden die Messungen durchgeführt. [44]

Die erfolgreiche Bestimmung der Partikelgrößenverteilung bei der Laserdiffraktometrie beruht auf der passenden Beschreibung des Lichtstreuerverhaltens. Hierbei kann zwischen zwei Modellen, entweder die Mie-Theorie für kleine Partikel, oder die Fraunhofer-Näherung für große Partikel (>50 µm Durchmesser), ausgewählt werden. Für Messungen mit breitem Messbereich ist die Mie-Theorie als Modell vorzuziehen, da sie bei großen Partikeln ähnliche Ergebnisse wie die Fraunhofer-Näherung liefert, jedoch eine höhere Genauigkeit bei kleinen Partikeln aufweist. Da die Mie-Theorie genauer ist, müssen spezifische Informationen bezüglich des zu vermessenden Mediums, wie zum Beispiel der Brechungsindex der Partikel, bekannt sein. [46]

Wichtig: Das verwendete Messgerät Spraytec10K der Firma Malvern Instruments arbeitet mit einem patentierten Algorithmus (*multiple scattering* (US Patent Nr. 5,619,324 [47])). Da es bei hohen Partikelkonzentrationen, zu Mehrfachstreuung (Streulicht kann erneut von anderen Teilchen gestreut werden) und dadurch zu fehlerhaften Messungen kommen kann, wird der patentierte Algorithmus dazu benutzt, diese Mehrfachstreuungen zu korrigieren. [45]

6.4.2 Messdurchführung und Messergebnisse

Bei den verwendeten Injektoren wurde eine Sprayanalyse mittels Laserbeugung durchgeführt, um anschließend aus den Messergebnissen den Sauter-Durchmesser zu ermitteln.

Messaufbau

In Abbildung 6-16 wird das Messgerät Spraytec 10k (links) und der Messaufbau zur Untersuchung der Injektoren (rechts) dargestellt. Die Nummerierungen 1-5 in Abbildung 6-16 bezeichnen den Laser und Messbereich (1), den Sender (2), den Empfänger (3), die Linse (4) und das Gestell (5).

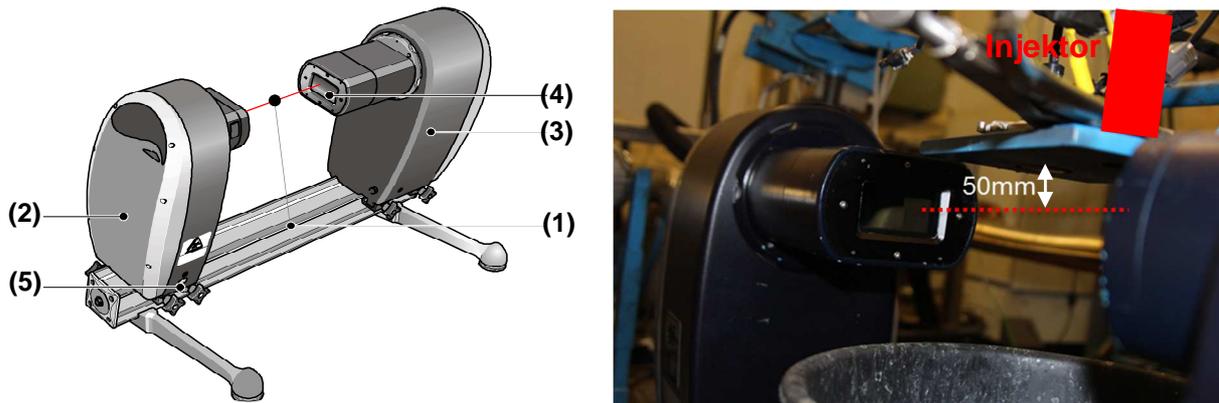


Abbildung 6-16: Spraytec 10k Messgerät [45] (links) und Bild des Messaufbaus (rechts)

Der zu vermessende Injektor wurde 50 mm über dem Laserstrahl in einer, am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, angefertigten Halterung montiert. Die Spraytec-Untersuchung erfolgte bei Raumtemperatur, wobei der Injektor in einen darunter stehenden Behälter dosierte.

In Tabelle 6-1 sind die verwendeten Einstellungen der Spraytec-Software der einzelnen Messungen ersichtlich. Als Triggersignal für das Auslösen des Lasers wurde das Dosiersignal vom Motorsteuergerät verwendet.

Tabelle 6-1: Messeinstellungen der Spraytec Software

Einstellungen der Spraytec Software		
Dosierfrequenz	3	[Hz]
Einspritzdruck	5; 6,5; 7,5	[bar]
elektrischer Hintergrund	131	[%] an Laserintensität
optischer Hintergrund	82	[%] an Laserintensität
Pre-Trigger	4,8	[ms]
Post Trigger	150	[ms]
Berechnungsindex Adblue	1,35	[-]
Dichte AdBlue bei 20°C	1,09	[g/cm ³]
Dichte Luft bei 20°C	1	[kg/m ³]
verwendete Näherung	Mie-Theorie	

Die Untersuchungen wurden bei unterschiedlichem HWL-Einspritzdruck von 5; 6,5; 7,5 bar und unterschiedlicher Eindosiermenge von 5,6 und 35 mg/s HWL durchgeführt. Die

Einspritzmengen entsprechen dem eindosierten Reduktionsmittelmassenstrom \dot{m}_{AdBlue} der verwendeten Betriebspunkte (siehe Kapitel 5.4.2; Tabelle 5-2).

Sauter-Durchmesser

Der Sauter-Durchmesser SMD wird zur Beurteilung der Güte eines Zerstäubungssystems verwendet und ist somit eine wichtige Kenngröße zur Bewertung eines Einspritzstrahls. Dieser wird zur Charakterisierung herangezogen, da aufgrund von turbulenten Strömungen keine einheitliche Tropfengröße entstehen kann, sondern ein Tropfenspektrum. Das Spray wird mit seiner Tropfengrößenverteilung auf einen Zahlenwert reduziert. Dieser Wert ermöglicht keine Aussage über die einzelnen Tropfen, sondern nur über die Eigenschaften der Gesamtheit der Tropfen. Der Sauter-Durchmesser gibt die Tropfengröße an, die das gleiche Oberflächen-Volumen-Verhältnis wie das gesamte Spray aufweist und wird mit Hilfe der Gleichung 6-1 bestimmt. [48]

$$\text{SMD} = \frac{\sum N_i \cdot D_i^3}{\sum N_i \cdot D_i^2}$$

Gleichung 6-1

D_i ...Tropfendurchmesser

N_i ... Anzahl der Tropfen eines Durchmessers

In Tabelle 6-2 sind die mittels Laserbeugung gewonnenen Messergebnisse der vier verwendeten Injektoren aufgelistet. In Abbildung 6-17 werden die Sauter-Durchmesser in Zusammenhang mit dem Einspritzdruck dargestellt.

Tabelle 6-2: Messergebnisse Spraytec

Sauter-Durchmesser SMD [μm]					
HWL [mg/s]	Druck [bar]	Injektor A	Injektor B	Injektor C	Injektor D
5,6	5	96,76	97,3	84,36	98,5
35	5	86,21	96,58	77,14	77,15
5,6	6,5	86,63	83,62	70,6	73,27
35	6,5	76,27	85,56	62,51	58,45
5,6	7,5	81,01	69,66	62,73	62,86
35	7,5	73,04	68,76	54,26	49,39

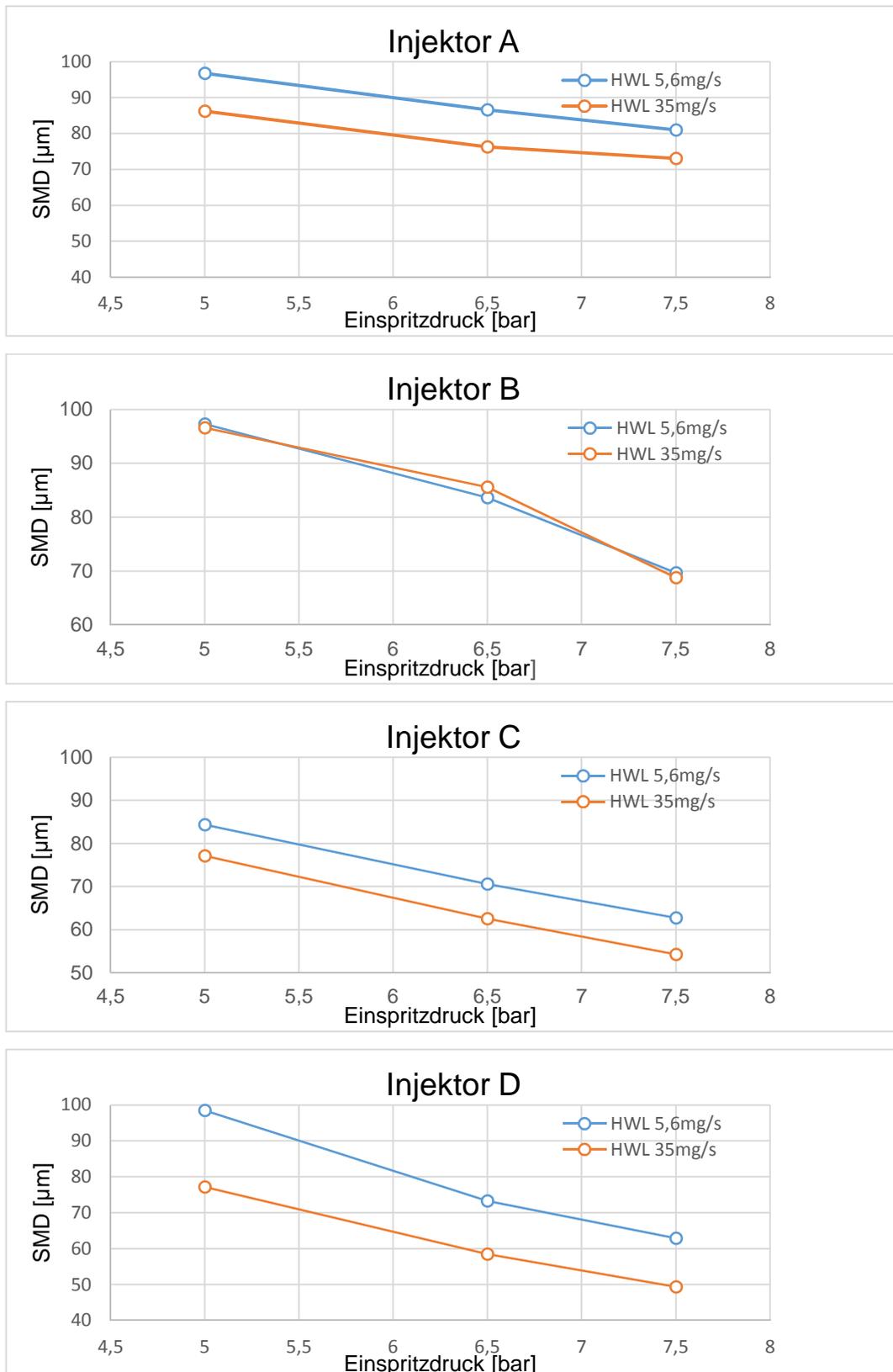


Abbildung 6-17: Messergebnisse der Spraytec – Analyse der Injektoren A – D bei einem Reduktionsmittelmassenstrom \dot{m}_{AdBlue} von 5,6 und 35 mg/s

Zu erkennen ist, dass mit zunehmendem Einspritzdruck der Sauter-Durchmesser bei jedem gemessenen Injektor abnimmt. Je kleiner der Sauter-Durchmesser, desto kleiner ist die durchschnittliche Größe der Tropfen. Das eidosierte AdBlue kann dadurch besser verdampfen. Wenn der Sauter-Durchmesser größer ist, sind die Tropfen größer, schwerer und fügen sich nicht so leicht an den Massenstrom des Abgases an, wie kleinere, wodurch es zu Verdampfungsproblemen und dadurch zu einer schlechteren Aufbereitung kommt.

In der Tabelle 6-3 sind die Ergebnisse der interpolierten Sauter-Durchmesser bei 6 bar HWL-Einspritzdruck aufgelistet. Diese sind für die weiteren Gleichverteilungsuntersuchungen ausschlaggebend, um den Einfluss des Sauter-Durchmessers bei den Standard HWL-Einspritzdrücken besser beschreiben zu können.

Tabelle 6-3: Interpolation der Sauter-Durchmesser auf 6 bar HWL-Einspritzdruck

Interpolation Sauter-Durchmesser SMD [μm] für 6 bar					
HWL [mg/s]	Druck [bar]	Injektor A	Injektor B	Injektor C	Injektor D
5,6	6	90,01	88,18	75,19	81,68
35	6	79,58	89,23	67,39	64,68

Fazit

Je höher der Einspritzdruck, desto geringer ist der Sauter-Durchmesser der eingespritzten Tropfen. Größere Tropfen weisen ein schlechteres Verdampfungsverhalten aufgrund des Oberflächen-Volumen-Verhältnisses auf. Des Weiteren sind diese schwerer und fügen sich nicht so leicht dem Abgasmassenstrom an. Kleinere Tropfen verdampfen besser und fügen sich eher dem Abgasmassenstrom an, daraus resultiert eine bessere Aufbereitung des Reduktionsmittels.

6.5 HWL-Einspritzdruckvariation

Aufgrund der Erkenntnisse der Laserbeugungsuntersuchung und dem daraus resultierenden Einfluss des Einspritzdruckes auf den Sauter-Durchmesser, soll nun auch der Einfluss des Druckes auf die Gleichverteilung veranschaulicht werden.

In Abbildung 6-18 sind die Ergebnisse der Messungen des Betriebspunktes 0 mit unterschiedlichen Einspritzdrücken mit dem Injektor B dargestellt. Dabei wurde der Druck von 4,5 bar auf 6 bar angehoben und schlussendlich noch weiter auf 7,5 bar erhöht.

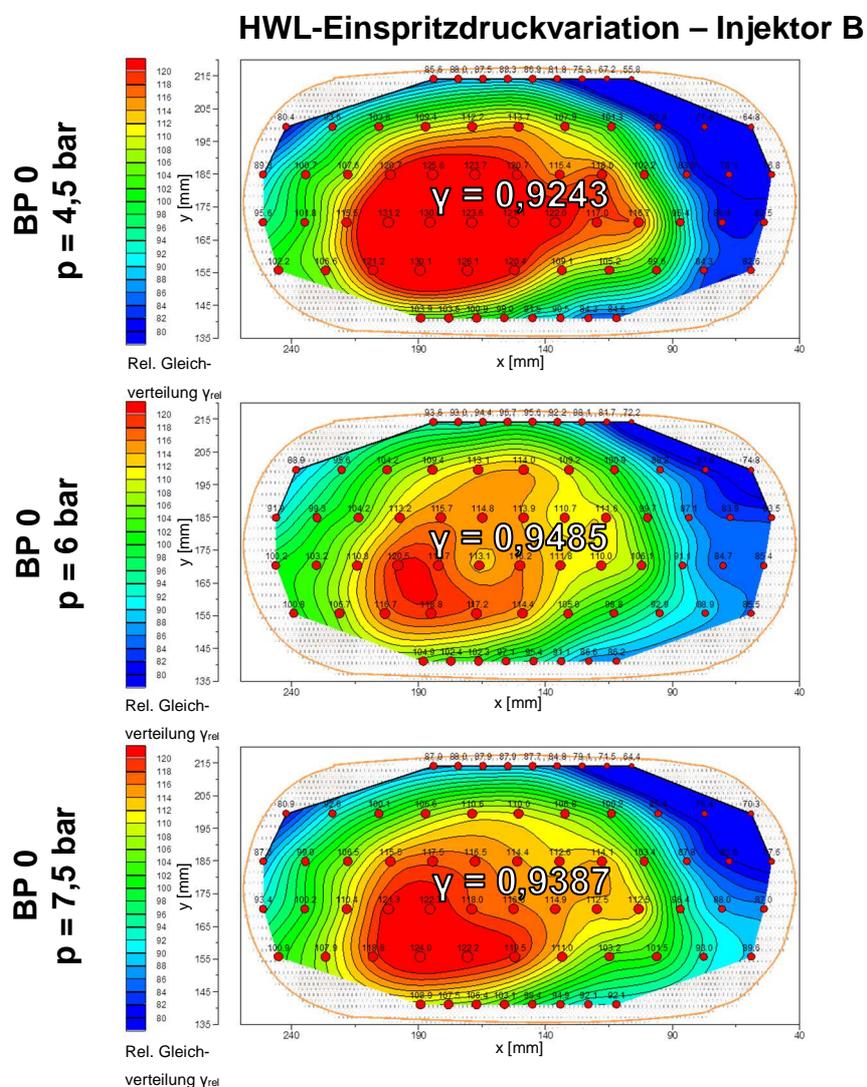


Abbildung 6-18: Gleichverteilungsergebnisse der Instrom-Anlage mit einer Mischstreckenlänge von 440 mm, mit Injektor B und HWL-Einspritzdruckvariation (BP0 p=4,5 bar oben, BP0 p=6 bar Mitte, BP0 p=7,5 bar unten)

Bei einem Einspritzdruck von 4,5 bar ist mittig ein NH_3 -Überschuss ersichtlich, der auf größere Tropfen hinweist, da diese schlechter verdampfen, wodurch es zu einer schlechteren Aufbereitung des Reduktionsmittels kommt.

