



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

## **Bachelorarbeit**

Juri Lüth

# **Bewertung, Überprüfung und Optimierung der Abgaskorrekturformel im Rahmen der periodischen Abgasuntersuchung bei Krafträdern**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Automotive and  
Aeronautical Engineering*



# **Zusammenfassung**

**Juri Lüth**

## **Thema der Bachelorthesis**

„Bewertung, Überprüfung und Optimierung der Abgaskorrekturformel im Rahmen der periodischen Abgasuntersuchung bei Krafträdern“

## **Stichworte**

Kraftrad, AUK, Abgasuntersuchung, Kohlenstoffmonoxid, CO, Korrekturformel, Abgase, Pulsation

## **Kurzzusammenfassung**

Ziel der nachfolgenden Bachelorarbeit soll es sein, die im Rahmen der Abgasuntersuchung bei Krafträdern eingesetzten Korrekturformeln für die Kohlenmonoxidmesswerte auf ihre Funktionalität und Genauigkeit zu überprüfen. Zunächst wird dazu in einer ersten Untersuchung der Reproduzierbarkeit der Messungen die erwartbare Qualität der Messergebnisse eingeordnet. In einer zweiten Untersuchung werden anschließend mögliche Anforderungen an die Genauigkeit der Korrekturformeln gestellt. Für die dritte Untersuchung werden an verschiedenen Krafträdern die Messreihen des Kohlenmonoxidgehaltes und deren korrigierten Werte über die Einführungstiefe der Messsonde ausgewertet. Auch wenn keine konkrete Aussage gegeben werden kann, deuten die gewonnenen Ergebnisse auf eine gute Genauigkeit der korrigierten Werte hin. Dabei kann jedoch grundsätzlich kein Zusammenhang zwischen der Genauigkeit dieser Werte und der Einführungstiefe erkannt werden.

**Juri Lüth**

## **Title of the paper**

“Valuation, examination and optimization of the exhaust gas correction formula in the context of the periodic exhaust emission test for motorcycles”

## **Keywords**

motorcycle, AUK, emissions test, carbon monoxide, CO, correction formula, exhaust gas, pulsation

## **Abstract**

The aim of the following bachelor thesis was to check the functionality and accuracy of the correction formulas for the carbon monoxide measurement values used in the exhaust emission testing of motorcycles. For this purpose, series of measurements were taken on several motorcycles. First, the expected quality of the measurement results is classified in a first investigation of the reproducibility of the measurements. In a second investigation, possible requirements for the accuracy of the correction formulas are then specified. For the third investigation, the series of measurements of the carbon monoxide content on various motorcycles and their corrected values are evaluated via the insertion depth of the measuring probe. Even if no concrete statement is given, the results obtained indicate a good accuracy of the corrected values. However, basically no correlation between the accuracy of these values and the insertion depth can be recognized.

---

## Inhalt der Bachelorarbeit

Abkürzungsverzeichnis .....	V
Symbolverzeichnis .....	VI
Tabellenverzeichnis.....	VII
Abbildungsverzeichnis .....	VIII
<b>1 Einführung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Antriebsstränge in Krafträdern .....</b>	<b>3</b>
2.1.1 Abgase und Schadstoffe .....	4
2.1.2 Schadstoffreduktion und Abgasnachbehandlung .....	6
2.1.3 Abgasanlagen und Pulsation .....	9
<b>2.2 Abgasuntersuchung bei Krafträdern .....</b>	<b>11</b>
2.2.1 Durchführung der Abgasuntersuchung.....	13
2.2.2 Problematik bei der Erfassung von Messwerten .....	15
<b>3 Forschungsdesign und Material .....</b>	<b>20</b>
<b>3.1 Forschungsfrage und methodisches Vorgehen .....</b>	<b>20</b>
3.1.1 Untersuchung 1: Reproduzierbarkeit und Abweichungen .....	22
3.1.2 Untersuchung 2: Anforderung an die Genauigkeit der korrigierten CO-Werte .....	23
3.1.3 Untersuchung 3: Bewertung der Korrekturformeln .....	24
<b>3.2 Messtechnik.....</b>	<b>25</b>
<b>3.3 Versuchsaufbau.....</b>	<b>26</b>
<b>3.4 Stichprobe der Krafträder .....</b>	<b>27</b>
<b>3.5 Versuchsdurchführung .....</b>	<b>29</b>
<b>4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse .....</b>	<b>31</b>
<b>4.1 Untersuchung 1 .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2 Untersuchung 2 .....</b>	<b>38</b>

---

<b>4.3</b>	<b>Untersuchung 3</b> .....	<b>41</b>
<b>5</b>	<b>Abschluss</b> .....	<b>54</b>
<b>5.1</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b> .....	<b>54</b>
<b>5.2</b>	<b>Beantwortung der Aufgabenstellung</b> .....	<b>58</b>
<b>5.3</b>	<b>Methodenkritik und Ausblick</b> .....	<b>59</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>61</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>63</b>

---

## Abkürzungsverzeichnis

AU	Abgasuntersuchung
AUK	Abgasuntersuchung für Krafträder
FIN	Fahrzeugidentifikationsnummer
G-Kat.	geregelter Katalysator
GTÜ	Gesellschaft für technische Überwachung mbH
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
NDIR	nicht-disperses Infrarotlichtverfahren
SachVIP	Sachverständigen-Informationsportal
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
U-Kat.	ungeregelter Katalysator

---

## Symbolverzeichnis

$a$	Abstand der Messpunkte
$CO$	Kohlenmonoxid
$CO_2$	Kohlendioxid
$CO_{korr}$	korrigierter $CO$ -Wert
$e$	Einführungstiefe der Messsonde
$f$	Frequenz der Pulsation
$h_u$	Umgebungsluftfeuchtigkeit
$HC$	Kohlenwasserstoff
$H_2O$	Wasser, Wasserdampf
$L_{st}$	stöchiometrischer Luftbedarf
$M$	Anzahl der Zylinder
$n_{probe}$	Stichprobenumfang
$n_M$	Motordrehzahl
$N_x$	Stickoxide
$O_2$	Sauerstoff
$p_u$	Umgebungsluftdruck
$\lambda$	Verbrennungsluftverhältnis

---

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Messgenauigkeit und Auflösung des Bosch BEA060 .....	25
Tabelle 2: Übersicht der zu untersuchenden Krafträder .....	28
Tabelle 3: Messwerte und Differenzen der Vergleichsmessung mit Endrohr-Adaption .....	38

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusammensetzung der Abgase eines Viertakt-Ottomotors .....	5
Abbildung 2: Abhängigkeit der $CO$ -Rohemissionen von dem Verbrennungsluftverhältnis $\lambda$ ...	6
Abbildung 3: Schnittdarstellung eines Drei-Wege-Katalysators bei optimaler Umsetzung der Schadstoffe .....	7
Abbildung 4: Temperaturabhängigkeit der Umsetzungseffizienz eines Katalysators.....	9
Abbildung 5: Parameter des Abgasstroms eines Ottomotors über die Zeit dargestellt .....	10
Abbildung 6: Ablaufschema zur Durchführung der AUK .....	15
Abbildung 7: Schnittansicht eines Reflexionsschalldämpfers mit Prallblechen.....	16
Abbildung 8: Beispielhafte Darstellung der Anwendung der Endrohr-Adaption .....	16
Abbildung 9: Heckansicht der Suzuki GSR600 mit eingelassenem Endschalldämpfer .....	17
Abbildung 10: Beispielhafte Darstellung der Endrohr-Adaption mit Verbindungskegel.....	18
Abbildung 11: Versuchsaufbau der Messreihen zur $CO$ -Endrohrmessung bei Krafträdern....	26
Abbildung 12: Darstellung der Messpunkte im Endschalldämpfer .....	30
Abbildung 13: Messreihen zur Reproduzierbarkeit der $CO$ -Messung bei der KTM 200 EXC.	32
Abbildung 14: Messreihen zur Reproduzierbarkeit der $CO$ -Messung bei der BMW R1150GS .....	33
Abbildung 15: Messreihen zur Reproduzierbarkeit der $CO_2$ -Messung bei der KTM 200 EXC	33
Abbildung 16: Messreihen zur Reproduzierbarkeit der $CO_2$ -Messung bei der BMW R1150GS .....	35
Abbildung 17: Darstellung der korrigierten $CO$ -Werte bei der KTM 200 EXC .....	36
Abbildung 18: Darstellung der korrigierten $CO$ -Messwerte bei der BMW R1150GS .....	36
Abbildung 19: $CO$ -Messwerte und korrigierte $CO$ -Werte der Yamaha XVS1100.....	43
Abbildung 20: Darstellung des $CO$ - und $CO_2$ -Gehaltes der Yamaha XVS1100 über die Einführungstiefe .....	44
Abbildung 21: $CO$ -Messwerte und korrigierte $CO$ -Werte der KTM 300 EXC .....	44
Abbildung 22: $CO$ -Messwerte und korrigierte $CO$ -Werte der KTM 200 EXC .....	45
Abbildung 23: $CO$ -Messwerte und korrigierte $CO$ -Werte der Honda CB500.....	46
Abbildung 24: Darstellung des $CO$ - und $CO_2$ -Gehaltes der Honda CB500 über die Einführungstiefe .....	47

---

Abbildung 25: $CO$ -Messwerte und korrigierte $CO$ -Werte der Harley Davidson Electra Glide..	48
Abbildung 26: $CO$ -Messwerte und korrigierte $CO$ -Werte der BMW R1150GS.....	49
Abbildung 27: Darstellung des $CO$ - und $CO_2$ -Gehaltes der BMW R1150GS über die Einführungstiefe .....	50
Abbildung 28: $CO$ -Messwerte und korrigierte $CO$ -Werte der Honda CBR600RR.....	51
Abbildung 29: Darstellung des $CO$ - und $CO_2$ -Gehaltes der Honda CBR600RR über die Einführungstiefe .....	52

---

# 1 Einführung

Eines der wichtigsten gesellschaftlichen Themen der aktuellen Zeit ist der Klimawandel und der damit verbundene Umweltschutz [1]. Bestrebungen, die menschengemachte Schädigung an der Umwelt abzuschwächen, zielen vor allem auf die Reduktion von Schadstoffen aller Art ab. Da das Verkehrswesen eine der größten Quellen von Schadstoffemissionen ist, stellt die Forderung nach strengeren Schadstoffgrenzwerten für die Politik einen notwendigen Schritt dar. Dabei ist kaum ein Sektor in der aktuellen Zeit so stark davon betroffen wie der motorisierte Individualverkehr [2].

Diese Entwicklung betrifft jedoch nicht nur die konventionellen Personenkraftwagen, auch Krafträder sind davon nicht ausgenommen [2]. Mit sinkenden Schadstoffgrenzwerten bei Krafträdern kommen jedoch steigende Anforderungen an die Güte der Abgasuntersuchungen und die dazu verwendeten Mittel hinzu. Bei Krafträdern bietet sich dabei für die Abgasuntersuchung häufig dasselbe Problem:

Aufgrund von kurzen Endschalldämpfern oder komplexen Geometrien in den Endschalldämpfern kann die Messsonde bei der Abgasuntersuchung nicht immer ausreichend tief in das Endrohr eingeführt werden. Eine Verfälschung der Messwerte durch Umgebungsluft ist daher nicht vollkommen auszuschließen. Als Abhilfe ist unter anderem die Verwendung spezieller Korrekturformeln für die Kohlenmonoxidmesswerte vorgesehen, wodurch verfälschte Messwerte berichtigt werden sollen. Der Umfang an zugänglichen Informationen zu diesen Formeln ist jedoch äußerst gering, da weder Angaben zu der Genauigkeit oder den Einschränkungen bei deren Verwendung bekannt sind. Dadurch sind die Prüfenden bei Anwendung der Korrekturformeln nicht immer in der Lage, deren Limitationen zu erkennen.

Ziel dieser Arbeit soll es daher sein, die Korrekturformeln für Kohlenmonoxidmesswerte eingehender zu untersuchen und Aussagen über deren Genauigkeit zu machen. Dazu soll durch die Aufnahme und Auswertung von Messreihen bestimmt werden, bis zu welcher Einführungstiefe der Messsonde die Korrekturformeln Ergebnisse generieren, die den Ansprüchen der Abgasuntersuchung nachkommen. Es soll somit eine Orientierungshilfe geschaffen werden, infolge welcher zukünftig die Sinnhaftigkeit der Anwendung der Korrekturformeln abgeschätzt werden kann. Da außerdem keine Vorarbeiten auf diesem Themengebiet bestehen, gilt es im Rahmen dieser Bachelorarbeit neben der Beantwortung der Fragestellung auch darum, erste grundlegende Erkenntnisse zu dieser Thematik zu erarbeiten und deren Ausmaß abzuschätzen. Wenn es die gewonnenen Erkenntnisse und Mittel dieser Bachelorarbeit zulassen, soll bei Bedarf zusätzlich eine Optimierung der Korrekturformeln angestrebt werden.

---

Der Aufbau dieser Arbeit gliedert sich in insgesamt 6 Kapitel. Im zweiten Kapitel sollen die theoretischen Grundlagen, die zum Verständnis der Arbeit beitragen, aufgeführt werden. Dabei wird der aktuelle Stand der Technik in Krafträdern kurz dargelegt und auf Besonderheiten eingegangen. Auch wird die Thematik der Abgasuntersuchung bei Krafträdern in diesem Kapitel ausführlich behandelt. Das dritte Kapitel widmet sich der Methodik dieser Arbeit. Zum einen wird das Vorgehen zur Lösung der Aufgabenstellung, zum anderen die praktische Umsetzung vorgestellt. Abschließend wird ein Einblick über die zur Verfügung stehenden sowie verwendeten Materialien gegeben. Für die Zielerreichung dieser Ausarbeitung werden mit der Durchführung der Versuche eine große Anzahl an Daten generiert. Diese werden im vierten Kapitel dargestellt und ausgewertet. Es soll dabei auf mögliche Zusammenhänge und Einflussgrößen in den Daten eingegangen und diese gegebenenfalls erläutert werden. Im fünften Kapitel werden die gewonnenen Erkenntnisse tiefergehend diskutiert und dazu genutzt, die zentrale Zielsetzung und damit die Aufgabenstellung dieser Bachelorarbeit zu beantworten. Außerdem werden die Limitationen der Ausarbeitung sowie mögliche Ansätze für weiterführende Untersuchungen aufgezeigt. Das sechste Kapitel stellt eine abschließende Zusammenfassung dar, indem die erarbeiteten Erkenntnisse der Untersuchung komprimiert dargelegt werden.

---

## 2 Theoretische Grundlagen

Um ein tieferes Verständnis für die Hintergründe und das Vorgehen dieser Ausarbeitung zu schaffen, soll zunächst ein Überblick über die theoretischen Grundlagen gegeben werden. Grundlegendes Wissen und Fachbegriffe zur Funktionsweise von Verbrennungsmotoren wird dabei als vorausgesetzt angenommen. Ist das nicht der Fall, kann ein guter Einstieg in diese Thematik in [3], [4] und [5] gefunden werden. Aufgrund der großen Relevanz für diese Ausarbeitung soll die Entstehung von Abgasen und die Reduktion von Schadstoffen bei Verbrennungsmotoren trotzdem bündig wiederholt werden. Zudem wird aus technischer Sicht ein Fokus auf die Abgasanlagen in Krafträdern gelegt.

Im zweiten Teil der theoretischen Grundlagen wird auf die Abgasuntersuchung bei Krafträdern eingegangen. Dazu werden zunächst die Hintergründe und gesetzlichen Vorgaben dargelegt, um im weiteren Verlauf die Durchführung der Abgasuntersuchung zu erläutern.

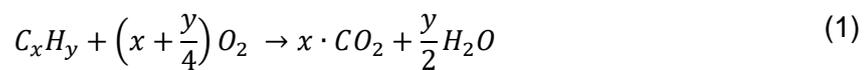
### 2.1 Antriebsstränge in Krafträdern

Die Anzahl von Antriebskonzepten in Krafträdern ist umfassend. Neben den konventionellen verbrennungsmotorischen Antrieben finden auch vermehrt alternative Systeme wie Elektroantriebe oder gar Hybridantriebe in Krafträdern Verwendung. Die Tendenz ist dabei steigend. Wie jedoch aus den Statistiken des Kraftfahrtbundesamtes (KBA) hervorgeht, ist auch heute noch der etablierte Verbrennungsmotor das eindeutig vorwiegende Mittel zum Antrieb. Von den 4.661.561 zugelassenen Krafträdern auf den deutschen Straßen (Stand 01. Januar 2021), verfügen rund 99,5% der Krafträder über eine Form eines Verbrennungsmotors. Überwiegend sind dabei Ottomotoren, die mit Benzin (4.635.635 Einheiten) oder Erd-/Flüssiggas (129 Einheiten) als Kraftstoff betrieben werden. Dieselmotoren befinden sich in rund 4.591 zugelassenen Motorrädern und sind damit wesentlich seltener [6]. Sie werden häufig in militärischen Anwendungen, Kleinserien und privaten Umbauten verwendet [7].

Historisch wurden auf Grund ihrer einfachen Bauweise und hohen Leistungsabgabe bei geringem Gewicht häufig Zweitaktmotoren in Krafträdern eingesetzt. Steigende Ansprüche an deren Effizienz sowie die Schadstoffreduktion haben die Vorteile jedoch zu Gunsten der Viertaktmotoren aufgewogen, wodurch diese in modernen Krafträdern fast ausschließlich verbaut werden. Ausnahmen sind bei Kleinkrafträdern und Krafträdern für den sportlichen Einsatz, beispielsweise Enduros, zu finden [4].

### 2.1.1 Abgase und Schadstoffe

Die chemische Energie wird einem Verbrennungsmotor in Form eines Kraftstoffes zugeführt. Bei Ottomotoren handelt sich es hierbei in der Regel um eine Form von Benzin. Aber auch andere Kraftstoffarten, wie Autogase oder Erdgas sind möglich. Sie alle bestehen aus verschiedenen Variationen von Kohlenwasserstoffverbindungen. Während der Verbrennung im Zylinder werden die Kohlenwasserstoffverbindungen zusammen mit dem in der Luft befindlichem Sauerstoff oxidiert. Bei einer idealen Verbrennung ergeben sich die Kohlenwasserstoffe  $C_xH_y$  mit dem Luftsauerstoff  $O_2$  nach folgender Reaktionsgleichung zu Kohlenstoffdioxid  $CO_2$  und Wasserdampf  $H_2O$ :



Die Variablen  $x$  und  $y$  belegen sich nach der konkret vorliegenden Kohlenwasserstoffverbindung des Kraftstoffes [4]. Demnach sollten die Abgase von Ottomotoren lediglich aus Kohlenstoffdioxid, Wasserdampf und dem unveränderten Stickstoff aus der Luft bestehen. In der Realität findet die genannte Reaktionsgleichung jedoch nicht auf direktem Wege statt, sondern über diverse Zwischenprodukte. Wird der Verbrennungsablauf lokal gestört oder vorzeitig beendet, wie es bei jeder realen Verbrennung in einem gewissen Maße der Fall ist, kommt es zu der Entstehung von Nebenprodukten. Haben diese toxische Eigenschaften, werden sie auch als Schadstoffe bezeichnet. Eine weitere Ursache für die Entstehung von Nebenprodukten kann das Vorhandensein von weiteren Inhaltstoffen im Kraftstoff, zum Beispiel Additiven oder Verunreinigungen, sein [4]. Abbildung 1 zeigt die prozentuale Zusammensetzung der Abgase eines Viertakt-Ottomotors bei einem Betrieb mit dem Verbrennungsluftverhältnis  $\lambda = 1$ .

Neben den zu erwartenden Hauptbestandteilen des Abgases, Stickstoff, Kohlendioxid und Wasserdampf, treten dort auch 2% Nebenprodukte auf. Rund 1% davon sind wiederum harmlose Nebenprodukte wie Edelgase, Sauerstoff und Wasserstoff. Als Schadstoffe werden die verbleibenden 1% klassifiziert. Dabei handelt es sich um Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Stickoxide und andere Feststoffe, wie beispielsweise Rußpartikel. Für Kohlendioxid sei angemerkt, dass es für die Umwelt als nicht giftig und damit in der Regel nicht als Schadstoff angesehen wird. Es ist jedoch als Mitverursacher des Treibhauseffektes identifiziert und wird daher häufig im anderen Kontext trotzdem als schädlicher Bestandteil des Abgases verstanden [5].

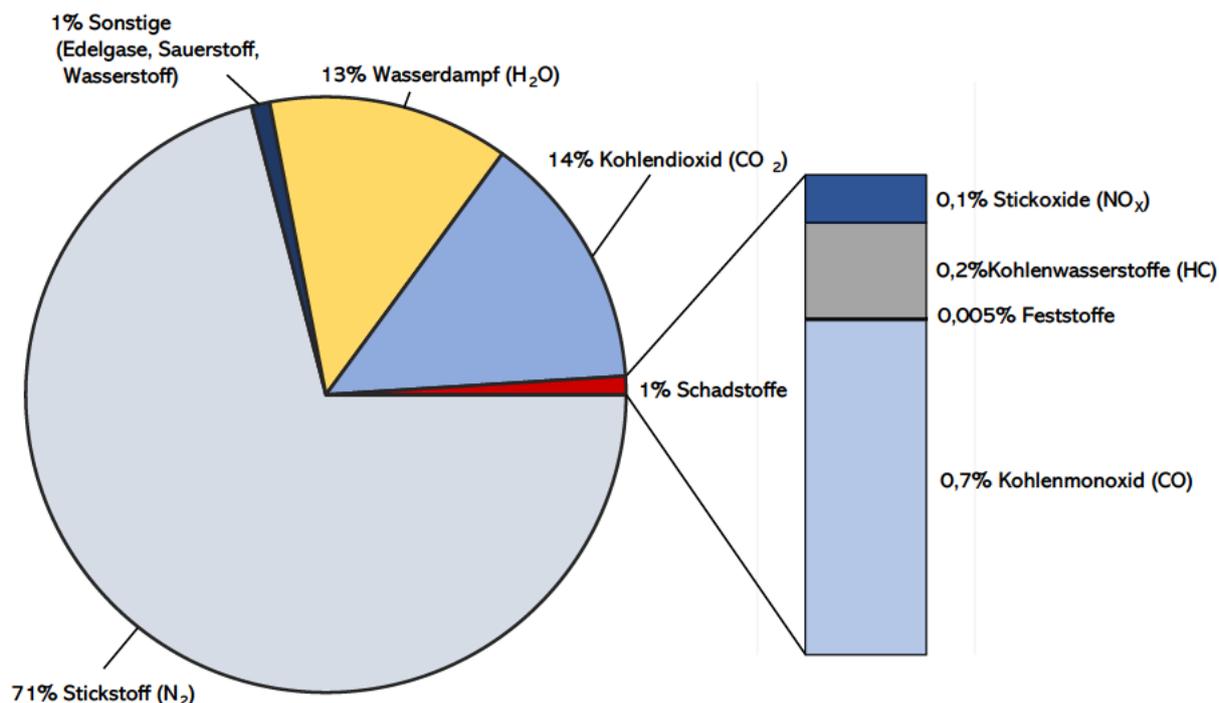


Abbildung 1: Zusammensetzung der Abgase eines Viertakt-Ottomotors

Quelle: angelehnt an [5]

Den größten Anteil der Schadstoffe machen die Kohlenmonoxide  $CO$  mit rund 0,7% vom Gesamtabgas aus. Kohlenmonoxid ist für den Menschen giftig und wird aufgrund seiner geringen Wahrnehmbarkeit als sehr gefährlich eingestuft. Es kommt als Zwischenprodukt in jeder Verbrennung vor, jedoch oxidiert es bei einem ungestörten Ablauf weiter zu Kohlendioxid, wodurch der  $CO$ -Anteil im Idealfall gering ist. Wird der Motor mit einem fetten Gemisch betrieben, kommt es durch den Luft- und damit Sauerstoffmangel zu einem erhöhten Anteil von Kohlenmonoxid. Es ist somit direkt von dem Verbrennungsluftverhältnis  $\lambda$  abhängig. Für ein sinkendes  $\lambda$  erhöht sich der Anteil von Kohlenmonoxid. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 2 deutlich. Eine weitere wichtige Abhängigkeit des Kohlenmonoxidgehalts ist die Relation zur Motordrehzahl. Bei steigender Motordrehzahl wird die Zeit, welche im Brennraum zur Ausbreitung und Verbrennung des Luft-Kraftstoff-Gemisch zur Verfügung steht, immer kürzer. Darunter leidet die Qualität der Verbrennung und führt somit zu einem Anstieg von Kohlenmonoxid [5].

Kohlenwasserstoffe  $HC$  sind mit rund 0,2% an den Abgasen beteiligt. Sie gelten ebenfalls als Schadstoffe, da sie als krebserregend eingestuft werden. Wie auch Kohlenmonoxide entstehen sie vermehrt bei einer unvollständigen Verbrennung und Sauerstoffmangel. Sie teilen damit eine ähnliche Korrelation zum Verbrennungsluftverhältnis  $\lambda$  und der Motordrehzahl. In erster Linie bestehen die Kohlenwasserstoffe aus unverbranntem oder nur teilverbranntem Kraftstoff [5]. Aber auch weitere Bestandteile des Gemisches, wie darin

gelöste Schmierstoffe, tragen zu den Kohlenwasserstoffemissionen hinzu. Daher ist der Anteil von Kohlenwasserstoffen im Abgas vor allem bei Zweitaktmotoren besonders hoch [8].

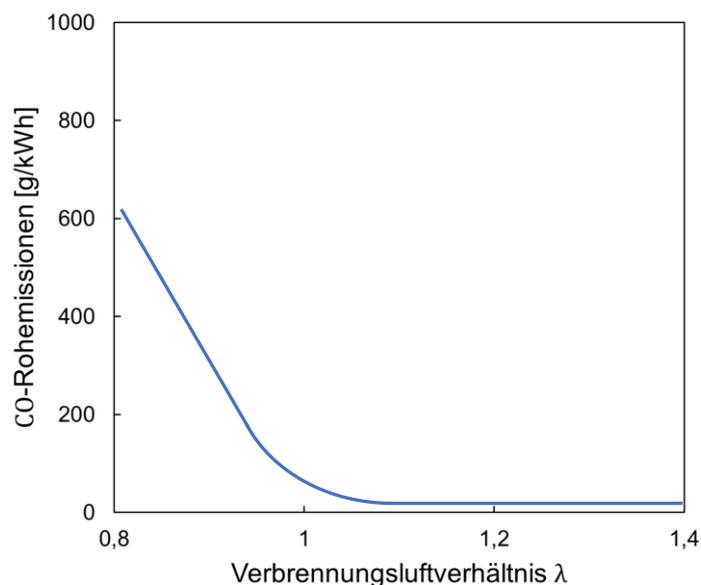


Abbildung 2: Abhängigkeit der CO-Rohemissionen von dem Verbrennungsluftverhältnis  $\lambda$

Quelle: angelehnt an [5]

Stickoxide  $NO_x$  sind sowohl für den Menschen als auch für die Umwelt gefährlich. Sie brauchen zur Entstehung eine hohe äußere Energiezufuhr, welche bei der Verbrennung im Zylinder durch die hohen Temperaturen gegeben ist. In Ottomotoren liegen Stickoxide vor allem als Stickstoffmonoxid, in geringerem Maße aber auch als Stickstoffdioxid vor und machen etwa 0,1% der Abgase aus. Bei hohen Motordrehzahlen nimmt der Stickoxidanteil durch die geringere Zeit zur Bildung ab. Sie sind in erster Linie von den Brennraum- und Abgastemperaturen abhängig [5].

