

VEMAC GmbH & Co. KG  
Aachen

**Entwicklung eines vollintegrierten piezoelektrischen  
Gemischbildners zur Abgasentgiftung von Kleinmotoren**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 28755 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Michael Reke

August 2012

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>28755</b>	Referat	<b>21/0</b>	Fördersumme	<b>122.500,00 EUR</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Entwicklung eines voll integrierten piezoelektrischen Gemischbildners zur Abgasentgiftung von Kleinmotoren</b>			
<b>Stichworte</b>					
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>21 Monate</b>	<b>02.08.2010</b>	<b>02.05.2012</b>			
Zwischenberichte	1. Zwischenbericht	31.02.2011			
	2. Zwischenbericht	31.08.2011			
<b>Bewilligungsempfänger</b>	VEMAC GmbH & Co. KG Krantzstr. 7 / Halle 33 a 52070 Aachen E-Mail: <a href="mailto:contact@vemac.de">contact@vemac.de</a> www.vemac.de			Tel 0241 / 1829 – 290 Fax 0241 / 1829 – 299 Projektleitung Dipl.-Ing. Michael Reke Bearbeiter	
<b>Kooperationspartner</b>					

### **Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens**

Die Kraftstoff-Gemischbildung bei Antriebs-Verbrennungsmotoren von handgeführten Maschinen und Motorrädern erfolgt nach wie vor durch technisch relativ einfache mechanische Vergaser. Daher wurde in einem von der DBU geförderten Projekt (AZ 25301) mit einem Demonstrator die Machbarkeit der von VEMAC patentierten umweltfreundlichen Piezovergasertechnologie (EP 1353058) nachgewiesen. Mit diesem Projekt soll die Technologie durch die Entwicklung eines voll integrierten Piezovergasers weiterentwickelt werden. Die dadurch zu erwartende bessere Wirtschaftlichkeit wird zu einem Einsatz in großen Stückzahlen und damit zu einer relevanten Umweltentlastung durch verminderte Abgasemissionen führen.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Mit der Entwicklung eines voll integrierten piezogesteuerten Gemischbildners/Vergasers, mit dem nicht nur die bereits nachgewiesenen Verbesserungspotentiale (Emission und Verbrauch) erreicht bzw. überschritten werden, wird eine auch im Hinblick auf Materialeinsatz und damit wirtschaftlich deutlich optimierte Lösung erarbeitet. Die so für Privatpersonen erreichbare Wirtschaftlichkeit soll zu einer großflächigen Einführung dieser Technologie führen und damit zu einer erheblichen Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission. Gleichzeitig soll auch das Potenzial der Technologie, bei einer Verschärfung der Abgasgesetzgebung, durch Versuche mit optimierten Katalysatoren aufgezeigt werden. Für eine geschlossene technische und kommerzielle Darstellung soll auch das Potenzial des gesteuerten Betriebs ohne Lambdasonde anstelle des Betriebs in einem geschlossenen Regelkreis mit Lambdasonde untersucht werden.

# Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen .....	6
1. Zusammenfassung .....	7
1.1. Ausgangssituation .....	8
1.2. Aufgabenstellung .....	9
1.3. Zielsetzung und Aufgabenstellung des Projektes .....	11
2. Potenzialuntersuchung .....	13
2.1. Emissionsverhalten .....	13
2.2. Systemvereinfachung .....	17
2.3. Elektronisches Steuerungssystem .....	22
3. Konzeption des integrierten piezoelektrischen Vergasers .....	25
3.1. Entwurf und Berechnung .....	25
4. Konstruktion und Realisierung .....	32
4.1. Grundkonstruktion .....	32
4.2. Piezomodul .....	34
4.3. Vergaser für den Hero Honda Versuchsträger .....	39
4.4. Vergaser für den Briggs&Stratton Versuchsträger .....	41
5. Versuchsergebnisse .....	42
5.1. Der Piezo in neuer Einbausituation .....	42
5.2. Durchflussmessungen .....	45
5.3. Motorprüfstandsergebnisse Hero Honda .....	49
5.4. Motorprüfstandsergebnisse Briggs&Stratton .....	52
6. Ökologische und ökonomische Gesamtbetrachtung .....	57
7. Fazit .....	58
8. Literaturverzeichnis .....	59

## Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Graphiken und Tabellen

Abbildung 1.1 Verteilung des weltweiten Motorradmarktes nach Regionen .....	8
Abbildung 1.2 Vergleich der Abgasemission eines Motors mit Original- (rot) bzw. Piezo-Vergasers (grün) .....	9
Abbildung 1.3 Kumulierter Effekt in to der Reduktion an CO <sub>2</sub> -Emission wenn ab 2010 alle Neuzulassungen mit elektronischen Vergasern ausgerüstet würden.....	10
Abbildung 2.1 Qualitative Beziehung zwischen Kosten und Emissionen bei Einsatz von Katalysator-technologie.....	13
Abbildung 2.2 Lambdastabilität mit aufwändigerer Regelung .....	14
Abbildung 2.3 Kraftstoffverbrauch im Vergleich (gelb mit Katalysator) .....	15
Abbildung 2.4 CO Emissionen im Vergleich (gelb mit Katalysator) .....	15
Abbildung 2.5 HC Emissionen im Vergleich (gelb mit Katalysator).....	16
Abbildung 2.6 NO <sub>x</sub> Emissionen im Vergleich (gelb mit Katalysator).....	16
Abbildung 2.7 Durchflusskennfeld eines Piezomoduls mit PWM modulierter Ansteuerung .....	18
Abbildung 2.8 Hystereseoperator und Superposition der Hystereseoperatoren $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$ [7] .....	19
Abbildung 2.9 Geometrische Darstellung der Preisach-Funktion .....	19
Abbildung 2.10 Zustände im Preisach-Model .....	20
Abbildung 2.11 Gemessener Aktuatorhub .....	21
Abbildung 2.12 Simulierter Aktuatorhub .....	22
Abbildung 2.13 Bisherige Funktionsarchitektur mit zwei Prozessoren.....	23
Abbildung 2.14 Neue Funktionsarchitektur mit einem zentralen Prozessor.....	23
Abbildung 2.15 Bisheriges Steuergerät mit zwei Prozessoren (links) und neues Steuergerät mit einem zentralen Prozessor (rechts). .....	24
Abbildung 3.1 Prinzipskizze des Vergaserkonzeptes .....	28
Abbildung 3.2 Prinzipdarstellung der Dichtstelle.....	29
Abbildung 3.3 Ansicht der Düsengeometrie.....	30
Abbildung 4.1 Vollständiger Vergaser .....	32
Abbildung 4.2 Piezovergaser am Prüfstand.....	33
Abbildung 4.3 Schnitt durch den Piezovergaser .....	33
Abbildung 4.4 Schnittdarstellung der Düsengeometrie .....	34
Abbildung 4.5 Piezomodul.....	35
Abbildung 4.6 Biege-Piezoaktuator mit modifizierten Käfig .....	35
Abbildung 4.7 Aktuator über Düse .....	36
Abbildung 4.8 Beschichteter Aktuator.....	36
Abbildung 4.9 Federnstößel.....	37
Abbildung 4.10 Federnstößel über Aktuator .....	37
Abbildung 4.11 Einstellen der Feder.....	38
Abbildung 4.12 Flächenpressung in Abhängigkeit von der Düsenrandbreite und Vorspannkraft (Düsendurchmesser 2.0mm) .....	39
Abbildung 4.13 Realisierung des modular integrierten Vergaser für den Hero Honda Versuchsträger .....	39
Abbildung 4.14 Hero Honda Versuchsträger mit neuem Vergaser auf dem Prüfstand .....	40
Abbildung 4.15 Neuer Vergaser auf Hero Honda Versuchsträger montiert .....	40
Abbildung 4.16 CAD Konstruktion des Vergasers für den Briggs&Stratton Versuchsträger .....	41
Abbildung 4.17 Fotos des Vergasers für den Briggs&Stratton Versuchsträger .....	41

Abbildung 4.18 Briggs&Stratton Versuchsträger mit neuem Vergaser auf dem Motorprüfstand .....	42
Abbildung 5.1 Messanordnung .....	43
Abbildung 5.2 Messmodul am Prüfstand .....	43
Abbildung 5.3 Prüfstandssoftware .....	44
Abbildung 5.4 Messanordnung ohne Vorbelastung des Aktuators .....	45
Abbildung 5.5 Aktuatorhub ohne Vorbelastung .....	45
Abbildung 5.8 Durchflussprüfstand .....	46
Abbildung 5.9 Messanordnung zur Massenstromermittlung .....	47
Abbildung 5.10 Gemessene Kraftstoffmassenströme durch Piezomodul .....	48
Abbildung 5.11 Variation von Düsendurchmesser ( $F_{F0}=167\text{mN}$ ) .....	48
Abbildung 5.12 Aufbau am Prüfstand .....	50
Abbildung 5.13 Gegenüberstellung der Motorleistung .....	50
Abbildung 5.14 Kraftstoff-Luft-Verhältnis bei 25% Drosselklappenstellung .....	51
Abbildung 5.15 Gegenüberstellung des Kraftstoffverbrauches .....	51
Abbildung 5.16 Prozentuale Kraftstoffersparnis .....	52
Abbildung 5.17 Die aktuellen Grenzwerte in der EU und in den USA im Vergleich ..	53
Abbildung 5.18 Lambdawerte mit Originalvergaser .....	54
Abbildung 5.19 Ergebnis der Emissionsmessung mit Originalvergaser .....	54
Abbildung 5.20 Lambdastabilitätsuntersuchung bei einem Sollwert von $\lambda=0,95$ .....	55
Abbildung 5.21 Ergebnis der Emissionsmessung mit Piezovergaser .....	56

## Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

	Begriff	physikalische Einheit
A	Fläche	[m <sup>2</sup> ]
ACEM	Association des Constructeurs Européens de Motorycles	[-]
c	Federsteifigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]
CO	Kohlenmonoxid	[-]
CO	Wegbezogener Kohlenmonoxidmassenausstoß	[g/km]
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid	[-]
CO <sub>2</sub>	Wegbezogener Kohlendioxidmassenausstoß	[g/km]
d	Abstand	[mm]
EEX	European Energy Exchange	[-]
ECU	Electronic Control Unit	[-]
EU	Europäische Union	[-]
F	Kraft	[N]
g	Erdbeschleunigung	[Nkg/s <sup>2</sup> ]
H	Matrix mit Wichtungswerten der Preisachfunktion	[-]
HC	Kohlenwasserstoffe	[-]
HC	Wegbezogener Kohlenwasserstoffmassenausstoß	[g/km]
H <sub>2</sub> O	Wasser	[-]
LKW	Lastkraftwagen	[-]
PCC	Piezo Controlled Carburettor (Piezo-Vergaser)	[-]
PKW	Personenkraftwagen	[-]
PWM	Pulsweitenmodulation	[-]
MAP	Manifold Air Pressure	[Pa]
NBR	Nitril-Butadien-Kautschuk	[-]
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus	[-]
NO <sub>x</sub>	Stickoxide	[-]
V	Volumen	[m <sup>3</sup> ]
V	Volumen	[m <sup>3</sup> ]
XML	Extensible Markup Language	[-]
$\alpha_i$	Schaltschwelle zum Einschalten eines Hystereseoperators	[V]
$\beta_i$	Schaltschwelle zum Ausschalten eines Hystereseoperators	[V]
$\Delta p$	Druckdifferenz	[Pa]
$\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$	Hystereseoperator	[1]
$\mu(\alpha,\beta)$	Wichtungsfunktion im Preisachmodell	[1]
$\lambda$	Lambda (Luft-Kraftstoffgemisch)	[-]
$\rho_B$	Dichte des Brennstoffs	[kg/m <sup>3</sup> ]

## Zusammenfassung

Dieses Forschungsprojekt sollte das Potential des Piezovergasers im Vergleich zum herkömmlichen mechanischen Vergaser aufzeigen. Anhand unterschiedlicher Motoren mit unterschiedlichen Anforderungsprofilen (Rasenmähermotor, kleiner Motorradmotor, etc.) wurde ein hoher Reifegrad der bestehenden Technologie festgestellt. Um aber aktuelle und zukünftige Emissionsrichtlinien umsetzen zu können, sind die Möglichkeiten des mechanischen Vergasers limitiert bzw. ausgeschöpft. Der Piezovergaser stellt also eine Möglichkeit dar, zukünftige ökologische und ökonomische Ziele erreichen zu können. Nach heutigem Stand der Technik besitzt in diesem Umfeld der Piezovergaser den Vorteil des einfachen Aufbaus und den dadurch niedrigen Fertigungskosten bei hohem technologischen Potential hinsichtlich der Verbrauchs- und Emissionsreduzierung. Ein Erfolg dieser Technologie hängt aber nicht nur vom technologischen Ergebnis ab, sondern wird auch in einem nicht geringen Umfang von wirtschaftlichen und politischen Interessen bestimmt.