Bei einem Einspritzdruck von 7,5 bar, erlaubt ein kleinerer Sauter-Durchmesser eine bessere Verdampfung und mittiger ist eine bessere Aufbereitung zu erkennen. Da sich kleine Tropfen leichter an den Abgasmassenstrom ($\dot{m}_{\text{Abgas}}=75 \text{ kg/h}$) anfügen, kommt es somit zentral, zu besseren relativen Gleichverteilungswerten. Bei der Erhöhung des HWL-Einspritzdrucks von 4,5 auf 7,5 wurde die Gleichverteilungszahl von 0,9243 auf 0,9387 erhöht.

Bei 6 bar ist die Verteilung des Reduktionsmittels am gleichmäßigsten und ergibt somit mit 0,9485 auch die beste Gleichverteilungszahl dieser Untersuchungsvariation. Diese Gleichverteilungsuntersuchung bestärkte des Weiteren auch die Verwendung des Einspritzdrucks von 6 bar bei unseren weiteren Gleichverteilungsmessungen.

Fazit

Die Messungen haben ergeben, dass die Gleichverteilungszahl bei einem Einspritzdruck von 4,5 und 7,5 bar schlechter als bei einem Einspritzdruck von 6 bar sind. Der beste Kompromiss zwischen 4,5 bar und 7,5 bar, liegt hier somit bei 6 bar.

6.6 Dosiermengenvariation

Bei Betriebspunkt 0 wurde, aufgrund der langjährigen Erfahrungen des Instituts, 5,6 mg/s AdBlue eindosiert (siehe Tabelle 5-2).

In der Tabelle 6-4 ist das berechnete Dosierverhältnis des Betriebspunktes 0 und auch die notwendige Eindosierung für $\alpha=1$ und $\alpha=2$ für die folgenden Gleichverteilungsuntersuchungen angegeben. Des Weiteren wird auch das Dosierverhältnis der Betriebspunkte 1 und 23 angegeben, welches ebenfalls unterstöchiometrisch ist.

Tabelle 6-4: Dosiermenge

Dosierverhältnis α			
	m_{Abgas} [kg/h]	α [-]	HWL [mg/s]
BP0	75	0,64	5,6
BP0	75	1	7,6
BP0	75	2	14,6
BP1	100	0,41	5,6
BP23	340	0,25	35

Die Eindosierung von 5,6 mg/s ist weit unterstöchiometrisch ($\alpha=0,65$), somit wird bei dem Betriebspunkt 0 gewährleistet, dass kein NH_3 -Schlupf auftritt.

Da die Eindosierung unterstöchiometrisch erfolgte, soll noch ein Zusammenhang zwischen der unterstöchiometrischen und der überstöchiometrischen Eindosierung dargestellt werden. Die Ergebnisse der Gleichverteilungsuntersuchungen mit den unterschiedlichen Dosierverhältnissen von 0,64, 1 und 2 werden in Abbildung 6-19 dargestellt.

Die Erhöhung des Dosierverhältnisses von 0,64 auf 1 bringt, da mehr AdBlue eindosiert wird, jedoch das NH_3 -Maxima vermehrt wird, eine minimale Verschlechterung der Gleichverteilungszahl von 0,9485 auf 0,9408. Dies wird bei der graphischen Darstellung der Gleichverteilung gut ersichtlich.

Bei der überstöchiometrischen Eindosierung von $\alpha=2$ wird ersichtlich, dass durch höhere Eindosierungsmengen, die Gleichverteilung und somit die Gleichverteilungszahl wesentlich verbessert wird, jedoch kann kein NH_3 -Schlupf gemessen werden, da es sich bei den Gleichverteilungsuntersuchungen am offenen Katalysator handelt und das Abgas sofort von der Absaugung aufgesogen wird, der bei dieser Menge an Eindosierung sicherlich entsteht.

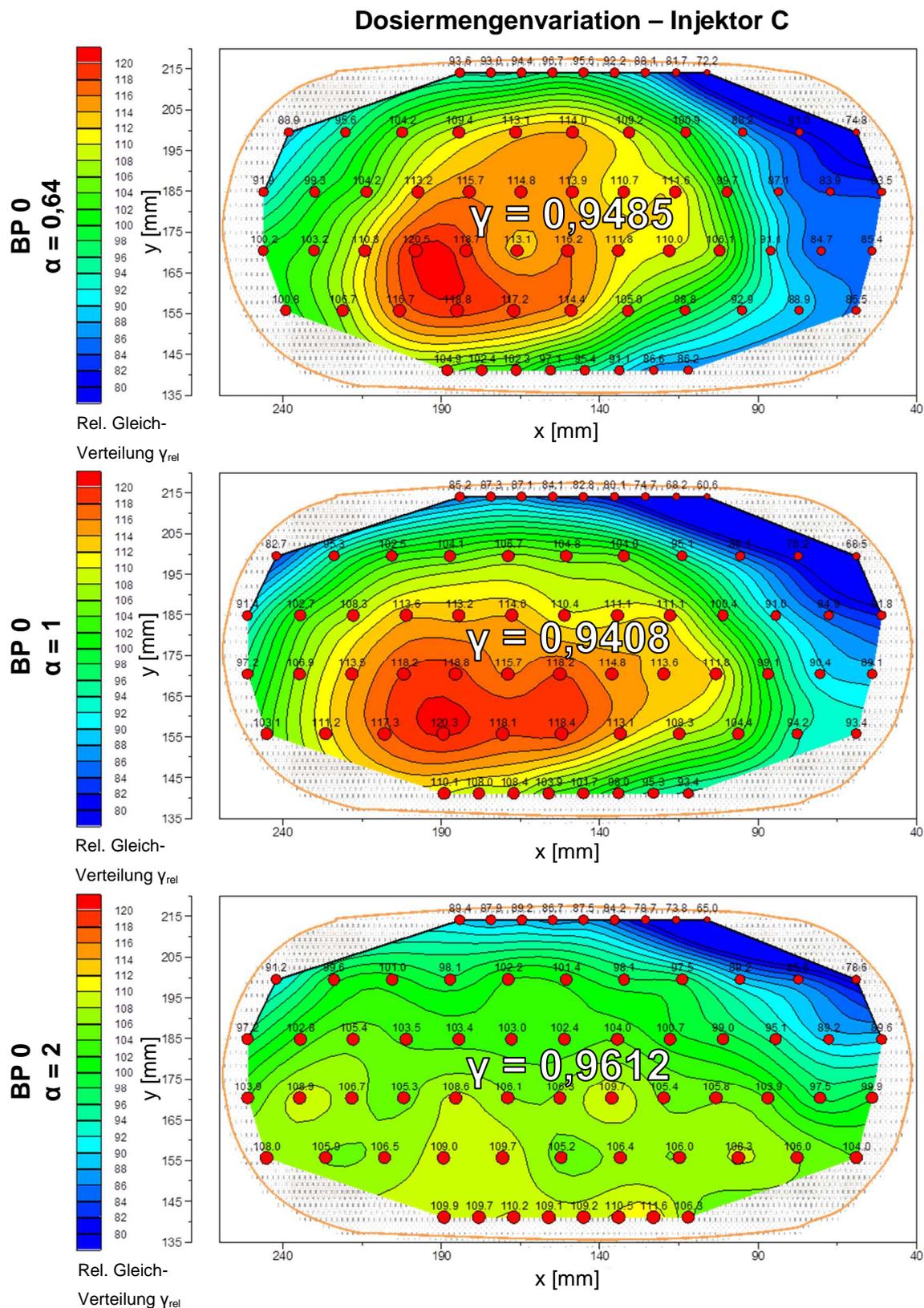


Abbildung 6-19: Gleichverteilungsergebnisse der Instrom-Anlage mit einer Mischstreckenlänge von 440 mm, mit Injektor B und Dosiermengenvariation (BP0 $\alpha=0,64$ oben, BP0 $\alpha=1$ Mitte, BP0 $\alpha=2$ unten)

Ausblick

In der Regel wird in der Praxis ein überstöchiometrisches Dosierverhältnis verwendet [49].

Auf diese Weise wird in allen Bereichen eine nahezu vollständige Reduktion erreicht. Möglichem NH_3 -Schlupf, der zurzeit noch keine limitierte Abgaskomponente für Pkw darstellt, steht das NH_3 -Speicherverhalten des SCR-Katalysators gegenüber. Die NH_3 -Zugabe erfolgt getaktet überstöchiometrisch und wird erst wieder unterbrochen, wenn ein entsprechend der Katalysatoreigenschaften und dem Katalysatorvolumen vorgegebener Maximalwert erreicht wird. Die NH_3 -Zugabe wird bei unterschreiten eines vorgegebenen Minimalwerts wieder begonnen. Diese gespeicherten NH_3 -Werte können als Kennfeld in Abhängigkeit verschiedener Betriebsparameter festgelegt werden. Dadurch kann bei Instationärbetrieb auch NO_x -Spitzen Rechnung getragen werden. [49]

In Abbildung 6-20 wird die maximale und zulässige NH_3 -Speicherfähigkeit zweier SCR-Katalysatoren bei Stationärbedingungen dargestellt.

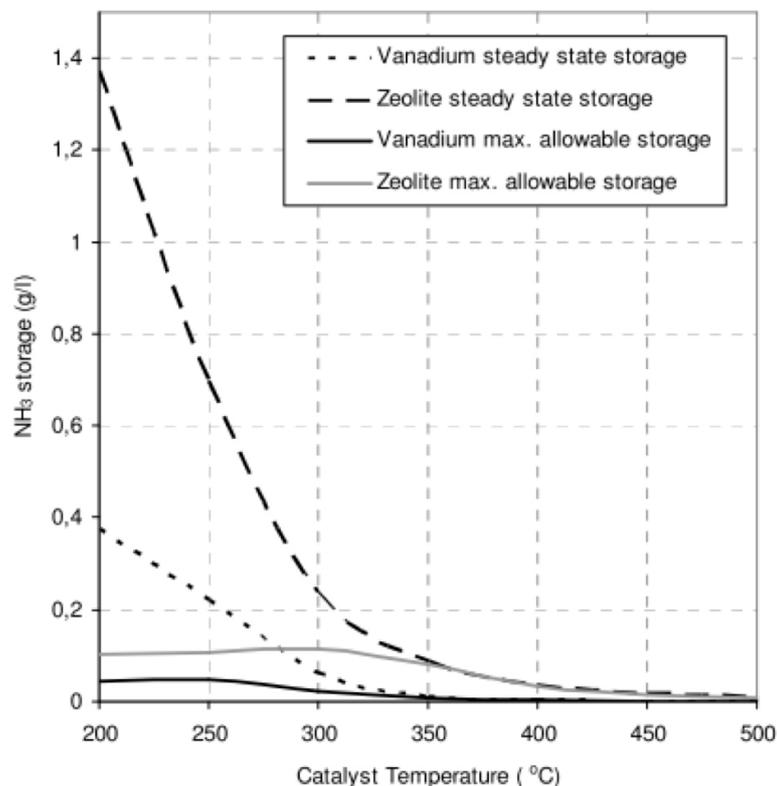


Abbildung 6-20: Maximale und zulässige NH_3 -Speicherfähigkeit zweier SCR-Kats bei Stationärbedingungen [50]

Fazit

Die Gleichverteilungsuntersuchungen mit Dosiermengenvariation haben ergeben, dass obwohl die Eindosierung erhöht wurde (von 5,6 mg/s bei $\alpha=0,64$ auf 7,6 mg/s bei $\alpha=1$), sich die Gleichverteilungszahl minimal verschlechterte (von 0,9485 auf 0,9408). Die Gleichverteilung war bei $\alpha=2$ am besten, jedoch wird wahrscheinlich bei dieser Dosiermenge wahrscheinlich ein NH_3 -Schlupf (der nicht optimal ist) auftreten. Der NH_3 -Schlupf kann bei den Gleichverteilungsuntersuchungen bei offenem Katalysator nicht gemessen werden, da nach dem Katalysator kein NH_3 -Sensor vorhanden ist. Aus diesem Grund werden die weiteren Gleichverteilungsuntersuchungen weiterhin mit den in Kapitel 5.4.2 beschriebenen Betriebspunkten und deren Dosiermengen durchgeführt.

6.7 Variationsmöglichkeiten der Injektoren

Eine weitere Variation, neben der Verwendung von unterschiedlichen Injektoren, stellt der Injektorversatz dar. Im folgenden Kapitel werden der Versatz des Injektors und dessen Einfluss auf die Gleichverteilungszahl erläutert.

6.7.1 Injektorversatz

Der Injektorversatz wird mit Hilfe eines Abstandshalters ermöglicht und wird in Abbildung 6-21 schematisch dargestellt. Der Injektor wurde auf diese Weise um 25 mm nach außen versetzt.

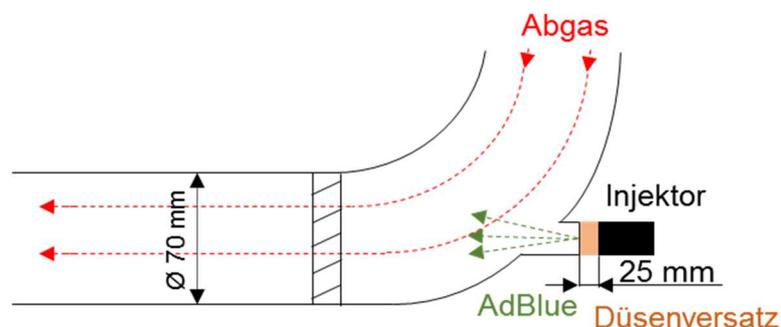


Abbildung 6-21: Schematische Darstellung einer Instream-Anlage mit Mischelement, einem Abgasrohrdurchmesser von 70 mm und einem Injektorversatz von 25 mm

In Abbildung 6-22 sind die Ergebnisse der Untersuchung ohne Versatz des Injektors D (links) und mit einem Injektorversatz von 25 mm (rechts) ersichtlich.

Bei allen Betriebspunkten wurde durch diese Variation eine Verbesserung der Gleichverteilungszahl erzielt.