Im Abgas treten zusätzlich eine Vielzahl von Feststoffen auf. Diese Partikelemissionen haben bei Ottomotoren einen sehr geringen Anteil von rund 0,005% am Gesamtabgas und werden daher häufig vernachlässigt [4]. Bei Zweitakt-Ottomotoren ist der Anteil von Rußpartikeln wiederum deutlich höher, hauptsächlich hierfür sind Schmierstoffe, die mitverbrannt werden [8].

### 2.1.2 Schadstoffreduktion und Abgasnachbehandlung

Aufgrund steigender Anforderungen an die Schadstoffkonzentrationen im Abgas wurden Methoden zu deren Reduktion eingeführt. Motorische Maßnahmen zielen auf die Entstehung der Schadstoffe während der Verbrennung ab. Dabei werden diverse Parameter der

Verbrennung, wie beispielsweise das Verbrennungsluftverhältnis, Gemischaufbereitung und Steuerzeiten der Ventile so eingestellt, dass die Schadstoffe in den Abgasen möglichst gering bleiben. Diese Abgase, welche unmittelbar aus der Brennkammer entstammen, werden als Rohabgase bezeichnet [5].

Um die Schadstoffkonzentrationen weiter zu senken, werden die Rohabgase weiteren externen Maßnahmen unterzogen. Dabei wird von der Abgasnachbehandlung oder auch Abgasreinigung gesprochen [5]. Im Nachfolgenden soll auf Systeme eingegangen werden, die in der Kraffradtechnik Anwendung zur Reinigung der Abgase finden. Diese machen sich grundlegend alle einen Katalysator zu Nutze.

Unter einem Katalysator wird in der Chemie ein Stoff verstanden, welcher einen chemischen Prozess beschleunigt oder verlangsamt, ohne dabei selbst verändert zu werden [9]. Im Spezielleren wird dabei die benötigte Aktivierungsenergie der Reaktionen beeinflusst. Dieser Eigenschaft wird sich bei der Abgasnachbehandlung bedient, um die Schadstoffe im Abgas durch nachträgliche Reaktionen in weniger schädliche Stoffe umzuwandeln. Der katalytische Stoff wird auf ein Trägermaterial aufgetragen, welches vom Abgasstrom innerhalb der Abgasanlage umströmt wird. Um der Reaktion eine möglichst große Oberfläche zu bieten, ist es häufig als Waben- oder Gitterform angelegt [10]. Abbildung 3 zeigt diesen Aufbau in Schnittdarstellung. Das daraus resultierende Bauteil wird in der Fahrzeugtechnik ebenfalls als Katalysator bezeichnet.

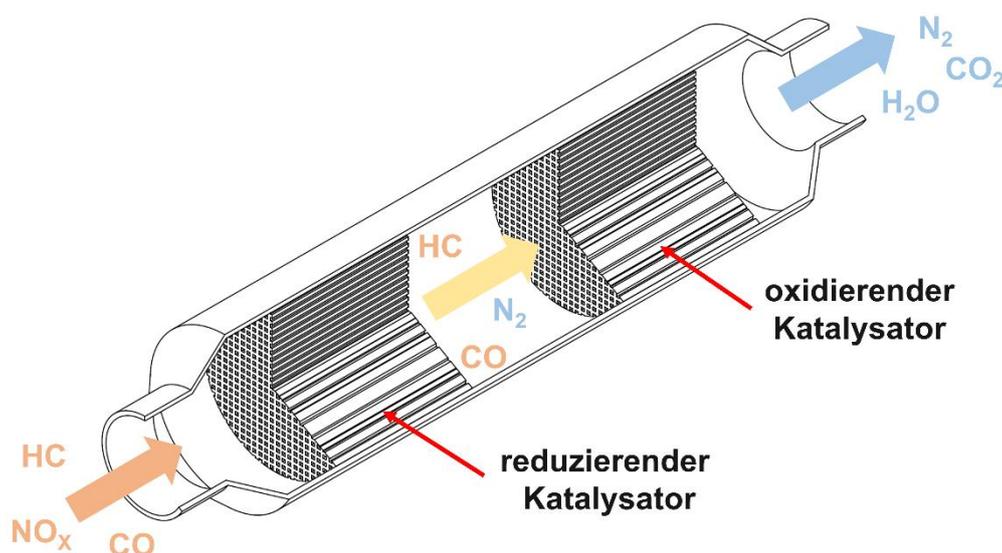
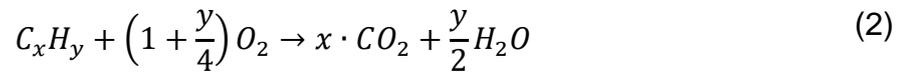


Abbildung 3: Schnittdarstellung eines Drei-Wege-Katalysators bei optimaler Umsetzung der Schadstoffe

Quelle: angelehnt an [4]

Durch einen gewissen Restsauerstoff in den Abgasen kommt es nach Formel (2), (3) und (4) zur Oxidation der Schadstoffe Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoff zu Kohlendioxid und Wasser bzw. Wasserstoff.



Allerdings läuft dieser Prozess nicht ausreichend schnell genug ab, um die Schadstoffkonzentrationen stark zu verringern. An dieser Stelle setzt der Katalysator an. Beim Durchströmen des Katalysators kommen die Abgase und mit ihnen die Schadstoffe in Berührung mit der beschichteten Oberfläche, wodurch die Oxidation beschleunigt wird. Der Umsatz der Schadstoffe in weniger gefährliche Stoffe geschieht somit wesentlich umfassender. Im Gegensatz dazu müssen die im Abgas enthaltenen Stickstoffe im chemischen Sinne reduziert werden. Dies geschieht durch die Reaktion der Stickstoffe mit Kohlenmonoxid, Wasserstoff oder Kohlenwasserstoffen. Auch dieser Prozess kann durch einen Katalysator beschleunigt werden. In Abbildung 3 wird gut sichtbar, dass sich der Katalysator in zwei Abschnitte teilt. Der vordere Abschnitt dient dabei der Oxidation von Kohlenmonoxiden und Kohlenwasserstoffen, während der hintere Teil die Reduktion der Stickoxide katalysiert [4].

In Krafträdern finden vor allem zwei Typen von Katalysatoren Verwendung: Der Oxidationskatalysator und der Drei-Wege-Katalysator. Der Oxidationskatalysator ist in der Lage die Oxidation der Schadstoffe zu katalysieren, wodurch er nur Einfluss auf die Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffkonzentrationen im Abgas nimmt. Anwendung findet dieser Typ in älteren Krafträdern und solchen mit Zweitaktmotoren. Für letztere eignet sich durch die geringeren Stickstoffemissionen eine Verwendung des Oxidationskatalysators besonders [10]. Da der Oxidationskatalysator unabhängig von der Gemischaufbereitung des Motors eingesetzt werden kann, wird er gegenüber dem Drei-Wege-Katalysator auch als „ungeregelter Katalysator“ bzw. „U-Kat.“ bezeichnet.

Der Drei-Wege-Katalysator findet heutzutage in einem Großteil der Motorräder Anwendung und ist damit der aktuelle Stand der Technik [10]. Er ist in der Lage die Umsetzung der drei Schadstoffe Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Stickoxid zu katalysieren. Dazu ist es nötig Bedingungen zu schaffen, in welchen eine Oxidation von Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoff, aber gleichzeitig auch eine Reduktion der Stickstoffe möglich ist. Diese

Gegebenheiten sind im Abgas bei einem Verbrennungsluftverhältnis von  $\lambda = 1$  gegeben. Für die korrekte Funktionsweise des Drei-Wege-Katalysators ist damit eine genaue Regelung der Gemischaufbereitung notwendig. Daher kommt dieser Typ des Katalysators ausschließlich in Verbindung mit einer elektronisch geregelten Gemischaufbereitung in Form von Saugrohr- oder Direkteinspritzung in Krafträdern vor. Es wird daher auch von einem „geregelten Katalysator“ oder „G-Kat.“ gesprochen [5].

Die Wirkungsweise eines Katalysators ist stark temperaturabhängig. Es lässt sich im Allgemeinen sagen, dass mit steigender Temperatur auch die Umsatzrate des Katalysators steigt, wobei nach oben vor allem die Bauteiltemperaturbeständigkeit limitierend ist. Die qualitative Abbildung 4 zeigt den Zusammenhang der Temperatur und Umsetzungseffizienz eines Katalysators.

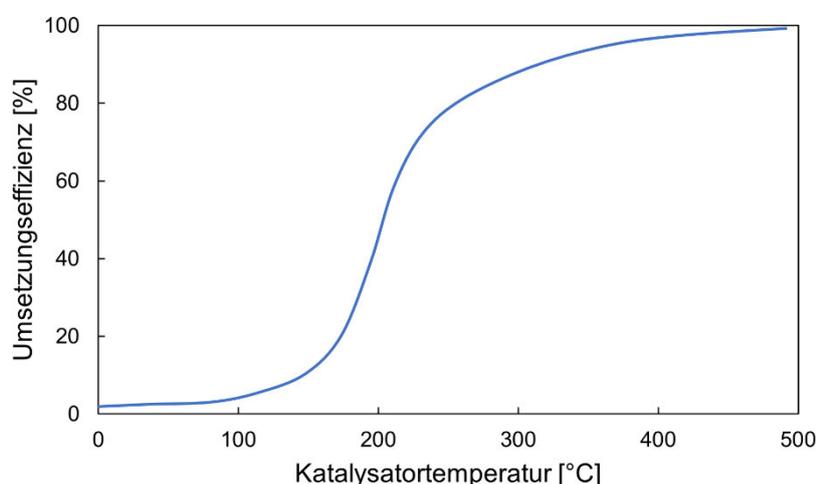


Abbildung 4: Temperaturabhängigkeit der Umsetzungseffizienz eines Katalysators

Quelle: angelehnt an [11]

Es wird deutlich, dass der Katalysator eine gewisse Mindesttemperatur erreichen muss, um suffizient zu arbeiten. Diese wird auch als *Light-Off-Temperatur* bezeichnet und im Allgemeinen bei etwa 300 °C angenommen [12].

### 2.1.3 Abgasanlagen und Pulsation

Als Abgasanlage wird in der Kraftradtechnik jene Einrichtung bezeichnet, welche die Abgase nach Austritt aus dem Brennraum des Motors an einen dafür vorgesehenen Ort führt und dabei mehrere Aufgaben übernimmt. Neben der Beeinflussung der Leistungscharakteristik des Motors dient sie vor allem zur Abgasnachbehandlung sowie zur Verringerung der Geräuschbelastung durch die Abgase [10].

Der austretende Abgasstrom eines Verbrennungsmotors ist nicht stationär. Werden die Auslassventile bzw. Auslassschlitze des Motors geöffnet, so können die unter Druck stehenden Abgase schlagartig aus dem Zylinder expandieren. Dadurch läuft eine Druckwelle durch die Abgasanlage bis hin zum Endrohr. An reduzierten Querschnitten oder Prallblechen in der Abgasanlage kann es zusätzlich zur Reflektion der Druckwellen kommen, wodurch wiederum rücklaufende Druckwellen entstehen. Der Druck in der Abgasanlage steigt damit kurzfristig drastisch an, um nachfolgend wieder abzufallen [13]. Dieser Durchlauf wiederholt sich mit jedem Arbeitsspiel von jedem Zylinder des Motors. Die Abbildung 5 stellt den Abgasdruck (*exhaust pressure*), die Abgastemperatur (*exhaust temperature*) und den Abgasmassenstrom (*flow rate*) im Auspuff eines Ottomotors über die Zeit dar. Deutlich erkennbar ist die Oszillation des Abgasdrucks sowie des Abgasvolumenstroms in Folge der Druckwellen beim Öffnen der Auslassventile. Der mittlere Umgebungsluftdruck auf Meereshöhe beträgt normgemäß  $P_{atm} = 101,325 \text{ kPa}$  [14]. Dieser Wert wird durch den schwankenden Abgasdruck periodisch unterschritten, wodurch der Umgebungsluftdruck Umgebungsluft in das Endrohr drückt. Es entsteht ein Rückstrom in die Abgasanlage [15]. Dieser Rückstrom macht sich in Abbildung 5 als negativer Abgasvolumenstrom bemerkbar.

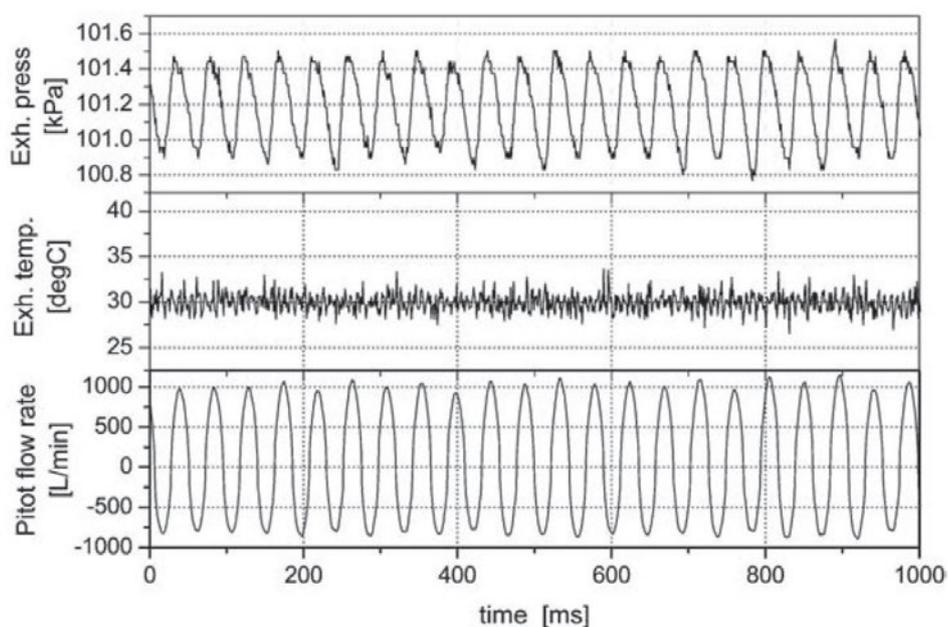


Abbildung 5: Parameter des Abgasstroms eines Ottomotors über die Zeit dargestellt

Quelle: [15]

Die Druckschwankungen im Abgasstrom werden als Pulsation bezeichnet. Da sie primär beim Öffnen der Auslassventile und dem Ausschleusen der Abgase entstehen, ist die Frequenz des Pulsierens direkt mit der Motordrehzahl und der Zylinderanzahl gekoppelt. In [15] ist dazu für einen Viertaktmotor folgender Zusammenhang angegeben:

---

$$f = \frac{1}{2} \cdot n_M \cdot \frac{1}{60} \cdot M \quad (5)$$

Wobei  $f$  die Frequenz der Pulsation,  $n_M$  die Motordrehzahl und  $M$  die Zylinderzahl des Motors darstellt.

Da sowohl die Abgase als auch die Umgebungsluft eine gewisse Massenträgheit aufweisen, ist der Rückstrom stark von dieser Frequenz abhängig. Bei hohen Motordrehzahlen und damit auch hohen Frequenzen verringert sich durch die Trägheit der Abgase und der Umgebungsluft die Amplitude und Dauer des Rückstroms. Sie sind unter anderem dafür ausschlaggebend, wie tief die Umgebungsluft in das Endrohr vordringt. Im Betrieb bei geringen Motordrehzahlen und geringem Abgasgedrückt, tritt der Effekt durch die größere Amplitude hingegen verstärkt auf [13]. Die einströmende Umgebungsluft kann sich dabei im Bereich des Endrohres mit den Abgasen vermischen. Es kommt zu einer Verdünnung der Abgase und damit auch zu einer Senkung der Schadstoffkonzentration im Endrohr. Außerdem steigt der Sauerstoffgehalt in diesem Bereich erheblich an. Dieses Phänomen soll nachfolgend als Frischluftvermischung der Abgase bezeichnet werden [11].

Neben der Motordrehzahl und Zylinderzahl ist die Pulsation auch von diversen charakteristischen Eigenschaften des Antriebstranges abhängig. Bei Motoren mit einem großen Hubraum je einzelnen Zylinder ist auch das Volumen der Abgase beim Ladungswechsel jedes Zylinders größer, was wiederum in einer größeren Amplitude des Abgasvolumenstroms resultiert. Im Gegensatz dazu stehen Motoren mit mehreren Zylindern. Dort kommt es durch die versetzte Abfolge der Arbeitstakte der einzelnen Zylinder zu einer gegenseitigen Abschwächung der Abgasschwingungen. Die Zeitpunkte der Rückströmung überschneiden sich mit der Öffnung der Auslassventile anderer Zylinder, wodurch der Unterdruck aufgefüllt und die Pulsation abgeschwächt wird [13].

## 2.2 Abgasuntersuchung bei Krafträdern

Mit einem steigenden Bewusstsein für die Umweltbelastung durch Kraftfahrzeuge wurden im Jahr 1994 einheitliche Grenzwerte für die Schadstoffemissionen von Krafträdern in Form der ECE-R40 Verordnung eingeführt. Ab diesem Zeitpunkt mussten Hersteller bei der Typzulassung neuer Krafträder in der Europäischen Union (EU) deren Einhaltung gewährleisten. Im Jahr 1999 wurden mit der Abgasnorm Euro-1-Norm die Grenzwerte für alle Kraftfahrzeuge, darunter auch Krafträder, in der EU vereinheitlicht. Mit der Euro-2-Norm wurden im Jahr 2003 die Schadstoffgrenzwerte auch für Krafträder weiter gesenkt. Ab dem 01. April 2006 wurde die Euro-3-Norm eingeführt. Neben einer erneuten Verschärfung der Schadstoffgrenzwerte, sah

---

die Euro-3-Norm erstmals auch eine Überwachung der im Umlauf befindlichen Krafträder in Form einer Umweltuntersuchung vor. Diese ist seither zum Bestehen der periodischen Hauptuntersuchung (HU) an Krafträdern verpflichtend [16]. Die Umweltuntersuchung teilt sich in die Beurteilung der Lärmentwicklung und der Motorabgase auf. Letztere wird als die *Untersuchung der Abgase an Krafträdern* (AUK) bezeichnet. Die Vorschriften zur AUK sind in ihrer aktuellen Form in der *Richtlinie für die Durchführung der Untersuchung der Abgase von Kraftfahrzeugen nach Nummer 6.8.2* in der Anlage VIIIa der StVZO abgefasst. Sie wird verkürzt auch als *AU-Richtlinie* bezeichnet.

Ziel der AUK ist es, das Umweltverhalten der im Umlauf befindlichen Krafträder über deren gesamtes Produktleben zu überwachen. Das ist notwendig, da sich die Schadstoffemissionen von Krafträdern beispielsweise durch Verschleiß, mangelnde Wartung oder bewusste Modifikation abgasrelevanter Bauteile verändern können. Im Rahmen der AUK soll diesen Veränderungen vorgebeugt bzw. diese rechtzeitig erkannt werden, um eine erhöhte Umweltbelastung auszuschließen.

Von der AUK sind alle zulassungspflichtigen Krafträder mit Zwei- oder Viertakt-Fremdzündungsmotoren betroffen, die gleichzeitig eine bauartbedingte Höchstgeschwindigkeit von mehr als  $45 \text{ km/h}$  und/oder einen Hubraum von mehr als  $50 \text{ cm}^3$  besitzen. Es sind dabei nur Krafträder mit einem Erstzulassungsdatum ab dem 01. Januar 1989 zu berücksichtigen. Im weiteren Sinne unterstehen auch drei bzw. vierrädrige Fahrzeuge mit einer Antriebsleistung bis  $15 \text{ kW}$  der AUK-Pflicht, sofern die zuvor genannten Kriterien ebenfalls zutreffen [16].

In der Euro-3-Norm sind Grenzwerte für die Gehalte von  $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$  und  $\text{NO}_x$  im Abgas von Krafträdern festgelegt. Diese werden bei der Typzulassung eines Kraftrads überprüft. Im Rahmen der AUK erfolgt jedoch lediglich eine wiederkehrende Überprüfung des  $\text{CO}$ -Gehaltes auf Einhaltung des Grenzwertes, wobei sich die Grenzwerte für die AUK von jenen der Euro-3-Norm unterscheiden und auch kraftradspezifisch variieren können [§29 Abs. 25 Satz 3 StVZO].

Die Aufnahme der Messwerte erfolgt über eine Messsonde im Endrohr des Kraftrades, weshalb von einer Endrohrmessung gesprochen wird. Nach der AU-Richtlinie muss die Messsonde dabei mindestens  $300 \text{ mm}$  tief im Endrohr platziert werden, um zulässige Messwerte aufzunehmen. Bei mehrflutigen Abgasanlagen wird aus den Messwerten aller Endrohre das arithmetische Mittel gebildet. Als Messgeräte für die AUK sind  $\text{CO}$ -Messgeräte und 4-Gas-Messgeräte einzusetzen, die bauartzugelassen sind und wiederkehrend nach den gesetzlichen Vorgaben geeicht und gewartet werden [§29 Abs. 25 Satz 6 StVZO].

---

Generell darf die AUK von amtlich anerkannten Sachverständigen und Prüfern in Prüfstellen und von amtlich anerkannten Prüfengeuren der technischen Überwachungsorganisationen im Rahmen der HU nach §29 StVZO durchgeführt werden. Zusätzlich können auch Kfz-Werkstätten nach Anlage VIIIc der StVZO zur Durchführung der AUK berechtigt werden. In diesem Fall muss jedoch berücksichtigt werden, dass die AUK frühestens einen Kalendermonat vor der eigentlichen HU stattfindet [16].

Durchgeführt werden soll die AUK in einem dafür geeigneten, geschlossenen Raum. Dort müssen neben dem Abgasmessgerät gegebenenfalls auch noch Mittel zur Erfassung der Motordrehzahl und Motortemperatur bereitstehen [§29 Abs. 4 Satz 2 StVZO].

### **2.2.1 Durchführung der Abgasuntersuchung**

Die eigentliche Abgasuntersuchung teilt sich in vier Abschnitte auf, welche die Identifikation, Erfassung der Soll-Daten, Erfassung der Ist-Daten und die Dokumentation umfassen. Nachfolgend sollen die jeweiligen Schritte bei der Durchführung einer AUK chronologisch dargelegt werden. In Abbildung 6 ist dieser Ablauf zusätzlich komprimiert in einer Grafik zusammengefasst dargestellt.

#### Identifikation

Im ersten Schritt muss das zu prüfende Kraftrad identifiziert werden, um einen möglichen Betrug auszuschließen und eine spätere Zuordnung der durchgeführten AUK zum jeweiligen Kraftrad zu gewährleisten. Folgende Punkte sollen dazu erfasst werden:

- Fahrzeugidentifikationsnummer (FIN) im Fahrzeugschein und deren Abgleich mit der eingprägten FIN des Kraftrades
- das vollständige amtliche Kennzeichen
- Stand des Wegstreckenzählers
- Hersteller und Modell des Kraftrades mit den jeweiligen Schlüsselnummern

#### Erfassung der Soll-Daten

Nach der Identifikation des Kraftrades können die Soll-Daten bestimmt werden. Darunter werden die für die Abgasuntersuchung einzuhaltenden Grenzwerte verstanden. An dieser Stelle teilt sich die AUK in zwei Kategorien auf:

Krafträder ohne oder mit einer unregelmäßigen katalysatorischen Abgasreinigung werden bei ihrer Leerlaufdrehzahl gemessen. Diese ist aus den Herstellerangaben zu entnehmen. Sind dazu keine Herstellerangaben veröffentlicht, gilt ein allgemeiner Messbereich von  $800 - 1200 \text{ min}^{-1}$  für die Abgasuntersuchung. Auch die einzuhaltenden  $CO$ -Grenzwerte sollen den

---

Herstellerangaben entnommen werden. Als allgemeiner Alternativwert ist ein Grenzwert von 4,5 % *vol* vorgegeben.

Krafträder mit einer geregelten katalysatorischen Abgasreinigung werden im Gegensatz dazu bei einer erhöhten Drehzahl gemessen. Wenn diese durch den Hersteller nicht anders spezifiziert ist, liegt die allgemeine Vorgabe bei 2000 – 3000  $\text{min}^{-1}$ . Der allgemein einzuhaltende *CO*-Grenzwert ist für die Krafträder bei 0,3 % *vol* festgesetzt. Abweichende Herstellervorgaben müssen auch hier berücksichtigt werden.

#### Erfassung der Ist-Daten

Vor der eigentlichen Messung muss der Motor des Kraftrades konditioniert und auf Betriebstemperatur gebracht werden. Auch hier gilt es nach Herstellervorgaben zu handeln. Ansonsten ist eine Motortemperatur nach Anzeige von mindestens 60 °C einzuhalten. Die abgasrelevanten Komponenten des Kraftrades müssen zusätzlich einer Sichtprüfung unterzogen werden, die mögliche Defekte ausschließt.

Für die Messung wird das Kraftrad in den vorgegebenen Drehzahlbereich gebracht und die Messsonde in das Endrohr eingeführt. Die dabei erfassten Ist-Werte werden mit den Soll-Werten abgeglichen. Bei Einhaltung der Grenzwerte, wird die Untersuchung beendet. Bei Nichteinhaltung darf die Messung beliebig häufig wiederholt werden. Ist die Messung im Leerlauf durchzuführen, soll zusätzlich überprüft werden, ob dieser in dem vorgegebenen Drehzahlbereich liegt.

#### Dokumentation

In der Dokumentation wird abschließend das Bewertungsergebnis der AUK festgehalten. Neben den genannten Identifikationsmerkmalen sind dort auch das Datum mit Uhrzeit, die Soll-Daten, die Ist-Daten und gegebenenfalls aufgetretene Mängel zu vermerken. Die Bewertung der zuvor genannten Kriterien erfolgt mit „in Ordnung“ (i.O.) oder „nicht in Ordnung“ (n.i.O.). Auch die für die AUK verantwortliche Person soll aus dieser Dokumentation hervorgehen und die Richtigkeit der AUK mit einer Unterschrift bestätigen [§29 Abs. 25 Satz 3 StVZO].