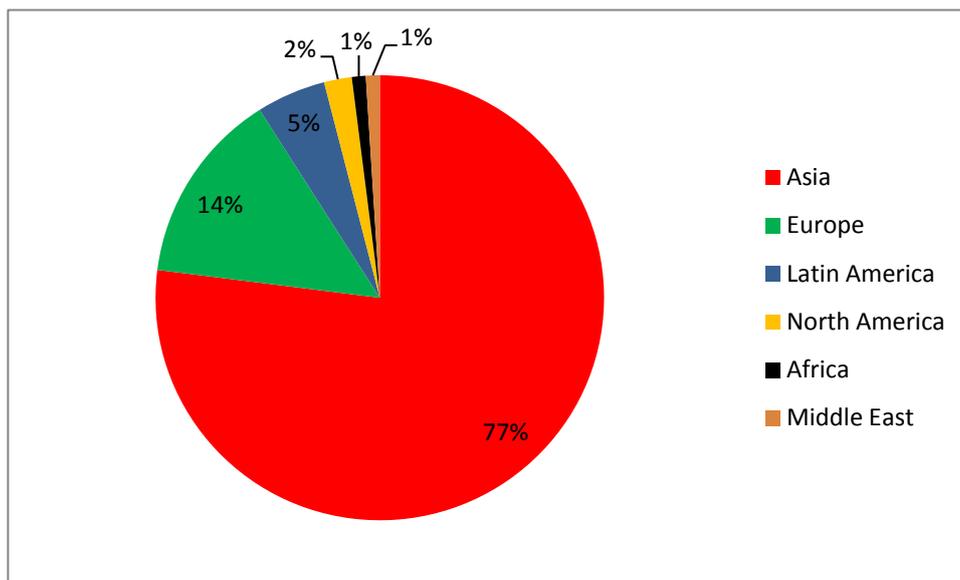
# 1. Einleitung

## 1.1. Ausgangssituation

Der „Otto-Motor“ ist das dominierende Motorenprinzip bei Krafträdern, Industrieantrieben mit geringer Leistung und handgeführten Maschinen. Gleichzeitig sind die bei diesen Motoren eingesetzten Gemischbildner technisch vergleichsweise einfach aufgebaut.

Der Betrieb von Verbrennungsmotoren ist aufgrund der nicht vollkommenen Verbrennung fossiler Kraftstoffe mit gasförmigen Emissionen verbunden, die zu erheblichen Umweltbelastungen führen. Bei größeren Kraftfahrzeugen (Pkw und Lkw) hat dieser Umstand zur Einführung und kontinuierlichen Verschärfung von Abgasgrenzwerten geführt und die Hersteller zur Entwicklung und Einführung der o.g. Abgasentgiftungstechnologien gezwungen, wobei die Grenzwerte für Motorräder, primär aus Gründen technologischer Natur, moderater sind. Eine Umweltentlastung durch diese Maßnahmen ist ohne Zweifel feststellbar [1].

Betrachtet man die weltweite Verteilung der zugelassenen Motorräder, so wird deutlich, dass Nordamerika und Europa mit ihren erfolgreichen und strengen Abgasnormen zusammen gerade einmal 16% ausmachen. (siehe hierzu Abbildung 1.1) [2].



**Abbildung 1.1 Verteilung des weltweiten Motorradmarktes nach Regionen**

Alleine in 2008 waren weltweit 313 Mio. Motorräder zugelassen. Dabei machte der asiatische Markt mit 77% oder 241 Mio. Motorrädern den größten Teil aus, wobei hier China, gefolgt von Indien, die zulassungsstärksten Länder sind. Aufgrund der bisher beobachteten und auch weiterhin vorhergesagten Wachstumsraten in der Größenordnung von 10% [3] spielen diese Märkte nicht nur wirtschaftlich sondern auch umweltpolitisch eine erhebliche Rolle.

Insbesondere die indische Regierung hat dies erkannt und weitgehende Maßnahmen eingeleitet. Sie will nicht nur eine Art Emissionshandel noch im Jahr 2011 [4] starten, sondern unterstützt dies z.B. über Konferenzen, Einbindung der Industrie und gezielte Forschungsarbeiten.

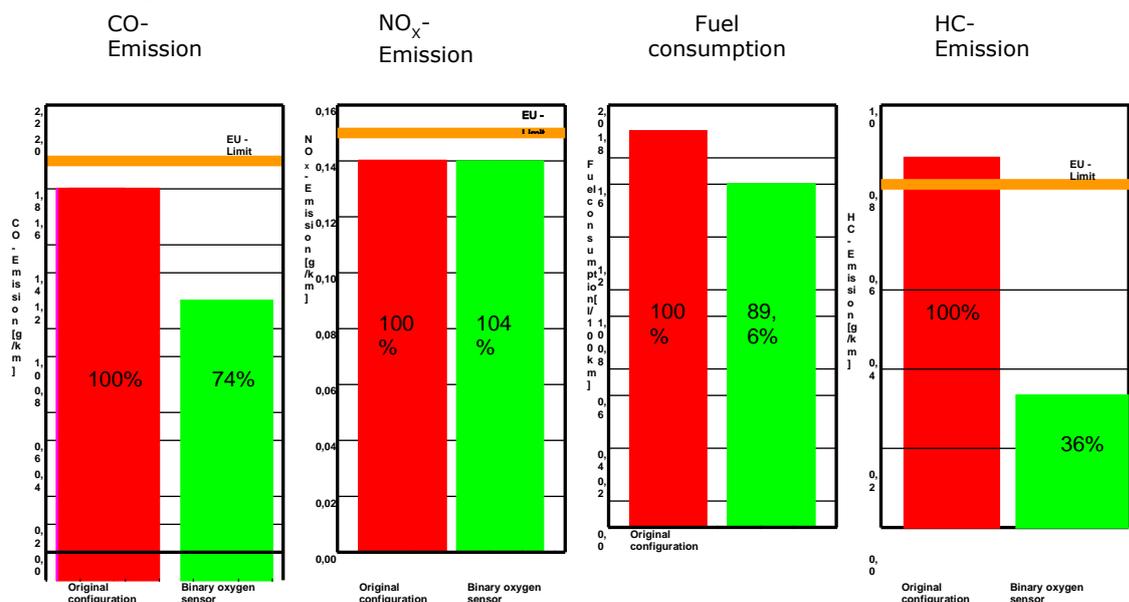
Mit dem technologisch neuartigen Lösungsansatz der Firma VEMAC sollen sowohl in Europa heutige, als auch die z.Z. diskutierten zukünftigen Emissionsgrenzwerte für

Motorräder sicher eingehalten werden können. Die Europäische Kommission arbeitet zurzeit an den Emissionsnormen Euro 4 und Euro 5 für neue Motorräder. Um die Grenzwerte in einem für die Industrie erträglichen Rahmen zu halten, hat der europäische Verband der Motorradhersteller ACEM [5] der Kommission einen Vorschlag unterbreitet. Dieser sieht vor, dass neue Motorräder mit mehr als 50 ccm Hubraum ab 2012 Euro 4 einhalten müssen. Dabei muss der bisherige Kohlenmonoxid-Ausstoß (CO) mit einem Gramm pro Kilometer um die Hälfte gesenkt werden. Die Emission an Stickoxid (NO<sub>x</sub>) muss von 0,15 auf 0,08 g/km sinken. Mit dem nächsten Schritt der Euro 5- Norm hat der NO<sub>x</sub>- Grenzwert ab 2015 bei 0,06 g/km zu liegen. Eine Entscheidung der EU- Kommission steht noch aus. Dies gilt insbesondere für den hohen Anteil an Motorrädern mit einem Hubraum < 125ccm, aber auch für Motorräder bis zu 250ccm, für die eine aufwändige Abgasentgiftung nicht in Frage kommt (s.o.).

Die zu erwartenden Mehrkosten bei einer Großserienfertigung sollten geringfügig über den derzeitigen Systemkosten für die Gemischbildung liegen und damit deutlich unter denen für z.B. Einspritzanlagen.

## 1.2. Aufgabenstellung

Das Potential der Rohemissionsabsenkung durch einen piezoelektrischen Gemischbildner wurde im vorangegangenen Projekt deutlich gezeigt. Abbildung 1.2 zeigt die Ergebnisse im Überblick.



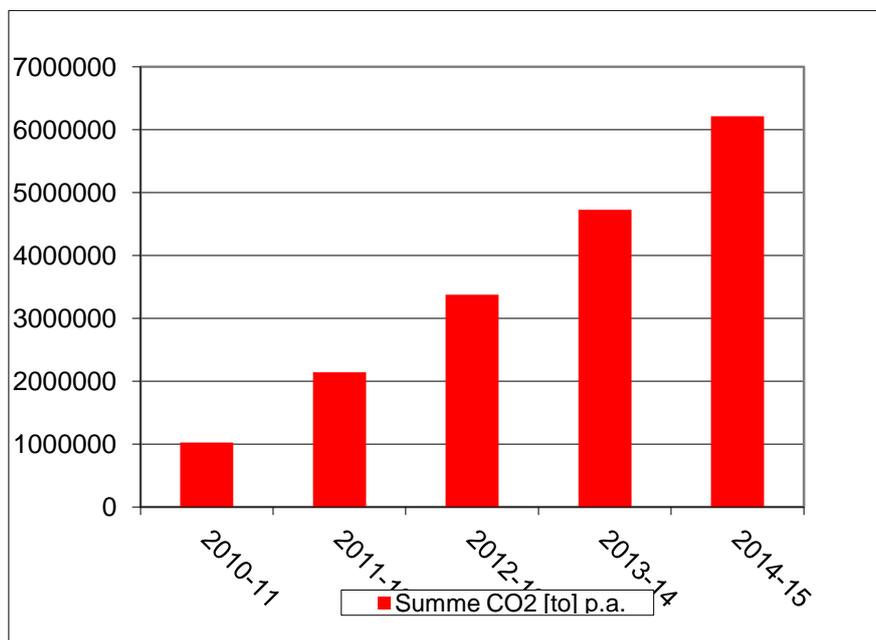
**Abbildung 1.2 Vergleich der Abgasemission eines Motors mit Original- (rot) bzw. Piezo-Vergasers (grün)**

Die Reduktion der CO<sub>2</sub> Emission ist direkt proportional zur Kraftstoffverbrauchsersparnis und kann aufgrund der Projektergebnisse mit ca. 10% beziffert werden (siehe 3.4). Legt man eine CO<sub>2</sub>-Produktion von 2,33 kg pro Liter Benzin zugrunde, sowie allein die Zulassungszahlen für zwei- und Dreiräder in Indien in 2009 (7,8 Mio), so ergäbe sich – nimmt man obige Werte (3l/km. 15.000km p.a.) an - alleine aufgrund der Neuzulassungen diesen Jahres eine Einsparung von 350 Mio. Litern Benzin bzw. einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission von 817.000t pro Jahr. Da für Indien ein starkes Wachstum an Neuzulassungen der Zwei- und Dreiräder erwartet wird [3], werden sich über Jahre hinweg beachtliche Einsparungen erzielen lassen.