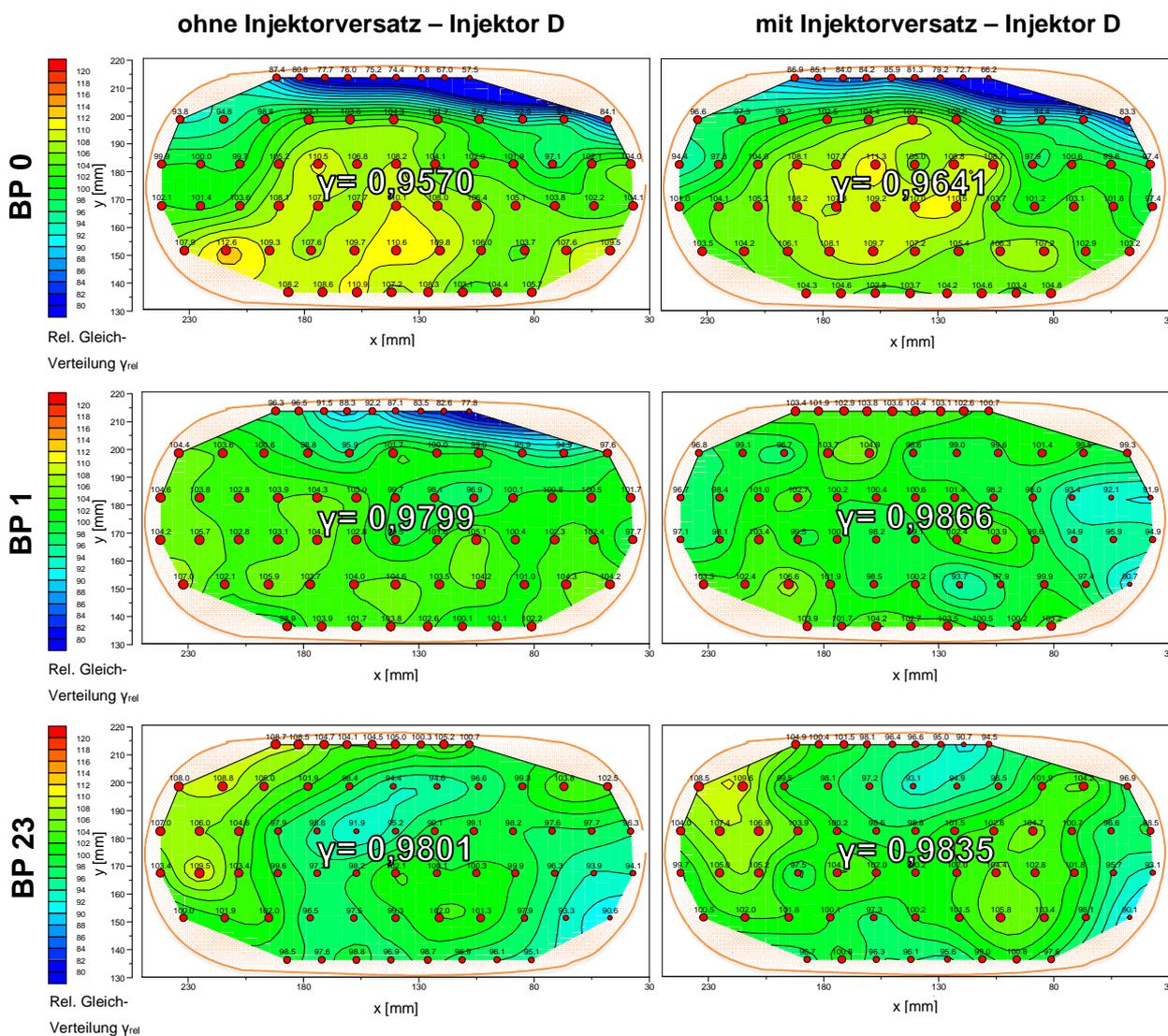


Abbildung 6-22: Gleichverteilungsergebnisse der Instrom-Anlage mit einer Mischstreckenlänge von 440 mm und Injektor D, ohne Injektorversatz (links), mit 25 mm Injektorversatz (rechts) (BP0 oben, BP1 Mitte, BP23 unten)

Bei Betriebspunkt 0, der den niedrigsten Abgasmassenstrom ($\dot{m}_{\text{Abgas}}=75 \text{ kg/h}$) besitzt, wurde eine minimale Verringerung des NH_3 -Mangels am oberen Randgebiet des Katalysators ersichtlich. Der leichte NH_3 -Überschuss (gelber Bereich) ist dabei mittig zu

erkennen. Die Gleichverteilungszahl wurde aufgrund des Injektorversatzes von 0,9570 auf 0,9641 erhöht.

Bei Betriebspunkt 1 wurde der NH_3 -Mangel am oberen Randgebiet des Katalysators vollständig reduziert, wodurch die bessere Verteilung des Reduktionsmittels ersichtlich wird. Jedoch ist im rechten Bereich ein NH_3 -Mangel zu erkennen.

Bei Betriebspunkt 23 mit dem höchsten Abgasmassenstrom ($\dot{m}_{\text{Abgas}}=350 \text{ kg/h}$), ist bei der graphischen Darstellung kein signifikanter Unterschied ersichtlich und die Gleichverteilungszahl wurde aufgrund des Injektorversatzes nur minimal von 0,9801 auf 0,9835 erhöht.

Der eindosierte Dosierkegel des AdBlue-Sprays kann sich durch den Versatz nach außen besser ausbreiten, jedoch können kleinere Tropfen bei hohem Massenstrom nicht mehr in die Rohranlage hinausströmen und werden somit an die Wand des Versatzes transportiert werden.

Fazit

Bei allen drei Betriebspunkten kann durch den Versatz nach außen eine Verbesserung erzielt werden. Jedoch wurden Ablagerungen des eindosierten AdBlue an der Wand des Versatzes ersichtlich und somit wurde diesbezüglich keine weitere Anwendung mehr durchgeführt.

Ausblick

Diese Ablagerungen sind kritisch, weil Biuret und höher molekulare Ablagerungen entstehen. Diese Ablagerungen führen zu einer Veränderung des Spraybildes und in weiterer Folge zur Beeinträchtigung der grundsätzlichen Funktion der Dosiereinheit. Im ungünstigsten Fall können die Ablagerungen die Dosierstelle mit der Zeit verschließen. [2], [16]

Durch Ablagerungen stimmt die Dosiermenge des eindosierten AdBlue nicht mehr mit der zur Aufbereitung nötigen Menge überein. Aus diesen Gründen wurde die Variante nicht weiter verfolgt.

7 Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Optimierung der Gleichverteilung bei kurzen Mischstreckenlängen

7.1 Kurze Abgasanlage - Instromdosierung

Ausgehend von den Referenzuntersuchungen der Anlage ohne Mischer in Kapitel 6.2 und mit Hilfe der Erkenntnisse aus dem vorherigen Kapitel werden nun Variationen durchgeführt um eine höhere Gleichverteilungszahl zu erreichen. Es werden bei einer Mischstrecke von circa 440 mm mehrere Variationen angewendet, um eine Gleichverteilungszahl von mindestens 0,98 zu erhalten.

Bei den folgenden Gleichverteilungsuntersuchungen wurde das AdBlue unterstöchiometrisch eindosiert. Die Dosiermengen für die jeweiligen Betriebspunkte sind in Tabelle 6-4 in Kapitel 6.6 aufgelistet.

7.1.1 Mischelementsvariation

Es wurden zwei unterschiedliche Mischer (mit unterschiedlicher Geometrie) mit dem Injektor B vermessen. Die Mischer sind hinsichtlich des Überdeckungsgrades, der Flügelform und des Anstellwinkels gleich. Die Flügelkontur der Mischer 1 und 2 wird in Abbildung 7-1 dargestellt.

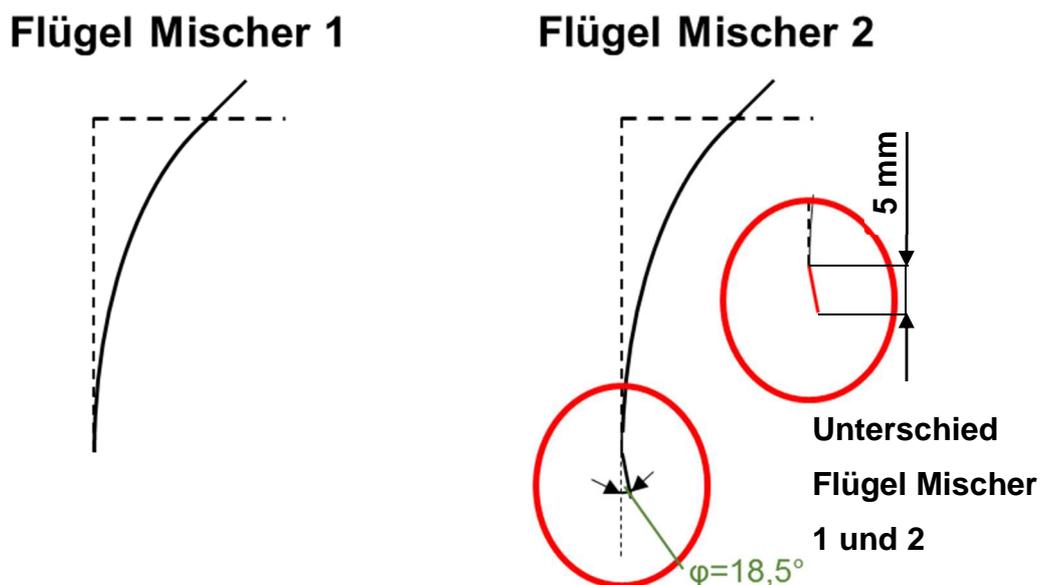


Abbildung 7-1: Flügelkontur Mischer 1 und Mischer 2

Während jedoch bei der Aufprallseite von Mischer 1 die Flügelbleche gerade sind, also nicht um ihre Achse geneigt, wurde bei Mischer 2 eine Verlängerung von 5 mm gegen die Strömungsrichtung eingebaut, die einen Winkel von $18,5^\circ$ enthält und aufgrund der Neigung der Flügel, einen anderen Drall erzeugt.

In Abbildung 7-2 werden die Ergebnisse der Gleichverteilungsuntersuchung der beiden Mischer dargestellt.

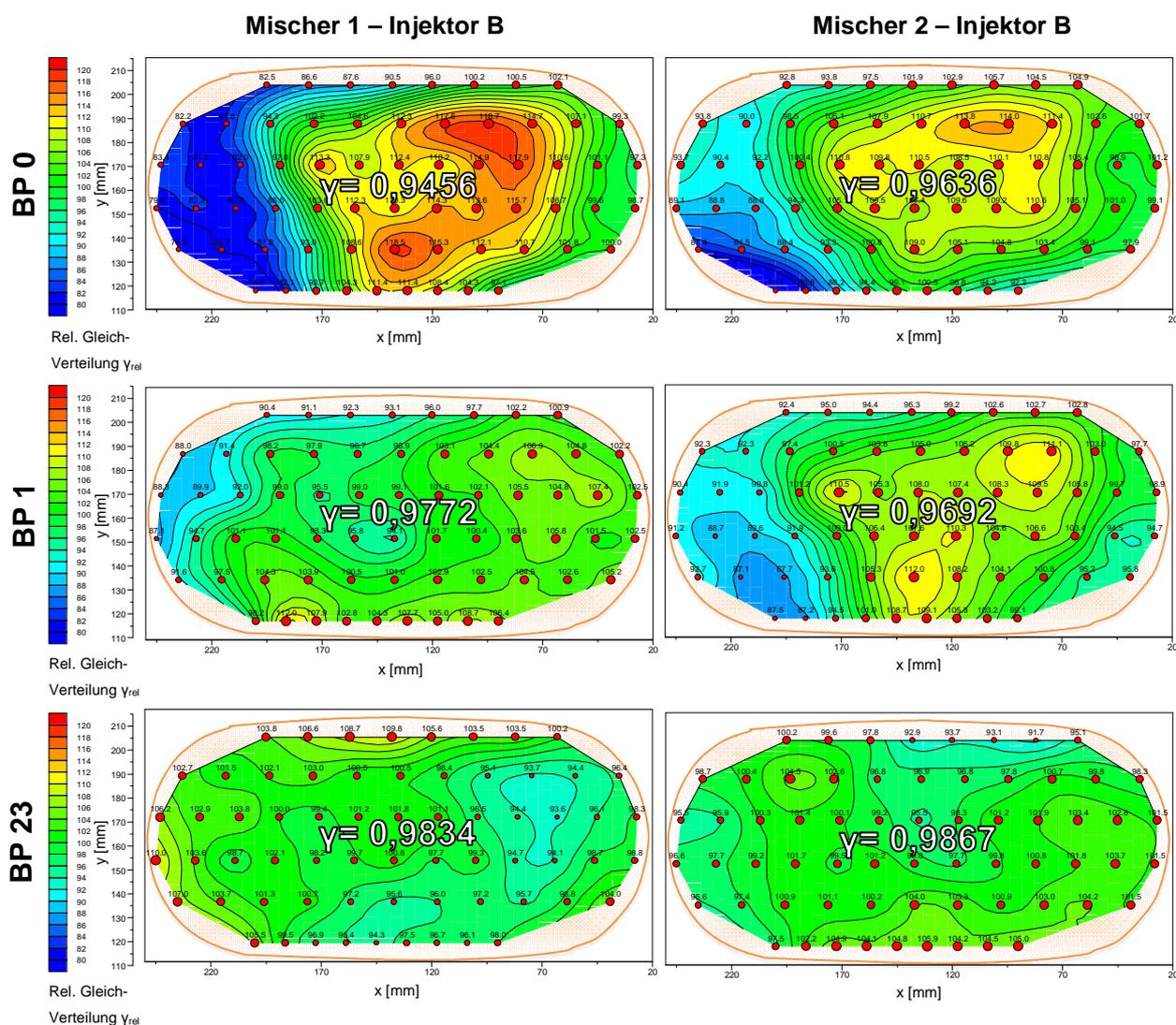


Abbildung 7-2: Gleichverteilungsergebnisse der Instrom-Anlage mit einer Mischstreckenlänge von 440 mm mit Injektor B, mit Mischer 1 (links) und Mischer 2 (rechts) (BP0 oben, BP1 Mitte, BP23 unten)

Bei Mischer 1 ist bei Betriebspunkt 0 ein Mangel an NH_3 im linken Bereich des Katalysators zu erkennen. Dieser ist bei Mischer 2 geringer, beziehungsweise der größte

Anteil an NH_3 -Mangel ist im unteren linken Bereich des Querschnittes zu erkennen. Bei Mischer 1 ist mittig NH_3 -Überschuss zu erkennen, der jedoch bei Mischer 2 geringer ist. Somit ist im Betriebspunkt 0 bei Mischer 2 die Gleichverteilungszahl ($\gamma=0,9636$) größer als bei Mischer 1 ($\gamma=0,9456$).

Bei Betriebspunkt 1 erzielte Mischer 1 eine Gleichverteilungszahl von 0,9772 und Mischer 2 eine Gleichverteilungszahl von 0,9692. Bei Mischer 2 wird ein flächenmäßig größerer NH_3 -Mangel an der linken Seite ersichtlich wodurch sich auch die Gleichverteilungszahl verringert.

Bei dem hohen Abgasmassenstrom ($\dot{m}_{\text{Abgas}}=350 \text{ kg/h}$) im Betriebspunkt 23 wird das NH_3 bei beiden Mischern gut verteilt (Mischer 1: $\gamma=0,9834$ und Mischer 2: $\gamma=0,9867$).

Durch die verbesserte Mischelementgeometrie, aufgrund der angestellten (geneigten) Flügel, konnte das Turbulenzniveau offensichtlich deutlich erhöht werden.

Aus diesem Grund wurde für die weiteren Messungen der Mischer 2 gewählt, da die Gleichverteilungszahl bei den Betriebspunkte 0 und 23 höher ist und die Verringerung des Betriebspunktes 1 somit mit einer anderen Variation erhöht werden muss.

7.1.2 Injektorvariation

Als weitere Variation wurde eine Untersuchung mit dem Mischer 2 (siehe Kapitel 7.1.1) mit dem Injektor C vermessen. Die Ergebnisse aus dieser Untersuchung sind in Abbildung 7-3 ersichtlich.

Bei den Betriebspunkten mit niedrigem Abgasmassenstrom (BP 0 mit $\dot{m}_{\text{Abgas}}=75 \text{ kg/h}$ und BP 1 mit $\dot{m}_{\text{Abgas}}=100 \text{ kg/h}$) ist für Injektor C eine deutliche Verbesserung der Gleichverteilungszahl ersichtlich. Im Vergleich zu der graphischen Auswertung der Gleichverteilung bei Injektor B, wurde bei Injektor C fast kein Überschuss an NH_3 gemessen, sowie der NH_3 -Mangel eindeutig reduziert. Dies lässt sich auf den geringeren Sauter-Durchmesser bei Injektor C (SMD= $75,19 \mu\text{m}$ bei BP 0 und 1) im Vergleich zu

Injektor B (SMD= 88,18 μm bei BP 0 und 1) zurückführen (siehe Tabelle 6-3), welches eine Verringerung von knapp 13 μm bedeutet.