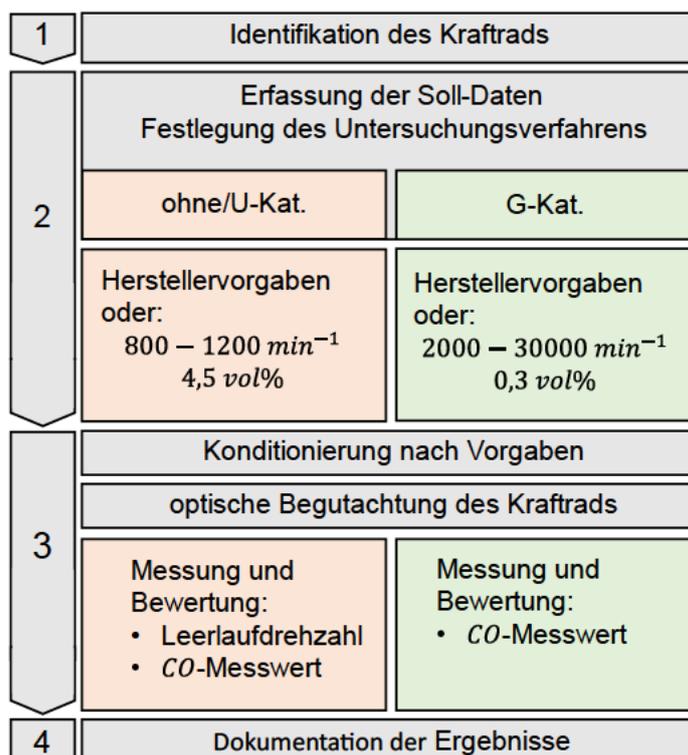


Abbildung 6: Ablaufschema zur Durchführung der AUK

### 2.2.2 Problematik bei der Erfassung von Messwerten

Nicht bei jedem Kraftrad kann die Messsonde die geforderten  $300 \text{ mm}$  in das Endrohr eingeführt werden. Gründe hierfür sind bauartbedingt, beispielsweise in Form eines sehr kurzen Endschalldämpfers oder Endschalldämpfer mit einer unstetigen inneren Geometrie. Zur Verdeutlichung ist der Abbildung 7 die Schnittansicht eines Reflexionsschalldämpfers zu entnehmen, bei welchem aufgrund der Prallbleche, die den Schalldämpfer in einzelne Kammern aufteilen, das vollständige Einführen der Messsonde verhindert wird. Vereinzelt kann auch ein Schutzgitter am Endrohr oder ein im Schalldämpfer verbauter Katalysator die Öffnung verschließen.

Für den Fall, dass die Messsonde nicht die vorgeschriebene Mindesteinführungstiefe in das Endrohr eingeführt werden kann, muss davon ausgegangen werden, dass in Folge des Pulsierens der Abgase Umgebungsluft in das Endrohr eintritt und die CO-Messwerte verfälscht. Daher gibt zwei alternative Möglichkeiten, um dennoch zulässige Messwerte aufzunehmen. Beide Alternativen sind in der AU-Richtlinie in §29 Abs. 25 Anlage 5 der StVZO beschrieben.

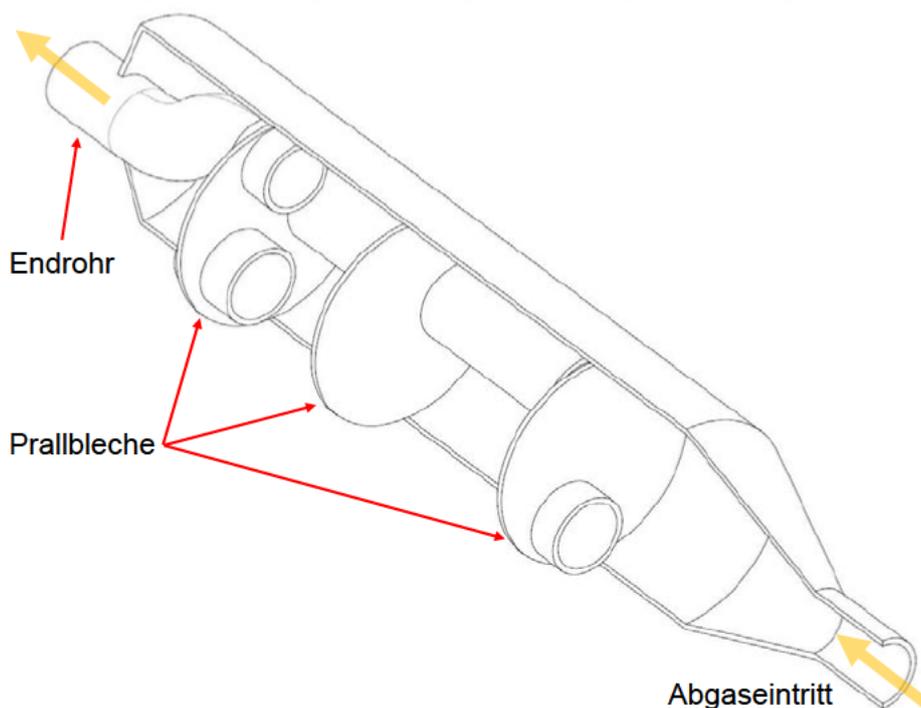


Abbildung 7: Schnittansicht eines Reflexionsschalldämpfers mit Prallblechen

#### Möglichkeit 1: Adaption

Zum einen kann ein Rohr zum Einsatz kommen, welches als Aufsatz das Endrohr verlängert und so eine ausreichende Einführungstiefe gewährleistet. Das Rohr wird nachfolgend als Adaption bezeichnet. Laut AU-Richtlinie muss die Adaption eine Mindestlänge von 400 mm und einen Innendurchmesser von maximal 50 mm aufweisen, um eine ausreichende Beruhigungszone für die Abgase zu bieten, wodurch die Frischluftvermischung minimiert werden soll. Die Adaption kann auch bei Krafträdern angewendet werden, bei denen das Endrohr beispielsweise durch ein Gitter verschlossen oder so eng dimensioniert ist, dass eine Sonde gar nicht eingeführt werden kann.

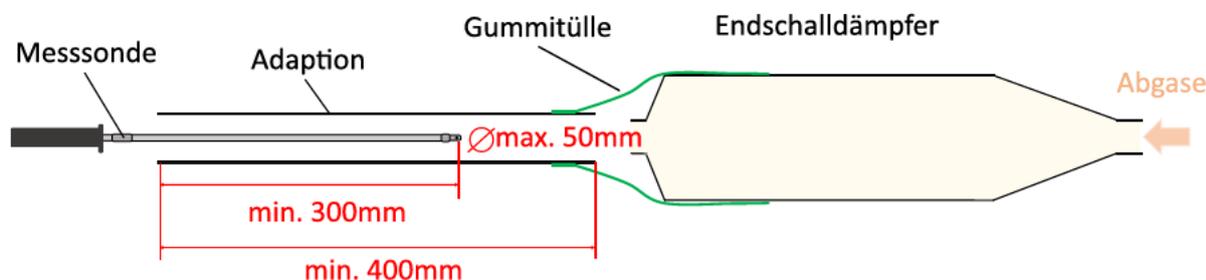


Abbildung 8: Beispielhafte Darstellung der Anwendung der Endrohr-Adaption

Quelle: angelehnt an [17]

In Abbildung 8 ist eine vereinfachte Grafik eines beispielhaften Messaufbaus mit Adaption dargestellt. Um eine luftdichte Verbindung zwischen Endrohr und Adaption zu gewährleisten, kommt eine Gummitülle zur Verwendung. Sie wird über den Auspuffendtopf gestülpt.

Durch die zusätzlichen Komponenten kommt bei der Durchführung der Abgasmessung ein Mehraufwand zu Stande. Auch muss eine luftdichte Verbindung zwischen dem Endrohr und dem Aufsatz gewährleistet werden, um das Eindringen von Frischluft aus der Umgebung zu verhindern. Bei hohen Temperaturen am Endrohr können durch die eingesetzte Gummitülle vereinzelt Rückstände auf hochwertigen Oberflächen, beispielsweise Chromendtöpfen, zurückbleiben. Aus diesem Grund wird die Verwendung des Aufsatzes durch die Prüferingenieure mitunter gemieden [18].

In einigen Fällen verhindert auch die Einbauposition des Endschalldämpfers die Verwendung einer Adaption. Abbildung 9 zeigt den Endschalldämpfer einer *Suzuki GSR600*. Dieser ist direkt unter der Sitzkonsole eingelassen und verkleidet, wodurch das luftdichte anbringen der Adaption nicht bzw. nur mit erheblichem Aufwand möglich ist.



Abbildung 9: Heckansicht der Suzuki GSR600 mit eingelassenem Endschalldämpfer

Für Anwendungsfälle dieser Art muss auf eine andere Form der Endrohr-Adaption zurückgegriffen werden. Bei dieser wird die Adaption nicht über eine Gummitülle luftdicht mit dem Endrohr verbunden, stattdessen findet ein elastischer Verbindungskegel Verwendung. Dessen beispielhafte Darstellung ist aus Abbildung 10 zu entnehmen. Der Nachteil dieser Form der Adaption liegt darin, dass eine gewisse Größe des Endrohres gegeben sein muss, damit eine luftdichte Verbindung hergestellt werden kann. Dies ist nicht für alle Krafträder gewährleistet.

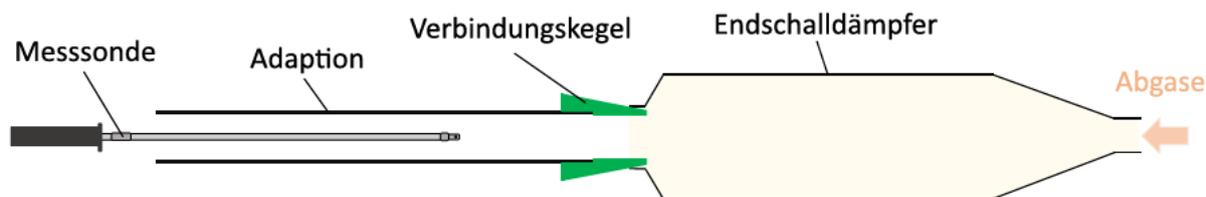


Abbildung 10: Beispielhafte Darstellung der Endrohr-Adaption mit Verbindungskegel

Quelle: angelehnt an [17]

### Möglichkeit 2: Korrekturformeln

Eine weitere alternative Möglichkeit bietet die Verwendung von Abgaskorrekturformeln. Mit diesen soll der erfasste  $CO$ -Gehalt auf einen Wert korrigiert werden, der dem der unverfälschten Abgaszusammensetzung entspricht. Die folgenden Grundlagen der Korrekturformeln wurden selbständig erarbeitet und durch Rücksprache mit einer Verkehrsbehörde bestätigt.

Die Formeln sind in der AU-Richtlinie abgedruckt und lauten wie folgt:

Für Zweitaktmotoren:

$$CO_{korr} = CO \cdot \left( \frac{10}{CO + CO_2} \right) \quad (6)$$

Für Viertaktmotoren:

$$CO_{korr} = CO \cdot \left( \frac{15}{CO + CO_2} \right) \quad (7)$$

Die beiden Korrekturformeln für Zweitakt- und Viertaktmotoren sind grundsätzlich identisch aufgebaut. Die Formeln stellen ein Produkt aus dem gemessenen  $CO$ -Wert und einem Korrekturfaktor dar, die zusammen den korrigierten Kohlenmonoxidgehalt  $CO_{korr}$  ergeben. Der Korrekturfaktor ist ein Bruch, in dessen Nenner die Summe aus dem gemessenen  $CO$ -Wert und dem gemessenen  $CO_2$ -Wert steht. Für Viertaktmotoren steht im Zähler dieses Bruches der Wert 15. Durch den Bruch wird ein Verhältnis aus der Summe von  $CO$  und  $CO_2$  zu dem Wert 15 im Zähler gebildet, womit der Korrekturfaktor den gemessenen  $CO$ -Wert auf eine Gesamtsumme von  $CO$  und  $CO_2$  von 15 vol % korrigiert.

Hinter diesem Vorgehen steht die Annahme, dass die Summe aus  $CO$  und  $CO_2$  bei modernen Viertakt-Ottomotoren mit einem stöchiometrischen Luft-Kraftstoff-Gemisch bei der Verbrennung einen Anteil von 14,7 vol % an den gesamten Abgasen hat [5]. Vereinfacht wird in der Formel als gerundeter Wert 15 % vol angenommen. Liegt die Summe von  $CO$  und  $CO_2$

---

bei der Endrohrmessung unter den 15 *vol* %, wird von einer Vermischung der Abgase mit Frischluft an dem Messpunkt ausgegangen und der *CO*-Messwert entsprechend hochkorrigiert.

Bei Zweitaktmotoren wird zu einem Wert von 10 *vol* % korrigiert. Dies ist darin begründet, dass bei dem Zweitaktarbeitsverfahren ein wesentlich höherer Anteil von unverbrannten Kohlenwasserstoffen im Abgas zu finden ist. Hinzu kommen Durchspülungsverluste beim Ladungswechsel, wodurch weiterer unverbrannter Kraftstoff sowie Frischluft im Abgas vorkommen [8]. Folglich wird von einem geringeren Anteil des *CO* und *CO*<sub>2</sub> an den gesamten Abgasen ausgegangen. Es werden vereinfacht 5 % *vol* in der Formel abgezogen, wodurch sich der Wert im Zähler zu 10 ergibt.

Da die Korrekturformeln aus einem mathematischen Produkt bestehen, können sie nur angewendet werden, wenn der unkorrigierte *CO*-Messwert ungleich null ist. Kann die Messsonde gar nicht in das Endrohr eingeführt werden, schließt sich die Anwendung der Korrekturformeln damit aus. Eine minimale Einführungstiefe der Messsonde zur Verwendung der Formeln ist jedoch nicht in der AU-Richtlinie spezifiziert.

Die Verwendung der Korrekturformeln kommt im Gegensatz zu der Adaption ohne zusätzliche Hilfsmittel aus. Da jedoch ein *CO*<sub>2</sub>-Messwert benötigt wird, muss immer ein 4-Gas-Messgerät für die Abgasuntersuchung genutzt werden. Mit einem *CO*-Messgerät allein können die Formeln nicht verwendet werden.

---

## 3 Forschungsdesign und Material

Im nachfolgenden Abschnitt sollen die Ansätze zur Lösung der vorliegenden Aufgabenstellung sowie das dazu angewandte methodische Vorgehen beschrieben werden. Außerdem soll ein Überblick über die dafür zur Verfügung stehenden Materialien und die verwendeten Ressourcen in dieser Ausarbeitung gegeben werden.

### 3.1 Forschungsfrage und methodisches Vorgehen

Die Aufgabenstellung der Bachelorarbeit ist es, zu überprüfen und zu bewerten, bis zu welcher Einführungstiefe der Messsonde die Korrekturformeln für  $CO$ -Messwerte angewendet werden können. Da auf diesem Themengebiet jedoch auf keine Vorkenntnisse zurückgegriffen werden kann, soll die übergeordnete Aufgabenstellung in kleinere einzelne Forschungsfragen aufgeteilt werden, die im Rahmen der nachfolgenden Untersuchungen untersucht werden sollen.

Um überprüfen zu können, bis zu welcher Einführungstiefe der Messsonde die Korrekturformeln anwendbar sind, muss zunächst eine Anforderung an die maximale Abweichung der korrigierten  $CO$ -Werte gegenüber dem Messwert des unverfälschten  $CO$ -Gehaltes in den Abgasen definiert werden. Bei einer idealen Anwendung der Korrekturformeln wären diese Abweichungen vernachlässigbar klein. Bei der realen Anwendung ist jedoch beispielsweise durch Messfehler eine Abweichung zu erwarten. Daher ist es notwendig, einen Orientierungswert für eine zulässige Abweichung festzulegen, die im Rahmen der AUK noch als zielführend betrachtet werden kann. Damit ergibt sich die folgende erste Forschungsfrage:

1. Welche Genauigkeit der korrigierten  $CO$ -Werte gegenüber dem Messwert des unverfälschten  $CO$ -Gehaltes in den Abgasen kann als hinreichend genau angenommen werden?

Die Anwendung der Korrekturformeln basiert auf der Annahme, dass es in Folge der Pulsation der Abgase im Endrohr zu einer Vermischung der Abgase mit Frischluft kommt (vgl. Kapitel 2.1.3), wodurch die Schadstoffkonzentration gesenkt und damit die  $CO$ -Messwerte verfälscht werden. Die Korrekturformeln sollen diesen Einfluss der Frischluftvermischung korrigieren. Es ist daher grundlegend zunächst festzustellen, ob die in der Theorie betrachtete Frischluftvermischung sich auch in den realen Messwerten widerspiegelt und damit eine Anwendung der Korrekturformeln notwendig ist. Die zweite Forschungsfrage lautet daher wie folgt:

2. Ist ein Einfluss der Vermischung der Abgase mit Frischluft und eine daraus resultierende Verfälschung der  $CO$ -Messwerte erkennbar?

---

Eine Anwendung der Korrekturformeln zur Korrektur der  $CO$ -Messwerte ist im Rahmen der AUK nur dann zielführend, wenn die korrigierten  $CO$ -Werte keine ausgeprägte Abweichung zu dem Messwert des unverfälschten  $CO$ -Gehaltes in den Abgasen aufweisen. Daher gilt es mit der dritten Forschungsfrage diese Abweichung festzustellen und unter den zuvor erlangten Erkenntnissen und der formulierten Anforderung zu bewerten:

3. Welche Differenzen können zwischen den korrigierten  $CO$ -Werten und dem Messwert des unverfälschten  $CO$ -Gehaltes in den Abgasen festgestellt werden?

Die zentrale Forschungsfrage dieser Bachelorarbeit impliziert außerdem, dass die Genauigkeit der korrigierten  $CO$ -Werte an die Einführungstiefe der Messsonde in das Endrohr gekoppelt ist, wodurch mit Erreichen eines Grenzwertes die Anwendung der Korrekturformeln nicht mehr zielführend ist. Diese Hypothese gilt es mit der vierten Forschungsfrage zu beantworten:

4. Ist eine Abhängigkeit der Genauigkeit der korrigierten  $CO$ -Werte gegenüber dem unverfälschten  $CO$ -Gehalt von der Einführungstiefe der Messsonde festzustellen?

Um die vier aufgestellten Forschungsfragen beantworten zu können, sollen quantitative Forschungsmethoden in Form von Experimenten angewendet werden. Dazu sollen bei verschiedenen Krafrädern Messreihen durchgeführt werden, bei denen der  $CO$ -Gehalt im Endrohr für verschiedene Einführungstiefen der Messsonde erfasst wird. Es hat sich bereits durch Vorversuche gezeigt, dass die Aufnahme von diesen Messreihen einem hohen zeitlichen Aufwand bedarf. Da der überwiegende Teil der Krafräder in dieser Untersuchung jedoch nicht für einen längeren Zeitraum zur Verfügung steht, kann an diesen lediglich jeweils eine einzelne Messreihe aufgenommen werden. Für die Beantwortung der Forschungsfrage ergibt sich dadurch folgende Problematik:

Da es kaum zugängliche Informationen auf dem Gebiet der Abgasuntersuchung bei Krafrädern gibt, ist auch die zu erwartende Qualität der Messergebnisse nicht bekannt. Starke Messabweichungen oder zufällige Ereignisse könnten sich in den Ergebnissen widerspiegeln, deren Auswertung und Interpretation dadurch erheblich erschwert werden und an Aussagekraft verlieren. Eine allgemeine Möglichkeit, diesen Einfluss der zufälligen Messabweichungen zu beseitigen, wäre die mehrfache Wiederholung der Messreihen an jedem Krafrad und die Bildung von Mittelwerten aus den gewonnenen Messwerten. Aufgrund der zeitlich beschränkten Verfügbarkeit der Krafräder stellt dies jedoch keine Möglichkeit für diese Untersuchung dar.

Alternativ sollen daher an den zwei einzigen Krafrädern, die über einen längeren Zeitraum zur Verfügung stehen, mehrere Messreihen aufgenommen werden. Anhand dieser Messreihen

---

soll die Reproduzierbarkeit der  $CO$ -Endrohrmessung und damit die erwartbaren Messabweichungen bewertet werden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse können dann als allgemeine Orientierung bei der Beantwortung der Forschungsfragen an den anderen Krafrädern herangezogen werden. Die Interpretation von Auffälligkeiten in den Messergebnissen würde damit zusätzlich an Aussagekraft gewinnen, da abgeschätzt werden kann, ob diese im Bereich erwartbarer zufälliger Messabweichungen liegen oder zu berücksichtigende Besonderheiten darstellen.

Es sollen daher drei Untersuchungen durchgeführt werden, wobei sich die Erste mit der Reproduzierbarkeit der  $CO$ -Endrohrmessung und die Zweite mit den erwartbaren Anforderungen an die Genauigkeit der Korrekturformeln beschäftigt, während sich die dritte Untersuchung der Beantwortung der verbleibenden Forschungsfragen unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse widmet. Im Folgenden sollen diese tiefergehend dargelegt werden.

### **3.1.1 Untersuchung 1: Reproduzierbarkeit und Abweichungen**

Mit Hilfe der ersten Untersuchung soll die Qualität der aus den Messreihen gewonnenen Messdaten eingeordnet und eine Orientierung für die erwartbaren Messabweichungen erarbeitet werden. Dazu wird die Reproduzierbarkeit der Messwerte bei verschiedenen Messreihen betrachtet.

#### Reproduzierbarkeit der Messungen

Die Messung des  $CO$ - und  $CO_2$ -Gehaltes im Rahmen der Abgasuntersuchung bei Krafrädern unterliegt einer Vielzahl von Einflüssen, die Auswirkungen auf die Messergebnisse haben könnten. Auf der einen Seite stehen dabei die Umweltbedingungen wie Umgebungslufttemperatur und Umgebungsluftdruck. Auf der anderen Seite sind die Messgrößen selbst dynamisch und können sich somit im Laufe der Messung verändern. Wie aus den theoretischen Grundlagen hervorgeht, sind die Schadstoffkonzentrationen in den Abgasen erheblich von der Qualität der Verbrennung im Motor, der Motordrehzahl sowie gegebenenfalls von der Umsetzungseffizienz des Katalysators abhängig (vgl. Kapitel 2.1.1 und Kapitel 2.1.2). Gerade die Motordrehzahl unterliegt bei der Messung mit einer erhöhten Drehzahl dem menschlichen Einfluss der prüfenden Person. Es lässt sich demnach nicht ausschließen, dass die Messergebnisse der Messreihen davon deutlich beeinflusst werden.

Da es für die Beantwortung der einzelnen Forschungsfragen notwendig ist, konkrete Messwerte der einzelnen Messreihen miteinander zu vergleichen, ist es unerlässlich, zunächst deren Qualität einzuordnen, um die Aussagekraft der erlangten Erkenntnisse zu bewerten. Um

---

die erwartbare Qualität der Messwerte zu bewerten und mögliche Abweichungen feststellen zu können, werden an zwei Krafträdern jeweils wiederholte Messreihen nach demselben Ablauf sowie unter denselben Bedingungen der zweiten Untersuchung aufgenommen und anschließend miteinander verglichen. Werden bei den wiederholten Messreihen für die jeweiligen Messpunkte nur geringe Differenzen festgestellt, ist davon auszugehen, dass eine gute Reproduzierbarkeit vorliegt und ein Vergleich der Messwerte innerhalb einer Messreihe aussagekräftig ist. Große Differenzen würden auf eine schlechtere Reproduzierbarkeit hindeuten und die Interpretation von Auffälligkeiten erschweren.

#### Abweichungen der korrigierten $CO$ -Werte

Neben den direkten Messwerten des  $CO$ - und  $CO_2$ -Gehaltes, soll auch die Reproduzierbarkeit der korrigierten  $CO$ -Werte betrachtet werden. Da die fehlerbehafteten Messwerte von  $CO$  und  $CO_2$  mit den Korrekturformeln verwendet werden, nehmen die Messabweichungen beider Messgrößen Einfluss auf den korrigierten  $CO$ -Wert. Bei den Korrekturformeln handelt es sich zudem um ein mathematisches Produkt, wodurch die Messabweichungen multiplikativ in das Ergebnis eingehen. Es ist daher zu erwarten, dass es zu einer Fehlerfortpflanzung kommt und sich die Abweichung der korrigierten  $CO$ -Werte anders zeigt als die der ursprünglichen Messwerte [19]. Daher soll zusätzlich die zu erwartende Streuung der korrigierten  $CO$ -Werte anhand der wiederholten Messreihen betrachtet werden. Eine Kenntnis über diese Streuung ist besonders wichtig, da die korrigierten  $CO$ -Werte später mit den  $CO$ -Messwerten am vorgeschriebenen Messpunkt verglichen werden sollen. Bei einer zu großen Streuung der korrigierten  $CO$ -Werte wäre dieser Vergleich nicht zweckmäßig bzw. stark eingeschränkt aussagekräftig.

### **3.1.2 Untersuchung 2: Anforderung an die Genauigkeit der korrigierten $CO$ -Werte**

Um die Korrekturformeln auf deren Anwendbarkeit überprüfen zu können, müssen Anforderungen an deren Genauigkeit aufgestellt werden, die von den korrigierten  $CO$ -Werten einzuhalten sind. Dafür soll die Endrohr-Adaption herangezogen werden. In der AU-Richtlinie stellt die Endrohr-Adaption für die meisten Anwendungsfälle die einzige Alternative zu den Korrekturformeln dar, um bei nicht ausreichender Einführungstiefe der Messsonde zulässige  $CO$ -Messwerte zu ermitteln. Um demnach eine Anwendung der Korrekturformeln zu rechtfertigen, sollten die korrigierten  $CO$ -Werte idealerweise eine mindestens gleichwertige oder geringere Abweichung zu dem unverfälschten  $CO$ -Gehalt der Abgase als die Verwendung der Endrohr-Adaption erzielen. Dazu wird bei jedem Kraftrad im Rahmen der Messungen ein Vergleichswert mit Endrohr-Adaption aufgenommen. Dieser wird mit dem Messwert des unverfälschten  $CO$ -Gehaltes der jeweiligen Messreihe verglichen, um die Genauigkeit zu

---

bestimmen, welche in der dritten Untersuchung ebenfalls als Orientierungswert dienen kann. Mit Hilfe dieser Untersuchung soll somit die erste Forschungsfrage beantwortet werden.

### **3.1.3 Untersuchung 3: Bewertung der Korrekturformeln**

Es verbleiben noch drei weitere Forschungsfragen, dieser Forschungsarbeit, welche es in der dritten Untersuchung zu beantworten gilt. Dazu sollen bei Krafträdern Messreihen des  $CO$ -Gehaltes über die Einführungstiefe der Messsonde aufgenommen und anschließend ausgewertet werden. Dabei wird es als sinnvoll erachtet, eine Vielzahl von unterschiedlichen Krafträdern in diese Messreihen einzubeziehen, um auszuschließen, dass es sich bei den erlangten Ergebnissen und Erkenntnissen um kraftradspezifische Besonderheiten handelt, die nicht auf den allgemeinen Kraftradbestand übertragen werden können.

Um zunächst die grundlegende Notwendigkeit der Korrekturformeln zu bestätigen, muss die Verfälschung der  $CO$ -Messwerte durch die Umgebungsluftvermischung festgestellt werden. Durch die Erfassung der  $CO$ -Gehalte in den Abgasen über die Einführungstiefe der Messsonde sollte ein möglicher Einfluss der Umgebungsluftvermischung durch einen mit Verringerung der Einführungstiefe abfallenden  $CO$ -Gehalt bemerkbar werden. Anhand dessen soll die zweite Forschungsfrage untersucht werden.

Um die Genauigkeit der Korrekturformeln zu bestimmen, welche Inhalt der dritten Forschungsfrage ist, werden die Korrekturformeln auf alle Messwerte der zuvor aufgenommenen Messreihen angewendet, bei denen die Einführungstiefe weniger als  $300\text{ mm}$  beträgt. Die dementsprechend korrigierten  $CO$ -Werte können dadurch mit dem  $CO$ -Gehalt eines Messpunktes verglichen werden, welcher nicht durch den Einfluss einer Umgebungsluftvermischung verfälscht ist. Da somit die Genauigkeit der Korrekturformeln für verschiedene Einführungstiefen der Messsonde bewertet werden kann, sollte folglich auch festzustellen sein, ob eine Abhängigkeit dieser Genauigkeit von der Einführungstiefe besteht. Dadurch soll auch die vierte Forschungsfrage beantwortet werden. Die Bewertung der Genauigkeit soll dabei unter Berücksichtigung der zuvor erlangten Erkenntnisse und definierten Anforderungen aus der ersten und zweiten Untersuchung erfolgen.