Es kann davon ausgegangen werden, dass bei Erfolg und Wirtschaftlichkeit der Technologie auch Umrüstungen des Altbestandes wahrscheinlich sind. Hier hängt es im Wesentlichen auch davon ab, welche Anreize international durch die Staaten gesetzt werden.

Gelingt es Indien z.B. seine ambitionierten Pläne umzusetzen, so wird in Indien bereits in 2011 der Handel mit Energieeffizienz-Zertifikaten nach Vorbild der EU starten. Geplant ist den Handel von energieintensiven Industriezweigen schrittweise auf andere Branchen auszuweiten [4].

Abbildung 1.3 zeigt den kumulierten Effekt der Reduktion an CO<sub>2</sub>-Emission wenn ab 2010 alle Neuzulassungen mit elektronischen Vergasern ausgerüstet würden. Nicht berücksichtigt ist die Anzahl der verschrotteten Zwei- und Dreiräder. Bereits in 2010 läge der Effekt der CO<sub>2</sub>-Reduktion der neuzugelassenen Zwei- und Dreiräder in der Größenordnung von 1 Mio. Tonnen.



**Abbildung 1.3 Kumulierter Effekt in to der Reduktion an CO<sub>2</sub>-Emission wenn ab 2010 alle Neuzulassungen mit elektronischen Vergasern ausgerüstet würden.**

Betrachtet man das wirtschaftliche Potential dieser CO<sub>2</sub>-Reduktion basierend auf den heutigen Preisen (13-15€ / t CO<sub>2</sub>) der an der EEX gehandelten CO<sub>2</sub>-Zertifikaten, so wird die mögliche wirtschaftliche Bedeutung für den Staat Indien deutlich.

Ein konventioneller, mechanischer Gemischbildner kann nur in einem engen Betriebsbereich optimal abgestimmt werden. Da eine unvermeidbare Fehlabbastmungen in Kauf genommen werden muss, wird in der Regel ein Betrieb mit Kraftstoffüberschuss gewählt, um Motorschäden zu vermeiden.

Beim piezoelektrischen-Gemischbildner kann die elektronische Regelung der Gemischzusammensetzung diese Fehlabbastmungen verhindern und damit den Kraftstoffüberschuss vermeiden. Das Einsparpotential im Kraftstoffverbrauch betrug bei den Vorversuchen mehr als 15% und konnte mit dem DBU Projekt AZ 25301 mit 10% beziffert werden.

Diese Ergebnisse sollen mit diesem Projekt in unterschiedlichen Motorapplikationen mindestens bestätigt, wenn nicht sogar übertroffen werden. Der im vorherigen Projekt betrachtete Motor war in seiner Grundabstimmung bereits sehr mager, so

dass erwartet werden kann, unter anderen Voraussetzungen auch eine höhere Kraftstoffeinsparung zu erreichen.

### 1.3. Zielsetzung und Aufgabenstellung des Projektes

Die Firma VEMAC hat z.B. für Krafträder, Industrieantriebe mit geringer Leistung und handgeführte Maschinen eine Technik entwickelt und patentiert [6], mit der durch Regelung des Kraftstoffmassenstroms über piezoelektrische Aktuatoren auch in einfachen Gemischbildnern ein optimales Kraftstoff-Luftgemisch im gesamten Betriebsbereich eines Motors eingestellt werden kann. Hierdurch werden die Voraussetzungen für den Einsatz der bekannten Katalysatortechnik auch für die oben genannten Anwendungen geschaffen. Gleichzeitig lässt sich durch den elektronisch geregelten Gemischbildner ein erhebliches Kraftstoffeinsparpotential erschließen.

Beide Verbesserungspotentiale (Emission und Verbrauch) konnten mit praxisnahen Demonstratoren im Rahmen eines von der DBU geförderten Projekts AZ 25301 nachgewiesen werden (s. Abb. 2). Die bislang erzielten Ergebnisse wurden mit Hilfe von modifizierten Originalvergäsern erreicht, d.h. der jeweilige Vergaser wurde mit einem Zusatzmodul ausgestattet.

Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung eines voll integrierten piezogesteuerten Gemischbildners/Vergasers. Innerhalb dieses Projektes sollen folgende Einzelziele erreicht werden:

- Basierend auf dem bestehenden System und den vorliegenden Erfahrungen soll das Potenzial der Reduktion von Schadstoffen im Hinblick auf weitere Verschärfungen der Abgasnormen (geplant: EURO IV 2012, EURO V 2015 s.o.) untersucht und dargestellt werden. Weiterhin soll auch der gesteuerte Betrieb des Piezovergasers ohne Lambdasonde untersucht werden, da dies für viele Anwendungen eine technisch und wirtschaftlich interessante Lösung darstellen würde
- Neben den bereits nachgewiesenen Verbesserungspotentialen (Emission und Verbrauch) soll auch eine im Hinblick auf Materialeinsatz/-bilanz und damit auch eine wirtschaftlich deutlich optimierte Lösung entwickelt werden. Im Hinblick auf die Akzeptanz dieser Lösung hat die Wirtschaftlichkeit eine große Bedeutung, da eine erfolgreiche Vermarktung wesentlich von der Investitionsbereitschaft des Käufers abhängen wird. Insbesondere in Ländern wie Indien, Pakistan o.a. ist der Hebel in Bezug auf Benzinersparnis bzw. Schadstoffreduktion aufgrund der hohen Zulassungszahlen erheblich. Geht man z.B. von einer jährlichen Fahrleistung von 15.000km und einem Benzinverbrauch von 3l/100km aus so ergeben sich bei den derzeit üblichen Benzinkosten in Indien ca. 450€ für Treibstoff pro Jahr. Einer Verbrauchsreduktion von 10% aufgrund des Einsatzes eine Piezo-Vergasers würde eine Einsparung von 45€ entsprechen. Legt man Margen des Herstellers und der Vertriebsorganisation in der Größenordnung von 100% zugrunde, so dürfen die Mehrproduktionskosten für den Piezo-Vergaser 22,50€ nicht übersteigen, wenn sich die Investition für den Verbraucher bereits nach einem Jahr amortisiert haben soll. Geht man von einer Amortisation nach zwei Jahren aus, so dürfen die Mehrproduktionskosten entsprechend höher liegen. Diese Kosten sind nur mit einem vollintegrierten Piezo-Vergaser unter Ausschöpfung aller Potentiale zu erreichen. Das

Unterschreiten dieser zusätzlichen Produktionskosten und damit das Erreichen einer Marktakzeptanz wird zu einer erheblichen Umweltentlastung führen.

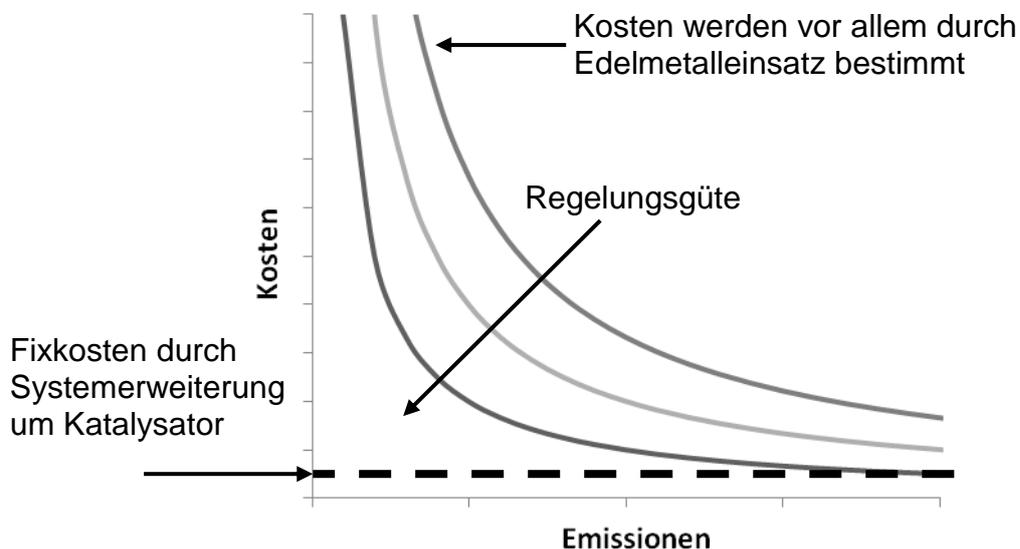
## 2. Potenzialuntersuchung

Ziel der Potenzialuntersuchung ist die Darstellung der technischen Möglichkeiten des Systems im Hinblick auf zukünftige gesetzliche Rahmenbedingungen und im Hinblick auf Kosteneinsparpotenziale. Dazu wurden unterschiedliche Aspekte untersucht und bewertet. Zunächst wurde das Emissionsverhalten des Systems unter Verwendung eines optimierten 3-Wege-Katalysators untersucht, um das Erfüllungspotenzial zukünftiger Emissionsgrenzwerte nachzuweisen. Weiterhin wurde mit einem Betrieb ohne Lambdasonde eine mögliche Systemvereinfachung untersucht, die Kosten- und Energievorteile bedeutet. Darüber hinaus wurde auch das elektronische Steuergerät für den Piezovergaser vereinfacht, indem das bisher auf zwei Prozessoren aufbauende Gerät auf nur einen reduziert wurde.

### 2.1. Emissionsverhalten

Da es sich bei der Piezo-Veragsertechnologie um eine neue Technologie handelt, ist es von großer Bedeutung auch das Potenzial zur Erfüllung möglicher verschärfter Emissionsgrenzwerte darzustellen. Besonders kritisch ist dies bei den Fahrzeuganwendungen (hier „Motorrad“), da die Grenzwerte in diesem Bereich strenger als in stationären Anwendungen sind.

Signifikante Verbesserungen im Emissionsverhalten kann bei Verbrennungsmotoren durch den Einsatz der bei Kraftfahrzeugen bekannten Katalysatortechnik erreicht werden. In Abbildung 2.1 ist zur Veranschaulichung der qualitative Zusammenhang von Kosten und Emissionen in Abhängigkeit von der Regelungsgüte dargestellt.