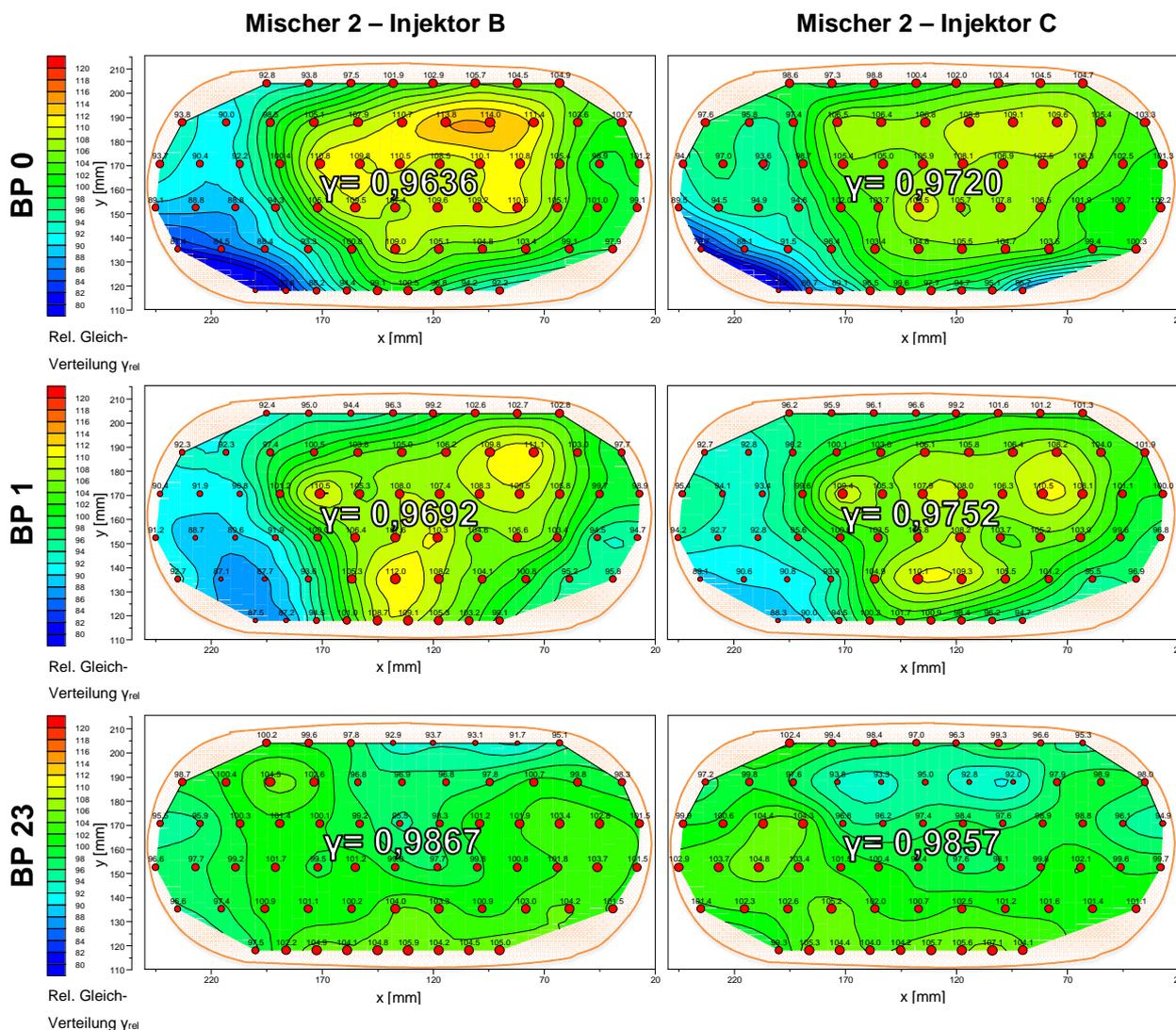


Abbildung 7-3: Gleichverteilungsergebnisse der Instrom-Anlage mit einer Mischstreckenlänge von 440 mm und Mischer 2, mit Injektor B (links) und Injektor C (rechts) (BP0 oben, BP1 Mitte, BP23 unten)

Kleinere Tropfen des AdBlue-Sprays können besser verdampfen und dadurch eine bessere Aufbereitung erzielen. Bei dem Betriebspunkt 23, mit dem höheren Massenstrom ($\dot{m}_{\text{Abgas}}=350 \text{ kg/h}$) ist kein signifikanter Unterschied der Gleichverteilungszahl (Injektor B: $\gamma=0,9867$ und Injektor C: $\gamma=0,9857$) und der graphischen Auswertung ersichtlich.

7.1.3 Mischelementpositionsvariation

Beide Injektoren wurden als letzte Variation mit einer Positionsänderung des Mixers 2 vermessen. Der Mischer wurde für diese Messung um 10 mm in Strömungsrichtung versetzt und die Gleichverteilungsuntersuchungsergebnisse werden in Abbildung 7-4 dargestellt.

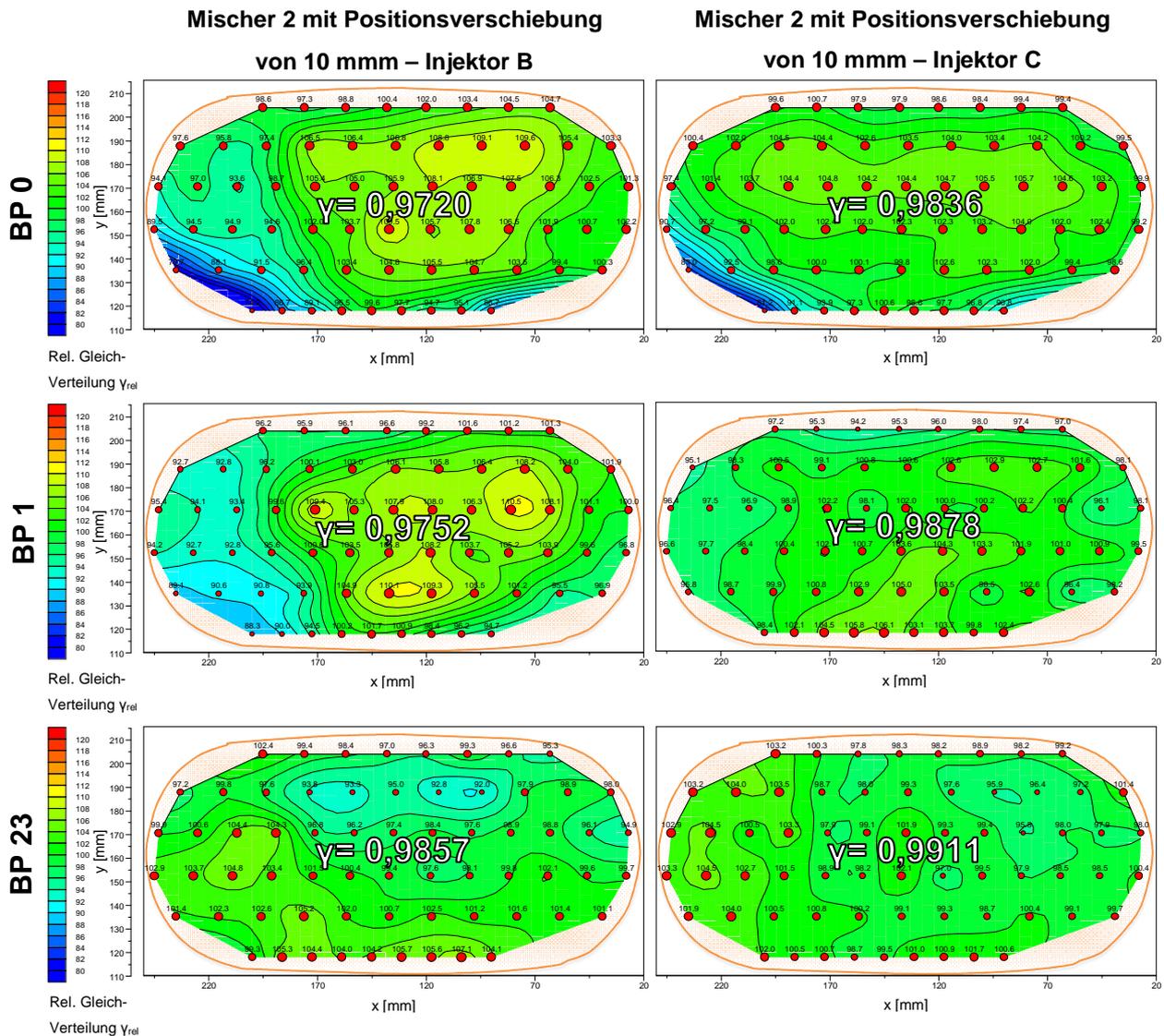


Abbildung 7-4: Gleichverteilungsergebnisse der Instrom-Anlage mit einer Mischstreckenlänge von 440 mm mit Mischer 2 und Positionsverschiebung von 10 mm, mit Injektor B (links) und Injektor C (rechts) (BP0 oben, BP1 Mitte, BP23 unten)

Hierbei wurde bei Injektor B wie bei den dazugehörigen Referenzuntersuchungen in Kapitel 6.3.2, eine Verbesserung der Messergebnisse bei den niedrigen

Abgasmassenstrom-Betriebspunkten 0 und 1 ($\dot{m}_{\text{Abgas}}=75 \text{ kg/h}$ und $\dot{m}_{\text{Abgas}}=100 \text{ kg/h}$) erzielt. Bei dem Betriebspunkt 23 hat die Gleichverteilungszahl sich um 0,001 verringert.

Bei Injektor C hat sich jedoch auch der Betriebspunkt 23 verbessert, was zeigt, dass nicht nur die Mischelementsposition, sondern auch der verwendete Injektor, ausschlaggebend für die Gleichverteilungszahl ist.

Der Grund dafür sind die ebenfalls untersuchten Sauter-Durchmesser der beiden Injektoren (siehe Kapitel 6.4.2). Bei Injektor C (siehe Abbildung 6-17 oder Tabelle 6-3) war der Sauter-Durchmesser bei der Dosierung von 35mg/s um 21 μm geringer als bei Injektor B und somit wird sich das AdBlue bei dem hohen Massenstrom und der späteren Vermischung, durch schnellere Verdampfung besser verteilen.

7.1.4 Zusammenfassung kurze Instrom-Anlage

In Abbildung 7-5 werden alle Variationen der ausgeführten Gleichverteilungsuntersuchungen der kurzen Instrom-Anlage, mit Mischstreckenlänge von 440 mm, in einem Diagramm für den jeweiligen Betriebspunkt dargestellt.

Zuerst wurde eine Mischelementsvariation (Variante 1 und Variante 2) durchgeführt, um das bessere Mischelement für die Instrom-Anlage zu finden. Durch den Einsatz von Mischer 2 statt Mischer 1, wurde eine Verbesserung der Gleichverteilungszahl bei Betriebspunkt 0 von 0,9456 auf 0,9636 und bei Betriebspunkt 23 von 0,9834 auf 0,9867 erzielt. Aufgrund dieser Verbesserung wurde Mischer 2 für die weiteren Gleichverteilungsuntersuchungen herangezogen.

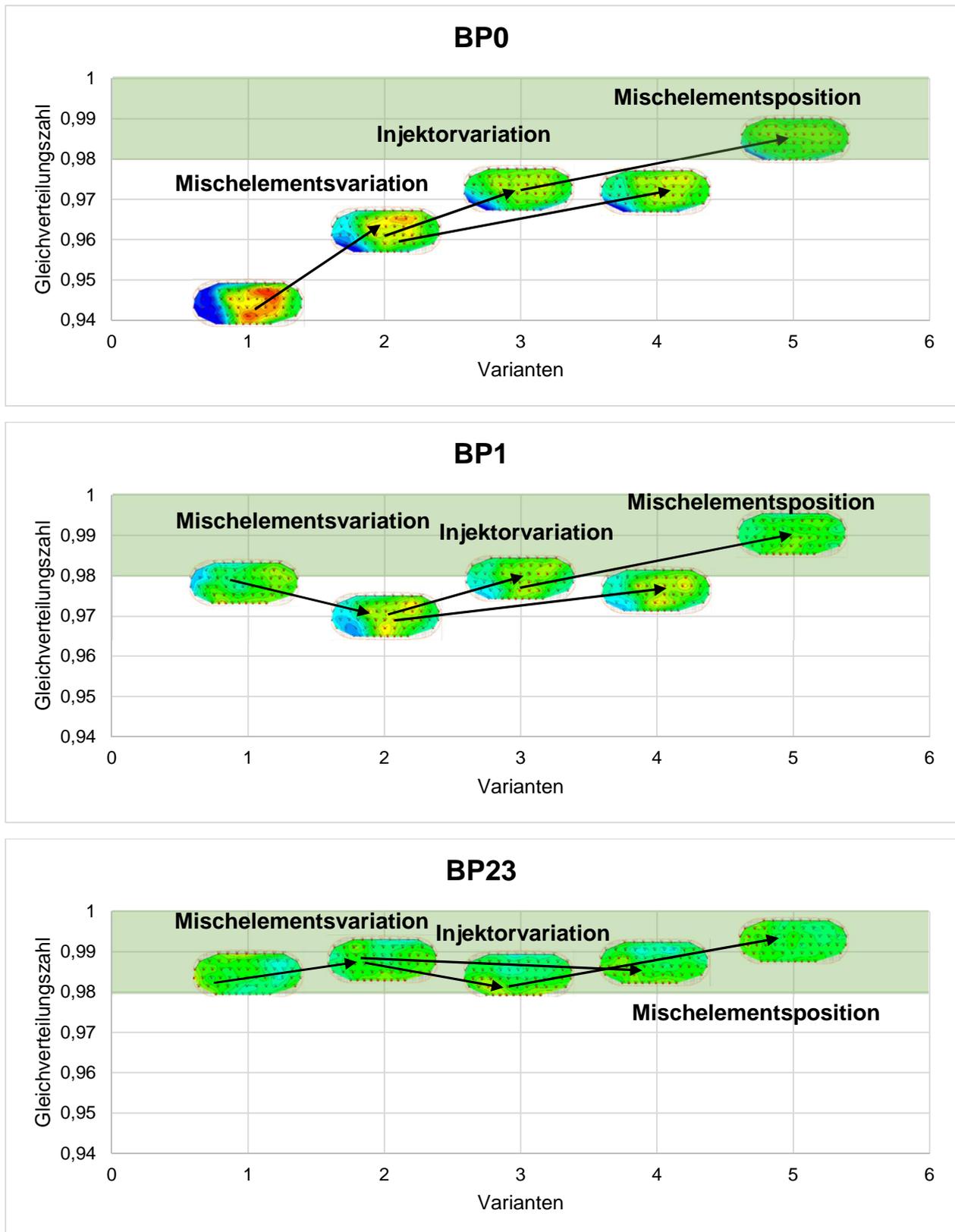


Abbildung 7-5: Gleichverteilungsergebnisse der Instrom-Anlage mit einer Mischstreckenlänge von 440 mm – Zusammenfassung (BP0 oben, BP1 Mitte, BP23 unten)

Anschließend wurde eine Variation der Injektoren (Variante 3) durchgeführt. Dank der unterschiedlichen Charakteristiken der Sauter-Durchmesser wurde durch Injektor C, der einen niedrigeren Sauter-Durchmesser besitzt, bei den niedrigen Betriebspunkten, die Gleichverteilungszahl verbessert. Da die Tröpfchen des AdBlue besser verdampfen, wurde bei Betriebspunkt 0 durch die Verwendung von Injektor C eine Gleichverteilungszahl von 0,9720 und bei Betriebspunkt 1 eine Gleichverteilungszahl von 0,9752 erzielt, da die Tropfen des AdBlue besser verdampfen.