In der AU-Richtlinie ist eine minimale Einführungstiefe der Messsonde in das Endrohr von  $300\text{ mm}$  gefordert, wodurch eine Verfälschung der  $CO$ -Messwerte bei der AUK durch den Einfluss von Frischluft ausgeschlossen werden soll. Die Messsonden, die mit den Abgasuntersuchungsgeräten Verwendung finden, weisen dabei in der Regel eine Länge unwesentlich größer als der geforderten Mindesteinführungstiefe auf. Es ist demnach davon auszugehen, dass die Erfassung der  $CO$ -Messwerte bei der AUK bei einer Einführungstiefe

von etwa 300 mm stattfindet. Daher soll dieser Messpunkt in den nachfolgenden Untersuchungen als Referenzwert für die Bewertung der korrigierten  $CO$ -Werte herangezogen werden. Der Messpunkt und der zugehörige  $CO$ -Messwert werden demnach nachfolgend als Zielpunkt und Zielwert bezeichnet.

### 3.2 Messtechnik

Zur Datenerhebung für die zuvor dargelegten Untersuchungen kommt als zentrales Messgerät zur Aufnahme der Messreihen das Abgasuntersuchungssystem *BEA950* der Robert Bosch GmbH zum Einsatz. Dieses verfügt über die notwendigen Einrichtungen, um sowohl Diesel- als auch Benzinabgase zu untersuchen. Die Benzinabgase werden dabei mittels des integrierten Abgasmessgerätes *BEA060* analysiert und deren Zusammensetzung bestimmt. Bei dem *BEA060* handelt es sich um ein sogenanntes 4-Gas-Messgerät. Mit diesem können die Konzentration der vier Gase  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $HC$  sowie  $O_2$  im Abgas ermittelt werden. Es kommen dabei zwei Verfahren zum Einsatz. Die Konzentration von  $CO$ ,  $CO_2$  und  $HC$  kann durch einen Drei-Gas-Sensor festgestellt werden, welcher sich das nicht-disperses Infrarotlichtverfahren zu Nutze macht. Für die Bestimmung des  $O_2$ -Gehaltes wird ein separater chemisch-galvanischer Sensor eingesetzt. Diese beiden Messverfahren erlauben es dem Abgasmessgerät in der Genauigkeitsklasse *Class 0* nach OIML R99 Ed.1998 zu messen, wodurch es für die Abgasuntersuchung im Rahmen der periodischen HU bei Krafträdern zugelassen ist. Die Eichung des eingesetzten *BEA060* ist zum Zeitpunkt der Messungen gültig. Die konkreten Angaben zur Messgenauigkeit des *BEA060* nach Tabelle 1 aus dem offiziellen Datenblatt lauten wie folgt:

Tabelle 1: Messgenauigkeit und Auflösung des Bosch BEA060

Gas	Messbereich	Messgenauigkeit	Auflösung
Kohlenmonoxid	0 bis 10 % vol	$\pm 0,03$ % vol	0,001 % vol
Kohlendioxid	0 bis 18 % vol	$\pm 0,4$ % vol	0,01 % vol
Kohlenwasserstoff	0 bis 9999 ppm vol	$\pm 1$ ppm vol	1 ppm vol
Sauerstoff	0 bis 22 % vol	$\pm 0,1$ % vol	0,01 % vol

Quelle: [20]

Da das *Bosch BEA950* im 4-Gas-Messmodus keine Motordrehzahl erfassen und anzeigen kann, wird bei Krafträdern ohne eigene Drehzahlanzeige zusätzlich der induktive Drehzahl-aufnehmer eines *Bosch BEA550* Abgasuntersuchungssystems verwendet.

Um die Umgebungsbedingungen der Messungen zu dokumentieren, kommt ein kombinierter Temperatur-, Luftfeuchtigkeits- und Luftdrucksensor zum Einsatz. Es handelt sich dabei um den *PTH200-USB* der Dracal Technologies Inc., dessen Messwerte über die Software *QTenki* auf einem Notebook dargestellt werden.

Zur Bestimmung der Einführungstiefe der Messsonde in das Endrohr wird ein geeichtes Maßband mit Millimeterskalierung genutzt. Die Länge der Messsonde des verwendeten Abgasmessgerätes erlaubt dabei eine maximale Einführungstiefe von 315 mm.

### 3.3 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau bei der Durchführung der Messreihen soll den realen Bedingungen der AUK entsprechen. Dazu werden die Messreihen in der Prüfhalle der GTÜ-Prüfstelle im Kisdorfer Weg 34 in Kaltenkirchen durchgeführt. Die Halle ist vollständig geschlossen, wodurch während der Messreihen annähernd gleichbleibende Umgebungsbedingungen geschaffen werden können.

Die genaue Versuchsanordnung lässt sich der Abbildung 11 entnehmen. Bei den Versuchen steht das Kraftrad auf dem Seitenständer im Mittelpunkt der Versuchsanordnung. Das Abgasuntersuchungssystem *BEA950* ist so aufgestellt, dass der Prüfende die Motordrehzahl des Kraftrades halten und gleichzeitig die Messwerte aufnehmen kann.



Abbildung 11: Versuchsaufbau der Messreihen zur CO-Endrohrmessung bei Krafträdern

Kann die Motordrehzahl nicht von einer Anzeige des Motorrads abgelesen werden, wird der induktive Drehzahlaufnehmer eines weiteren Abgasmessgerätes verwendet.

---

Die Messsonde wird an einem Stativ befestigt in das Endrohr eingeführt, wodurch dessen Position genau festgelegt werden kann. Eine Markierung an der Messsonde zeigt die 300 mm Sondenlänge an. Die Endrohr-Adaption wird bei der Verwendung ebenfalls durch ein Stativ an der korrekten Position gehalten und über eine Gummitülle mit dem Auspuffendrohr verbunden. Sie weist eine Länge von 450 mm und einen Innendurchmesser von 40 mm auf.

Aufgrund der Abgasbelastung während der Messungen im Gebäude ist zusätzlich eine Absaugungsanlage notwendig. Um die Messwerte nicht zu beeinflussen ist die Absaugungsanlage in einem Abstand von 1,5 m hinter dem Endrohr platziert. Da für die Aufnahme der Messreihen eine gewisse Zeit benötigt wird, muss bei Krafträdern mit reiner Luftkühlung zusätzlich ein Gebläse aufgestellt werden, um das Überhitzen des Motors im Stand zu verhindern. Hierbei wird darauf geachtet, dass der Luftstrom des Gebläses nur auf den Motorblock und nicht den Bereich der Messung trifft. Sowohl die Absaugungsanlage als auch das Gebläse sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht in Abbildung 11 abgebildet.

### **3.4 Stichprobe der Krafträder**

Nachfolgend soll die Auswahl der Krafträder begründet werden, die in dieser Ausarbeitung untersucht werden. Zunächst sind dabei einschränkende Kriterien zu nennen.

Für die Messungen werden nur nach der AU-Richtlinie untersuchungspflichtige Krafträder in Betracht gezogen. Um einen Zielwert an dem vorgeschriebenen Messpunkt erfassen zu können, sind ebenfalls nur Krafträder von Interesse, bei denen die Messsonde auf 300 mm in das Endrohr eingeführt werden kann.

Probemessungen an vier Krafträdern mit aktueller Abgasreinigungstechnik haben zudem gezeigt, dass diese bei den vorgegebenen Messdrehzahlen geringe CO-Gehalte im Abgas aufweisen, die für das verwendete Abgasmessgerät nicht erfassbar sind. Für die angestrebten Untersuchungen sind diese Krafträder ebenfalls nicht geeignet, da zur Anwendung der Korrekturformeln ein CO-Gehalt größer null notwendig ist. Die Probemessungen und firmeninterne Erfahrungswerte bestätigen, dass dies in der Regel für Krafträder ab Baujahr 2016 nicht der Fall ist.

Da im Umfang dieser Ausarbeitung nur eine beschränkte Anzahl von Messreihen aufgenommen werden kann, ist die statistische Signifikanz dieser Untersuchungen eher gering. Allerdings sollen durch eine gezielte Auswahl der Krafträder trotzdem aussagekräftige Ergebnisse erzeugt werden. Dazu werden gewisse charakteristische Eigenschaften der Krafträder betrachtet. Die ausgewählten Krafträder für diese Untersuchungen der vorliegenden Arbeit sind in der Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Übersicht der zu untersuchenden Krafträder

Kraftrad	Harley Davidson Electra Glide	Honda CB500 (PC32)	Yamaha XVS1100	Honda CBR600RR (PC37)	BMW R1150GS (R21)	KTM 200 EXC	KTM 300 EXC
Baujahr	1992	1999	1994	2006	2002	2015	2015
Hubraum [cm <sup>3</sup> ]	1340	499	1063	599	1139	193	293
Zylinderzahl	V2	Reihe 2	V2	Reihe 4	Boxer 2	1	1
Arbeitsverfahren	4-Takt	4-Takt	4-Takt	4-Takt	4-Takt	2-Takt	2-Takt
Katalysator	keiner	keiner	U-Kat.	G-Kat.	G-Kat.	U-Kat.	U-Kat.
Kraftstoff	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin	Benzin + Schmierstoff	Benzin + Schmierstoff

Unter den sieben ausgewählten Krafträdern befinden sich fünf Krafträder mit Viertaktmotor und zwei mit Zweitaktmotor. Dadurch sind beide motorischen Arbeitsverfahren in den Untersuchungen abgedeckt. Auch die drei gängigen Konzepte zur Abgasreinigung in Krafträdern sind durch geregelte, ungeregelte und nicht vorhandene Katalysatoren vertreten.

Wie aus der theoretischen Betrachtung der Pulsation in Abgasanlagen hervorgeht, ist zu erwarten, dass die Vermischung der Abgase mit Frischluft vor allem bei Krafträdern mit großem Hubraum je Zylinder und einer kurzen Abgasanlage besonders ausgeprägt ist. Diese Eigenschaften sind für die *Harley Davidson Electra Glide* und die *Yamaha XVS1100* zutreffend. Auch die *BMW R1150GS* verfügt über einen Zweizylindermotor mit einem großen Hubraum. Allerdings ist sie mit einer geregelten Gemischaufbereitung und Drei-Wege-Katalysator (U-Kat.) ausgestattet, wodurch geringere *CO*-Messwerte zu erwarten sind. Diese Ausgangskonditionen ermöglichen es die Genauigkeit der Korrekturformeln bei unterschiedlichen Bereichen des *CO*-Gehaltes zu vergleichen.

Am anderen Ende des Spektrums stehen die Honda Modelle *CBR600RR* und *CB500*. Sie verfügen im Vergleich zu den zuvor erwähnten Krafträdern über einen wesentlich geringeren Hubraum je einzeltem Zylinder. Gerade für *CBR600RR* ist das der Fall. Sie verfügt außerdem über einen Vierzylindermotor mit einem einzelnen Endschalldämpfer. Aus der theoretischen Betrachtung heraus sollte damit eine geringe Pulsation und damit eine geringe Umgebungs-luftvermischung der Abgase zu erwarten sein. Die Genauigkeit der Formeln können somit auch für diesen Fall überprüft werden.

Bei den ausgewählten Krafträdern mit Zweitaktmotoren handelt es sich um Enduro-Sport-Motorräder, die mit einer Straßenzulassung auch im Straßenverkehr bewegt werden dürfen. Diese stellen einen der Hauptverwendungszwecke von Zweitaktmotoren in modernen, untersuchungspflichtigen Krafträdern dar und sind daher sehr repräsentativ für diese Untersuchungen [4].

---

Die Wahl für die Untersuchung zur Reproduzierbarkeit der Messungen fällt auf die *KTM 200 EXC* mit Zweitaktmotor und die *BMW R1150 GS* mit Viertaktmotor. Dadurch sind beide motorischen Arbeitsverfahren in dieser Untersuchung abgedeckt. Sie sind außerdem die einzigen Krafträder, die für diese Ausarbeitung über einen längeren Zeitraum zur Verfügung stehen und damit eine Reihe von wiederholten Messungen ermöglichen.

### 3.5 Versuchsdurchführung

Nach der Darstellung des Versuchsaufbaus und der gewählten Stichprobe, soll im Folgenden näher auf die Versuchsdurchführung eingegangen werden. Demnach findet die Aufnahme jeder Messreihe nach einem einheitlichen Ablauf statt. An erster Stelle steht die Erfassung der technischen Daten und Zustandsdaten des Fahrzeuges sowie die geforderten Soll-Daten im Messprotokoll. Die Beschaffung der Soll-Daten für die einzelnen Krafträder erfolgt über die SachVIP, einer zentralen Informationsdatenbank der GTÜ. Außerdem werden im Messprotokoll die Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck vermerkt.

Vor Beginn der eigentlichen Messreihe muss das Kraftrad in den korrekten Betriebszustand versetzt werden. Dazu wird das Kraftrad im Leerlauf auf die geforderte Betriebstemperatur gebracht. Diese ist von der bordeigenen Kühlwassertemperaturanzeige abzulesen. Bei Krafträdern, die nicht über eine solche Anzeige verfügen, wird als Alternative die Öltemperatur an der Ölwanne oder dem Ölfilter mit einem Infrarotthermometer abgenommen. An dieser Stelle wird von der AU-Richtlinie leicht abgewichen. Während die Richtlinie lediglich eine Motortemperatur von mindestens 60 °C oder alternativen Herstellerangaben vorsieht, haben Vorversuche gezeigt, dass bei einigen Krafträdern die vier Messwerte der Abgase auch nach Erreichen dieser Temperaturen noch weiter fallen, was vermutlich in einer weiteren Aufheizung des Motors und Katalysators begründet ist. Daher wird im Aufwärmprozess die Messsonde im Endrohr platziert und gewartet bis die Messwerte annähernd konstant bleiben. Fallen die Messwerte über einen Zeitraum von 60 s nicht mehr, wird der Aufwärmprozess als abgeschlossen angesehen und die Messreihe gestartet.

Der korrekte Betriebszustand umfasst auch die geforderte Messdrehzahl. Bei Krafträdern, welche im Leerlauf gemessen werden, ist festzustellen, ob der eingestellte Leerlauf der geforderten Messdrehzahl entspricht und stabil gehalten wird. Bei Messungen mit einer erhöhten Messdrehzahl ist diese durch den Prüfenden anzufahren und für die Messung konstant zu halten. Um dies zu vereinfachen, wird aus dem zulässigen Drehzahlband eine gerundete Drehzahl gewählt, die eindeutig auf dem Drehzahlmesser abgelesen werden kann. Da die Drehzahl von vielen Krafträdern bei konstanter Gashebelstellung schwankt oder leicht

ansteigt, ist die Verwendung einer mechanischen Arretierung des Gashebels nicht zweckmäßig.

Um das Verhalten des  $CO$ -Gehaltes über die Einführungstiefe der Messsonde zu erfassen, werden Messwerte an elf Messpunkten in einem Abstand von  $30\text{ mm}$  aufgenommen. Begonnen wird die Messreihe bei der geforderten Mindesteinführungstiefe von  $300\text{ mm}$ . Wie aus Abbildung 12 zu entnehmen ist, wird diese zwischen dem Ende des Auspuffendrohrs und den Saugöffnungen der Sonde gemessen. Die Einführungstiefe wird von dort aus in der genannten Schrittweite auf  $0\text{ mm}$  Einführungstiefe reduziert. Nach Aufnahme der Messwerte bei  $150\text{ mm}$  und  $0\text{ mm}$  Einführungstiefe werden jeweils erneute Messungen bei  $300\text{ mm}$  Einführungstiefe durchgeführt. Diese beiden Rückvermessungen sollen sicherstellen, dass vergleichbare Bedingungen über die gesamte Messreihe bestehen. Ist zwischen den Rückvermessungen eine erhebliche Diskrepanz festzustellen, kann davon ausgegangen werden, dass sich auch die Bedingungen während der Messreihe stark verändert haben. Für diesen Fall muss die Messreihe wiederholt werden.

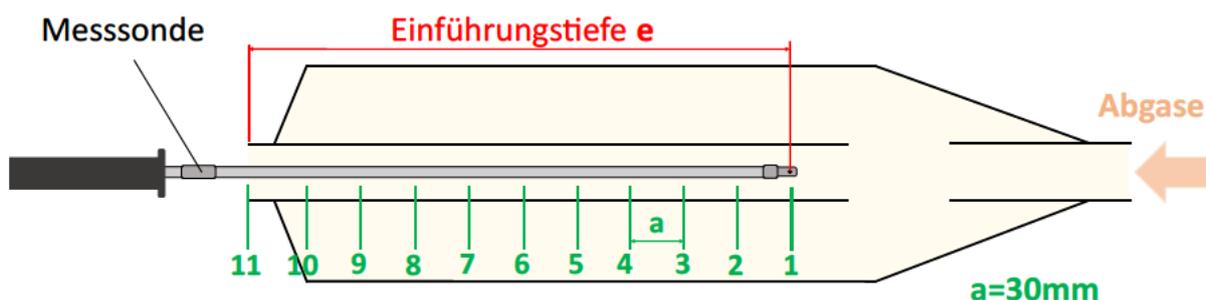


Abbildung 12: Darstellung der Messpunkte im Endschalldämpfer

Für den letzten Messpunkt wird der Trichteraufsatz montiert und ein Messwert bei vollständiger Einführung der Messsonde in den Trichteraufsatz erfasst. Es ergeben sich somit 12 verschiedene Messpunkte in einer Messreihe.

Da die Messung der vier Gaskonzentrationen in den Abgasen unter einer sehr dynamischen Umgebung stattfindet, unterliegen die Messwerte leichten Schwankungen. Es kann jedoch beobachtet werden, dass sich die Messwerte nach einigen Sekunden um einen Wert einpendeln, dieser Wert wird als Messwert notiert.

Aus den vier Gaswerten wird durch das *BEA950* unter der Berechnungsformel nach Brettschneider [21] direkt das Verbrennungsluftverhältnis  $\lambda$  bis zu einem maximalen Wert von  $\lambda = 5$  berechnet und angezeigt, welches ebenfalls im Protokoll erfasst wird. Dadurch werden an jedem Messpunkt vier Messwerte und ein errechneter Wert notiert.

---

## 4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

Nach dem in Kapitel 3.5 beschriebenen Vorgehen wurden Messreihen an insgesamt sieben Krafträdern aufgenommen. Da für die Untersuchung zur Reproduzierbarkeit der Messungen an zwei Krafträdern jeweils vier wiederholte Messreihen aufgenommen wurden, stehen damit insgesamt 13 Messreihen für die drei nachfolgenden Untersuchungen zur Verfügung. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse separat pro Untersuchung dargestellt und interpretiert. Für die erste und zweite Untersuchung soll dabei bereits eine Interpretation der Erkenntnisse erfolgen, um diese bei der Betrachtung der Ergebnisse in der dritten Untersuchung berücksichtigen zu können.

### 4.1 Untersuchung 1

In der folgenden Untersuchung 1 sollen zunächst die wiederholten Messreihen an der *KTM 200 EXC* und der *BMW R1150GS* betrachtet und ausgewertet werden, um die erwartbare Qualität der generierten Messdaten einzuordnen. Im Rahmen der zeitlichen Verfügbarkeit der Krafträder konnten dabei vier Messreihen pro Kraftrad aufgenommen werden, wobei jeweils die Messreihe 1 und 2 bzw. Messreihe 3 und 4 am selben Tag unmittelbar aufeinanderfolgend durchgeführt wurden. Für diese herrschten daher annähernd identische Umgebungsbedingungen.

#### Reproduzierbarkeit der Messungen

Zunächst sollen die direkten Messwerte der Messreihen ausgewertet werden. Diese umfassen je Messreihe die  $CO$ - und  $CO_2$ -Gehalte für elf Messpunkte. Da lediglich vier wiederholte Messreihen durchgeführt werden konnten, ist die statistische Signifikanz dieser Stichprobe gering und eine Auswertung mit statistischen Methoden nicht zielführend. Jedoch sollen die gewonnenen Messwerte dazu genutzt werden, eine Einschätzung der Reproduzierbarkeit und der erwartbaren Messabweichungen bei der Endrohrmessung an Krafträdern zu geben. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt daher mit Hilfe einer grafischen Darstellung. Dazu werden die Messwerte für jeden Messpunkt in einem Diagramm über die Einführungstiefe der Messsonde aufgetragen.

In Abbildung 13 sind die vier Messreihen für die  $CO$ -Gehalte der *KTM 200 EXC* dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, wie die Messwerte für alle Messreihen mit Erhöhung der Einführungstiefe der Messsonde ansteigen. Sie liegen in einem Wertebereich zwischen 0,52 % vol bis 2,99 % vol.

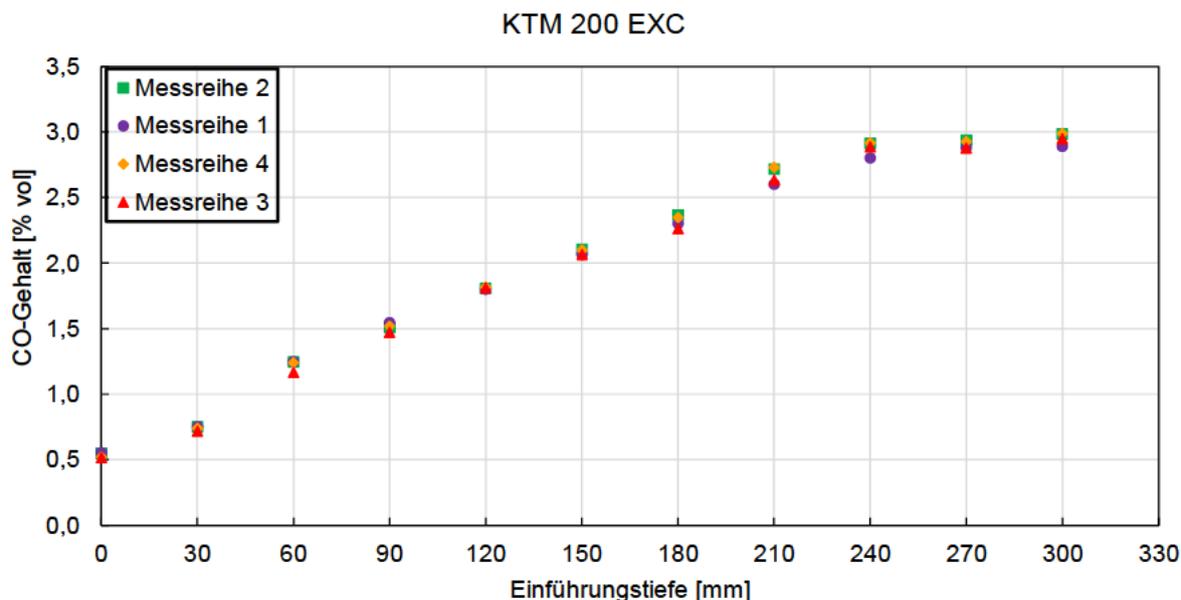


Abbildung 13: Messreihen zur Reproduzierbarkeit der CO-Messung bei der KTM 200 EXC

Ebenfalls auffällig ist, dass die einzelnen Messwerte je Messpunkt über die gesamte Einführungstiefe eng gruppiert liegen. In der grafischen Darstellung lassen sich nur sehr geringe sichtbare Abweichungen zwischen diesen erkennen. Innerhalb dieser Abweichungen ist jedoch eine Tendenz der Messwerte der vierten Messreihe zu erkennen, dass diese für annähernd alle Messpunkte im unteren Bereich der Gruppierung liegen. Die Messwerte der Messreihen 1 und 3 bilden hingegen über die gesamte Einführungstiefe die obere Grenze der der Gruppierung.

Eine ähnlich enge Gruppierung der Messwerte lässt sich auch für die Messreihen des CO-Gehaltes bei der *BMW R1150GS* erkennen, diese sind in Abbildung 14 dargestellt. Es zeigt sich auch hier ein Anstieg der Messwerte mit erhöhter Einführungstiefe der Messsonde. Die absoluten Werte des CO-Gehaltes befinden sich in einem Wertebereich von 0,01 % vol bis 0,21 % vol.

Ebenfalls sind in den Messreihen der *BMW R1150GS* nur sehr geringe Differenzen zwischen den CO-Messwerten der jeweiligen Messpunkte festzustellen, auch wenn die relative Streuung der Messwerte geringfügig größer ist als die der Messreihen an der *KTM 200 EXC*. Unter Berücksichtigung des deutlich kleineren Wertebereiches der Messreihen an der *BMW R1150GS* sind die absoluten Differenzen zwischen den Messwerten für diese Messreihen jedoch geringer einzustufen.

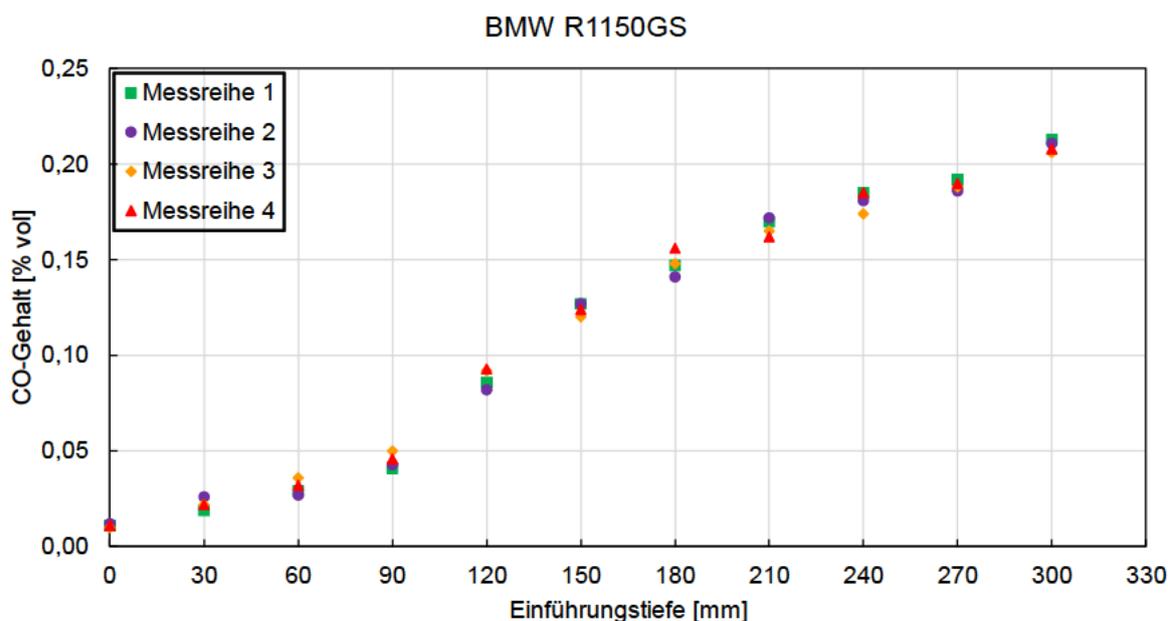


Abbildung 14: Messreihen zur Reproduzierbarkeit der  $CO_2$ -Messung bei der BMW R1150GS

Im Gegensatz zu den Messreihen der *KTM 200 EXC* zeigt sich bei den Messreihen der *BMW R1150GS* keine systematische Anordnung der Messwerte. Die leichten Messabweichungen sind dementsprechend als zufällige Fehler einzuordnen.