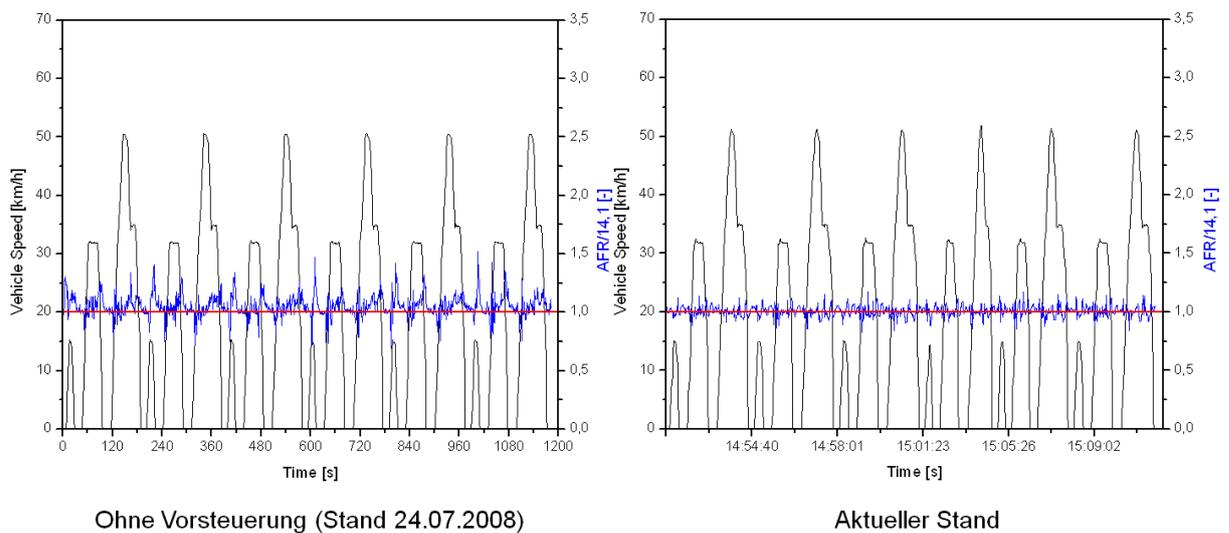


**Abbildung 2.1 Qualitative Beziehung zwischen Kosten und Emissionen bei Einsatz von Katalysatortechnologie**

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Katalysatorkosten primär von dem zu erreichenden Emissionsgrenzwert abhängen. Beim Einsatz eines Katalysator fallen zunächst einmal Fixkosten durch die Erweiterung des Abgassystems an. Für die chemische Reaktion im Abgas werden jedoch Edelmetalle wie Platin und Rhodium benötigt, in einer Menge, die sich vor allem nach dem zu erreichendem Emissionswert richtet. Die Kosten hierfür überlagern somit die Fixkosten. Durch eine optimierte Regelung des Luft-/Kraftstoffgemisches kann jedoch die Effizienz des Katalysators gesteigert werden. Das wiederum bedeutet, dass bei gleichem

Emissionswert niedrigere Kosten für den Katalysator anfallen. Dies zeigt die Notwendigkeit der Darstellung des Regelungspotenzials der Piezovergasertechnologie.

Im Rahmen des Projektes wurden daher Untersuchungen unternommen, ob die Lambdastabilität durch eine aufwändigere Regelung verbessert werden kann. Dazu wurden als zusätzliche Informationen der Druck im Saugrohr (MAP, Manifold Air-Pressure) als Lastinformation und die Drehzahl in das Steuergerät eingelesen. In Abhängigkeit von diesen beiden Messgrößen wurde dann ein Vorsteuerwert für die Piezospaltung aus einem Kennfeld berechnet. Ein Messergebnis dieser Erweiterung ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Die Messung wurde mit dem Hero Honda Versuchsträger durchgeführt.



**Abbildung 2.2 Lambdastabilität mit aufwändigerer Regelung**

Hierbei ist in der rechten Darstellung sehr deutlich die Verbesserung durch den neuen Regler zu erkennen. Als Lastprofil wurde bei dieser Messung der neue europäische Fahrzyklus (NEFZ) zugrunde gelegt.

Weiterhin wurden mit dieser optimierten Regelungen auch Messungen mit Versuchskatalysatoren durchgeführt. Dabei wurde ebenfalls der NEFZ als Basis verwendet. Die Katalysatoren wurden mit einer Beschichtung versehen, so dass auch eine 3-Wege-Reduktion möglich ist. Das bedeutet, dass gegenüber einem reinen Oxidations-Katalysator auch die NO<sub>x</sub> Emissionen reduziert werden. Die Ergebnisse der entsprechenden Messung sind in Abbildung 2.3, Abbildung 2.4, Abbildung 2.5 und Abbildung 2.6 dargestellt. In diesen Abbildungen wird die Originalkonfiguration des Hero Honda Motorrads (blau) mit der ersten Version des Piezovergasers, geregelt auf eine binäre Lambdasonde (rot), verglichen. Das Motorrad wurde hierbei mit dem serienmäßigen Abgassystem betrieben, in dem auch schon ein Oxidationskatalysator enthalten ist. Weiterhin sind in den Abbildungen die Messungen mit der optimierten Regelung und einem angepassten 3-Wege-Katalysator dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Emissionen durch den Einsatz einer derartigen Technologie noch einmal erheblich reduziert werden können.

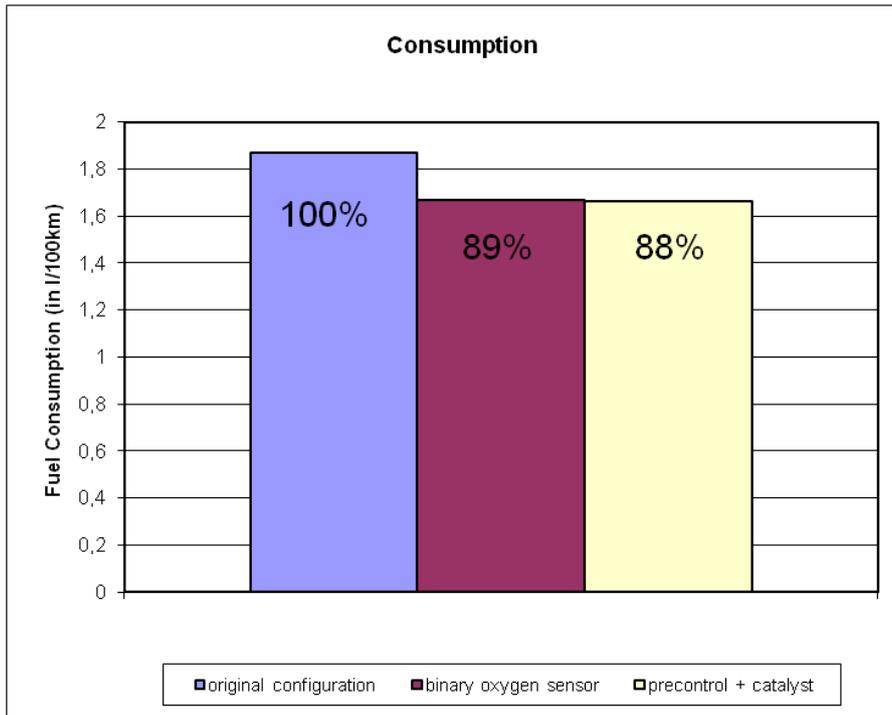


Abbildung 2.3 Kraftstoffverbrauch im Vergleich (gelb mit Katalysator)

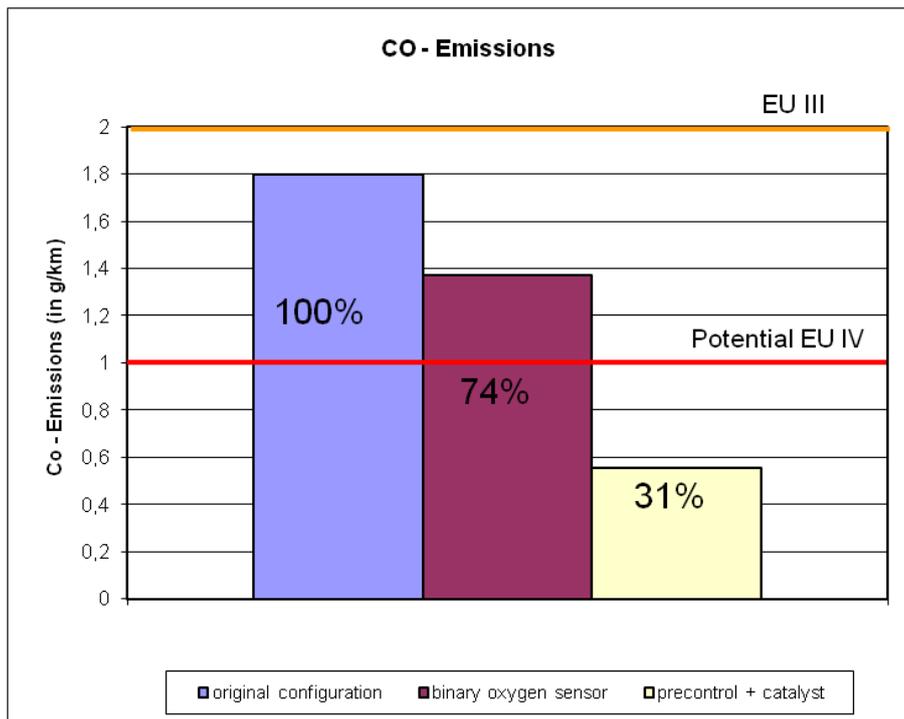


Abbildung 2.4 CO Emissionen im Vergleich (gelb mit Katalysator)

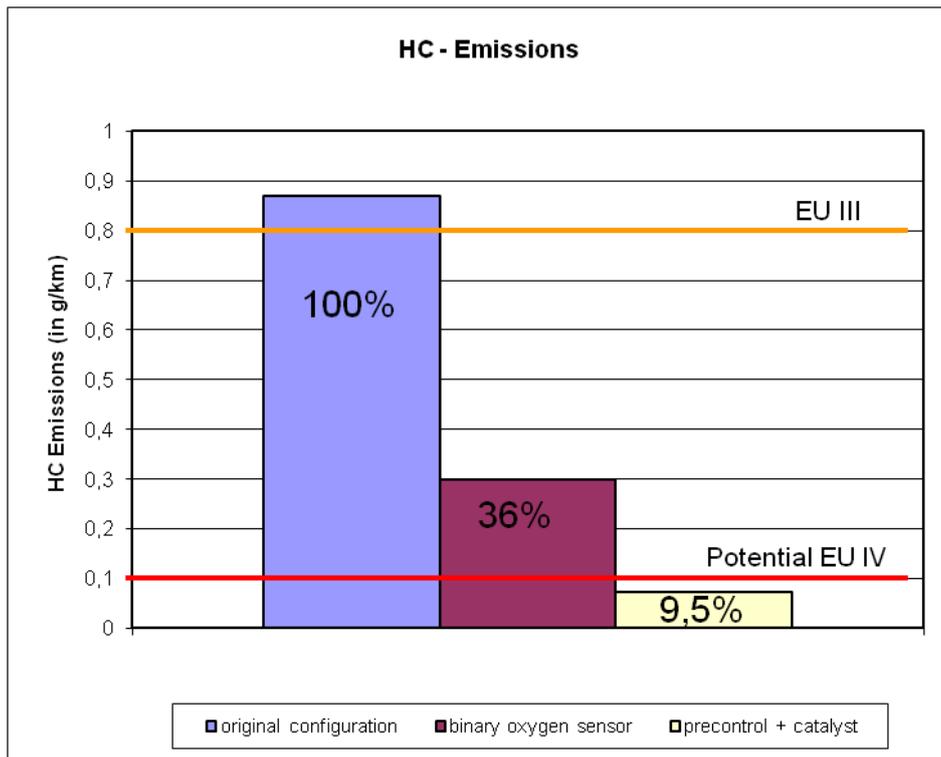


Abbildung 2.5 HC Emissionen im Vergleich (gelb mit Katalysator)