Bei Betriebspunkt 23 mit Injektor C, dessen Sauter-Durchmesser der Tropfen um fast 22 μm kleiner ist als bei Injektor B, wurde eine minimale Verschlechterung der Gleichverteilungszahl um 0,0010 festgestellt. Jedoch wird dies aufgrund der schon höheren Gleichverteilungszahl in diesem Betriebspunkt in Kauf genommen.

Um bei dieser Anlage eine optimale Gleichverteilungszahl zu erzielen, wurde die letzte Variation (Variation 4 und 5), der Positionsveränderung des Mischelements bei beiden Injektoren durchgeführt, da die Referenzuntersuchungen bei dieser Variation eine Verschlechterung der Betriebspunkte 23 anzeigten.

Mit Injektor B spiegelten sich die Ergebnisse der Referenzuntersuchungen wieder und die Gleichverteilungszahl bei Betriebspunkt 23 verschlechterte sich minimal um 0,010. Bei Injektor C jedoch wurde keine Verschlechterung gemessen, sondern eine Verbesserung der Gleichverteilungszahl von 0,9857 auf 0,9911. Wodurch ersichtlich wurde, wie wichtig der Sauter-Durchmesser bei Gleichverteilungsmessungen ist, da dieser einen großen Einfluss auf die Gleichverteilung ausübt.

Mit diesen Variationen wurde das gesetzte Ziel eine Gleichverteilungszahl von mindestens 0,98 zu erreichen erfüllt. Letztenendes wurde bei Betriebspunkt 0 eine Gleichverteilungszahl von 0,9836, bei Betriebspunkt 1 eine Gleichverteilungszahl von 0,9878 und bei Betriebspunkt 23 sogar eine Gleichverteilungszahl von 0,9911 erzielt. Diese Gleichverteilungszahlen kommen der Anlage mit langer Mischstreckenlänge sehr nahe (BP 0 mit $\gamma=0,9911$, BP 1 mit $\gamma=0,9917$ und BP 23 mit $\gamma=0,9916$)

Fazit

Bei der Instrom-Anlage, mit einer Mischstreckenlänge von 440 mm, ist anhand mehrerer Variationen und Modifikationen eine hohe Gleichverteilungszahl und damit eine sehr gute Verteilung des eindosierten AdBlue in allen Betriebspunkten möglich.

7.2 Kurze Abgasanlage - Gegenstromdosierung

Ausgehend von den Referenzuntersuchungen der Anlage ohne Mischer in Kapitel 6.2.2 werden nun Variationen durchgeführt um eine höhere Gleichverteilungszahl zu erreichen. Die Mischstreckenlänge ist mit circa 300 mm im Gegensatz zu der langen Anlage, mit Mischstreckenlänge von 800 mm, in Kapitel 6.1 sehr kurz. Auch bei dieser Anlage sollte eine Gleichverteilungszahl von mindestens 0,98 in allen Betriebspunkten erzielt werden.

7.2.1 Vormischervariation

Aufgrund der Gleichverteilungsuntersuchungen mit Vormischer und ohne Vormischer in Kapitel 6.2.2 werden bei der Gegenstrom-Anlage nun auch mit einem eingebauten Mischer Untersuchungen durchgeführt.

In Abbildung 7-6 ist die Flügelkontur von Mischer 3 dargestellt.

Flügel Mischer 3

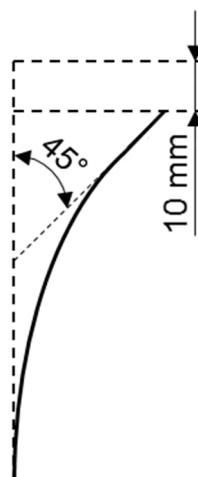


Abbildung 7-6: Flügelkontur Mischer 3

Der verwendete Mischer 3 ist ein Rechtsdrall Mischer mit 45 Grad Winkel und einer gleichzeitigen Mischelementpositionsänderung von -10 mm. Die negative Streckenangabe soll, im Gegensatz zu den Gleichverteilungsuntersuchungen der Mischelementpositionsvariation bei der kurzen Instrom-Anlage in Strömungsrichtung, den Versatz gegen die Strömungsrichtung darstellen.

Die Ergebnisse der Gleichverteilungsuntersuchungen werden in Abbildung 7-7 mit Vormischer (links) und ohne Vormischer (rechts) dargestellt. Die Untersuchungen wurden mit dem Injektor C durchgeführt.

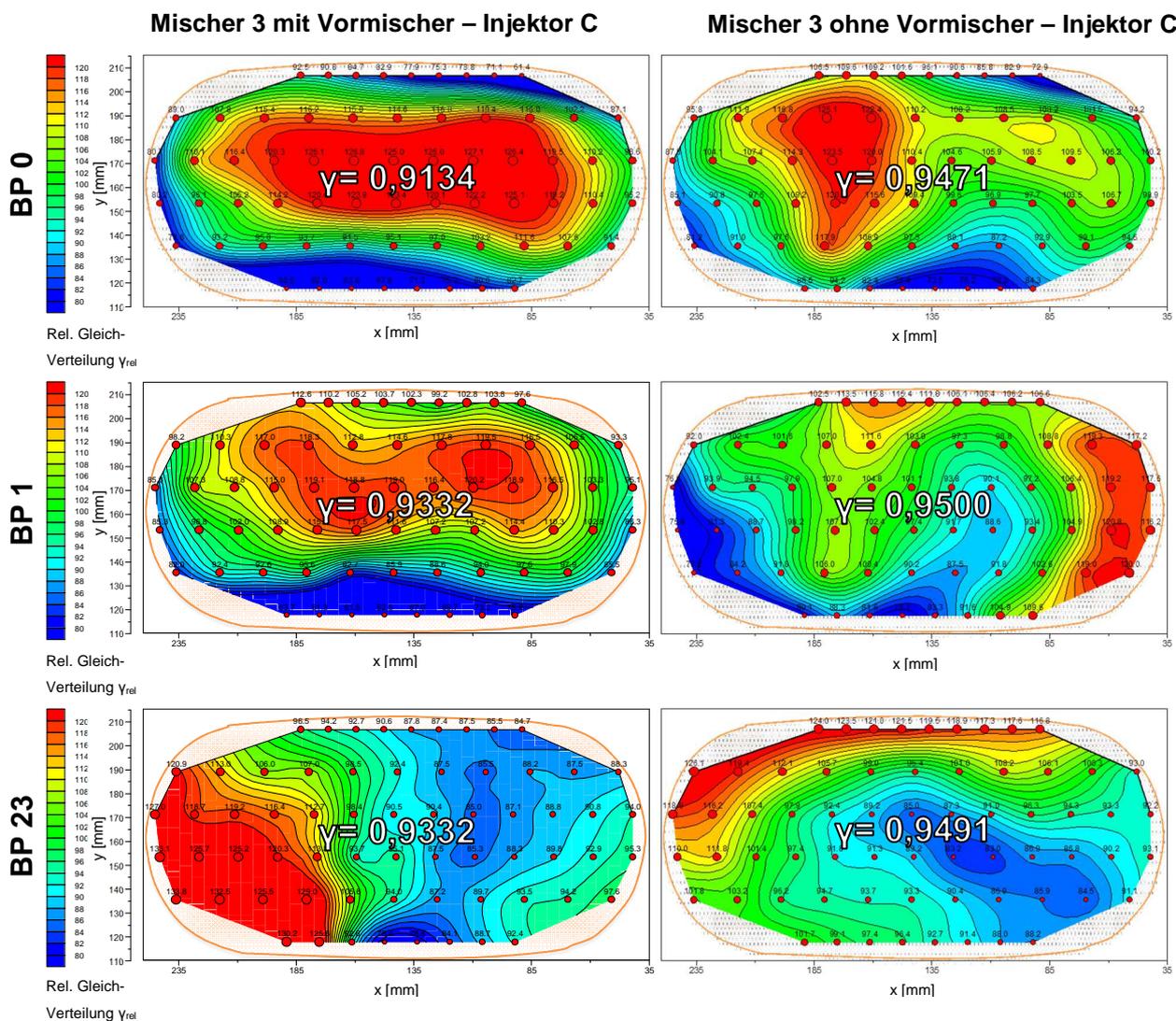


Abbildung 7-7: Gleichverteilungsergebnisse der Gegenstrom-Anlage mit einer Mischstreckenlänge von 300 mm mit Injektor C und Mischer 3, mit Vormischer (links) und ohne Vormischer (rechts) (BP0 oben, BP1 Mitte, BP23 unten)

Wie auf einen Blick zu erkennen ist, sind die Gleichverteilungszahlen ohne Vormischer höher als jene mit Vormischer. Bei den Referenzuntersuchungen war jedoch die Variante ohne Mischer mit Plattenvormischer (siehe Abbildung 6-7 in Kapitel 6.2.2) besser, als jene ohne Mischer und ohne Plattenvormischer (siehe Abbildung 6-5 in Kapitel 6.2.2).

In Abbildung 7-8 ist eine schematische Darstellung des Mischers mit Vormischer (oben) sowie des Mischers ohne Vormischer (unten) dargestellt. Die Abbildung 7-8 soll als Hilfestellung für die Erklärung, warum die Ergebnisse der Gleichverteilungsuntersuchung (Abbildung 7-7) mit Vormischer schlechter als die ohne Vormischer sind, dienen.

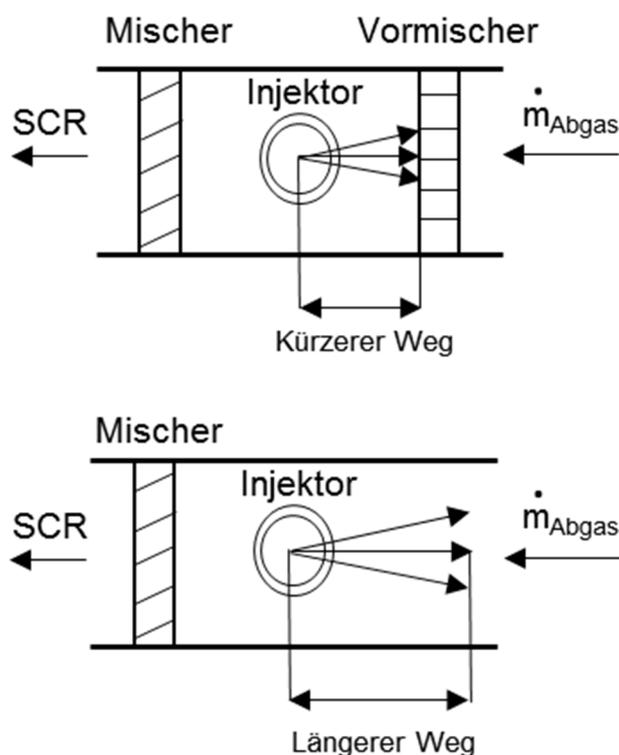


Abbildung 7-8: Skizze Mischer und Vormischer

Aufgrund des kürzeren Weges bei Einbau des Vormischer kommt es zur schlechteren Verdampfung des AdBlue-Sprays und das Reduktionsmittel wird direkt auf den Vormischer gespritzt. Im Gegensatz dazu kommt es bei Weglassen des Vormischer zu einem längeren Weg des eidosierten AdBlue. Da kein Aufprall an den Vormischer

vonstattengeht, kommt es offensichtlich zu einer besseren Vermischung und somit zu einer besseren Verdampfung.

Des Weiteren ist bei den graphischen Auswertungen der Gleichverteilungsuntersuchungen zu erkennen, dass bei den Untersuchungen mit dem Vormischer und niedrigem Abgasmassenstrom (BP 0 mit $\dot{m}_{\text{Abgas}}=75 \text{ kg/h}$ und BP 1 mit $\dot{m}_{\text{Abgas}}=100 \text{ kg/h}$) der Bereich mit NH_3 -Überschuss über den ganzen Querschnitt verteilt wird. Wobei bei den Gleichverteilungsdiagrammen ohne Vormischer es zu einer besseren Verteilung des Reduktionsmittels kommt, was zu einem zentralen NH_3 -Maximum führt. Bei Betriebspunkt 1 wird mehr NH_3 an das rechte Randgebiet des Katalysators befördert.

Bei Betriebspunkt 23 wird bei den Gleichverteilungsuntersuchungen ersichtlich, dass das eindosierte NH_3 sich bei dem hohen Massenstrom ($\dot{m}_{\text{Abgas}}=350 \text{ kg/h}$) kaum ausbreiten kann und somit auch kein Kontakt mit dem Prallblech erfolgt. Das eindosierte NH_3 wird gleich an den linken Rand transportiert. Bei dem längeren Ausbreitungsweg, ohne Vormischer, wird das NH_3 bei diesem Betriebspunkt an das obere Randgebiet befördert.

Bei den weiteren Optimierungsschritten der Gleichverteilungszahl wird somit auf den Vormischer verzichtet und die weiteren Untersuchungen ausschließlich mit den üblichen Mischelementen durchgeführt.

7.2.2 Mischelementsvariation

Für die Mischelementsvariationen wurden zusätzliche Messungen mit zwei weiteren Mischelementgeometrien durchgeführt. In Abbildung 7-9 sind die Flügelkonturen der Mischer 4 und 5 dargestellt.

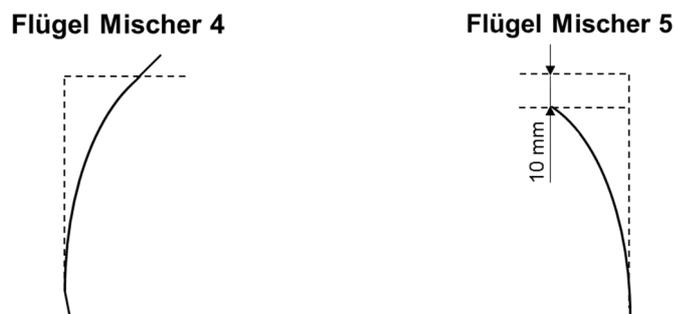


Abbildung 7-9: Flügelkontur Mischer 4 und Mischer 5

Bei dem verwendeten Mischer 4 handelt es sich um einen Doppeldrall-Mischer, wobei die gleiche Geometrie verwendet wurde, die sich bei der kurzen Instrom-Anlage als günstig erwiesen hat. Bei dem Mischer 5 wurde die gleiche Geometrie wie bei Mischer 3 verwendet nur ein Linksdrall anstatt des Rechtsdralls.

Die Gleichverteilungsuntersuchungsergebnisse von Mischer 4 (links) und die Ergebnisse von Mischer 5 (rechts) werden in Abbildung 7-10 dargestellt. Die Messungen wurden mit Injektor C durchgeführt.