Auch für die Messwerte des  $CO_2$ -Gehaltes der *KTM 200 EXC* in Abbildung 15 ist bei erhöhter Einführungstiefe der Messsonde ein deutlicher Anstieg zu erkennen. Im Gegensatz zu den  $CO$ -Konzentrationen lassen sich hierbei jedoch deutlich sichtbare Unterschiede zwischen den Messreihen feststellen.

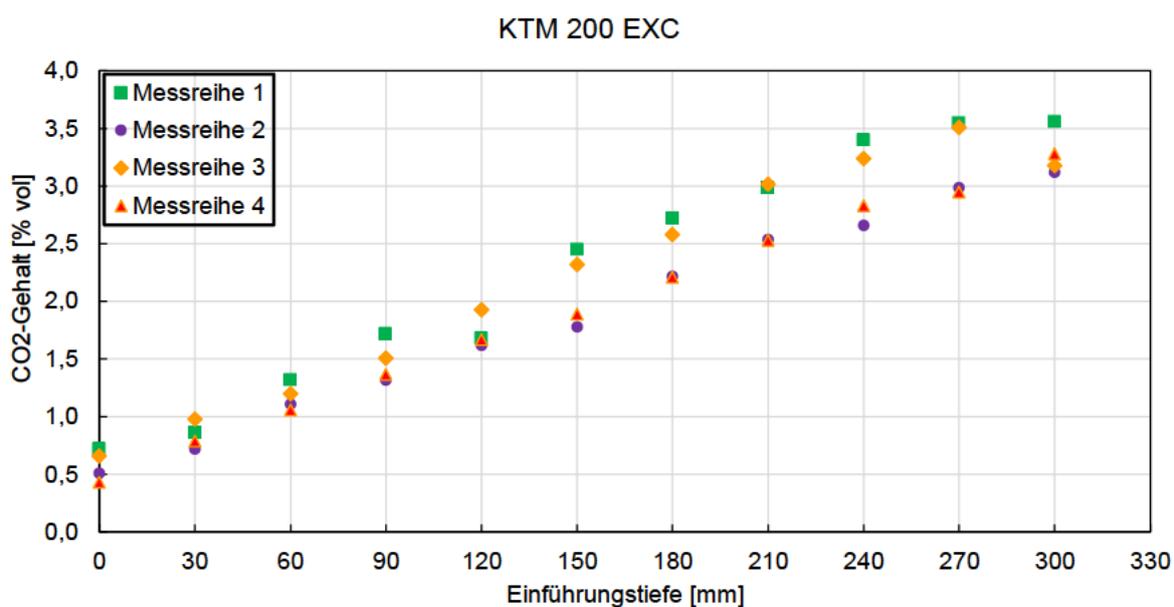


Abbildung 15: Messreihen zur Reproduzierbarkeit der  $CO_2$ -Messung bei der KTM 200 EXC

---

Bereits bei 0 mm Einführungstiefe lässt sich erkennen, dass die Messwerte der Messreihen 1 und 3 deutlich höher als die der Messreihen 2 und 4 liegen, zueinander jedoch jeweils eng gruppiert sind. Diese Tendenz setzt sich für höhere Einführungstiefen fort, wodurch sie weiter ausgeprägt wird. Besonders für die Messpunkte bei 240 mm und 270 mm Einführungstiefe lassen sich dadurch erhebliche Differenzen zwischen den Messreihen erkennen.

Die Abweichungen sind demnach systematisch und durch einen gleichbleibenden Einfluss hervorgerufen. Auffällig ist dabei jedoch, dass sich die Messreihen, welche am selben Tag in einem ähnlichen Zeitraum aufgenommen wurden, stark unterscheiden. Die Umgebungsbedingungen können daher als Ursache für diese Beobachtung ausgeschlossen werden. Eine mögliche Erklärung könnte darin liegen, dass die Messreihen an einem Tag aufeinander folgend durchgeführt wurden. Die jeweils ersten Messreihen eines Tages zeigen dabei höhere  $CO_2$ -Konzentrationen als die darauffolgenden Messreihen des gleichen Tages. Es wäre daher anzunehmen, dass die Krafträder in den zweiten Messungen noch aus den vorhergehenden Messungen vorgewärmt waren, wodurch bei den Messwerten bei großen Einführungstiefen, welche am Anfang der Messreihe entstehen, bereits eine bessere Umsetzungseffizienz des Katalysators bzw. eine bessere Qualität der Verbrennung vorliegt, welche in niedrigeren Messwerten resultiert. Auffällig ist, dass sich diese Unterschiede nicht in den Messreihen der  $CO$ -Gehalte widerspiegeln. Ungeachtet der systematischen Abweichungen zwischen den Messreihen 1 und 3 zu Messreihen 2 und 4, zeigen sich zwischen den Messwerten der Messreihen mit gleicher Tendenz nur geringe Abweichungen. Dies deutet auf einen geringen Einfluss zufälliger Messabweichungen hin.

Die Messreihen des  $CO_2$ -Gehaltes für die *BMW R1150GS* sind in Abbildung 16 dargestellt. Auch diese Messwerte steigen mit Erhöhung der Einführungstiefe der Messsonde an, bilden für die letzten vier Messpunkte jedoch ein Plateau. Im Vergleich zu den Messreihen bei der *KTM 200 EXC* zeigen sich die Messwerte der einzelnen Messpunkte sehr eng gruppiert, es lassen sich nur geringe Differenzen erkennen. Auch werden keine systematischen Abweichungen sichtbar. Sie weisen damit eine ähnlich gute Reproduzierbarkeit wie die Messreihen der  $CO$ -Konzentration auf.

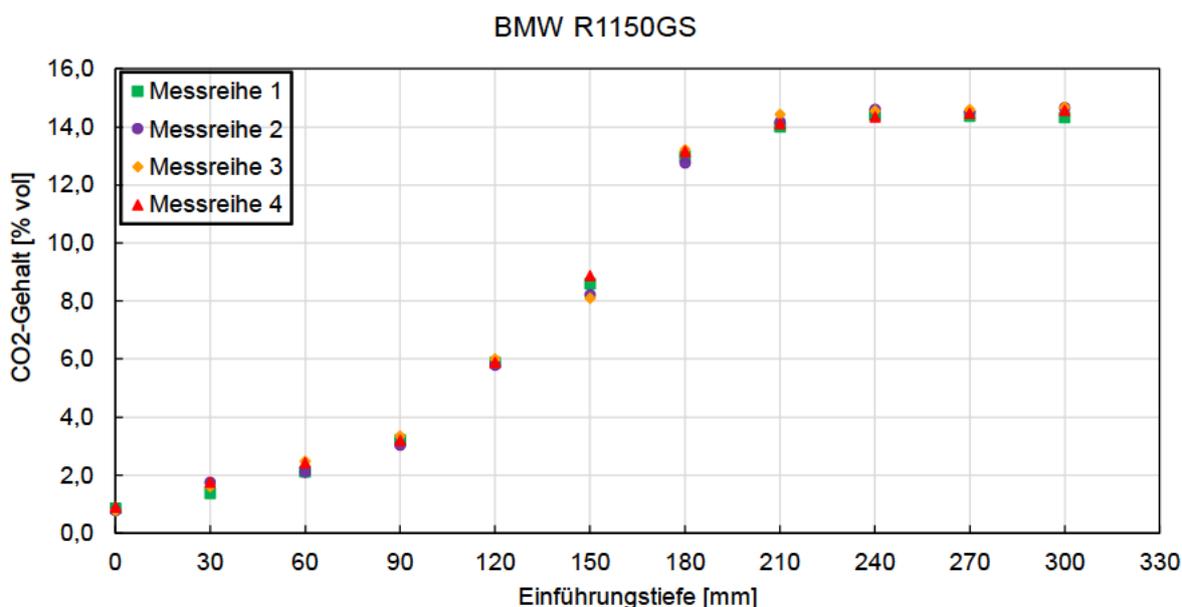


Abbildung 16: Messreihen zur Reproduzierbarkeit der  $CO_2$ -Messung bei der BMW R1150GS

### Streuung der korrigierten $CO$ -Werte

Die korrigierten  $CO$ -Werte werden durch die Anwendung der Korrekturformeln auf die  $CO$ -Messwerte der jeweils vier Messreihen je Kraftrad errechnet. Da somit die Messabweichungen der  $CO$ - und  $CO_2$ -Messwerte in die korrigierten  $CO$ -Werte einfließen, ist durch die Fehlerfortpflanzung eine größere Streuung als bei den  $CO$ -Messwerten zu erwarten. Die korrigierten  $CO$ -Werte sollen daher nachfolgend grafisch dargestellt werden. Sie werden dazu in einem Diagramm über die Einführungstiefe der Messsonde aufgetragen. Zur Orientierung ist ebenfalls der Mittelwert aus den unkorrigierten  $CO$ -Messwerten für jeden Messpunkt eingezeichnet.

In Abbildung 17 ist das zugehörige Diagramm für die Messreihen der *KTM 200 EXC* zu sehen. Deutlich zu erkennen ist die sichtbare Streuung der korrigierten  $CO$ -Werte, welche sich wesentlich ausgeprägter zeigt als die der direkten  $CO$ -Messwerte. Zudem spiegeln sich in diesen Werten die systematischen Unterschiede zwischen den Messreihen 1 und 3 zu Messreihen 2 und 4 wider, wie sie bereits in den  $CO_2$ -Messwerten erkannt werden konnten. Die Streuung der korrigierten  $CO$ -Werte ist demnach deutlich von den Abweichungen der  $CO_2$ -Messwerte abhängig. Jedoch lässt sich über die gesamte Einführungstiefe eine konstante Streuung der korrigierten  $CO$ -Werte beobachten. Nur für die Einführungstiefen von  $0\text{ mm}$  und  $30\text{ mm}$  ist eine größere Abweichung der korrigierten  $CO$ -Werte zu erkennen. Da für den  $CO_2$ -Gehalt eine breitere Streuung der Messwerte bei höheren Einführungstiefen zu erkennen ist,

deutet diese Beobachtung darauf hin, dass die Streuung der korrigierten  $CO$ -Werte von einem weiteren Faktor beeinflusst wird.

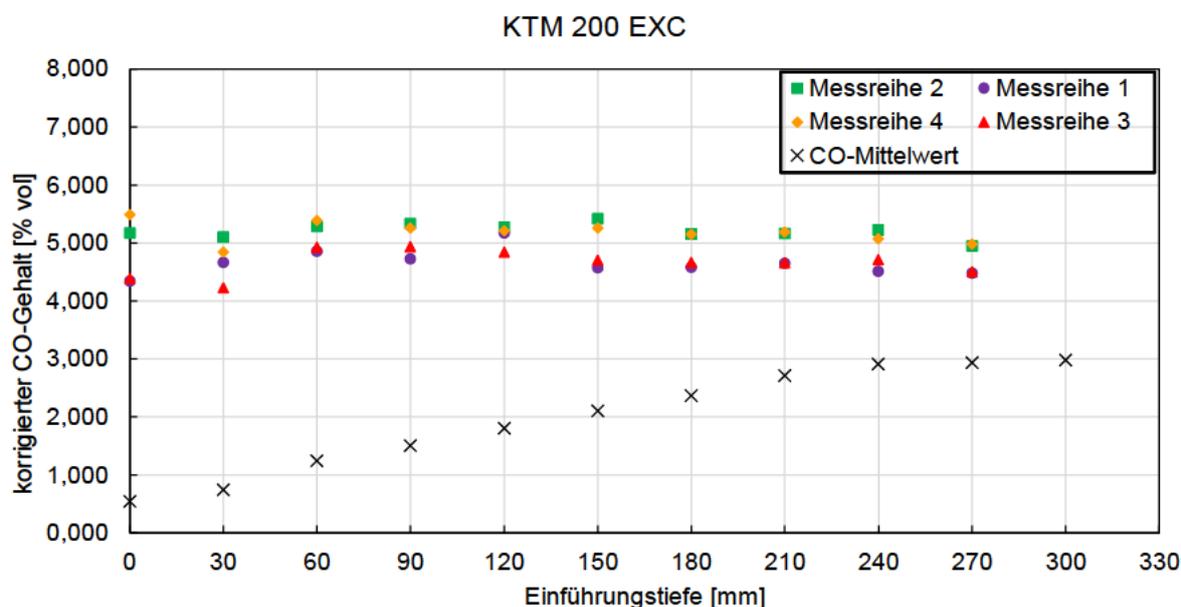


Abbildung 17: Darstellung der korrigierten  $CO$ -Werte bei der KTM 200 EXC

In Abbildung 18 sind die korrigierten  $CO$ -Messwerte für die *BMW R1150GS* dargestellt. Auch hier lässt sich deutlich erkennen, dass die korrigierten  $CO$ -Werte eine stärkere Streuung als die  $CO$ -Messwerte aufweisen. Auffällig ist dabei, dass diese Streuung der Werte vor allem für geringe Einführungstiefen wesentlich ausgeprägter ist und mit höheren Einführungstiefen abnimmt.

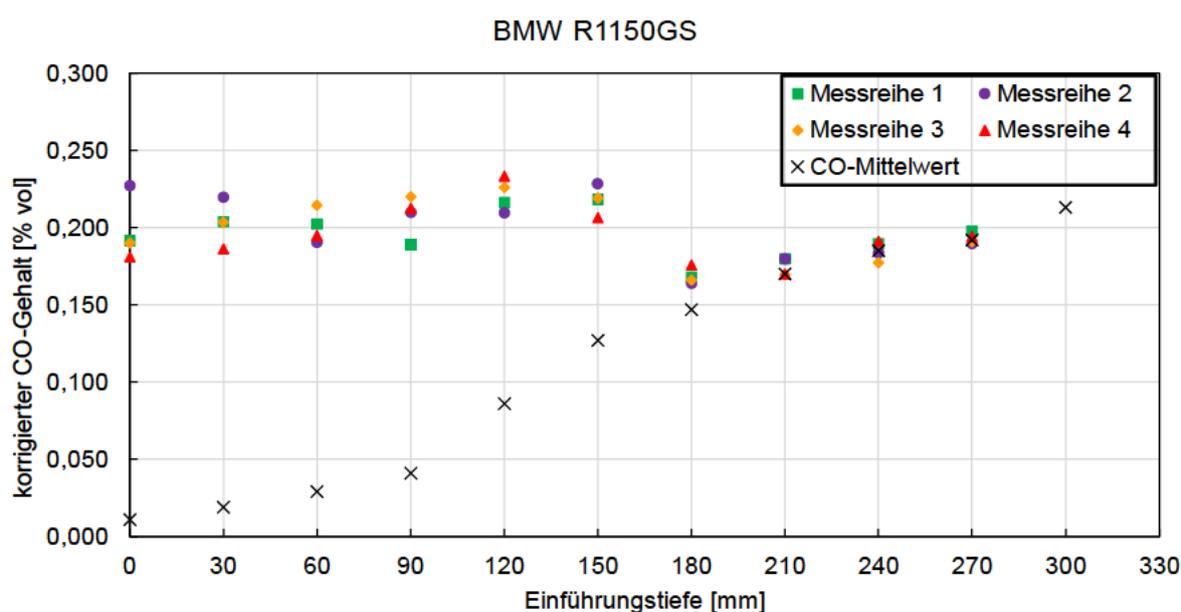


Abbildung 18: Darstellung der korrigierten  $CO$ -Messwerte bei der *BMW R1150GS*

---

Werden im Vergleich dazu die Mittelwerte der  $CO$ -Messwerte betrachtet, zeigt sich, um welchen Betrag die Messwerte korrigiert wurden. Dabei wird deutlich, dass die Streuung bei großen Einführungstiefen, bei denen die  $CO$ -Messwerte nur geringfügig korrigiert werden, sehr gering ist. Bei geringen Einführungstiefen, für die es zu einer sehr ausgeprägten Korrektur der Messwerte kommt, wird auch die breitere Streuung der korrigierten  $CO$ -Werte beobachtet. Diese Beobachtung ist in dem Aufbau der Korrekturformeln als mathematisches Produkt aus dem  $CO$ -Messwert und einem Korrekturfaktor zu begründen. Bei einem sehr großen Korrekturfaktor wird der  $CO$ -Messwert und mit diesem auch die aufgeprägten Abweichungen um ein Vielfaches multipliziert, wodurch eine breitere Streuung zu beobachten ist.

Auch für die Messreihen der *KTM 200 EXC* findet eine stärkere Korrektur der  $CO$ -Messwerte bei geringen Einführungstiefen statt, wenn auch weniger ausgeprägt als bei der *BMW R1150GS*. Jedoch überlagert sich dieser Einfluss mit der größeren Streuung der  $CO_2$ -Messwerte bei größeren Einführungstiefen, wodurch sich über die gesamte Einführungstiefe eine annähernd konstante Abweichung der korrigierten  $CO$ -Werte zueinander zeigt.

#### Zwischenfazit für Untersuchung 1

Der Vergleich der jeweiligen Messreihen der Krafträder hat gezeigt, dass zwischen den einzelnen Messwerten verschiedener Messreihen bei der direkten  $CO$ -Messung nur geringe Abweichungen zu erkennen sind. Dies deutet auf eine gute Reproduzierbarkeit der Messungen hin. Für die nachfolgenden Untersuchungen kann demnach davon ausgegangen werden, dass trotz der umfassenden Anzahl an variablen Einflüssen bei der Abgasuntersuchung nur eine relativ geringe Abweichung der Messwerte zu erwarten ist. Dem direkten Vergleich zweier  $CO$ -Messwerte kann daher eine große Aussagekraft zugeschrieben werden. Auch für die Messung des  $CO_2$ -Gehaltes konnte eine ähnlich gute Reproduzierbarkeit festgestellt werden, auch wenn bei den Messreihen der *KTM 200 EXC* eine systematische Abweichung ersichtlich wurde. Durch die Anwendung der Korrekturformeln kommt es zu einer deutlichen Verstärkung der Messabweichungen, für welche eine eindeutige Abhängigkeit von der Größe des Korrekturfaktors beobachtet werden konnte. Trotz dieser Erkenntnisse können die korrigierten  $CO$ -Werte für die nachfolgenden Untersuchungen für Vergleiche herangezogen werden, wobei dabei besonders für stark korrigierte Messwerte die Möglichkeit einer ausgeprägten Abweichung berücksichtigt werden sollte.

## 4.2 Untersuchung 2

Eine mögliche Anforderung an die Korrekturformeln soll aus dem Vergleich mit den Messwerten der Endrohr-Adaption aufgestellt werden. Dazu wurden an den untersuchten Krafträdern bei jeder Messreihe zusätzlich  $CO$ -Vergleichswerte mit der Adaption erfasst. Da für diese Untersuchung lediglich eine Adaption mit Gummitülle zur Verfügung stand, war dies für sechs der sieben untersuchten Krafträder möglich. Die erfassten  $CO$ -Werte werden mit dem  $CO$ -Messwert des Zielpunktes bei 300 mm Einführungstiefe verglichen.

In der Tabelle 3 ist der  $CO$ -Gehalt am Zielpunkt und bei Verwendung der Adaption sowie deren Differenz aufgelistet. Für die Krafträder mit Viertaktmotor liegen diese absoluten Differenzen in einem Bereich von 0,02 % *vol* bis 0,41 % *vol*, für die beiden Zweitaktkrafträder bei 1,06 % *vol* und 1,07 % *vol*. Auffällig ist, dass die Differenzen der Messwerte für alle Krafträder positiv sind. Bei der Messung mit Adaption werden also grundsätzlich Messwerte erfasst, die größer als die zugehörigen Zielwerte sind.

Die Erklärung dafür lässt sich in den  $\lambda$ -Werten beider Messpunkte finden. Sie sind ebenfalls in der Tabelle 3 dargestellt. Das Verbrennungsluftverhältnis  $\lambda$  liegt bei einem Ottomotor für den optimalen Fall bei einem Wert nahe  $\lambda = 1$ . Je nach Art der Gemischaufbereitung und deren Regelung kann dieses Verhältnis im realen Betrieb geringfügig davon abweichen. Allerdings muss das Verbrennungsluftverhältnis immer in einem Bereich von  $0,8 < \lambda < 1,4$  liegen, damit überhaupt ein zündfähiges Luft-Kraftstoff-Gemisch vorliegt [5].

Tabelle 3: Messwerte und Differenzen der Vergleichsmessung mit Endrohr-Adaption

Kraftrad	CO-Gehalt [% vol]		Differenz		$\lambda$ -Wert	
	Zielpunkt	Adaption	absolut	relativ	Zielpunkt	Adaption
Yamaha XVS1100	3,79	4,20	0,41	10,8%	1,83	1,45
Harley D. Electra Glide	0,41	0,72	0,31	75,6%	3,51	1,99
Honda CB500	0,25	0,31	0,06	24,0%	2,42	1,12
BMW R1150GS	0,21	0,23	0,02	9,5%	1,02	1,00
KTM 200 EXC	2,89	3,95	1,06	36,6%	1,19	0,86
KTM 300 EXC	3,97	5,04	1,07	27,0%	1,01	0,78

Für die *Yamaha XVS1100* ergibt sich am Zielpunkt ein Verbrennungsluftverhältnis von  $\lambda = 1,83$ , welches eindeutig außerhalb des zündfähigen Bereiches liegt. Es ist also davon auszugehen, dass bereits am vorgegebenen Messpunkt eine Frischluftvermischung stattfindet, wodurch die Abgase verdünnt und ein höherer  $\lambda$ -Wert errechnet wird. Bei Messung mit der Adaption liegt nur noch ein  $\lambda = 1,45$  vor, was auf eine geringere Frischluftvermischung in der Adaption schließen lässt. Diese Veränderung spiegelt sich in einem Anstieg des  $CO$ -

---

Gehaltes zwischen den Messwerten ohne und mit Adaption wider, dieser steigt von 3,79 % *vol* auf 4,20 % *vol* an. Jedoch kann auch dieser  $\lambda$ -Wert noch nicht die unverfälschte Abgaszusammensetzung wiedergeben, die Adaption scheint die Frischluftvermischung grundsätzlich nicht verhindern zu können. Noch auffälliger lässt sich dieser Effekt bei der *Harley Davidson Electra Glide* beobachten. Dort wird am Zielpunkt ein  $\lambda$ -Wert von  $\lambda = 3,51$  gemessen, welcher sich bei Anwendung der Adaption jedoch auf  $\lambda = 1,99$  reduziert. Diese Veränderung macht sich in einem Anstieg von 75,6% des *CO*-Gehaltes zwischen beiden Messpunkten bemerkbar. Es ist damit jedoch noch immer eine ausgeprägte Verfälschung der Abgaszusammensetzung mit Adaption zu erkennen.

Auch am Zielpunkt im Endrohr der *Honda CB500* liegt eine Verdünnung der Abgase mit Frischluft vor, deutlich erkennbar an  $\lambda = 2,42$ . Mit der Endrohr-Adaption kann dieser Wert auf  $\lambda = 1,12$  gesenkt werden. Zwar ist auch bei diesem Wert noch von einer leichten Vermischung der Abgase mit Frischluft auszugehen, jedoch wurde diese stark reduziert. Bei diesem Kraftrad können also durch die Verwendung der Adaption annähernd realistische Verhältnisse für die Messungen mit geringer Frischluftvermischung der Abgase geschaffen werden. Der Unterschied macht sich in einer relativen Differenz von 24,0% zwischen *CO*-Zielwert und *CO*-Messwert mit Adaption bemerkbar.

Bei der *BMW1150GS* lässt sich die Verfälschung der Messwerte am Zielpunkt nicht eindeutig erkennen. Sowohl zwischen den  $\lambda$ -Werten als auch den *CO*-Messwerten treten nur sehr kleine Differenzen auf. Es ist daher nicht zu unterscheiden, ob diese Differenzen auf eine geringe Frischluftvermischung oder allgemeine Messabweichungen zurückzuführen sind. Generell ist jedoch davon auszugehen, dass die Messwerte beider Messpunkte bei diesem Kraftrad die reale Zusammensetzung sehr präzise darstellen, da die  $\lambda$ -Werte sehr nahe  $\lambda = 1$  liegen. Eine ausgeprägte Frischluftvermischung der Abgase kann bei diesem Kraftrad daher für beide Messpunkte ausgeschlossen werden.

Die  $\lambda$ -Werte, die bei den Zweitaktkrafträdern erfasst wurden, unterscheiden sich eindeutig von denen der Viertaktkrafträder. Sowohl bei der *200 EXC* als auch der *300 EXC* sind bereits am Zielpunkt  $\lambda$ -Werte berechnet worden, die denen eines zündfähigen Luft-Kraftstoff-Gemisches entsprechen. Allerdings liegen die errechneten  $\lambda$ -Werte bei Messung mit Adaption wesentlich tiefer, für die *KTM 300 EXC* bei  $\lambda = 0,78$ . Dafür gibt es zwei mögliche Erklärungen. Zum einen werden Zweitaktmotoren in Krafträdern fast ausschließlich mit einem fetten Gemisch, also bei  $\lambda < 1$  betrieben. Grund hierfür ist, dass Zweitaktmotoren über dem Kraftstoff beigemischte Schmierstoffe geschmiert werden. Ein zu mageres Gemisch kann zu erhöhtem Verschleiß oder zu einer Verklemmung des Kolbens führen. Des Weiteren treten bei Zweitaktmotoren grundsätzlich große Spülverluste auf, wodurch unverbrannter Kraftstoff in die Abgase gelangt

[3]. In den Messwerten beider Krafräder ist dies an sehr hohen Konzentrationen von *HC* zu erkennen. Für die *KTM 300 EXC* ist eine *HC*-Konzentration bei Messung mit Adaption von  $12653 \text{ ppm vol}$  gemessen worden. Bei der *Yamaha XVS 1100* mit Viertaktmotor liegt dieser Wert, als Referenz, bei  $91 \text{ ppm vol}$ . Dadurch wird ein wesentlich geringerer  $\lambda$ -Wert aus den Abgasen der Zweitaktkrafträder bestimmt. Das deutet wiederum darauf hin, dass auch bei diesen Krafrädern eine Vermischung der Abgase mit Frischluft am Zielpunkt auftritt. Es ist also auch hier davon auszugehen, dass die Messwerte an dem Zielpunkt nicht die reale Zusammensetzung der Abgase widerspiegeln und verfälscht sind. Dadurch lassen sich auch für die Zweitaktkrafträder erhebliche Differenzen zwischen den *CO*-Messwerten am Zielpunkt und mit der Endrohr-Adaption erkennen. Für die Messwerte des *CO*-Gehaltes mit Adaption kann keine Aussage über eine Verfälschung durch Frischluft gemacht werden, da für den  $\lambda$ -Wert für die unverdünnten Abgase bei Zweitaktmotoren aus genannten Gründen eine Abweichung von dem Literaturwert zu erwarten ist.