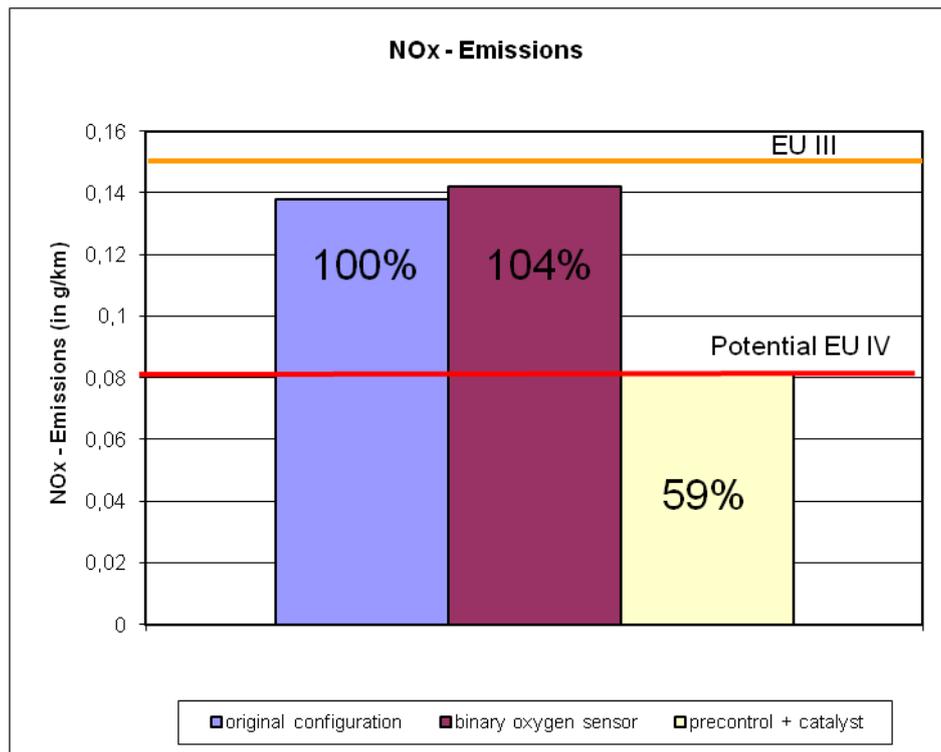


Abbildung 2.6 NOx Emissionen im Vergleich (gelb mit Katalysator)

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Piezovergasersystem erhebliches Zukunftspotenzial bietet. Wenn es aufgrund der Emissionsgesetzgebung notwendig sein wird die Emissionen weiter zu senken, so kann das mit der Piezovergasertechnologie erreicht werden, indem das System z.B. durch eine aufwändigere Regelung und / oder einen aufwändigeren Katalysator kombiniert wird.

Diese Systemerweiterung wäre auch für konkurrierende Technologien wie der Einspritzung notwendig und stellt sich somit kostenneutral dar.

## 2.2. Systemvereinfachung

Für kosten- und energiesensitive Applikationen ist ein Verzicht auf die Lambdasonde wünschenswert, da Lambdasonden zum einen im Vergleich zu den übrigen PCC-Systemkomponenten teuer sind und zum anderen mit einer Leistungsaufnahme von einigen Watt für die Heizung eine hohen Stromaufnahme des System verursachen. Diese beiden Faktoren sind insbesondere für batterielose, handgehaltene Applikationen entscheidend.

Der Verzicht auf die Lambdasonde bedeutet einen gesteuerten Betrieb des Piezovergasers, bzw. eine Regelung auf Ersatzgrößen wie z.B. die Abgastemperatur oder einer Auswertungen der Drehzahldynamik, wie es in einschlägiger Literatur beschrieben wird.

Die Voraussetzung für einen gesteuerten Betrieb ist aber eine Linearisierung der Piezowegsteuerung. Hierfür wurden zwei unterschiedliche Wege untersucht und als prinzipiell umsetzbar identifiziert. Die besondere Herausforderung dabei liegt in der Kompensation der Weg-Hysterese des Piezos.

Der erste Weg basiert auf der Idee, den Piezo mit einem Pulsweiten-moduliertem (PWM) Ansteuersignal zu betreiben. Der effektive Öffnungsquerschnitt ist bei diesem Verfahren proportional zum Tastverhältnis des PWM-Ansteuersignals.

Der zweite Weg basiert darauf die aktuelle Piezoposition auf Basis eines Simulationsmodells zu bestimmen und in Echtzeit zu verwenden.

### **PWM Ansteuerung**

Um die PWM Ansteuerung zu untersuchen wurde zunächst die Elektronik des Steuergerätes modifiziert. Hierbei mussten vor allem die Vorwiderstände verkleinert werden um ein schnelles Laden und Entladen des Piezos zu gewährleisten. Anschließend wurde eine Spezialversion der ECU Software entwickelt, mit der es möglich ist den Piezo mit einem sehr schellen Digitalsignal zu laden und zu entladen. Die Ansteuerung erfolgte mit 50Hz und mit einem einstellbarem Tastverhältnis. Für die Messung wurde das Tastverhältnis so eingestellt, dass sich auf dem Piezo die gewünschte mittlere Spannungen einstellte. Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Gegenüber der quasi kontinuierlichen Ansteuerung ist kein wesentlicher Unterschied zu erkennen.

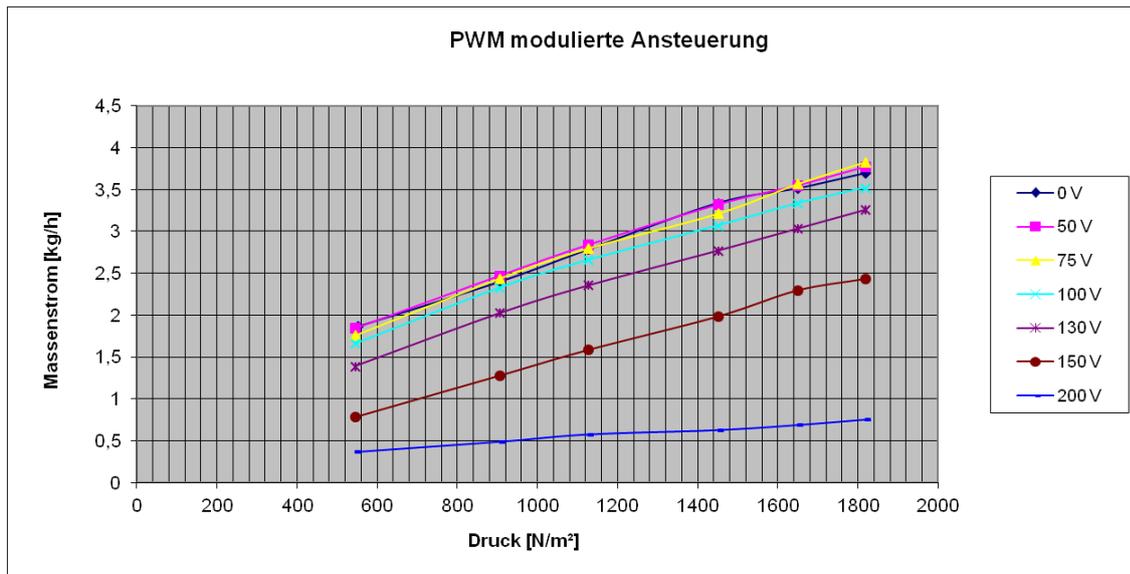


Abbildung 2.7 Durchflusskennfeld eines Piezomoduls mit PWM modulierter Ansteuerung

Nachteilig wirkt sich bei diesem Verfahren die höhere Belastung des Piezos durch ständiges Schalten aus. Typischerweise besitzen die verwendeten Piezos eine garantierte Lebensdauer von ca.  $1 \times 10^9$  Schaltspielen. Bei einer Ansteuerung mit 50 Hz ergibt sich daraus eine garantierte Lebensdauer von ca. 5.500h. Dieser Wert liegt weit über der typischen Lebensdauer der meisten relevanten Applikationen.

### Modellbasierte Hysterese-Kompensation

Für hysteresebehaftete Systeme wird vielfach das klassische Preisach-Modell zur phänomenologischen Beschreibung von Hystereseerscheinungen aus Messdaten verwendet. Im Preisach-Modell wird eine Hysteresekurve aus der Überlagerung von unendlich vielen elementaren Hystereseoperatoren  $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$  gebildet (siehe Abbildung 2.8). Diese Hystereseoperatoren sind Schaltelemente, welche zwischen zwei Zuständen mit jeweils einer konstanten Ausgabegröße wechseln.

Dabei hat jeder einzelne Operator unterschiedliche Schaltschwellen für das Eingangssignal  $u(t)$ ,  $\alpha_i$  (aufwärts) und  $\beta_i$  (abwärts), bei denen zwischen den 2 Niveaus des Ausgangssignales gewechselt wird. Für jeden Hystereseoperator  $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$  gilt:

$$\hat{\gamma}_{\alpha\beta}(u(t)) = \begin{cases} 1; & \text{für } \hat{\gamma}_{\alpha\beta} \in S^+ \text{ bzw. } u(t) \geq \alpha_i \\ 0; & \text{für } \hat{\gamma}_{\alpha\beta} \in S^- \text{ bzw. } u(t) \leq \beta_i \end{cases}$$

Das Preisach-Modell fasst die Überlagerung der Hystereseoperatoren nach [7] in folgendem Integral zusammen:

$$y(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \hat{\gamma}_{\alpha\beta}(u(t)) d\alpha d\beta$$

Dabei stellt  $y(t)$  die Ausgabegröße und  $u(t)$  die Eingabegröße dar.  $\alpha$  stellt hier die höchste zuletzt angelegte Eingangsgröße dar und  $\beta$  die kleinste. Mit der Verteilungsfunktion  $\mu(\alpha, \beta)$  wird die Preisach-Funktion gewichtet. Dadurch kann die Form der Hysterese entsprechend dem realen Vorbild verzerrt werden.