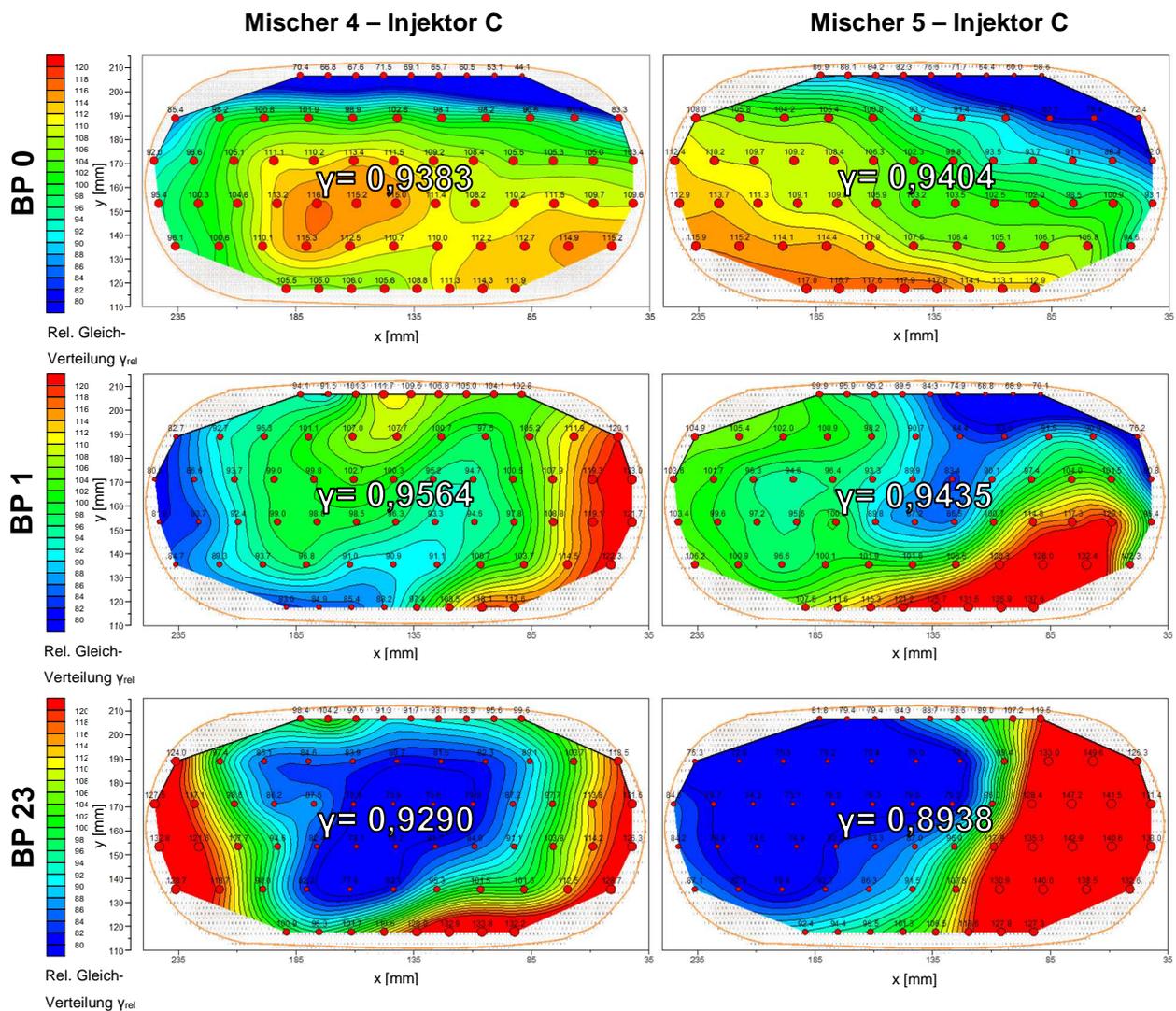


Abbildung 7-10: Gleichverteilungsergebnisse der Gegenstrom-Anlage mit einer Mischstreckenlänge von 300 mm und Injektor B, mit Mischer 4 (links) und mit Mischer 5 (rechts) (BP0 oben, BP1 Mitte, BP23 unten)

Bei Betriebspunkt 0 erzielen die Mischer 4 und 5 ähnliche Gleichverteilungszahlen (Mischer 4: $\gamma=0,9383$ und Mischer 5: $\gamma=0,9404$), jedoch ist die Gleichverteilungszahl mit Mischer 3 (siehe Abbildung 7-7) in diesem Betriebspunkt geringfügig besser.

Mischer 4 erzeugt in Betriebspunkt 1 eine wesentlich bessere Gleichverteilungszahl ($\gamma=0,9564$) als Mischer 3 ($\gamma=0,9332$) und Mischer 5 ($\gamma=0,9435$).

Jedoch kommen bei Betriebspunkt 23, aufgrund der kurzen Verweilzeit der Tropfen, beide Mischelementsvariationen nicht an die Verteilung des ursprünglichen Mischers heran.

Ein Linksdrall-Mischer wie Mischer 5 kann keine signifikante Verbesserung der Gleichverteilung erzielen. Der Grund dafür liegt darin, dass zwar bei den graphischen Auswertungen der Gleichverteilungsuntersuchungen das NH_3 -Maxima rechts gezeigt wird, jedoch die Diagramme in Sicht auf den Katalysator und somit in entgegengesetzte Strömungsrichtung (Blickrichtung stromaufwärts – „upstream“) dargestellt werden. Somit verteilt sich der NH_3 -Überschuss auf der linken Seite in Strömungsrichtung. Um diesen Überschuss von der linken Seite zu verteilen, wird ein Element benötigt. Dies wird, wie es in den Gleichverteilungsuntersuchungen ersichtlich wurde, mit einem Rechtsdrall-Mischer realisiert.

Für die weiteren Variationsmöglichkeiten wurde Mischer 3 mit Rechtsdrall verwendet, da dieser bei allen drei Betriebspunkten, im Vergleich zu den anderen beiden, die besten Gleichverteilungsergebnisse erzielte.

7.2.3 Rohrverlängerung

Für die Rohrverlängerung wurde zusätzlich ein Rohrteil nach dem Mischer hinzugefügt und somit die Mischstrecke nach dem Mischer verlängert, um bessere Ergebnisse bei der Gleichverteilung zu erzielen. Das Verlängerungsstück des Rohres ist 200 mm lang. Die Mischstreckenlänge der Gegenstrom-Anlage beträgt nun 500 mm.

In Abbildung 7-11 wird die schematische Darstellung der Gegenstrom-Anlage ohne und mit Rohrverlängerung dargestellt.

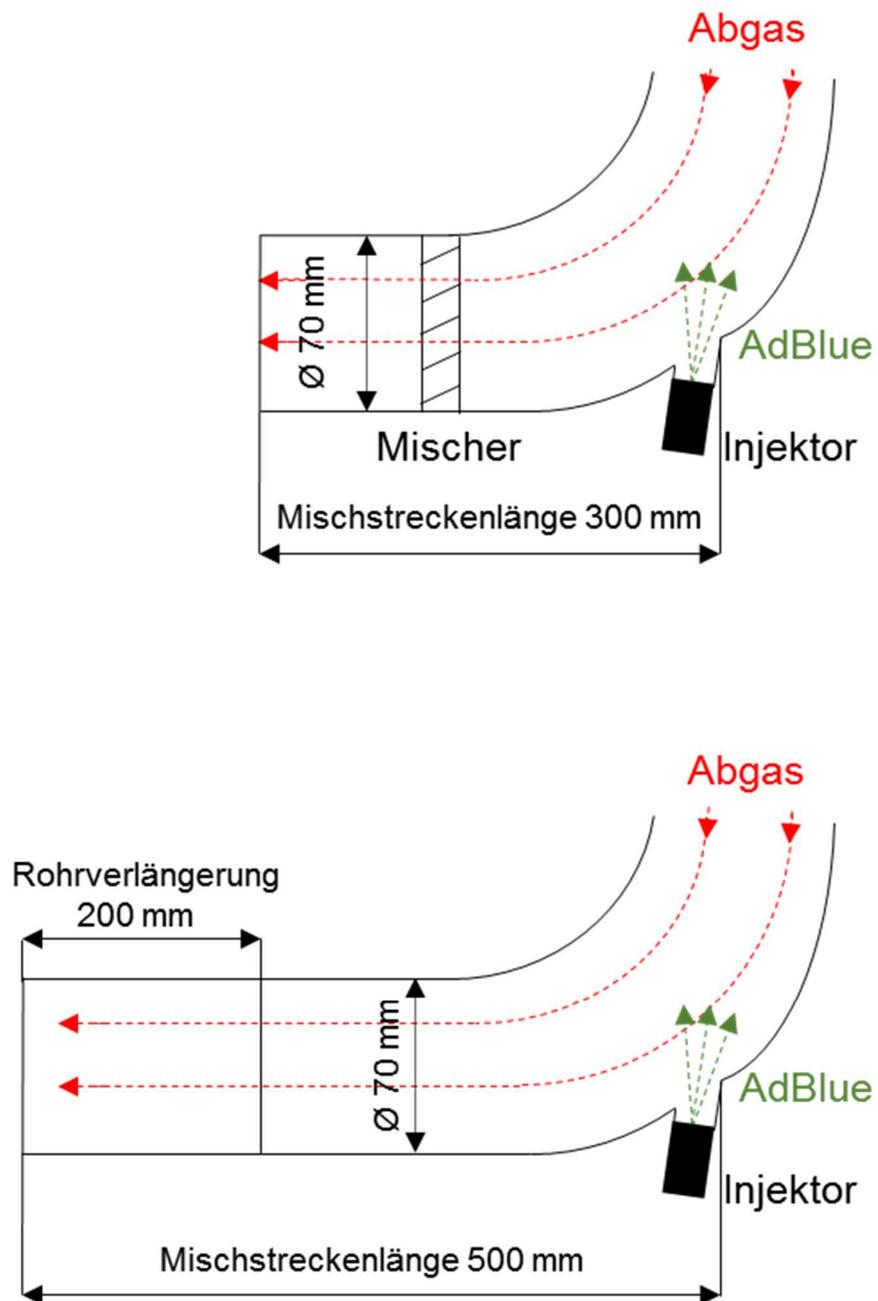


Abbildung 7-11: Schematische Darstellung Gegenstrom-Anlage ohne Rohrverlängerung (oben) und mit 200 mm Rohrverlängerung (unten)

Die Ergebnisse der Gleichverteilungsuntersuchungen mit der 200 mm Rohrverlängerung werden in [Abbildung 7-12](#) dargestellt.

Mischer 3 mit 200 mm Rohrverlängerung – Injektor C

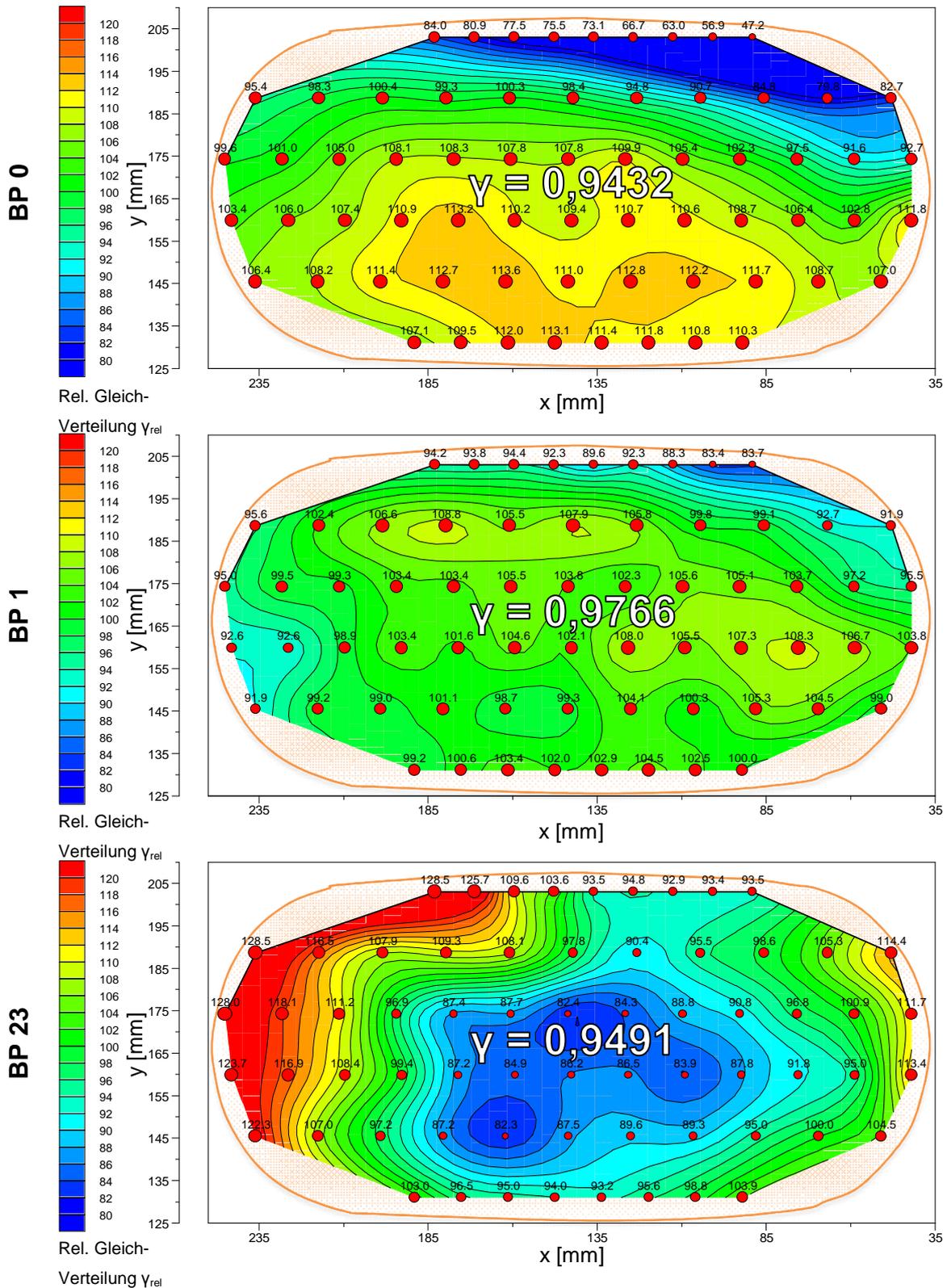


Abbildung 7-12: Gleichverteilungsergebnisse der Gegenstrom-Anlage mit einer Mischstreckenlänge von 300 mm, mit Injektor B und Mischer 3 mit 200 mm Rohrverlängerung (BP0 oben, BP1 Mitte, BP23 unten)

Wie erwartet, ist sofort ersichtlich, dass die Stellen mit NH_3 -Überschuss durch die Verlängerung der Mischstrecke reduziert wurden und somit eine bessere Gleichverteilung erzielt werden konnte.

Bei einem Abgasmassenstrom von 100kg/h und der Rohrverlängerung wurde eine wesentliche Verbesserung der Gleichverteilungszahl von 0,9500 auf 0,9766 erzielt. Dies kommt unserem Idealwert der Gleichverteilungszahl sehr nahe. Bei Betriebspunkt 23 wird ersichtlich, dass die Verlängerung des Rohres und somit die Verlängerung der Mischstrecke keinen Einfluss auf die Gleichverteilungszahl hat und somit die gleiche Gleichverteilungszahl wie die Untersuchung ohne Rohrverlängerungen hat.

7.2.4 Injektorvariation

Eine weitere Variation ist, wie auch schon bei der Instrom-Anlage, eine Variation des Injektors. Die folgenden Gleichverteilungsuntersuchungen wurden wieder mit dem Vormischer und dem Injektor A durchgeführt und werden in Abbildung 7-13 dargestellt.

Die Gleichverteilungszahlen und -diagramme sind dem des Injektors B sehr ähnlich (siehe Abbildung 7-7 links). Die Gleichverteilungsuntersuchungen ergaben eine Gleichverteilungszahl von 0,9186 bei Betriebspunkt 0, 0,9307 bei Betriebspunkt 1 und 0,9403 bei Betriebspunkt 23.

Da diese Variation bei der Gegenstrom-Anlage auch keine wesentliche Verbesserung erzielt hat, wurde auch bei diesem Injektor keine weitere Variation mehr durchgeführt. Das Erreichen des gesteckten Zieles, eine Gleichverteilungszahl von 0,98 bei der Gegenstrom-Anlage zu erreichen ist schier unmöglich.

Letztendlich konnte anhand der gezeigten Mischelementsvariationen und Injektorvariationen, das Ziel einer Gleichverteilungszahl von 0,98 für die Gegenstrom-Anlage nicht erreicht werden. Wie die Ergebnisse der Dissertation von Bitto [2] vermuten ließen, bestätigten die Gleichverteilungsuntersuchungen dieser Arbeit, dass die Gegenstrom-Anlage tatsächlich keine annähernd guten Gleichverteilungswerte, wie die Instrom-Anlage erreicht.