#### Zwischenfazit für Untersuchung 2

Die Auswertung der Vergleichsmessungen hat gezeigt, dass für alle untersuchten Krafräder, ausgenommen der *BMW R1150GS*, bereits am Zielpunkt von einer erheblichen Verfälschung der *CO*-Messwerte durch eine Vermischung der Abgase mit Frischluft ausgegangen werden muss. Durch die Verwendung der Endrohr-Adaption konnte dieser Einfluss der Frischluftvermischung reduziert, jedoch für keines dieser Krafräder gänzlich ausgeschlossen werden. Zudem zeigen sich diese Differenzen zwischen den Messwerten am Zielpunkt und mit Endrohr-Adaption für die verschiedenen Krafräder sehr unterschiedlich stark ausgeprägt. Daher kann aus diesen Vergleichsmessungen keine allgemeine Anforderung an die Genauigkeit der Korrekturformeln formuliert werden, sie müssten für jedes Krafrad selbstständig betrachtet werden.

Im Vordergrund steht daher die Erkenntnis, dass bereits am Zielpunkt bei  $300 \text{ mm}$  Einführungstiefe der Messsonde eine Verfälschung der Messwerte zu beobachten ist. Dies widerspricht der Annahme in der AU-Richtlinie, dass *CO*-Messwerte ab dieser Einführungstiefe als unverfälscht und damit als zulässige Messwerte der Abgaszusammensetzung angenommen werden können. Für die nachfolgenden Untersuchungen ergibt sich daraus folgende Problematik:

Die Korrekturformeln sollen die *CO*-Messwerte bei unzureichender Einführungstiefe auf einen Wert korrigieren, welcher dem *CO*-Gehalt in unverdünnten Abgasen entspricht. Auch wenn die aufgenommenen Zielwerte im Sinne der AU-Richtlinie als zulässig gelten, sind sie demnach als Referenz zur Bewertung der korrigierten *CO*-Werte nicht geeignet. Jedoch bieten die zur Verfügung stehenden Materialien keine Möglichkeit, unverfälschte Referenzwerte bei höheren

---

Einführungstiefen aufzunehmen, da die Messsonde des verwendeten Abgasuntersuchungsgerätes lediglich eine maximale Einführungstiefe von 315mm erlauben würde. Zudem konnte für vier der untersuchten Krafträder festgestellt werden, dass durch den Aufbau der Abgasanlagen auch mit einer längeren Messsonde nur unwesentlich größere Einführungstiefen erzielt werden könnten.

Demnach muss von dem Vorgehen abgesehen werden, eine konkrete Anforderung an die Korrekturformeln zu definieren, um deren Genauigkeit in der dritten Untersuchung nach dieser bewerten zu können. Dies wäre mit den zur Verfügung stehenden Messdaten nicht zielführend. Jedoch kann für die Diskussion der Ergebnisse der dritten Untersuchung auf der Erkenntnis aufgebaut werden, dass der unverfälschte  $CO$ -Gehalt der Abgase für die Verbrennung eines stöchiometrischen Luft-Kraftstoff-Gemisches für einige Krafträder als wesentlich höher als der jeweilige Zielwert anzunehmen ist. Da die Korrekturformeln die  $CO$ -Messwerte auf den Wert dieses unverfälschten  $CO$ -Gehaltes korrigieren sollen, sollte daher zu erwarten sein, dass sich auch die korrigierten  $CO$ -Werte größer als die jeweiligen Zielwerte darstellen.

### 4.3 Untersuchung 3

In dieser Untersuchung gilt es die generierten Messdaten darzustellen und zu interpretieren. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen in der anschließenden Diskussion genutzt werden, um die zuvor formulierten Forschungsfragen und damit zentrale Aufgabenstellung dieser Arbeit zu beantworten. Es stehen dafür die Messreihen von sieben Krafträdern zur Verfügung. Die entsprechenden Korrekturformeln werden auf die Messwerte des  $CO$ -Gehaltes der verschiedenen Messreihen angewendet, um die  $CO$ -Messwerte und die resultierenden korrigierten  $CO$ -Werte grafisch auszuwerten. Dabei sind – im Sinne der formulierten Forschungsfragen – vor allem die folgenden drei Kriterien bei der Betrachtung von übergeordnetem Interesse:

Zunächst wird die Anordnung der  $CO$ -Messwerte der Messreihen betrachtet. Bei der Anwendung der Korrekturformeln liegt die Annahme zu Grunde, dass es im Endrohr von Krafträdern zu einer Verdünnung der Abgase durch eindringende Frischluft kommt, wodurch eine Verfälschung der Messwerte des  $CO$ -Gehaltes auftritt. Diese Verfälschung der Messwerte in Folge der Verdünnung der Abgase sollte in der grafischen Auswertung der Messreihen durch einen deutlichen Abfall des  $CO$ -Gehaltes mit Verringerung der Einführungstiefe sichtbar werden.

Die zweite Untersuchung hat gezeigt, dass von einer Bewertung der Abweichungen zwischen den korrigierten  $CO$ -Werten und den Zielwerten anhand eines Grenzwertes abgesehen werden muss. Außerdem hat sich in dieser Untersuchung gezeigt, dass auch der Zielwert für die

---

meisten Krafträder als direkte Referenz ungeeignet ist. Dennoch soll die Lage der korrigierten  $CO$ -Werte gegenüber den Zielwerten betrachtet werden. Unter Berücksichtigung der Erkenntnis, dass der unverfälschte  $CO$ -Gehalt der Abgase deutlich über dem Zielwert liegen kann, soll gegebenenfalls die Genauigkeit der korrigierten  $CO$ -Werte eingeordnet werden. Ebenfalls können für diese Einordnung die Vergleichsmessungen mit der Endrohr-Adaption herangezogen werden.

Auch die Anordnung der korrigierten  $CO$ -Werte ist für die Bewertung der Korrekturformeln sehr wichtig. Durch die Anwendung der Korrekturformeln sollten idealerweise alle Messwerte des  $CO$ -Gehaltes über die gesamte Einführungstiefe zu einem gleichen Wert korrigiert werden, der dem des  $CO$ -Gehaltes in den unverdünnten Abgasen entsprechen würde. Da die Messreihen grafisch über die Einführungstiefe der Messsonde dargestellt werden, wäre daher für diesen Fall eine Anordnung der korrigierten  $CO$ -Werte in einer Geraden, parallel zu der Abszisse, zu erwarten.

Um die Kriterien bei den aufgenommenen Messreihen bewerten zu können, werden diese grafisch in Diagrammen dargestellt. Dabei werden die  $CO$ -Messwerte und die korrigierten  $CO$ -Werte über die Einführungstiefe der Messsonde aufgetragen. Sofern vorhanden und für die Interpretation sinnvoll, werden zusätzlich die  $CO$ -Messwerte aus der Vergleichsmessung mit der Adaption über dem Zielpunkt aufgetragen, um eine weitere Referenz zu geben. Die Darstellung der Ergebnisse zur Untersuchung 3 erfolgt im Folgenden aus Gründen der Übersichtlichkeit unterteilt nach den unterschiedlichen Krafträdern.

#### Yamaha XVS1000

In Abbildung 19 ist die Messreihe der *Yamaha XVS1100* dargestellt. Deutlich ist für die Messwerte des  $CO$ -Gehaltes ein annähernd konstantes Abfallen mit Verringerung der Einführungstiefe der Messsonde zu erkennen. Der  $CO$ -Gehalt fällt dabei von einem Wert von 3,79 % vol auf 0,61 % vol bei 0 mm Einführungstiefe ab. Somit ist anzunehmen, dass es bei diesem Kraftrad im Endrohr zu einer ausgeprägten Verdünnung der Abgase mit Frischluft kommt, die eine Verfälschung der  $CO$ -Messwerte bewirkt. Damit ist die Anwendung der Korrekturformel bei Einführungstiefen unterhalb der Mindesteinführungstiefe notwendig.

Durch die Anwendung der Korrekturformel ergeben sich die korrigierten  $CO$ -Werte dieser Messreihe zu einem annähernd gleichen Wert, wodurch sich eine eindeutige Anordnung dieser Werte als Gerade parallel zu der Abszisse abzeichnet. Dabei sind keine Ausreißer zu erkennen.

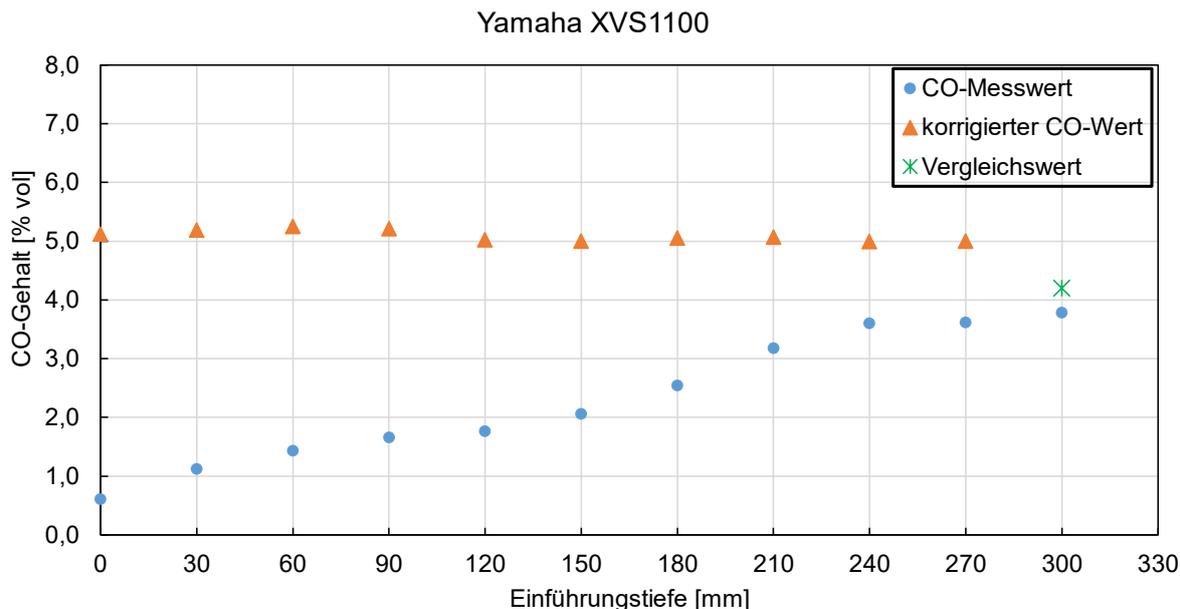


Abbildung 19: CO-Messwerte und korrigierte CO-Werte der Yamaha XVS1100

Während die Anordnung der korrigierten CO-Werte zueinander übereinstimmt, zeigt sich ein deutlicher Versatz zwischen diesen Werten und dem Zielwert bei 3,79 % vol. Der kleinste korrigierte CO-Wert liegt mit 5,00 % vol rund 32 % Prozent höher als der Zielwert. Jedoch konnte in der zweiten Untersuchung für diesen Zielwert eine erhebliche Verfälschung festgestellt werden. Bei der Vergleichsmessung mit Adaption konnte der Einfluss der Frischluft reduziert werden. Der CO-Vergleichsmesswert in Abbildung 19 zeigt dabei mit 4,20 % vol eine deutlich geringere Differenz zu den korrigierten CO-Werten. Da jedoch auch bei Verwendung der Adaption noch ein erheblicher Einfluss der Frischluft auf die Abgaszusammensetzung zu erkennen war, ist anzunehmen, dass der unverfälschte CO-Gehalt im Abgas dieses Kraftrades deutlich höher liegt, wodurch sich eine noch wesentlich geringere Differenz zu den korrigierten CO-Werten zeigen würde.

Zusätzliche Informationen können bei der Messreihe dieses Kraftrades auch aus der Betrachtung der Veränderung des CO- und CO<sub>2</sub>-Gehaltes entnommen werden.

In Abbildung 20 sind die Messwerte des CO- und CO<sub>2</sub>-Gehaltes über die Einführungstiefe der Messsonde dargestellt. Die Skalierung der Ordinatenachsen wurde dabei so gewählt, dass die Messwerte beider Messgrößen am Zielpunkt grafisch annähernd übereinstimmen. Es lässt sich dadurch deutlich erkennen, wie beide Messgrößen, relativ zum jeweiligen Wertebereich, gleichermaßen proportional zu der Einführungstiefe abfallen.

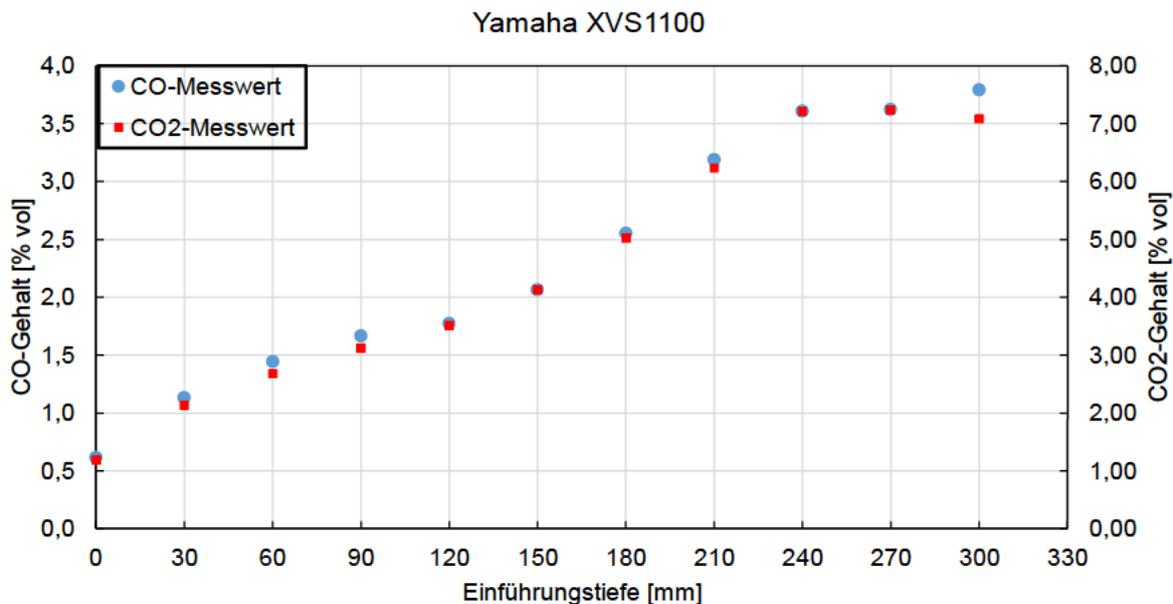


Abbildung 20: Darstellung des  $CO$ - und  $CO_2$ -Gehaltes der Yamaha XVS1100 über die Einführungstiefe

### KTM 300 EXC

Die Messreihe der *KTM 300 EXC* weist starke Ähnlichkeiten zu der Messreihe der Yamaha *XVS1100* auf. Sie ist in Abbildung 21 dargestellt. Wie schon zuvor, lässt sich auch hier der Einfluss der Frischluft in Form eines konstant fallenden  $CO$ -Gehaltes erkennen, welcher die Anwendung der Korrekturformeln notwendig macht. Auch die korrigierten  $CO$ -Werte nehmen für die Messreihe dieses Kraftrads eine deutliche Anordnung als Gerade an. Geringfügige Differenzen zwischen diesen Werten liegen im Bereich der erwartbaren Messabweichungen.

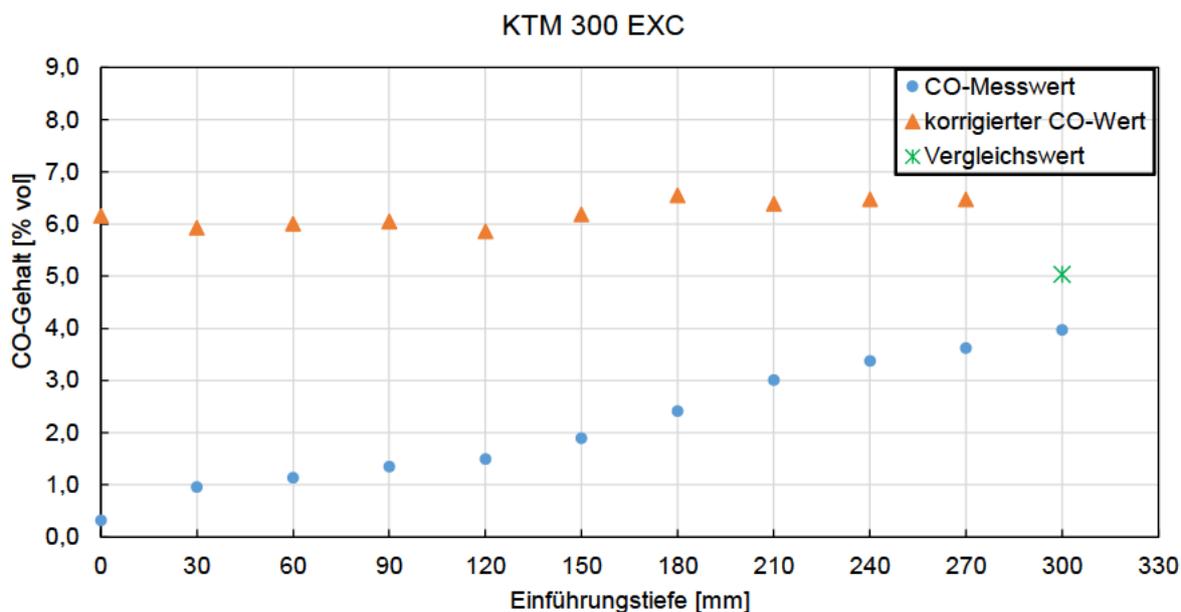


Abbildung 21:  $CO$ -Messwerte und korrigierte  $CO$ -Werte der KTM 300 EXC

Für die korrigierten  $CO$ -Werte lassen sich erneut erhebliche Differenzen zu dem Zielwert feststellen, sie liegen mindestens 1,89 % *vol* über dem Zielwert von 3,97 % *vol*. Jedoch wurde auch bei diesem Kraftrad zuvor eine Verfälschung des Zielwertes erkenntlich, der Vergleichsmesswert mit Adaption zeigt daher mit 5,04 % *vol* eine deutliche Annäherung an die korrigierten  $CO$ -Werte. Da bei den Zweitaktkrafträdern keine eindeutige Aussage darüber gemacht werden konnte, ob auch die  $CO$ -Messwerte bei Verwendung der Adaption dem Einfluss der Frischluft unterliegen, ist nicht festzustellen, wie ausgeprägt die reale Differenz zwischen den korrigierten  $CO$ -Werten gegenüber dem  $CO$ -Gehalt der unverdünnten Abgase ist.

Die Betrachtung des  $CO$ - und  $CO_2$ -Gehaltes über die Einführungstiefe der Messsonde zeigt für dieses Kraftrad die gleiche Proportionalität im Abfallen beider Messgrößen zueinander, wie sie bei der *Yamaha XVS1100* erkannt wurde.

### KTM 200 EXC

Die Messreihe für die *KTM 200 EXC* ergibt ein sehr ähnliches Bild zu denen der *KTM 300 EXC* und *Yamaha XVS1100*. Da für dieses Kraftrad im Rahmen der Untersuchung zur Reproduzierbarkeit der Messungen wiederholte Messreihen aufgenommen wurden, konnte der Einfluss zufälliger Messabweichungen durch die Bildung von arithmetischen Mittelwerten aus den vier Messreihen reduziert werden. Die resultierenden Messwerte sind in Abbildung 22 dargestellt.

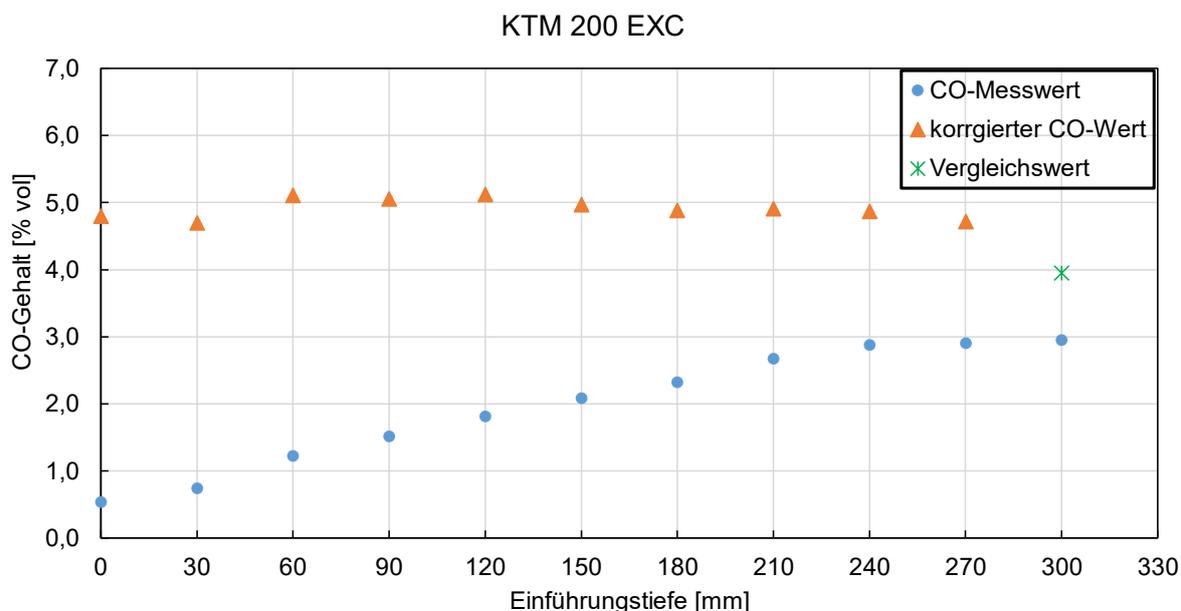


Abbildung 22:  $CO$ -Messwerte und korrigierte  $CO$ -Werte der *KTM 200 EXC*

Es lässt sich erneut der charakteristische Abfall des  $CO$ -Gehaltes bei sinkender Einführungstiefe infolge des Einflusses der Frischluft erkennen. Auch die korrigierten  $CO$ -Werte nehmen

erneut eine eindeutige Anordnung als Gerade an, wobei die Werte für 0 mm und 30 mm Einführungstiefe leicht davon abweichen. Es zeigt sich ein starker Versatz zwischen dem niedrigsten korrigierten  $CO$ -Wert mit 4,72 % vol und dem Zielwert bei 2,99 % vol. Auch für diesen Zielwert konnte zuvor eine deutliche Verfälschung erkannt werden. Der  $CO$ -Messwert mit Adaption zeigt dabei mit 3,95 % vol auch hier eine deutlich geringere Differenz zu den korrigierten  $CO$ -Werten. Eine konkrete Bewertung der korrigierten  $CO$ -Werte ist jedoch nicht möglich, da nicht zu bestimmen ist, inwiefern der Vergleichswert mit Adaption durch den Einfluss der Frischluft verfälscht ist.

Auch für dieses Kraftrad konnte bei der Gegenüberstellung des  $CO$ - und  $CO_2$ -Gehaltes über die Einführungstiefe die gleiche relative Reduzierung beider Messgrößen mit Verringerung der Einführungstiefe beobachtet werden, wie sie zuvor bei der *Yamaha XVS1100* und *KTM 300 EXC* ermittelt wurde.

### Honda CB500

Auch für die  $CO$ -Messwerte bei der *Honda CB500* in Abbildung 23 ist ein Einfluss der Frischluft in Form abfallender Werte zu erkennen. Wobei dieses Abfallen der Messwerte für höhere Einführungstiefen von 180 mm bis 300 mm ausgeprägter ist als für kleinere Einführungstiefen von 0 mm bis 150 mm. Für die korrigierten  $CO$ -Werte ist dabei auffällig, dass sie sich im Vergleich zu den Messreihen der vorangegangenen Krafträder nicht in einer einzigen Gerade anordnen. Viel mehr lassen sich zwei Plateaus in diesen Werten erkennen.

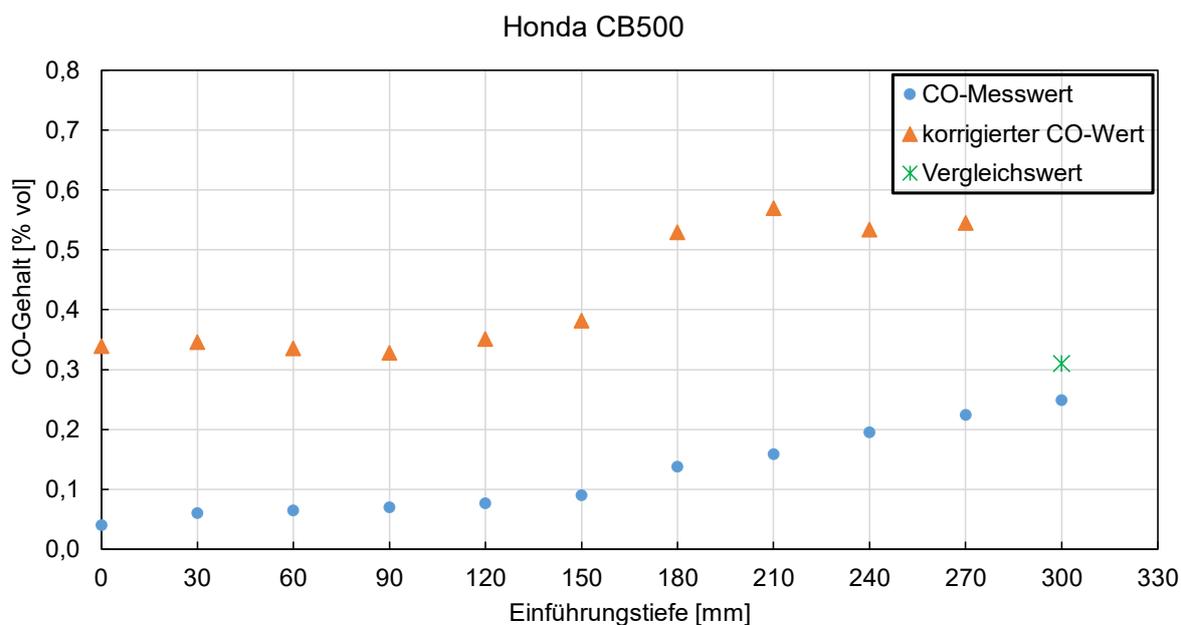


Abbildung 23:  $CO$ -Messwerte und korrigierte  $CO$ -Werte der Honda CB500

Im Bereich von 0 mm bis 150 mm sowie für 180 mm bis 270 mm Einführungstiefe ergeben sich die korrigierten  $CO$ -Werte dabei zu jeweils ähnlichen Beträgen. Wobei sich der kleinste Wert

des letzteren Plateaus mit 0,53 % *vol* sehr stark von dem Zielwert bei 0,25 % *vol* abhebt. Aber auch das erstere Plateau liegt mit dem kleinsten Wert von 0,33 % *vol* deutlich über dem Zielwert. Es muss dabei jedoch berücksichtigt werden, dass für diesen Zielwert in der ersten Untersuchung ein Einfluss der Frischluftvermischung festgestellt werden konnte. Die Vergleichsmessung mit Adaption hat einen *CO*-Messwert von 0,31 % *vol* ergeben, welcher jedoch noch einen geringen Einfluss der Vermischung der Abgase mit Frischluft erkennen ließ. Die Differenz zwischen dem Vergleichswert und den korrigierten *CO*-Werten des Plateaus von 0 *mm* bis 150 *mm* Einführungstiefe sind damit sehr ähnlich. Um den Versatz zwischen den beiden Plateaus der korrigierten *CO*-Werte zu erklären, müssen die *CO*- und *CO*<sub>2</sub>-Messwerte im Vergleich betrachtet werden. Sie sind in Abbildung 24 über die Einführungstiefe aufgetragen. Die Skalierung der Achsen ist dabei erneut so gewählt, dass der Gehalt von *CO* und *CO*<sub>2</sub> am Zielpunkt grafisch annähernd übereinstimmt. Dadurch wird deutlich, wie die beiden Gehalte über die Einführungstiefe im Vergleich zueinander abfallen.