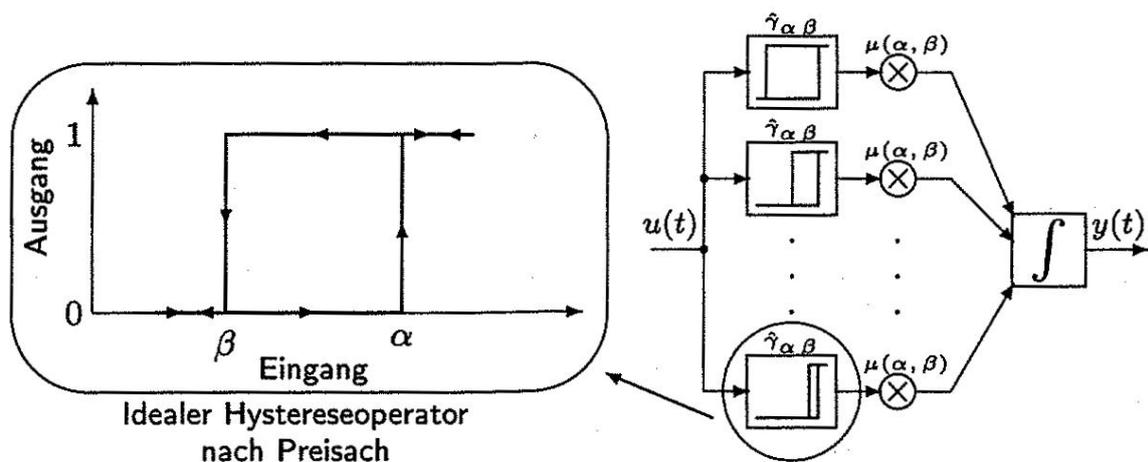


Abbildung 2.8 Hystereseoperator und Superposition der Hystereseoperatoren  $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$  [7]

Einen Zugang zur Funktion des Preisach-Modelles lässt sich am einfachsten durch die geometrische Betrachtung des berechneten Integrales finden. In Abbildung 2.9 ist eine geometrische Interpretation der Hystereseoperatoren dargestellt. Jeder Knotenpunkt im Gitter stellt einen elementaren Hystereseoperator dar. Alle Operatoren behalten ihren Zustand bis zu einer Änderung der Eingabegröße bei. Das System ist somit von vorangegangenen Zuständen abhängig.

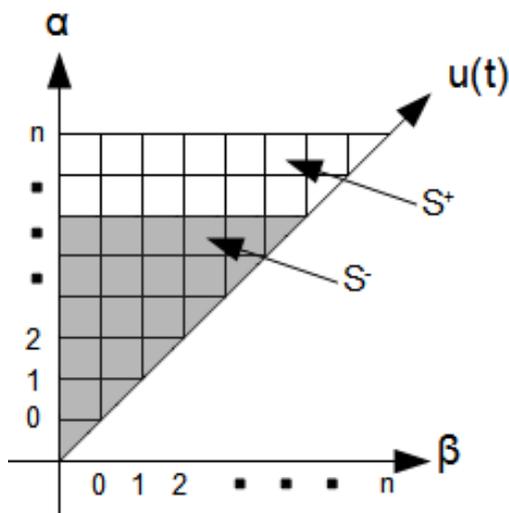
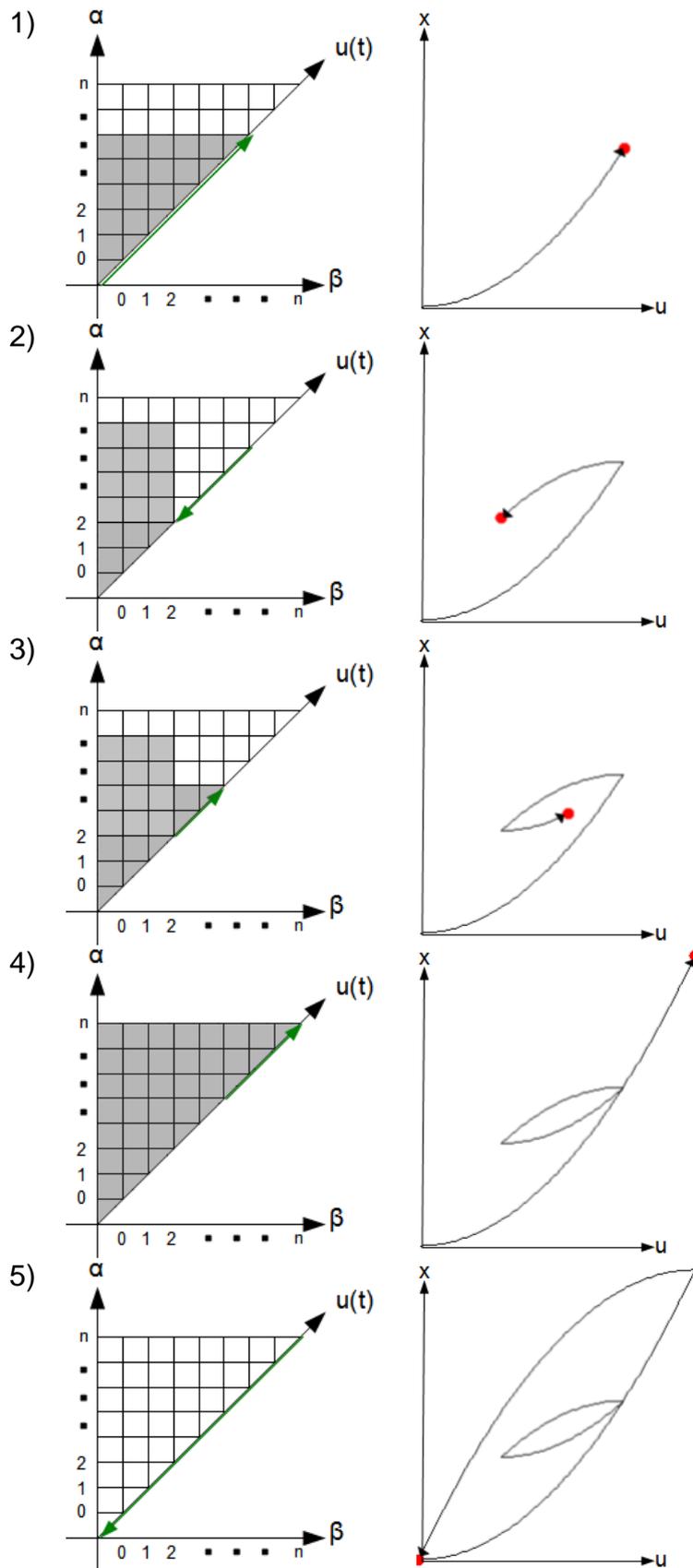


Abbildung 2.9 Geometrische Darstellung der Preisach-Funktion

Wird die Eingabegröße  $u(t)$  gesteigert, so wird die Diagonale  $u(t) = \alpha = \beta$  entlanggewandert (siehe Abbildung 2.10). Alle Operatoren mit  $\alpha_i \leq u(t)$  schalten auf  $y(t) = 1$ . Dabei teilt sich das Dreieck in einen eingeschalteten Anteil  $S^+$  (grau) und einen abgeschalteten Anteil  $S^-$  (weiß). Die Fläche  $S^+$  wird in vertikaler Richtung aufgebaut. Das Integral über den Hystereseoperatoren bzw. die Größe der Fläche  $S^+$  ergibt dann die Ausgabegröße  $y(t)$  (siehe Abbildung 2.10). Wird die Eingabegröße gesenkt, so liefern die Operatoren für die gilt  $u(t) \leq \beta_i$  wieder  $y(t) = 0$ . Geometrisch betrachtet wird die Fläche  $S^+$  in horizontaler Richtung abgetragen.



**Abbildung 2.10 Zustände im Preisach-Modell**

Bei erneutem Ansteigen der Eingangsgröße wird die Fläche  $S^+$  wieder in vertikaler Richtung erweitert. Es ist deutlich erkennbar, dass sich der Verlauf der

Ausgabegröße bei steigender Eingangsgröße nun gegenüber dem ersten Verlauf unterscheidet, da ein Teil der Hystereseeoperatoren aktiviert bleiben.

Das Modell wurde im Laufe dieses Projektes als Matlab/Simulink Modell implementiert. Um das Modell zunächst zu validieren wurden Piezowegmessungen durchgeführt. Diese Messungen wurden anschließend dazu verwendet das Preisach-Modell in der Simulation zu parametrieren. Im weiteren wurde der Piezo auch für die Simulation in der komplexen, federdruckbelasteten Einbausituation (vgl. Kapitel 3 und Kapitel 4) modelliert. Das Modell wurde dazu verwendet die Gesamtkonstruktion des im weiteren Verlauf dieses Berichtes vorgestellten Vergasers zu simulieren und auszulegen. Als Beispiel hierfür ist in Abbildung 2.11 der gemessene Aktuatorhub an einem realen Piezomodul dargestellt. Zum Vergleich ist das Simulationsergebnis des gleichen Versuchs in Abbildung 2.12 dargestellt.

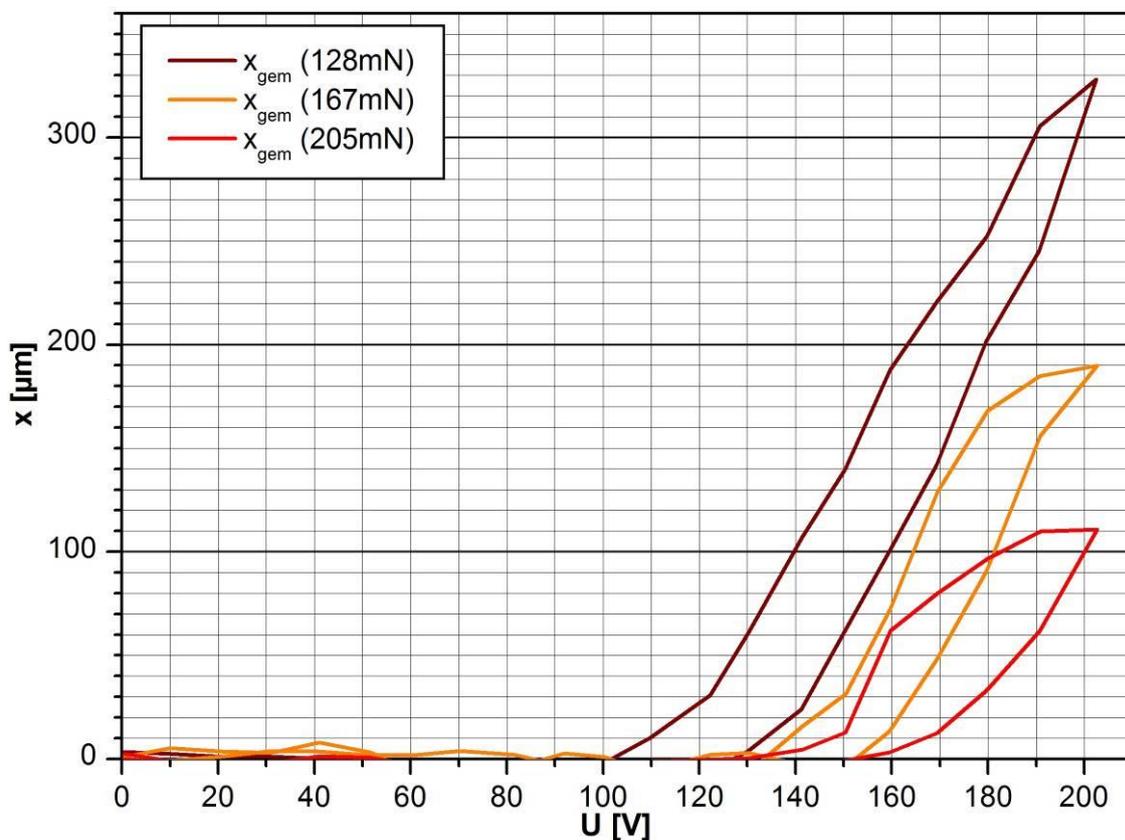
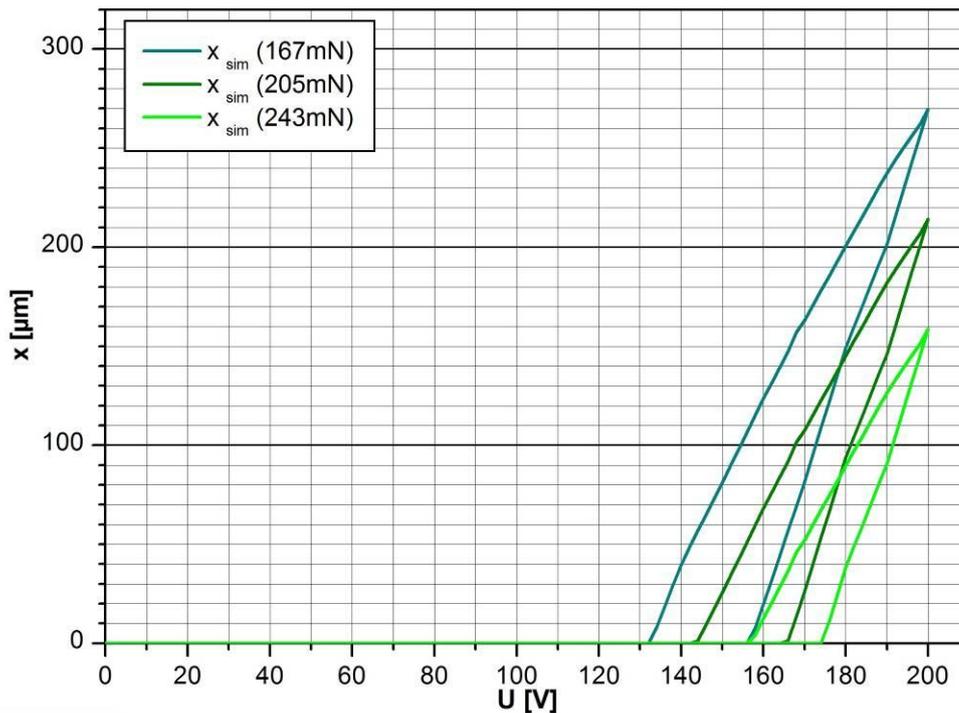