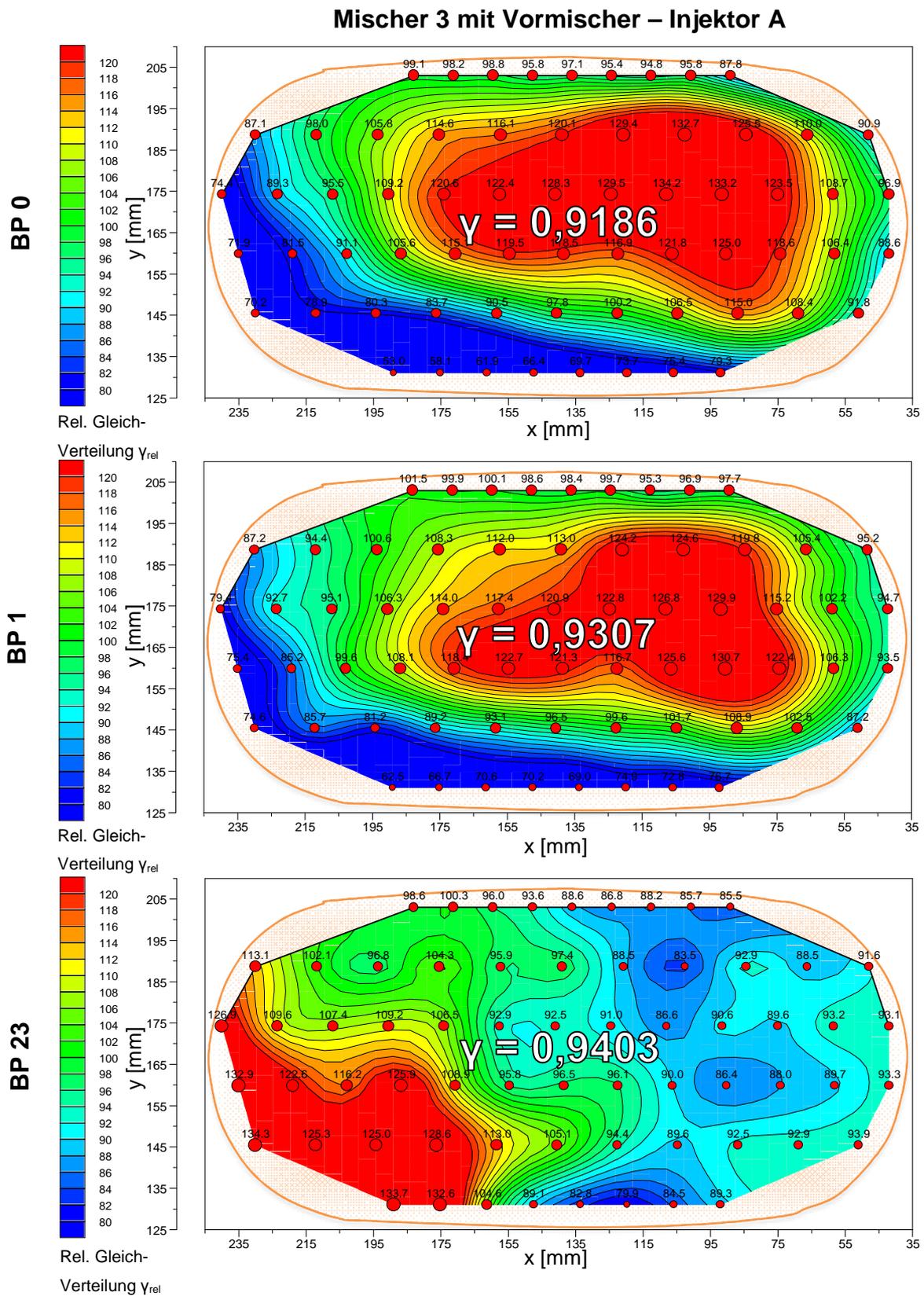


Abbildung 7-13: Gleichverteilungsergebnisse der Gegenstrom-Anlage mit einer Mischstreckenlänge von 300 mm mit Injektor A, Mischer 3 und Vormischer (BP0 oben, BP1 Mitte, BP23 unten)

7.2.5 Zusammenfassung Gegenstrom-Anlage

In Abbildung 7-14 werden alle Variationen der ausgeführten Gleichverteilungsuntersuchungen an der Gegenstrom-Anlage in einem Diagramm für den jeweiligen Betriebspunkt dargestellt.

Zu Beginn wurde untersucht, ob der Einbau eines Vormischers (Variante 1 und 2) für die Gleichverteilungszahl eine Verbesserung bringt. Da der Vormischer aufgrund kürzerer Wege und durch dadurch schlechtere Verdampfung keine erfolgreichen Ergebnisse erzielen konnte, wurde dieser für die weiterführenden Messungen entfernt. Durch den Ausbau des Vormischers wurde eine Verbesserung der Gleichverteilungszahl von 0,9134 auf 0,9471 bei Betriebspunkt 0, von 0,9332 auf 0,9500 bei Betriebspunkt 1 und von 0,9332 auf 0,9491 bei Betriebspunkt 23 erzielt.

Danach wurden zwei weitere Mischelemente (Variante 3 und 4) unterschiedlicher Geometrie verbaut, wobei der ursprüngliche Mischer 3 die bestmöglichen Ergebnisse bei diesen Variationen erzielt hat und somit für die weiteren Variationen wieder eingesetzt wurde. Bei Mischer 4 und 5 wurde eine Gleichverteilungszahl von 0,9383 und 0,9404 bei Betriebspunkt 0, 0,9564 und 0,9435 bei Betriebspunkt 1 und 0,9290 und 0,8938 bei Betriebspunkt 23 erzielt.

Die Rohrverlängerung (Variante 5) veränderte durch die längere Mischstrecke zwar die Gleichverteilungsdiagramme, jedoch war bis auf den Betriebspunkt 1 (niedriger Massenstrom von 100 kg/h) keine Verbesserung der Gleichverteilungszahl erkennlich. Bei Betriebspunkt 1 verbesserte sich die Gleichverteilungszahl von 0,9500 auf 0,9766.

Die letzte Variation (Variante 6) wurde aufgrund der Ausgangslage mit einem Vormischer und mit Injektor A durchgeführt. Jedoch waren die Änderungen der Gleichverteilungszahl (BP 0 $\gamma=0,9186$, BP 1 $\gamma=0,9307$ und BP 23 $\gamma=0,9403$) der Untersuchungsergebnisse nur minimal und somit wurden keine weiteren Variationen bei der Gegenstrom-Anlage durchgeführt.

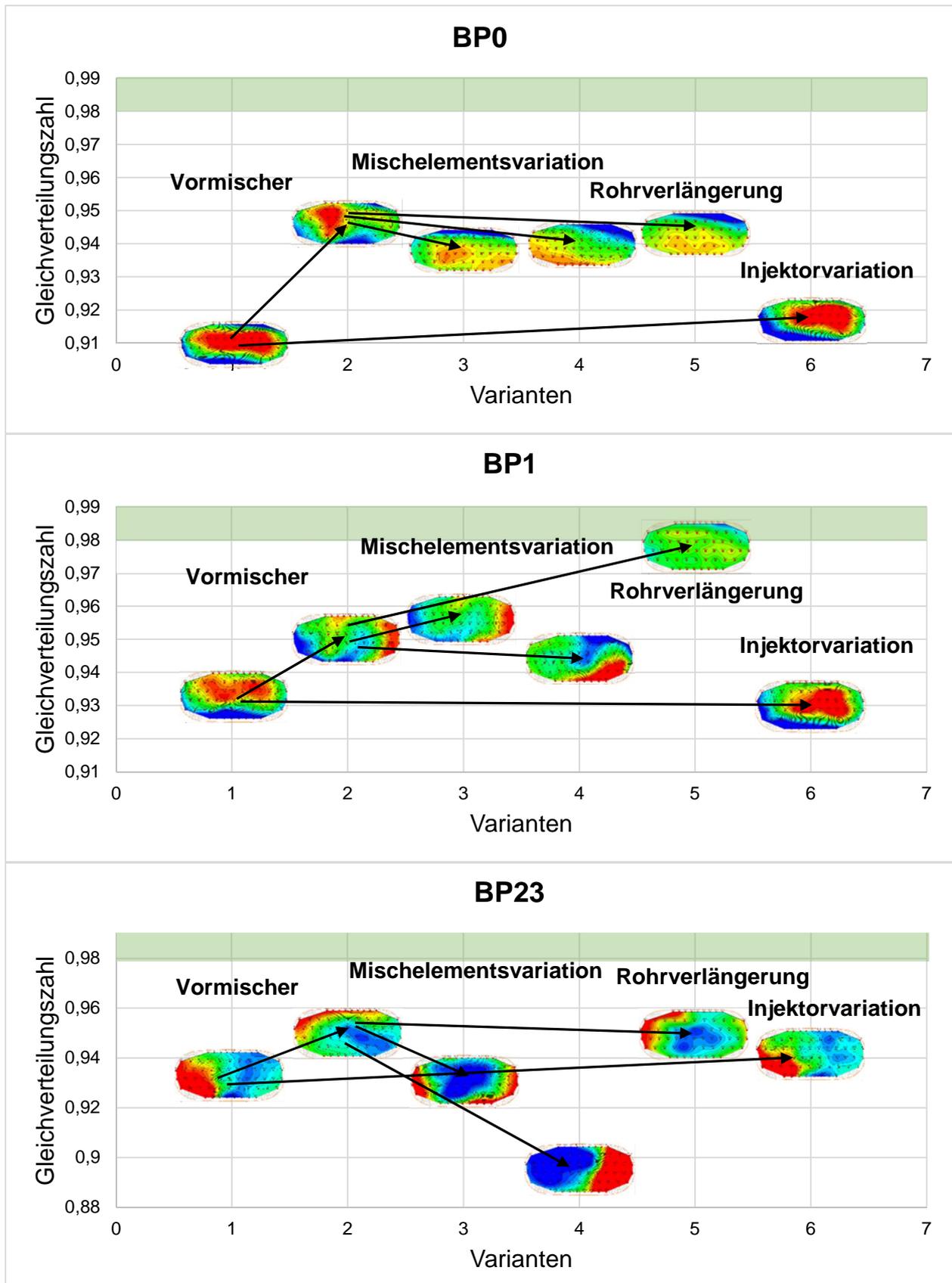


Abbildung 7-14: Darstellung Ausgeführte Anlagen Gegenstrom

Fazit

Das selbstgesteckte Ziel eine Gleichverteilungszahl von 0,98 in allen Betriebspunkten zu erreichen ist mit den oben genannten Variationen der Gegenstrom-Anlage, welche im Zuge der Diplomarbeit durchgeführt wurden, nicht zu realisieren. Bei keinem der drei Betriebspunkte wurde das Ziel erreicht.

8 Resümee

Der Einfluss der Reduktionsmitteleinbringung auf die Harnstoffgleichverteilung bei selektiver katalytischer Reduktion ist vielseitig. Die Gleichverteilung des Reduktionsmittels ist abhängig von der Eindosierungsart, ob in Strömungsrichtung oder dagegen. Bei der Gegenstrom-Anlage, wobei die Eindosierung des Reduktionsmittels entgegen der Strömungsrichtung erfolgt, sind keine guten Gleichverteilungsergebnisse zu erzielen. Ein wesentlicher Grund für die nicht ausreichende Gleichverteilung ist, die geringe Penetrationstiefe vor allem bei höheren Massenströmen, was eine geringe Aufbereitungslänge bedeutet und das Reduktionsmittel somit nicht tief genug in den Abgasstrang eingebracht werden kann.

Aufgrund des schnelleren Erreichens der Light-off Temperatur und nicht ausreichend vorhandenen Bauraums im Unterboden (Packaging-Gründe, Allradkonzepte und kurze Fahrzeuge), wird das Augenmerk auf kurze Abgasanlagen gelenkt. Da für gute Gleichverteilung eine ausreichende Mischstreckenlänge (Abgasstrecke zwischen Eindosierstelle des Reduktionsmittels und dem SCR-Katalysator) erforderlich ist, wird diese durch Verkürzung verschlechtert.

Neben der Mischstreckenlänge sind auch das eingesetzte Mischelement und der HWL-Injektor für die Gleichverteilung verantwortlich. Der Mischer wird nicht nur für das großflächige Durchmischen und dadurch zum Ausgleich der lokalen Konzentrationsunterschiede des eindosierten AdBlue benötigt, sondern auch für das Zerplatzen der auftreffenden Tropfen, da kleinere Tropfen wesentlich schneller verdampfen und es dadurch zu einer Verbesserung der Aufbereitung des Reduktionsmittels kommt. Sowohl die Spraycharakteristik des HWL-Injektors als auch die Tropfengröße sind ausschlaggebend für die effektive Aufbereitung und die daraus resultierende Gleichverteilung.

Um bei kurzen Anlagen die Gleichverteilung bei Betriebspunkten mit hohem Abgasmassenstrom (BP 23 mit $\dot{m}_{\text{Abgas}}=350 \text{ kg/h}$) zu verbessern sollte ein langes

Mischelement eingesetzt werden. Durch die Verwirbelung und den damit verbundenen höheren Turbulenzgrad, werden bessere Gleichverteilungsergebnisse erzielt.

Für die Verbesserung der Gleichverteilung bei niedrigem Abgasmassenstrom (BP 0 mit $\dot{m}_{\text{Abgas}}=75$ kg/h und BP 1 mit $\dot{m}_{\text{Abgas}}=75$ kg/h), ist die Verschiebung des Mischelements in Richtung des SCR-Katalysators eine Optimierungsmethode. Die längere und dadurch verbesserte Aufbereitung vor dem Mischelement, erzielt hier somit die Verbesserung.

Bezüglich des HWL-Injektors, sind Injektoren mit kleineren Tropfen und somit niedrigem Sauter-Durchmesser zu empfehlen, da bei den Untersuchungen der Gleichverteilung ersichtlich wurde, dass die Positionsverschiebung des Mischelements auch bei den Betriebspunkten mit höherem Abgasmassenstrom eine Verbesserung erzielt, sofern der HWL-Injektor einen geringeren Sauter-Durchmesser aufweist.

Da meist ein Kompromiss erzielt werden muss, ob man die Betriebspunkte mit niedrigerem oder höherem Abgasmassenstrom optimiert, ist im Hinblick auf die künftige Abgasgesetzgebung und des dadurch höheren Stellenwerts der niedrigeren beziehungsweise mittleren Lastpunkte, das Augenmerk eher auf die niedrigen Betriebspunkte legen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Bereich NO_x-Reduktion zur Erfüllung künftiger Abgasgesetzgebungen stellt das Verfahren der selektiven katalytischen Reduktion sich als jenes mit den größten Aussichten auf Erfolg dar. Um hohe NO_x-Umsatzraten zu erzielen ist eine gleichmäßige Verteilung des Reduktionsmittels über den Katalysatorquerschnitt nötig.

Neben einer guten Homogenisierung des eindosierten AdBlue-Sprays und einem Mischelement wird auch eine ausreichend lange Mischstreckenlänge für eine gute Gleichverteilung benötigt. Leider ist letzteres nicht immer möglich, aufgrund von Einschränkungen im Bauraum. Um mit kürzeren Mischstreckenlängen annähernd vergleichbare Ergebnisse bei der Gleichverteilung zu erhalten, müssen Maßnahmen zur Optimierung (Variationen bezüglich des Mischelements, wie unterschiedliche Mischelementgeometrien, Mischelementlängen, Positionierung des Mischelements und Variationen der Injektoren) vorgenommen werden, die in dieser Arbeit mittels Referenzuntersuchungen und anschließend mit einer Instrom- und Gegenstrom-Anlage an einer speziellen Abgasanlage durchgeführt wurden.

Um den Einfluss der einzelnen Mischelemente besser zu verstehen, wurden zuerst Messungen ohne Mischelement bei der Instrom-Anlage durchgeführt. Bei der Gegenstrom-Anlage, die neben dem Mischelement noch über einen Vormischer verfügt, um Ablagerungen im Entkoppellement zu verhindern, wurden Gleichverteilungsuntersuchungen ohne Vormischer und ohne Mischelement sowie mit Vormischer und ohne Mischelement durchgeführt, um auch diesen Zusammenhang darzustellen.

Ohne Mischelement kann sowohl die Instrom-Anlage, als auch die Gegenstrom-Anlage keine ausreichende Gleichverteilung erzielen wodurch die Notwendigkeit des Mischelements ersichtlich wird.