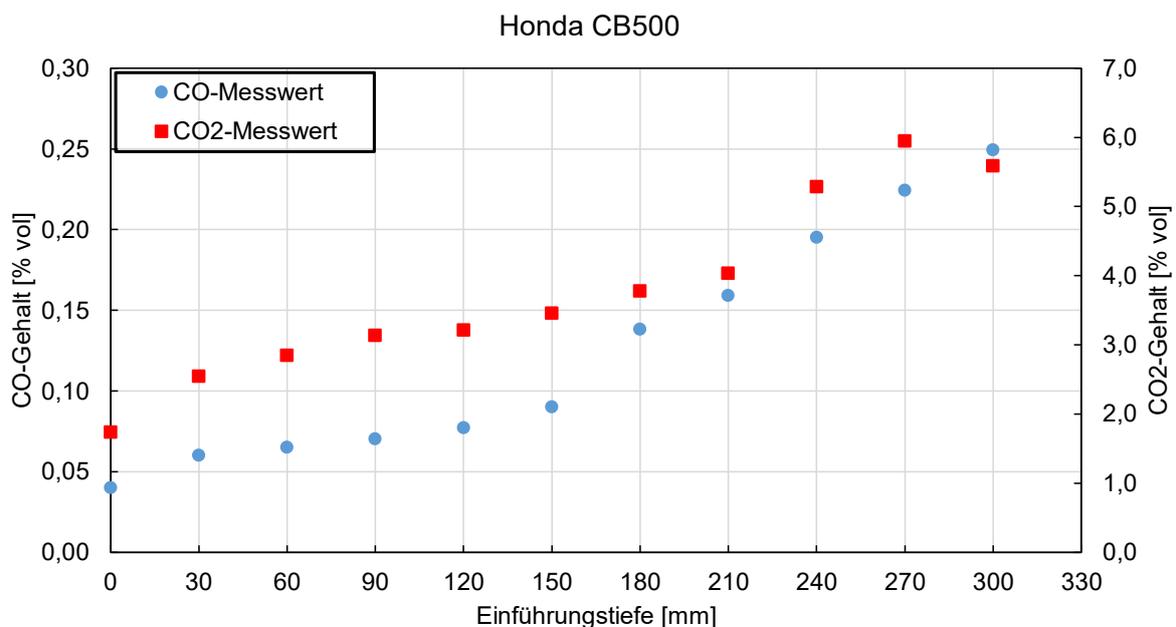


Abbildung 24: Darstellung des *CO*- und *CO*<sub>2</sub>-Gehaltes der Honda CB500 über die Einführungstiefe

Es zeigt sich deutlich, dass die Messwerte beider Reihen im Bereich von 180 *mm* bis 300 *mm* Einführungstiefe eng beieinander liegen und damit annähernd gleichermaßen proportional zur Einführungstiefe abfallen. Für kleinere Einführungstiefen ist hingegen ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Messwertreihen zu erkennen. Für diesen Bereich fällt der *CO*<sub>2</sub>-Gehalt weniger stark ab, wodurch eine geringere Korrektur der *CO*-Messwerte hervorgerufen wird. Es sind somit die zwei Plateaus in den korrigierten *CO*-Werten zu erkennen. Da der Gehalt beider Messgrößen für das Plateau von 180 *mm* bis 270 *mm* gleichermaßen proportional zur Einführungstiefe abfällt, entsprechen die zugehörigen

korrigierten  $CO$ -Werte dem Ansatz der Korrekturformeln. Sie weisen jedoch eine deutliche Differenz zu dem  $CO$ -Messwert mit Adaption auf, obwohl dabei nur eine geringe Verfälschung des Messwertes anzunehmen ist. Die geringe Differenz der korrigierten  $CO$ -Werte des zweiten Plateaus zu dem Messwert mit Adaption ist hingegen eher als eine zufällige Beobachtung einzustufen. Die optische Untersuchung des Endschalldämpfers bei diesem Kraftrad mit einem Endoskop konnte für eine Einführungstiefe von  $150\text{ mm}$  bis  $300\text{ mm}$  einen kleineren inneren Querschnitt als für geringere Einführungstiefen feststellen. Diese Beobachtung fällt unmittelbar mit dem veränderten Abfall der Gehalte beider Messgrößen zusammen.

### Harley Davidson Electra Glide

Die Messreihen von der *Harley Davidson Electra Glide* stellen in dieser Betrachtung einen gewissen Sonderfall dar. Sie sind in Abbildung 25 dargestellt. Im Gegensatz zu den Messreihen der bisher betrachteten Krafträder, bei denen der  $CO$ -Gehalt infolge der Vermischung der Abgase mit Frischluft bei sinkender Einführungstiefe abnimmt, bleiben die  $CO$ -Messwerte bei der Harley Davidson über den gesamten Messbereich annähernd gleich, steigen für  $90\text{ mm}$  und  $120\text{ mm}$  Einführungstiefe sogar leicht an. Erst für die letzten drei Messpunkte ist ein Abfallen des  $CO$ -Gehaltes bemerkbar.

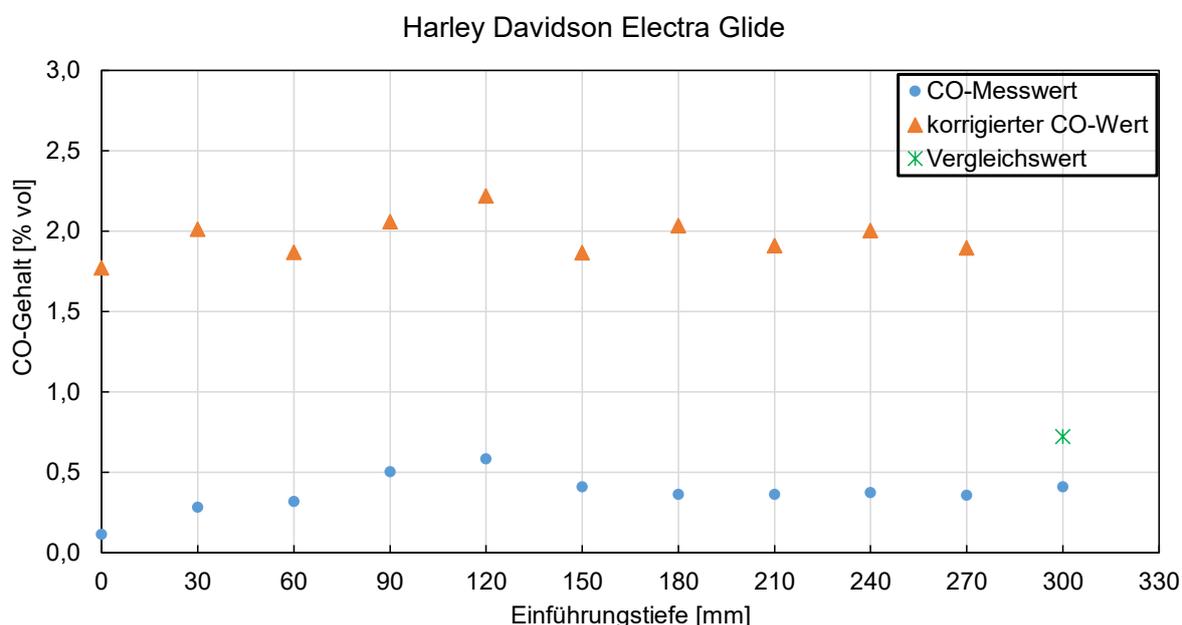


Abbildung 25:  $CO$ -Messwerte und korrigierte  $CO$ -Werte der Harley Davidson Electra Glide

Wie in Untersuchung 1 festgestellt, tritt bei diesem Kraftrad bereits am Zielpunkt eine erhebliche Verfälschung des  $CO$ -Messwertes auf. Für geringere Einführungstiefen scheint sich die Frischluftvermischung nicht zu verstärken.

Die Anwendung der Korrekturformeln auf die  $CO$ -Messwerte zeigt sehr große Differenzen zwischen dem Zielwert und den korrigierten  $CO$ -Werten. Der kleinste korrigierte  $CO$ -Wert liegt bei 1,77 % *vol* gegenüber dem Zielwert bei 0,41 % *vol*. Auch die Verwendung der Adaption konnte den Einfluss der Frischluft auf den  $CO$ -Gehalt nur bedingt reduzieren. Trotz eines leichten Anstiegs des zugehörigen  $CO$ -Messwertes gegenüber dem Zielwert, unterliegt auch dieser Messwert noch einer starken Verfälschung. Der unverfälschte  $CO$ -Gehalt in den Abgasen ist daher wesentlich höher anzunehmen. Inwiefern die korrigierten  $CO$ -Werte jedoch von diesem Gehalt abweichen, ist aus den vorliegenden Messdaten nicht zu beurteilen.

Die Anordnung der korrigierten  $CO$ -Werte zeigt sich als Gerade parallel zu der Abszisse. Für 90 mm und 120 mm Einführungstiefe ist der leichte Anstieg des  $CO$ -Gehaltes in den korrigierten  $CO$ -Werten wiederzuerkennen. Dieser leichte Anstieg der  $CO$ -Messwerte bei 90 mm und 120 mm Einführungstiefe ist von zusätzlichem Interesse. Mit dem Endoskop ist bei diesem Kraftrad bei einer Einführungstiefe von 90 mm ein Prallblech im Endrohr zu erkennen. Obwohl die Messsonde an diesem Prallblech vorbeigeführt werden kann, wird der Querschnitt des Rohres erheblich reduziert. Diese Beobachtung fällt damit unmittelbar mit dem Anstieg des  $CO$ -Gehaltes in den Abgasen zusammen.

### BMW R1150GS

In Abbildung 26 sind die  $CO$ -Messwerte und korrigierte  $CO$ -Werte für die *BMW R1150GS* dargestellt. Wie bei der *KTM 200 EXC* handelt es sich bei den dargestellten Werten um die arithmetischen Mittelwerte der vier wiederholten Messreihen, wodurch bei dieser Betrachtung nur ein geringer Einfluss zufälliger Abweichungen zu erwarten ist.

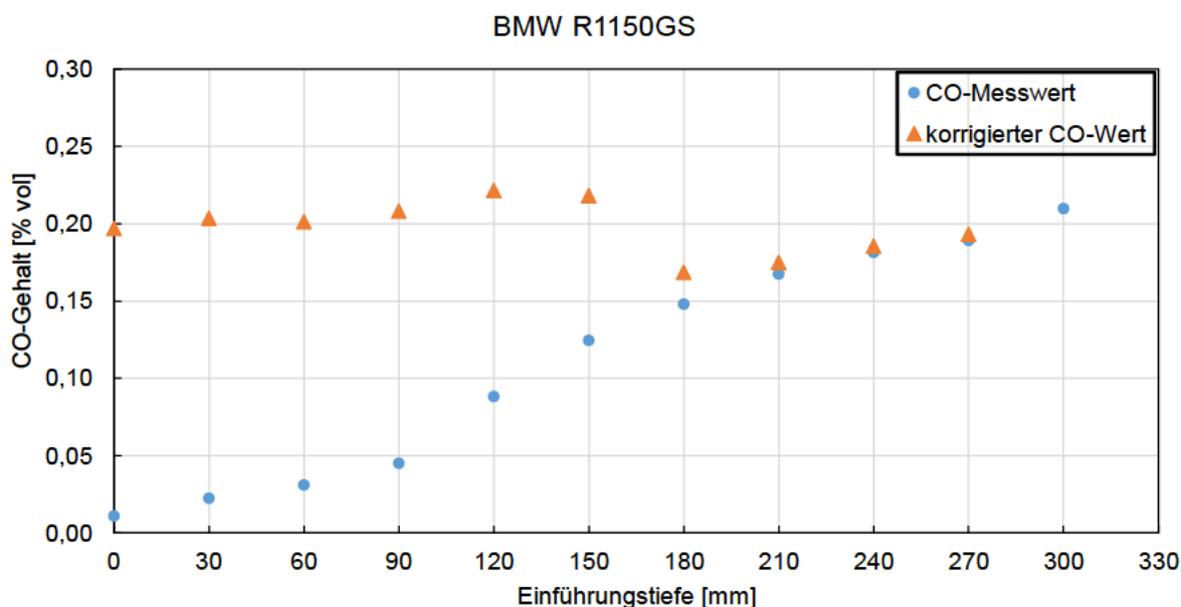


Abbildung 26:  $CO$ -Messwerte und korrigierte  $CO$ -Werte der *BMW R1150GS*

Auch für dieses Kraffrad zeigt sich die charakteristische Anordnung der  $CO$ -Messwerte, die den Einfluss der Frischluftvermischung erkennbar macht, wodurch eine Korrektur der Messwerte notwendig ist. In der zweiten Untersuchung hat sich jedoch gezeigt, dass die Frischluftvermischung nicht bis zu dem Zielpunkt reicht. Der  $CO$ -Messwert bei  $300\text{ mm}$  Einführungstiefe der Messsonde kann demnach als unverfälschter  $CO$ -Gehalt der Abgase angenommen werden. Bei diesem Kraffrad ist daher eine Bewertung der korrigierten  $CO$ -Werte in Bezug auf den Zielwert möglich.

Die Anordnung der korrigierten  $CO$ -Werte lässt sich sichtbar in zwei Abschnitte einteilen. Für Einführungstiefen der Messsonde von  $180\text{ mm}$  bis  $270\text{ mm}$  lässt sich nur eine sehr geringe Korrektur der Messwerte erkennen, die korrigierten  $CO$ -Werte fallen annähernd unverändert zu den  $CO$ -Messwerten ab, wodurch eine deutliche Differenz zum Zielwert erkennbar ist. Im Bereich von  $0\text{ mm}$  bis  $150\text{ mm}$  Einführungstiefe kommt es hingegen zu einer deutlichen Korrektur der Messwerte, sie zeigen dadurch eine eindeutige Anordnung in einer Geraden parallel zur Abszisse. Auch der Wertebereich dieser korrigierten  $CO$ -Werte entspricht dem des Zielwertes.

Um eine mögliche Erklärung für den Unterschied der zwei Abschnitte in den korrigierten  $CO$ -Werten zu finden, müssen die  $CO$ - und  $CO_2$ -Gehalte der Messreihen miteinander verglichen werden. In Abbildung 27 sind die Messwerte für den  $CO$ - und  $CO_2$ -Gehalt in den Abgasen bei der *BMW R1150GS* über die Einführungstiefe dargestellt.

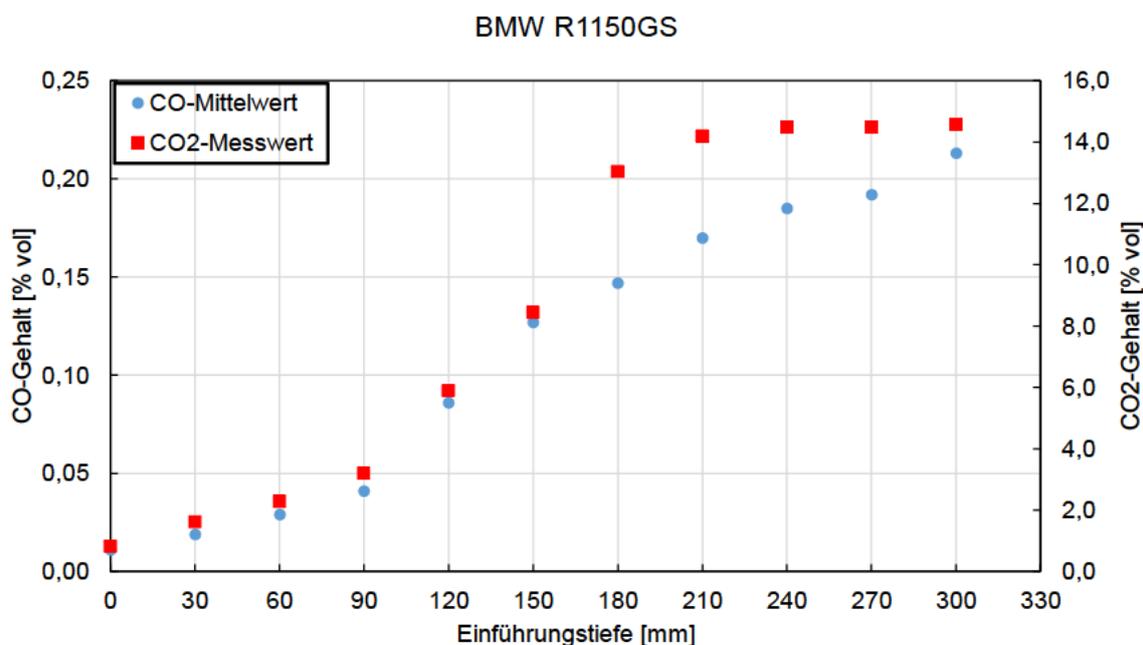


Abbildung 27: Darstellung des  $CO$ - und  $CO_2$ -Gehaltes der *BMW R1150GS* über die Einführungstiefe

Die Skalierung ist dabei erneut so gewählt, dass die relative Veränderung der Messwerte beider Größen miteinander verglichen werden kann. Deutlich zu erkennen ist, wie der  $CO$ -Gehalt vom Zielpunkt ausgehend mit Verringerung der Einführungstiefe abfällt. Der  $CO_2$ -Gehalt hingegen bleibt für die ersten fünf Messpunkte annähernd konstant. Da der  $CO_2$ -Gehalt gegenüber der  $CO$ -Gehalt wesentlich höher ausfällt, hat dieser einen größeren Einfluss auf den Korrekturfaktor in den Formeln. Es ergibt sich daher nur eine geringe Korrektur der zugehörigen  $CO$ -Messwerte bei Verwendung der Korrekturformeln für diese Messpunkte. Für kleinere Einführungstiefen der Messsonde zeigt sich hingegen in der Darstellung, dass die Messwerte für beide Messgrößen gleichermaßen proportional zur Einführungstiefe abfallen. Dadurch kommt es zu einer deutlichen Korrektur der  $CO$ -Messwerte.

Diese Beobachtungen konnten für dieses Kraffrad bei allen vier wiederholten Messreihen gemacht werden. Daher ist von einem dauerhaften Einfluss bei den genannten Einführungstiefen auszugehen. Die Untersuchung des Endrohres mit einem Endoskop zeigte keine Auffälligkeiten.

#### Honda CBR600RR

Die Messreihen für die Honda *CBR600RR* sind in Abbildung 28 dargestellt. Für die Messwerte des  $CO$ -Gehaltes lässt sich bei den Messpunkten bei  $0\text{ mm}$  bis  $90\text{ mm}$  eine eindeutige Verfälschung durch den Einfluss der Frischluft erkennen. Für höhere Einführungstiefen wird hingegen kein konstanter Anstieg des  $CO$ -Gehaltes deutlich. Während die  $CO$ -Messwerte für  $120\text{ mm}$  bis  $180\text{ mm}$  ein Plateau bilden, zeigen sich leicht erhöht dazu auch die  $CO$ -Messwerte für  $210\text{ mm}$  bis  $300\text{ mm}$  Einführungstiefe annähernd gleich.

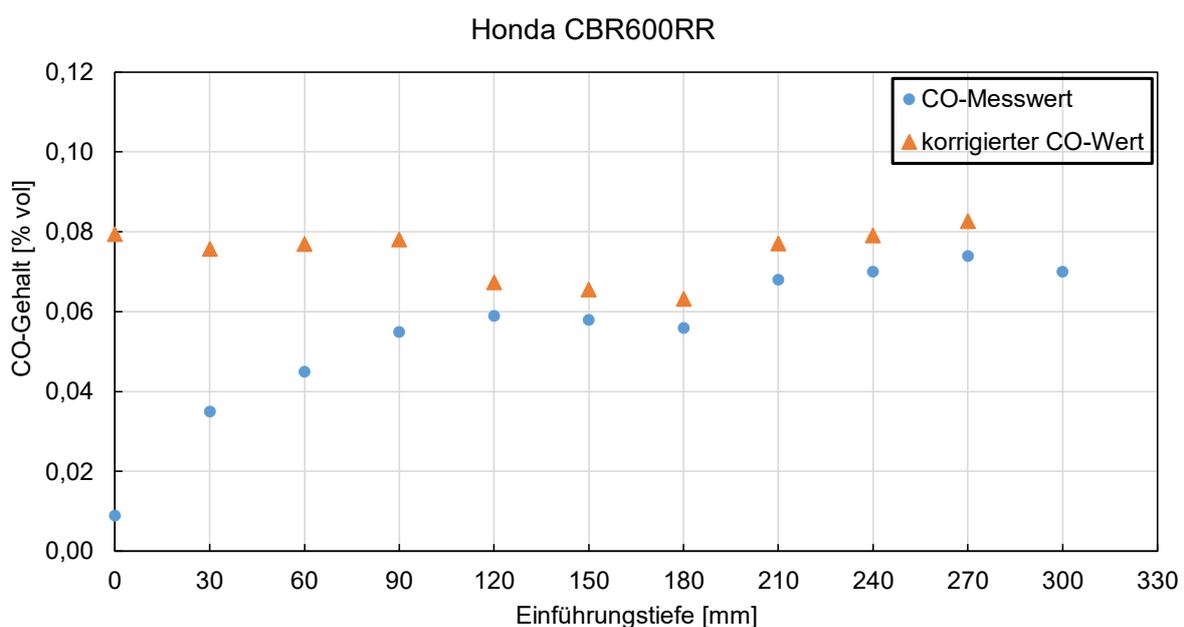


Abbildung 28:  $CO$ -Messwerte und korrigierte  $CO$ -Werte der Honda CBR600RR

Die korrigierten  $CO$ -Werte lassen sich bei diesem Krafrad, ähnlich wie bei den Messreihen der *BMW R1150GS* und *Honda CB500*, in mehrere Abschnitte einteilen. Für die Einführungstiefen von  $210\text{ mm}$  bis  $270\text{ mm}$  kommt es zu einer geringen Korrektur der  $CO$ -Messwerte. Die korrigierten  $CO$ -Werte liegen in einer gleichmäßigen Anordnung als Gerade über dem  $CO$ -Messwerten. Die  $CO$ -Messwerte für Einführungstiefen von  $120\text{ mm}$  bis  $180\text{ mm}$  werden um einen ähnlichen Betrag korrigiert. Dementsprechend liegen die zugehörigen korrigierten  $CO$ -Werte leicht unter denen der Messpunkte bei höheren Einführungstiefen. Für den Bereich von  $0\text{ mm}$  bis  $90\text{ mm}$  Einführungstiefe zeigen die korrigierten  $CO$ -Werte erneut eine gute Anordnung als Gerade parallel zu der Abszisse. Auffällig ist dabei, dass die  $CO$ -Messwerte in diesem Abschnitt wesentlich deutlicher korrigiert werden und die korrigierten  $CO$ -Werte einen ähnlichen Wertebereich aufweisen wie die zugehörigen Werte für den Abschnitt bei  $210\text{ mm}$  bis  $270\text{ mm}$ .

Um die geringe Korrektur der  $CO$ -Messwerte für die Einführungstiefe von  $120\text{ mm}$  bis  $180\text{ mm}$  zu erklären, muss der  $CO_2$ -Gehalt der Messreihe betrachtet werden. Dieser wird zusammen mit dem  $CO$ -Gehalt über die Einführungstiefe der Messsonde in Abbildung 29 dargestellt. Die Skalierung der Ordinatenachsen wurde dabei erneut so gewählt, dass der relative Abfall beider Messgrößen über die Einführungstiefe miteinander verglichen werden kann.

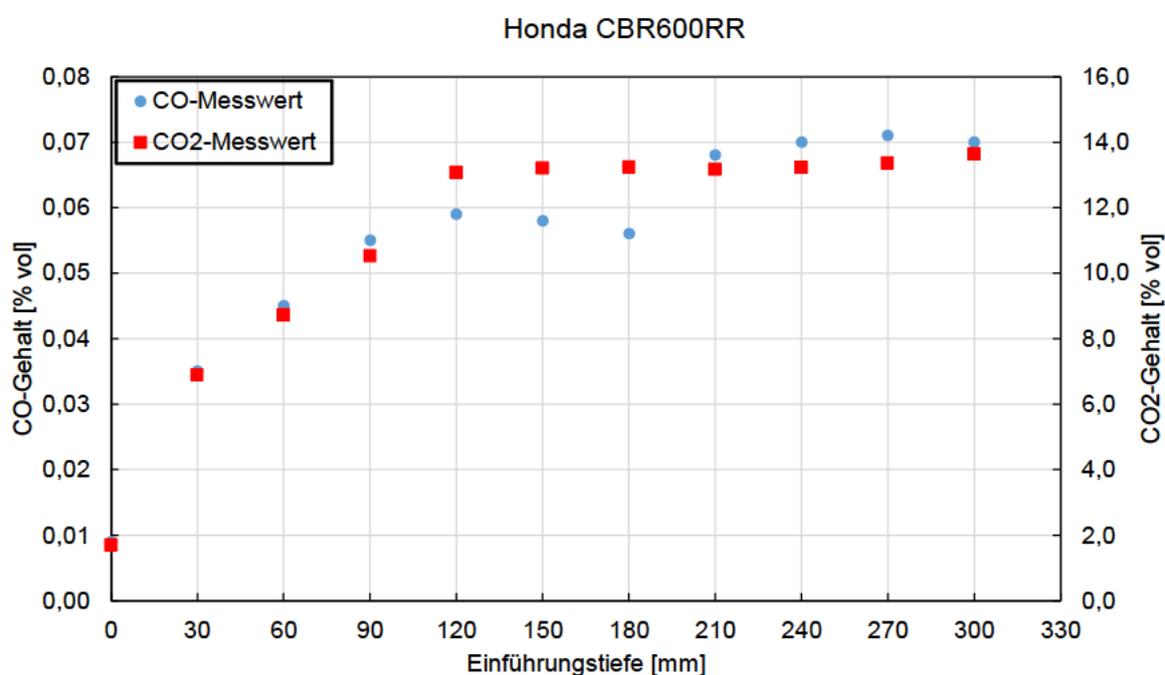


Abbildung 29: Darstellung des  $CO$ - und  $CO_2$ -Gehaltes der Honda CBR600RR über die Einführungstiefe

Während für die genannten Messpunkte von  $120\text{ mm}$  bis  $180\text{ mm}$  Einführungstiefe bereits zuvor niedrigere  $CO$ -Gehalte festgestellt wurden, zeigen sich die zugehörigen  $CO_2$ -Messwerte konstant zu denen bei höheren Einführungstiefen. Da der absolute  $CO$ -Gehalt jedoch deutlich

---

kleiner als der  $CO_2$ -Gehalt ist, hat die Veränderung der  $CO$ -Messwerte gegenüber den gleichbleibenden  $CO_2$ -Messwerten kaum Einfluss auf die Korrektur. Der Betrag, um welchen die Werte korrigiert werden bleibt dementsprechend annähernd gleich zu den Messwerten bei höheren Einführungstiefen. Bei der Untersuchung des Endschalldämpfers mit einem Endoskop, konnte bei diesem Kraftrad, ähnlich wie bei der *Honda CB500*, eine Änderung des inneren Endschalldämpferquerschnittes bei einer Einführungstiefe von  $120\text{ mm}$  festgestellt werden. Für Einführungstiefen größer der  $120\text{ mm}$  konnte ein wesentlich größerer Querschnitt als unmittelbar im Endrohr ermittelt werden. Diese Änderung der Geometrie weist Parallelen zu den Beobachtungen in dem  $CO_2$ -Gehalt auf.