Abbildung 2.11 Gemessener Aktuatorhub

Es ist deutlich zu erkennen, dass das Modell das Hystereseverhalten des Piezos sehr gut abbildet. Das Modell verwendet dafür jedoch eine rekursive Berechnungsmethode. Das bedeutet aber, dass ein Fehler im Laufe der fortlaufenden Berechnung, wie sie auf einem Steuergerät durchgeführt wird, integriert wird und damit zu einem Wegdriften der berechneten Piezoposition von der realen Position führt. In einer realen Umsetzung könnte ein solcher Fehler jedoch einfach zurückgesetzt werden, wenn der Piezo z.B. durch einen mechanischen Anschlag von Zeit zu Zeit in eine definierte Position gefahren wird. Hier könnte die simulierte Position auf den definierten Wert zurückgesetzt werden und die rekursive Berechnung wird mit diesem Wert fortgesetzt.



**Abbildung 2.12 Simulierter Aktuatorhub**

Leider konnte im Rahmen dieses Projektes das Modell nicht mehr als Echtzeit-Modell auf der ECU implementiert werden, obwohl die dafür notwendige Rechenkapazität zur Verfügung gestanden hätte, denn das Modell kommt mit wenigen Rechenoperationen aus.

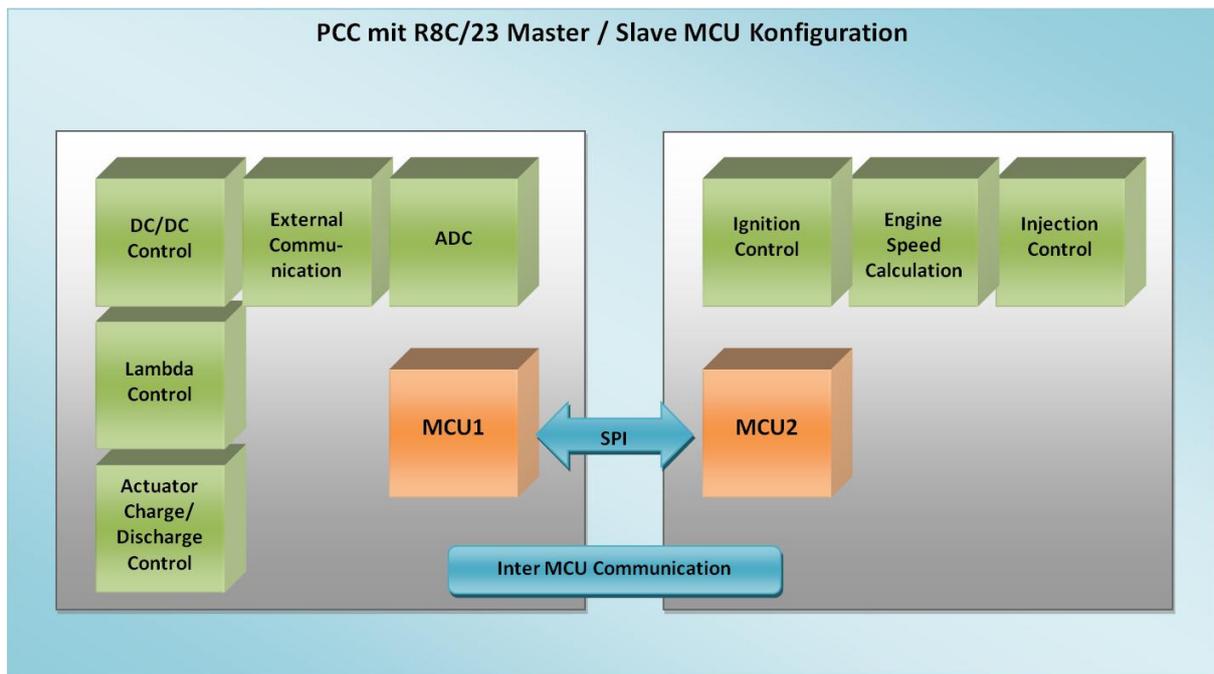
### 2.3. Elektronisches Steuerungssystem

Ziel dieses Arbeitspaketes war es zum einen eine Funktionserweiterung des elektronischen Systems bei gleichzeitiger Kostensenkung darzustellen. Die Erweiterungen sind vor allem in der Software zu sehen. Hier wurde vor allem eine Optimierung des Reglers vorgenommen, indem eine Vorsteuerfunktion integriert wurde.

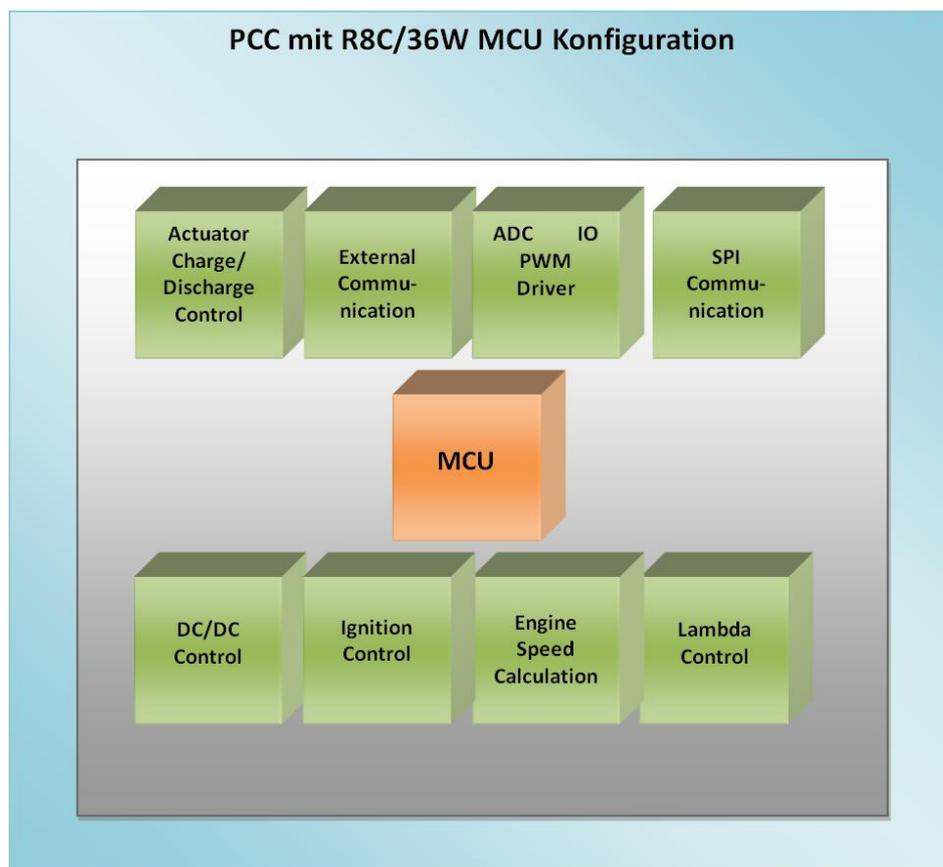
Für eine gleichzeitige Kostensenkung wurde das ECU Konzept von der Verwendung von zwei Prozessoren, in der bisherigen Variante, umgestellt auf einen Prozessor, ohne aber Abstriche bei der Funktionssoftware zu machen.

#### Steuergerät

Die Hardware des PCC Steuergerätes wurde von der Verwendung von zwei Prozessoren vom Typ Renesas R8C/23 (vgl. Abbildung 2.13) umgestellt auf einen zentralen Prozessor vom Typ Renesas R8C/36W (vgl. Abbildung 2.14). Dies erforderte zum einen ein Neudesign der Steuergeräteplatine und zum anderen musste die Betriebssoftware von der Zwei-Prozessor-Lösung auf die Ein-Prozessor-Variante umgestellt werden. Dazu wurden die vorhandene Softwareprogramme, für den Master- und Slave-Controller zu einem Hauptprogramm zusammengefügt. Timer, Interrupts, Routinen, Treiber, etc. wurden für den neuen Mikrocontroller angepasst. Weiterhin wurden neue Funktionen implementiert.