Beim Mischelement können unterschiedliche Mischelementgeometrien, Mischelementlängen und Positionen des Mischelements für die Gleichverteilung ausschlaggebend sein. Um die Gleichverteilungszahl bei niedrigen Massenströmen zu erhöhen sollte eine Mischelementspositionsänderung in Richtung des SCR-Katalysators durchgeführt

werden. Eine Verlängerung des Mischelements bewirkt eine Verbesserung bei dem höherem Abgasmassenstrom.

Der Sauter-Durchmesser ist eine wichtige Kenngröße für den Einspritzstrahl des AdBlue. Mittels Laserbeugungsuntersuchungen, die mit dem Spraytec Messgerät durchgeführt wurden, wurde die Tropfengrößenverteilung auf diesen Zahlenwert reduziert. Die Untersuchungen haben ergeben, dass der Sauter-Durchmesser vom Einspritzdruck abhängig ist. Der Sauter-Durchmesser nimmt bei höherem Einspritzdruck ab. Je kleiner die Tropfen, desto besser können sie verdampfen und sich dem Massenstrom des Abgases anfügen, jedoch besteht die Gefahr von Verwehungen. Bei größere Tropfen allerdings kommt es zu Verdampfungsproblemen. Aufgrund dieser Abhängigkeit wurden Gleichverteilungsuntersuchungen mit einer Variation des HWL-Einspritzdruckes des eindosierten AdBlue durchgeführt. Die Erkenntnisse der Sauter-Durchmesser-Untersuchungen wurden bestätigt und bei einem Einspritzdruck von 6 bar wurde die beste Gleichverteilungszahl erzielt. Da bei den Betriebspunkten der Gleichverteilungsuntersuchungen unterstöchiometrisch (Dosierverhältnis, dass den Zusammenhang zwischen der vorhanden NO_x -Menge und der eindosierten Ammoniakmenge angibt < 1) eindosiert wird, wurde des Weiteren untersucht, welchen Einfluss eine überstöchiometrische Dosiermenge (Dosierverhältnis, dass den Zusammenhang zwischen der vorhanden NO_x -Menge und der eindosierten Ammoniakmenge angibt > 1) auf die Gleichverteilung hat. Bei überstöchiometrischer Dosierung wird die Gleichverteilungszahl durch vermehrtes Dosieren des Reduktionsmittels verbessert.

Unterschiedliche Injektoren erzielen aufgrund aufgrund des jeweiligen Spraybildes des Injektors und dessen Sauter-Durchmesser ebenfalls unterschiedliche Gleichverteilungsergebnisse.

Bei der Instrom-Anlage wurde zuerst zwischen zwei Mischelementen mit unterschiedlicher Geometrie die ausgewählt, die bessere Gleichverteilungszahl erzielt hat. Anschließend ist die Gleichverteilungszahl mit Hilfe der Mischelementsposition und unterschiedlichen Injektoren zu einer annähernd guten Gleichverteilungszahl wie bei einer fast doppelten so langen Abgasnachbehandlungsanlage optimiert worden. Die Ergebnisse der Referenzuntersuchungen bestätigten sich. Zusätzlich wurde gezeigt wie

wichtig der Sauter-Durchmesser bei der Gleichverteilung ist. Des Weiteren konnte neben der erwarteten Verbesserung der Gleichverteilung bei dem Injektor mit geringerem Sauter-Durchmesser, bei den Betriebspunkten mit niedrigem Abgasmassenstrom, auch eine Verbesserung bei höherem Massenstrom erzielt werden.

Bei der Gegenstrom-Anlage wurde ersichtlich, dass die Konfiguration ohne Vormischer bessere Ergebnisse bei der Gleichverteilung erzielt, als mit Vormischer und somit wurde bei der Variation der Mischelemente der Vormischer weggelassen. Mittels einer Rohrverlängerung konnte bei dem Betriebspunkt mit einem niedrigen Massenstrom eine gute Gleichverteilung erzielt werden, jedoch ergaben sich bei den anderen Betriebspunkten keine Verbesserungen. Auch die Verwendung eines anderen Injektors konnte keine annähernd hohen Gleichverteilungszahlen wie bei ausreichender Mischstreckenlänge oder der Instrom-Anlage erzielen.

Bei Instrom-Anlagen mit kurzer Mischstreckenlänge können aufgrund verschiedener Variationen der Mischelemente, Mischelementspositionen und Injektoren sehr gute Ergebnisse der Gleichverteilung und somit der Gleichverteilungszahl erreicht werden. Bei der Gegenstrom-Anlage führten die Variationen der Mischelemente, das Weglassen des Vormischers und die Rohrverlängerung nicht zum Erreichen der gewünschten Gleichverteilungszahl.

Die Instrom-Anlage könnte mit anderen Injektoren mit unterschiedlichen Spraykegelwinkeln und Sauter-Durchmessern sowie weiteren Mischelementsgeometrien weiter optimiert werden. Bei den Gleichverteilungsuntersuchungen der Gegenstrom-Anlage konnte mit keinen Optimierungsmaßnahmen die guten Ergebnisse der Instrom-Anlage bei der Gleichverteilung des Reduktionsmittels erreicht werden. Somit ist es als fraglich anzusehen, ob hier noch signifikante Verbesserungen möglich sind. Es ist eher anzunehmen, dass bei dieser Konfiguration des Injektors bereits das maximale Potential der Gleichverteilung erreicht wurde.

10 Literaturverzeichnis

- [1] Europäisches Parlament.: *Verordnung (EU) Nr. 136/2014 der Kommission vom 11. Februar 2014 zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) sowie der Verordnung (EU) Nr. 582/2011 hinsichtlich der Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (Euro VI)*, Amtsblatt der Europäischen Union, 11. Februar 2014.
- [2] Bitto R.: *Herausforderungen und Lösungsansätze bei der Gestaltung von Diesellabgasanlagen zur Selektiven Katalytischen Reduktion*, Dissertation am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der TU Wien, B14001, 2014.
- [3] Mollenhauer K.; Tschöke H.: *Handbuch Dieselmotoren*, 3. Auflage, Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN: 978-3-540-72164-2, 2007.
- [4] 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 Typp Genehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge*, Amtsblatt der Europäischen Union, 18. Juli 2008.
- [5] Geringer B.: *Skriptum Kraftfahrzeug Antriebe*, Auflage WS 2013, Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der TU Wien, B130034, 2013.
- [6] Wagner U.; Merkel S.; Spicher U.: *Untersuchungen zur Entwicklung einer rußfreien Verbrennung bei Dieselmotoren mit Direkteinspritzung*, Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS), Institut für Kolbenmaschinen der Universität Karlsruhe, 2006.
- [7] Joos F.: *Technische Verbrennung - Verbrennungstechnik, Verbrennungsmodellierung, Emissionen*, Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN: 978-3-540-34334-9, 2006.

-
- [8] Unfug F.: *Experimentelle und numerische Untersuchung der Verbrennung eines mittelschnelllaufenden 4-Takt Dieselmotors*, Forschungsberichte aus dem Institut für Kolbenmaschinen der Universität Karlsruhe, Logos Verlag Berlin GmbH, ISBN: 978-3-8325-3566-7, 2013.
- [9] Reif K.: *Dieselmotor-Management im Überblick einschließlich Abgastechnik*, 2.Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-06555-3, 2014.
- [10] Reif K.: *Dieselmotor-Management Systeme, Komponenten, Steuerung und Regelung*, 5.Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-8348-2179-9, 2012.
- [11] Chan D.: *Thermische Alterung von Dieseloxydationskatalysatoren und NOx-Speicherkatalysatoren*, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2013.
- [12] Andreas W.; Severin C.: *Wechselwirkungen zwischen Dieselmotortechnik und -emissionen mit dem Schwerpunkt auf Partikeln*, FAT Schriftreihe 238, Berlin, 2012.
- [13] Teichmann R.; Merker G. P.; Schwarz C.: *Grundlagen Verbrennungsmotoren - Funktionsweise, Simulation, Messtechnik*, 7. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-03195-4, 2014.
- [14] Votsmeier M.; Kreuzer T.; Gieshoff J.; Lepperhoff G.: *Automobile Exhaust Control*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2009.
- [15] Basshuysen R. van; Schäfer F.: *Handbuch Verbrennungsmotor - Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven*, 6. Auflage, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, ISBN: 978-3-834-81549-1, 2012.
- [16] Schütte T.: *Ablagerungs- und Alterungsverhalten wässriger Harnstofflösung bei selektiver katalytischer Reduktion von Stickoxidemissionen*, Dissertation, Leuphana Universität Lüneberg, 2010.
- [17] Sluder C.; Storey J.; Lewis S.; Lewis L.: *Low Temperature Urea Decomposition and SCR Performance*, SAE 2005-01-1858, 2005.
- [18] Klimczak M.: *Entwicklung und Anwendung einer Technologie zur Untersuchung der chemischen Desaktivierung von SCR-Katalysatoren durch anorganische Gifte*, 3. Auflage, TU Darmstadt, 2010.

- [19] Peck S. R.: *Experimentelle Untersuchung und dynamische Simulation von Oxidationskatalysatoren und Dieselpartikelfiltern*, Dissertation, TU Stuttgart, 2006.
- [20] Borealis.: *Sicherheitsdatenblatt gemäß 1907/2006/EG, Artikel 31*. Linz : Borealis Agrolinz Melamine GmbH, 11.08.2009.
- [21] Deutsche Norm 70070.: *Dieselmotoren - NOx-Reduktionsmittel AUS 32 - Qualitätsanforderungen*, 2005.
- [22] BASF SE.: *Adblue - Hochreines NOX-Reduktionsmittel für Dieselmotoren, die mit SCR-Technologie ausgerüstet sind*, Technisches Merkblatt 2006.
- [23] Echte H.; Schöffel S.; Wenninger G.; Fischer S.; Lauer T.; Möltner L.: *Optimierung der selektiven katalytischen Reduktion mittels numerischer Methoden*, Motorentechnische Zeitschrift MTZ, 10/2010.
- [24] Möltner L.: *Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Ammoniakaufbereitung aus AdBlue unter besonderer Berücksichtigung der Tropfen/Abgas- und Tropfen/Wandinteraktion*, Dissertation am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der TU Wien, 2014.
- [25] Balle P.: *Selektive katalysierte Reduktion von NOx mittels NH₃ an Fe-modifizierten BEA-Zeolithen*, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2011.
- [26] Chemie am Auto - Der interaktive Führer in die Welt der Chemie.: *Abgasnachbehandlung*, Verfügbar unter <http://www.chemie-am-auto.de/abgase/abgasnachbehandlung.html>, gelesen am 25.12.2014.
- [27] Gerhart C.; Schulz B.; Kröcher O.; Peitz D.; Jaco E.: *Selektive katalytische Reduktion von Stickoxiden - Teil 1: Formiate als Ammoniak-Speicherverbindungen*, Motorentechnische Zeitschrift MTZ, 11/2012.
- [28] Wachtmeister G.; Heubuch A.; Toshev P.; Sattelmayer Th.; Peitz D.; Kröcher O.; Gerhart C.; Schulz B.: *Neue Nebenstromverfahren zur katalytischen Zersetzung flüssiger Ammoniakvorläufersubstanzen für die SCR-Anwendung am Beispiel des Pkw - Dieselmotors*, 7. Internationales Forum Abgas- und Partikel-Emissionen, Ludwigsburg, 2012.

- [29] Europäisches Parlament.: *Verordnung (EU) Nr. 582/2011 der Kommission vom 25. Mai 2011 zur Durchführung und Änderung der Verordnung (EG) Nr. 595/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (Euro VI) und zur Änderung der Anhänge I und III der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates*, Amtsblatt der Europäischen Union, 25. Mai 2011.
- [30] Gruden D.: *Umweltschutz in der Automobilindustrie*, 1.Auflage, Vieweg Teubner Verlag, Wiesbaden, ISBN: 978-3-834-80404-4, 2008.
- [31] Fischer M.; Spurk P.C.: *Adaption und Optimierung von SCR Systemen für Diesel Pkw*, 6.Internationales Forum Abgas- und Partikel-Emissionen, Ludwigsburg, 2010.
- [32] Fischer S.: *Simulation of the Urea-Water-Solution Preparation and Ammonia-Homogenization with a Validated CFD-Model for the Optimization of Automotive SCR-Systems*, Dissertation am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der TU Wien, 2012.
- [33] Smith H.; Zöchbauer M.; Lauer T.: *Advanced Spray Impingement Modelling for an Improved Prediction Accuracy of the Ammonia Homogenisation in SCR systems*, SAE 2015-01-1054.
- [34] Gehrlein J.; Lang A.; Palmer G.: *Optimierung von SCR-Systemen durch Integration von Mischelementen*, Motorentechnische Zeitschrift MTZ 03/2009.
- [35] Geringer B.; Fischer S.; Hofmann P.; Lauer T.; Möltner L.; Schneeweiss B.; Teiner P.: *Neue Ansätze und Entwicklungsmethoden zur Minimierung der NOx-Emissionen von Dieselmotoren*, 31. Internationales Wiener Motorensymposium 29.-30. April 2010, Fortschritt-Berichte VDI, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, ISBN: 978-3-183-71612-8, 2010.
- [36] Mayer M.: *Ablagerungsphänomene bei der Aufbereitung einer Harnstoffwasserlösung zur Selektiven Katalytischen Reduktion in einer Dieselabgasanlage*, Diplomarbeit am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der TU Wien B13004, 2013.
- [37] ECO Physics: *Handbuch CLD 700 EL ht*, Dürnten, 1997.
- [38] ETAS GmbH.: *INCA 4.0 Benutzeranhandbuch*, Stuttgart, 2004.

- [39] Spektrum: *Isolinien*; Verfügbar unter www.spektrum.de/lexikon/geographie/isolinien/3885, gelesen am 02.01.2015.
- [40] Geller W.: *Thermodynamik für Maschinenbauer*, 4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, ISBN: 978-3-540-32320-4, 2006.
- [41] Burkhardt C.; Rösler R.; Seeger B.; Börner F.; Hermann G.: *Feldanalyse und Korrosionssimulation zur Werkstoffauswahl bei Entkoppelementen*, Automobiltechnische Zeitschrift ATZ, 01/2008.
- [42] Calvo S.; Oesterle J.: *Untersuchungen eines Fahrzeugs mit SCR-Technologie im Alltagsbetrieb*, 10.FAD Konferenz, Dresden, 2012.
- [43] International Standard.: *Particle size analysis – Laser diffraction methods*, ISO 13320:2009-10, 2009.
- [44] Geringer B.; Lauer T.; Möltner L.: *Aufbereitung von AdBlue in SCR-Systemen*, Abschlussbericht zur Messkampagne in Gaggenau vom 6.10.2008-23.10.2008, Interner Bericht des IFA der TU Wien, B08037, 2008.
- [45] Malvern Instruments Ltd.: *Spraytec User Manual*, MAN 0368 Issue 3.0, Worcestershire, 2007.
- [46] Rawle A.; Kippax P.: *Neuer ISO-Standard - Partikelanalyse mittels Laserbeugung neu geregelt*, Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg, Vol. 16 Nr. 2 Schüttgut, 2010.
- [47] Malvern Instruments Ltd.: *Method for measuring particle size in the presence of multiple scattering*, US Patent No. 5,619,324, 29.12.1995.
- [48] Häntsche J. P.: *Entwicklung und experimentelle Untersuchungen einer Hochdruckpumpe für Ottokraftstoff basierend auf ingenieurkeramischen Gleitsystemen*, Forschungsberichte aus dem Institut für Kolbenmaschinen der Universität Karlsruhe Bd. 4/2009.
- [49] Morsbach B.; Daudel H.; Gaertner U.: *Verfahren zur Stickoxidminderung in Abgasen durch gesteuerte NH₃ Zugabe*, EP19930101156, 11.08.1993.
- [50] Willems F.; Cloudt R.; Eijnden E. v. d.; Genderen M. v.; Verbeek R.; Jager B. d.; Boomsma W.; Heuvel I. v. d.: *Is closed-loop SCR control required to meet future emission targets?*, SAE 2007-01-1574, 2006.