---

## 5 Abschluss

In diesem Abschnitt sollen die zuvor erläuterten Ergebnisse der verschiedenen Krafträder aus der dritten Untersuchung zusammen mit den Erkenntnissen der ersten und zweiten Untersuchung dazu genutzt werden, die formulierten Forschungsfragen zu beantworten. Aus der Beantwortung dieser Forschungsfragen soll im Anschluss ein Fazit bezüglich der zentralen Aufgabenstellung dieser Bachelorarbeit gezogen werden.

Abschließend wird das in dieser Bachelorarbeit angewandte Vorgehen zur Beantwortung der Aufgabenstellung kritisch hinterfragt und mögliche Ansätze für weiterführende Arbeiten aufgezeigt.

### 5.1 Diskussion der Ergebnisse

Im Folgenden sollen die zuvor erläuterten Ergebnisse für die Messreihen der einzelnen Krafträder zusammenfassend und tiefergehend diskutiert werden, um so die formulierten Forschungsfragen (vgl. Kapitel 3.1) zu beantworten.

1. Welche Genauigkeit der korrigierten  $CO$ -Werte gegenüber dem Messwert des unverfälschten  $CO$ -Gehaltes in den Abgasen kann als hinreichend genau angenommen werden?

Durch Verwendung der Endrohr-Adaption sollten in der zweiten Untersuchung die Differenzen zwischen den Zielwerten und Vergleichsmesswerten mit Adaption für die verschiedenen Krafträder ausgewertet werden, um eine Anforderung an die Genauigkeit der korrigierten  $CO$ -Werte zu formulieren. Diese Differenzen haben sich dabei kraftradspezifisch sehr unterschiedlich gezeigt. Auch konnten sowohl für die Zielwerte als auch für die Vergleichsmesswerte eine Verfälschung durch den Einfluss der Frischluftvermischung erkannt werden, wodurch von der Formulierung allgemeiner Anforderungen abgesehen wurde.

2. Ist ein Einfluss der Frischluftvermischung der Abgase und eine daraus resultierende Verfälschung der  $CO$ -Messwerte erkennbar?

Die Anwendung der Korrekturformeln geht von der theoretischen Annahme aus, dass es im Endrohr von Krafträdern bei geringen Einführungstiefen der Messsonde durch die Pulsation der Abgase zum Eindringen von Frischluft (vgl. Kapitel 2.1.3) und damit zu einer Verfälschung der  $CO$ -Messwerte kommt.

Grundsätzlich konnte bei jedem der sieben untersuchten Krafträder ein Abfallen des  $CO$ -Gehaltes mit Verringerung der Einführungstiefe der Messsonde erkannt werden, wodurch auf

einen Einfluss der Frischluftvermischung auf die Abgase zu schließen ist. Diese Erkenntnis unterstützt demnach die Notwendigkeit der Korrektur von  $CO$ -Messwerten, welche bei geringen Einführungstiefen der Messsonde aufgenommen wurden. Da alle untersuchten Krafträder von dieser Verfälschung der  $CO$ -Messwerte betroffen sind, wird auch eine große Relevanz der vorliegenden Thematik deutlich.

Zudem konnte in der zweiten Untersuchung gezeigt werden, dass der Einfluss der Frischluftvermischung für die Mehrzahl der untersuchten Krafträder über die Mindesteinführungstiefe von  $300\text{ mm}$  hinausgeht, wodurch sich die Annahme in der AU-Richtlinie, dass Messwerte bei höheren Einführungstiefen als unverfälscht angenommen werden können, als inkorrekt darstellt.

Als Ausnahme von dieser Erkenntnis konnte die *BMW R1150GS* ermittelt werden, bei welcher sich keine eindeutige Verfälschung der  $CO$ -Messwerte am Zielpunkt zeigt. Die Summe aus dem  $CO$ - und  $CO_2$ -Gehalt ergibt sich bei diesem Kraftrad an dem Zielpunkt zu  $14,54\% \text{ vol}$ , welche dem Literaturwert von  $14,70\% \text{ vol}$  für die Abgase in Folge der Verbrennung eines stöchiometrischen Luft-Kraftstoff-Gemisches (vgl. Kapitel 2.1.1) sehr nahe kommt. Die Annahme von  $15,00\% \text{ vol}$  für die Korrekturformeln ist daher als sehr realistisch einzuschätzen. Für die *Honda CBR600RR* ist für diese Summe ein Wert von  $13,70\% \text{ vol}$  zu berechnen, aus welcher eine geringe Frischluftvermischung am Zielpunkt abzuleiten ist. Für die untersuchten Viertaktkrafträder mit eindeutiger Verfälschung des Zielwertes ergibt sich diese Summe zwischen  $3,64\% \text{ vol}$  für die *Harley Davidson Electra Glide* und  $9,87\% \text{ vol}$  für die *Yamaha XVS1100*, wodurch sich diese Annahme zusätzlich bestätigt.

Für die Zweitaktkrafträder kann die Annahme von  $10\% \text{ vol}$  für die Summe aus  $CO$ - und  $CO_2$ -Gehalt für unverdünnte Abgase auf Grund der verfälschten Messwerte nicht bestätigt werden.

3. Welche Differenzen können zwischen den korrigierten  $CO$ -Werten und dem Messwert des unverfälschten  $CO$ -Gehaltes in den Abgasen festgestellt werden?

Wie in der zweiten Untersuchung erkannt werden konnte, ist für die  $CO$ -Messwerte bei der geforderten Mindesteinführungstiefe der Messsonde von  $300\text{ mm}$ , welche als Referenzwerte für diese Bewertung der korrigierten  $CO$ -Werte dienen sollten, bereits von einer deutlichen Verfälschung durch den Einfluss der Frischluft auszugehen. Diese Ergebnisse lassen sich bei dem Großteil der Stichprobe einheitlich erkennen, lediglich für die *BMW R1150GS* und die *Honda CBR600RR* ist für diesen Messpunkt eine sehr geringe Verfälschung des  $CO$ -Messwertes anzunehmen.

---

Für die *Yamaha XVS1100* und die *KTM 200 EXC* sowie *300 EXC* kann eine deutliche Differenz zwischen den korrigierten *CO*-Werten und den jeweiligen Zielwerten festgestellt werden, welche sich jedoch unter Verwendung der Adaption und damit Reduzierung der Frischluftvermischung deutlich verringert. Da für die *Yamaha XVS1100* auch unter Verwendung der Adaption noch eine deutliche Frischluftvermischung erkannt wurde, ist anzunehmen, dass der unverfälschte *CO*-Gehalt in den Abgasen deutlich größer als der Vergleichswert mit Adaption ist. Daher sind die korrigierten *CO*-Werte für dieses Kraftrad als realistisch einzustufen. Bei den beiden Zweitakkrafträdern von *KTM* kann keine Aussage über die Verfälschung der Vergleichswerte mit Adaption gemacht werden, wodurch auch die Genauigkeit der korrigierten *CO*-Werte nicht weiter einzuordnen ist.

Bei der *Harley Davidson Elektra Glide* und der *Honda CB500* lassen sich sehr ausgeprägte Differenzen zwischen den korrigierten *CO*-Werten und den jeweiligen Zielwerten erkennen. Für die *Harley Davidson Electra Glide* bleibt der Einfluss der Frischluftvermischung auch unter Verwendung der Adaption deutlich bestehen, wodurch der Vergleichswert noch immer eine sehr große Differenz zu den korrigierten *CO*-Werten aufweist. Eine Einordnung dieser Abweichungen ist daher nicht aussagekräftig. Die Verwendung der Adaption konnte bei der *Honda CB500* den Einfluss der Frischluftvermischung fast gänzlich verhindern. Der Vergleichsmesswert des *CO*-Gehaltes zeigt dabei jedoch noch immer deutliche Differenzen zu den korrigierten *CO*-Werten auf. Die Lage der korrigierten *CO*-Werte in Bezug auf den unverfälschten *CO*-Gehalt in den Abgasen ist bei diesem Kraftrad als wenig realistisch einzustufen.

Für die *BMW R1150GS*, bei welcher nach den Erkenntnissen der zweiten Untersuchung der gemessene Zielwert als Referenzwert für die die Bewertung angenommen werden kann, zeigt sich für kleinere Einführungstiefen eine sehr gute Übereinstimmung der korrigierten *CO*-Werte mit dem Referenzwert. Auch bei der *Honda CBR600RR* kann für den Zielwert von einer geringen Verfälschung ausgegangen werden. Die korrigierten *CO*-Werte sind dabei unwesentlich größer als dieser Zielwert, wodurch sich auch diese Werte als sehr realistisch einstufen lassen. Die Erkenntnisse an diesen beiden Krafträdern deuten auf eine hohe Genauigkeit der korrigierten *CO*-Werte gegenüber dem unverfälschten *CO*-Gehalt in den Abgasen hin.

Durch die fehlenden Referenzwerte kann keine konkrete Aussage über die Differenzen zwischen den korrigierten *CO*-Werten und dem unverfälschten *CO*-Gehalt in den Abgasen gemacht werden. Die Messreihen bei der *BMW R1150GS*, *Honda CBR600RR* und die *Yamaha XVS1100* deuten jedoch darauf hin, dass diese Differenzen als sehr gering

---

anzunehmen sind. Lediglich für die *Honda CB500* ist von sehr deutlichen Differenzen auszugehen.

4. Ist eine Abhängigkeit der Genauigkeit der korrigierten  $CO$ -Werte gegenüber dem vorgeschriebenen Messpunkt von der Einführungstiefe der Messsonde festzustellen?

Bei der Betrachtung der korrigierten  $CO$ -Werte konnte für die *Yamaha XVS1100* sowie für die *KTM 200 EXC* und *300 EXC* eine sehr eindeutige Anordnung dieser Werte als Gerade parallel zu der Abszisse beobachtet werden. Auch für die *Harley Davidson Electra Glide* kann diese Anordnung, wenn auch mit deutlich größeren Abweichungen, erkannt werden. Unter Berücksichtigung der sehr ausgeprägten Korrektur der  $CO$ -Messwerte der *Harley Davidson Electra Glide*, kann dies jedoch durch die Verstärkung der Messabweichung, wie sie in der ersten Untersuchung erkannt wurde, erklärt werden. Auch wenn keine konkrete Aussage über die Abweichungen der korrigierten  $CO$ -Werte der Messreihen dieser vier Krafträder gegenüber dem unverfälschten  $CO$ -Gehalt zu treffen ist, kann dennoch festgehalten werden, dass diese Abweichungen keine erkennbare Abhängigkeit von der Einführungstiefe der Messsonde aufweisen.

Für die Messreihen der *Honda CB500*, *BMW R1150GS* und *Honda CBR600RR* können hingegen abschnittsweise deutliche Abweichungen der korrigierten  $CO$ -Werte von dieser Anordnung in einer Geraden beobachtet werden. Besonders für die *BMW R1150GS* ist für größere Einführungstiefen der Messsonde trotz eines abfallenden  $CO$ -Gehaltes nur eine sehr geringe Korrektur der  $CO$ -Messwerte zu erkennen. Diese Beobachtungen spiegeln sich für jedes der drei Krafträder auch in der Betrachtung des  $CO$ - und  $CO_2$ -Gehaltes über die Einführungstiefe der Messsonde wider. Für die betroffenen Abschnitte zeigt sich der relative Abfall des  $CO_2$ -Gehaltes in Folge des Einflusses der Frischluftvermischung geringer als für den  $CO$ -Gehalt. Da der Betrag des  $CO$ -Gehaltes jedoch deutlich kleiner als der des  $CO_2$ -Gehaltes ist, kommt es zu einer sehr geringen Korrektur der  $CO$ -Messwerte.

Für die *Honda CB500* und die *CBR600RR* hat die optische Untersuchung des Endschalldämpfers eine Veränderung der inneren Geometrie ergeben, welche unmittelbar mit den Auffälligkeiten in dem  $CO_2$ -Gehalt der Messreihen zusammenfällt. Für kleinere Querschnitte des Endschalldämpfers scheint der  $CO$ - und  $CO_2$ -Gehalt über die Einführungstiefe gleichermaßen proportional zu der Einführungstiefe abzufallen, wodurch eine deutliche Korrektur der Messwerte hervorgerufen wird. Bei größeren Querschnitten kann hingegen beobachtet werden, dass der  $CO$ -Gehalt weiterhin proportional abfällt, während sich der  $CO_2$ -Gehalt geringfügiger ändert, wodurch eine geringere Korrektur der Messwerte hervorgerufen wird. Eine tiefergehende Untersuchung und Begründung dieses Zusammenhanges sind aufgrund der beschränkten Messwerte nicht möglich.

Für die *BMW R1150GS* ist keine optische Auffälligkeit im Endrohr anzumerken, welche mit den Beobachtungen zu dem  $CO_2$ -Gehalt korrelieren könnte. Da sich diese Auffälligkeiten für jede der vier wiederholten Messreihen zeigen, ist jedoch auch hier eher von einem gleichbleibenden Einfluss für die genannten Einführungstiefen, anstatt zufälliger Abweichungen, auszugehen.

Grundsätzlich lässt sich jedoch auch für diese drei Krafträder keine eindeutige Korrelation zwischen der Einführungstiefe der Messsonde und der Genauigkeit der korrigierten  $CO$ -Werte feststellen, die eine allgemeine Aussage ermöglichen würden. Die Auffälligkeiten sind als spezifische Besonderheiten der Abgasanlagen der Krafträder für die jeweiligen Einführungstiefen einzustufen.

## 5.2 Beantwortung der Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung dieser Bachelorarbeit lag darin, durch die Aufnahme von Messreihen zu überprüfen und zu bewerten, bis zu welcher Einführungstiefe der Messsonde die Korrekturformeln für die  $CO$ -Messwerte im Rahmen der Abgasuntersuchung an Krafträdern angewendet werden können.

Diese Aufgabenstellung konnte nicht vollständig beantwortet werden, da bei den für die Bewertung der Genauigkeit der korrigierten  $CO$ -Werte vorgesehenen Referenzwertem bei einem Teil der untersuchten Krafträder eine Verfälschung der Messwerte erkannt wurde. Für die verbleibenden Krafträder konnten diese korrigierten  $CO$ -Werte jedoch als sehr realistisch eingeordnet werden.

Für die untersuchten Krafträder haben sich die korrigierten  $CO$ -Werte zu einem jeweils sehr ähnlichen Wert ergeben, wodurch deren Differenz zu dem jeweiligen unverfälschten  $CO$ -Gehalt über die gesamte Einführungstiefe gleichbleibend ist. Abweichungen von dieser Beobachtung konnten mit kraftradspezifischen Besonderheiten der Abgasanlagen in Verbindung gesetzt werden.

Es kann daher abschließend festgehalten werden, dass die Ergebnisse dieser Bachelorarbeit auf eine geringe Differenz zwischen den korrigierten  $CO$ -Werten und den unverfälschten  $CO$ -Gehalt in den Abgasen hindeuten. Es kann somit eine hohe Genauigkeit der Korrekturformeln angenommen werden, welche sich mit den generierten Messdaten jedoch nicht vollständig bestätigen lässt. Eine allgemeine Abhängigkeit dieser Genauigkeit von der Einführungstiefe der Messsonde ist dabei nach den Erkenntnissen dieser Untersuchungen auszuschließen. Damit ist die Anwendbarkeit der Korrekturformeln nicht grundsätzlich in der Einführungstiefe der Messsonde begrenzt.

---

### 5.3 Methodenkritik und Ausblick

Abschließend wird festgehalten, dass diese Arbeit, wie auch andere Forschungsarbeiten, in gewisser Weise begrenzt ist. Die gewählte Methodik zur Erfüllung der Zielsetzung dieser Bachelorarbeit hat sich, unter Berücksichtigung der beschränkten Möglichkeiten, als grundsätzlich zielführend erwiesen. Auch wenn abschließend keine vollständige Beantwortung der Aufgabenstellung erreicht wurde, konnten grundlegende Erkenntnisse auf diesem unerforschten Themengebiet gesammelt werden. Für die gewonnenen Erkenntnisse und Beobachtungen dieser Untersuchungen sollte dabei jedoch berücksichtigt werden, dass vor allem in der dritten Untersuchung überwiegend einzelne Messreihen an den Krafträdern aufgenommen und ausgewertet wurden. Auch wenn sich die Reproduzierbarkeit in der ersten Untersuchung gut und damit die zu erwartenden zufälligen Abweichungen der Messungen als gering gezeigt haben, ist die Aussagekraft der generierten Ergebnisse immer kritisch zu betrachten.

Auch muss erwähnt werden, dass das gewählte Vorgehen nur für Krafträder angewendet werden konnte, bei denen eine Mindesteinführungstiefe der Messsonde von  $300\text{ mm}$  gewährleistet erreicht wird. Da die Korrekturformeln jedoch gerade bei Krafträdern angewendet werden müssen, bei denen dies nicht der Fall ist, kann nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden, dass die abweichende Bauart dieser Endschalldämpfer Einflüsse auf die Anwendbarkeit der Korrekturformeln hat.

Es wurde bereits angemerkt, dass ein Grund für die Beschränkung der möglichen Messreihenanzahl einerseits deren zeitlicher Aufwand und andererseits die beschränkte Verfügbarkeit von Krafträdern darstellte. Ausschlaggebend dafür war das verwendete Abgasuntersuchungssystem, welches nicht für die kontinuierliche Messung über einen längeren Zeitraum ausgelegt ist. Folglich wurden die Messreihen, im Besonderen an den Zweitaktkrafträdern, durch Selbstreinigungsphasen des Messgerätes unterbrochen, welche mit einem Umfang von bis zu  $45\text{ min}$  die Wiederholung der betroffenen Messreihen notwendig machte. In weiterführenden Untersuchungen zu dieser Thematik sollte daher die Verwendung alternativer Messsysteme in Betracht gezogen werden, um so den Umfang an Messreihen und damit die Aussagekraft der Untersuchungen zu erhöhen.

Zukünftig sollten insbesondere Arbeiten auf diesem Themengebiet, welche durch einen alternativen Versuchsaufbau die Erfassung des unverfälschten  $\text{CO}$ -Gehaltes in den Abgasen der Krafträder ermöglichen, priorisiert werden, um die grundlegenden Erkenntnisse dieser Bachelorarbeit zu validieren und eine vollständige Beantwortung der Aufgabenstellung zu ermöglichen. Zusätzlich könnten dadurch weitere Untersuchungen an Abgasanlagen vorgenommen werden, welche nur sehr geringe Einführungstiefen erlauben.

---

Die Erfassung des unverfälschten *CO*-Gehaltes in den Abgasen der Krafträder hätte außerdem auch für die Abgasuntersuchung an Krafträdern im Generellen eine sehr hohe Relevanz, da sich nach den Erkenntnissen dieser Untersuchungen die vorgeschriebene Mindesteinführungstiefe der Messsonde als ungenügend darstellt, um die Verfälschung der *CO*-Messwerte auszuschließen. Auch diese Beobachtung kann zukünftig dementsprechend durch weitere Forschungen tiefergehend untersucht sowie beurteilt werden.

---

## 6 Zusammenfassung

Die Zielsetzung dieser Bachelorarbeit sah es vor, die im Rahmen der Abgasuntersuchung bei Krafträdern angewendeten Korrekturformeln für  $CO$ -Messwerte eingehender zu untersuchen und eine Aussage darüber zu treffen, bis zu welcher Einführungstiefe der Messsonde diese angewendet werden können. Dazu wurden bei ausgewählten Krafträdern Messreihen des  $CO$ - und  $CO_2$ -Gehaltes über die Einführungstiefe der Messsonde in das Endrohr der Abgasanlage aufgenommen.

Da für die Aufnahme und Auswertung der Messungen jedoch auf keine Vorkenntnisse bezüglich der erwartbaren Qualität der Messergebnisse zurückgegriffen werden konnte, wurde in einer ersten Untersuchung durch die wiederholte Aufnahme der Messreihen an den gleichen Krafträdern die Reproduzierbarkeit der Messungen betrachtet. Dabei haben sich zwischen den Messreihen sowohl für die Messung des  $CO$ -Gehaltes als auch des  $CO_2$ -Gehaltes sehr geringe Abweichungen ergeben, welche auf eine gute Reproduzierbarkeit der Messung schließen lassen. Bei Anwendung der Korrekturformeln auf die Messreihen konnte für die korrigierten  $CO$ -Werte eine deutliche Streuung der Werte festgestellt werden, welche überwiegend in dem Aufbau der Korrekturformeln als mathematisches Produkt begründet ist. Die Bewertung der korrigierten  $CO$ -Werte in den nachfolgenden Untersuchungen wurde trotz dieser Abweichungen als zielführend eingestuft.

In einer zweiten Untersuchung sollte die Endrohr-Adaption für Vergleichsmessungen herangezogen werden, um daraus eine Anforderung an die Genauigkeit der Korrekturformeln zu formulieren. Auf Grund nicht eindeutiger Ergebnisse und der Erkenntnis, dass bereits die  $CO$ -Messwerte der vorgeschriebenen Mindesteinführungstiefe einer Verfälschung durch die Frischluftvermischung unterliegen, wurde von diesem Vorgehen abgesehen.

Unter Berücksichtigung der zuvor erlangten Erkenntnisse wurden in der dritten Untersuchung die Messreihen an einzelnen Krafträdern ausgewertet. Dabei konnte die grundlegende Erkenntnis erlangt werden, dass alle untersuchten Krafträder von einer Verfälschung der  $CO$ -Messwerte für kleine Einführungstiefen der Messsonde betroffen sind und eine Korrektur damit notwendig ist. Da in der zweiten Untersuchung auch eine Verfälschung des  $CO$ -Messwertes bei der Mindesteinführungstiefe erkannt wurde, konnte nur eine beschränkte Bewertung der korrigierten  $CO$ -Werte gegenüber einem Referenzwert durchgeführt werden. Dieser Vergleich hat jedoch darauf hingedeutet, dass im Grundsatz von geringen Differenzen und damit von einer guten Genauigkeit der Korrekturformeln ausgegangen werden kann.

Auch wenn nicht für alle untersuchten Krafträder ein Vergleich der korrigierten  $CO$ -Werte mit einem Referenzwert möglich war, kann in Bezug auf die Zielsetzung der Bachelorarbeit

---

festgehalten werden, dass kein direkter Zusammenhang zwischen der Genauigkeit der Korrekturformeln und der Einführungstiefe deutlich geworden ist. Dadurch ist die Anwendung der Korrekturformeln nicht in der Einführungstiefe der Messsonde begrenzt. Vielmehr deuten die erlangten Erkenntnisse darauf hin, dass etwaige Abweichungen in kraftradspezifischen Besonderheiten begründet sind. Unter anderem die Untersuchung dieser Besonderheiten sowie die Validierung der Erkenntnisse dieser Bachelorarbeit kann als Grundlage für weiterführende Arbeiten zu dieser Thematik gesehen werden.

---

## Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (HRSG.), *Umweltbewusstsein in Deutschland 2016. Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage*. Berlin: BUMB, 2017
- [2] Umweltbundesamt (HRSG.), *CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland. Mögliche Maßnahmen und ihre Minderungspotentiale*. Dessau-Roßlau: UBA, 2010
- [3] E-M. Hackbarth & W. Merhof, *Verbrennungsmotoren. Prozesse, Betriebsverhalten, Abgase*. Wiesbaden: Vieweg, 1998
- [4] R. van Basshuysen & F. Schäfer, *Handbuch Verbrennungsmotor*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015
- [5] K. Reif, *Abgastechnik für Ottomotoren*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015
- [6] Kraftfahrt-Bundesamt (HRSG.), *Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen*. Flensburg, 2021
- [7] DieselBike.net, 2021, URL: <http://www.dieselbike.net/motorcycles/motorcycles.html>
- [8] T. Ålander et al., “Particle Emissions from a Small Two-Stroke Engine: Effects of Fuel, Lubricating Oil, and Exhaust Aftertreatment on Particle Characteristics”, *Aerosol Science and Technology*, vol. 39, pp. 151-161, 2005
- [9] Dr. A. Zwahr (HRSG.), *Brockhaus Universallexikon*. Band 14, Leipzig: F.A. Brockhaus, 2003
- [10] J. Stoffregen, *Motorradtechnik. Grundlagen und Konzepte von Motor, Antrieb und Fahrwerk*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018
- [11] D. Bresch-Pietri, T. Leroy, N. Petit, *Controloriented time-varying input-delayed temperature model for si engine exhaust catalyst*. Artikel in *American Control Conference (ACC)*, 2013, 2189–2195. IEEE.
- [12] M. E. Crane et al., *Reduced Cold-Start Emissions Using Rapid Exhaust Port Oxidation (REPO) in a Spark Engine*. in *SAE970264*, 1997
- [13] N. F. González et al., *Methodology for instantaneous average exhaust gas mass flow rate measurement*. Artikel in *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 49, 2016
- [14] Dr. A. Zwahr (HRSG.), *Brockhaus Universallexikon*. Band 11, Leipzig: F.A. Brockhaus, 2003
- [15] H. Nakamura et al., *Analysis of pulsating flow measurement of engine exhaust by a Pitot tube flowmeter*, *International Journal of Engine Research*, 2005
- [16] Prof. Dr. M. Burgmer, *Handbuch zur AU-Schulung von verantwortlichen Personen und Fachkräften*. Vogel Buchverlag, 2011

- 
- [17] Afflerbach et al. (21.09.2021). *Arbeitsanweisung zur Durchführung der Abgasuntersuchung an Krafträdern*. [Online-PDF] URL: [https://www.idk-hannover.de/attachments/139\\_ArbeitsanweisungAUK.pdf](https://www.idk-hannover.de/attachments/139_ArbeitsanweisungAUK.pdf)
- [18] K. Schnoor, (persönliche Kommunikation, 12.08.2021)
- [19] F. P. León, *Messtechnik. Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Berlin: Springer Vieweg, 2019
- [20] Robert Bosch GmbH (HRSG.): *BEA060 Bedienungsanleitung*. Bedienungsanleitung, 2016
- [21] J. Brettschneider, *Berechnung des Luftverhältnisses  $\lambda$  von Luft-Kraftstoff-Gemischen und des Einflusses von Messfehlern auf  $\lambda$* . Bosch Technische Berichte, 1979



## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Lüth

Vorname: Juri

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Bewertung, Überprüfung und Optimierung der Abgaskorrekturformel im Rahmen der periodischen Abgasuntersuchung bei Krafträdern

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

*- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -*

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der Bachelorarbeit ist erfolgt durch:

\_\_\_\_\_  
Ort Datum Unterschrift im Original