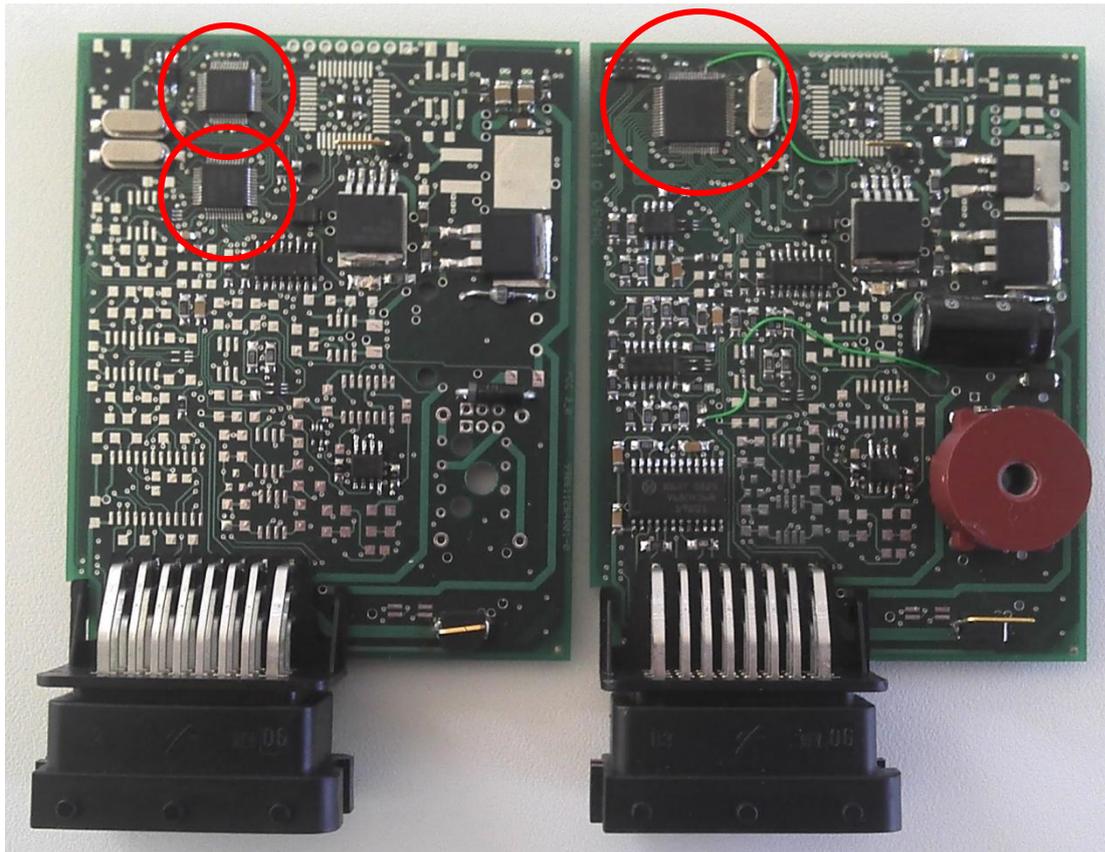


**Abbildung 2.13 Bisherige Funktionsarchitektur mit zwei Prozessoren**



**Abbildung 2.14 Neue Funktionsarchitektur mit einem zentralen Prozessor**

Das Terminal Programm, das die Schnittstelle zum Anwender darstellt, sowie das Parsing/XML Tool, zur Generierung der notwendigen XML Dateien, wurden an die neuen Anforderungen angepasst und erweitert. Abschließend wurde das Gesamtsystem, bestehend aus PCC Hardware, Verbindungskabelbaum, dem XML Tool und dem Terminal Programm, getestet



**Abbildung 2.15** Bisheriges Steuergerät mit zwei Prozessoren (links) und neues Steuergerät mit einem zentralen Prozessor (rechts).

### 3. Konzeption des integrierten piezoelektrischen Vergasers

Um das gesamte technologische und wirtschaftliche Potenzial der PCC Technologie darzustellen und zu untersuchen wurde in diesem Projekt ein integrierter, eigenständiger Vergaser mit piezoelektrischer Steuerung konzeptioniert und realisiert. Der Vergaser soll als Baukastensystem zur Erstellung von Prototypen verwendet werden. Zu beachten war bei der Konstruktion, dass ein kompakter Aufbau gewählt wird, welcher es erlaubt, Teile des Vergasers auch nach Anpassung des Vergasers auf einen anderen Motor unverändert verwenden zu können. Für die Konzeption waren folgende Grundforderungen an das System maßgeblich:

- Das System muss so konzipiert sein, dass es auch unter Veränderung der Umgebungsbedingungen eine Regelung des Luftmassenverhältnisses ermöglicht.
- Es sollte ein Aufbau mit möglichst nur einer Düse und einem Drosselement realisiert werden, um so das Potenzial für die günstigsten Fertigungskosten darzustellen.
- Der Piezoaktuator sollte ein vollständiges Verschließen der Kraftstoffdüse ermöglichen. Dadurch wird ein unkontrolliertes Auslaufen von Kraftstoff verhindert und ein lageunabhängiger Betrieb ermöglicht.
- Es sollen nach Möglichkeit bereits erhältliche Standard-Vergaserteile verwendet werden. Das reduziert vor allem bei der Prototypenrealisierung zusätzliche kostenintensivere Einzelfertigungen und erspart das erneute Erarbeiten von Lösungen für mechanische Komponenten.

#### 3.1. Entwurf und Berechnung

Grundlegend für die weitere Konstruktion war zunächst die Wahl des Drossel-elementes. Als mögliche Varianten standen sich dabei die Verwendung einer Drosselklappe oder eines Schiebers gegenüber. Die Eigenschaften der beiden Drosselemente sind Tabelle 3.1 gegenübergestellt und das entsprechend vorteilhafte System für das jeweilige Merkmal gekennzeichnet:

Kriterium	Vergaser mit Gasschieber (System 1)	Vergaser mit Drosselklappe (System 2)
Betätigung des Drosselementes	linear in paralleler Richtung zum Gaszug; Rückstellen über Druckfeder (*)	rotatorisch; Umlenkung des und Führung des Gaszuges notwendig
Form der Kraftstoffdüse im Vergaserkanal	konische Düsennadel, die in Hauptdüse eintaucht	Idealfall: einfache Bohrung (*)
Komplexität der Drosselmechanik	höher; für Schieberführung zusätzlicher Fertigungsaufwand; Möglichkeiten zur variablen Aufhängung der Düsennadel notwendig; unterer Anschlag für Schieber Innen liegend	geringer; nur Bohrungen für Drosselklappenwelle notwendig; Anschläge und Lagerung der Feder außen am Vergaser (*)
Modellierbarkeit der Strömungsverhältnisse	Druck- und Durchflussverhalten schwer zu bewerten; kaum	vereinfacht als Venturidüse beschreibbar; Strömungsverhalten

	tabellierte Berechnungsbeispiele	einzelner Elemente in ausreichendem Maß tabelliert [Venturi, Drosselklappe, Konturdüsen] (*)
Verhalten der Baulänge	sehr kurz, da Kraftstoffkammer, Drossel und Düse senkrecht übereinander liegen können (*)	Querschnittsverengung und Drosselklappe liegen in Richtung des Saugrohres hintereinander; Flucht der Drosselklappe muss gewährleistet werden
Verfügbarkeit von Einzelteilen	Einzelteile nur begrenzt, verfügbar; für Schiebermechanismus müsste kompletter Vergaser gekauft werden	Einzelteile als Reparatursätze für (fast) alle Komponenten erhältlich(*)

**Tabelle 3.1 Gegenüberstellung der Drosselmöglichkeiten. (\*) für bewertetes Merkmal vorteilhaftes System**

Um eine unabhängige Bewertung der Prinzipien zur gewährleisten wurden die Merkmale nochmals gegeneinander gewichtet:

	Betätigung	Düsenform	Mechanik	Modellierbarkeit	Baulänge	Anzahl Einzelteile	Summe	Wichtung
Betätigung		0	0	0	1	0	1	0,03
Düsenform	2		2	1	2	1	8	0,27
Mechanik	2	0		0	2	1	5	0,17
Modellierbarkeit	2	1	2		2	0	7	0,23
Baulänge	1	0	0	0		0	1	0,03
Anzahl Einzelteile	2	1	1	2	2		8	0,27

**Tabelle 3.2 Bewertungsmatrix für Drosselelement (Bedeutung der Bewertung: waagrecht zu senkrecht; 2 – wichtiger als, 1 – gleichwertig, 0 – weniger wichtig als)**

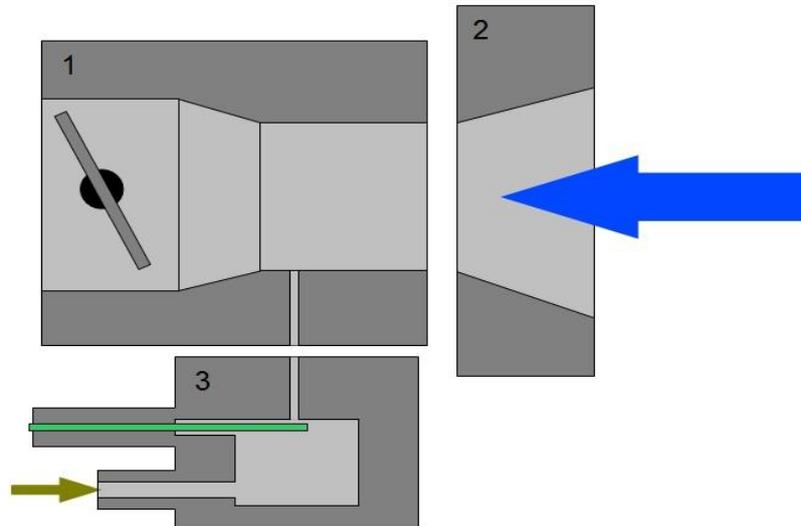
Wird bei den bewerteten Systemen pro vorteilhaftem Merkmal jeweils ein Punkt vergeben ergeben sich folgende Gesamtbewertungen:

Vergaser mit Schieber: **0,06**  
 Vergaser mit Drosselklappe: **0,94**

Als Bauart wurde daher der Drosselklappenvergaser gewählt, da dieser über einen einfacheren Aufbau als ein Schiebervergaser verfügt. Zudem sind für Drosselklappenvergaser Einzelteile wie Drosselklappen und Drosselklappenwellen in verschiedenen Größen leichter erhältlich, sodass bei diesen Teilen keine teure Einzelfertigung notwendig wird. Zudem vereinfacht sich die Fertigung des Vergaserkörpers sehr, da keine Führung für einen Schieber gefertigt werden muss.

Der Vergaser soll über eine abnehmbare Kraftstoffkammer verfügen, in der sich der Piezoaktuator mit der geregelten Kraftstoffdüse befindet. Die Verschraubungen für die Befestigung werden so angeordnet, dass ein Ausrichten der Kraftstoffkammer parallel oder senkrecht zum Saugrohr mit einer Drehung von jeweils 90° möglich ist. So können abhängig von den Einbauverhältnissen die Kabelzuführung und der Kraftstoffzulauf ausgerichtet werden. Die Düse, auf der der Piezoaktuator anliegt wird entweder als einschraubbare Düse gestaltet oder ist fester Bestandteil der Kraftstoffkammer. Eine Fertigung der Düse als Bestandteil der Kraftstoffkammer ist

sinnvoll, da so die Toleranz des Abstandes der Oberfläche des Aktuators zur Düse reduziert werden kann. Die Kraftstoffkammer ist möglichst kurz gehalten, um das enthaltene Kraftstoffvolumen zu minimieren und Raum zu sparen. Ein Zulauf findet direkt über einen angeschlossenen Schlauch statt.



**Abbildung 3.1** Prinzipskizze des Vergaserkonzeptes

Um den Kraftstoffstrom vollständig unterbrechen zu können ist ein blankes Aufliegen des Piezoaktuators auf der Düse ungeeignet. Ein direkter Kontakt ist zu vermeiden, da der Schutzlack durch wiederholtes Anschlagen an die metallene Oberfläche beschädigt werden kann und dann im schlimmsten Fall ein Kurzschluss entsteht. Es ist daher nötig, die Düse oder den Piezoaktuator mit einer zusätzlichen Schicht vor mechanischen Einwirkungen zu schützen. Diese könnte aus weichem Kunststoff wie VITON® bestehen. Mit der Schicht kann man zudem die Toleranzen der Oberflächen ausgleichen. Um sicher abzudichten muss der Piezoaktuator mit einer geringen Vorspannkraft gegen die Düse gedrückt werden. Diese wird durch ein Federelement hergestellt, welches auf der der Düse gegenüber liegenden Seite auf den Piezoaktuator drückt. Eine andere Positionierung ist nicht möglich, da bei Kräfteinwirkung, die nicht senkrecht über der Dichtfläche liegt, ein Biegemoment im Aktuator entsteht. Piezokeramiken sind empfindlich gegenüber Biegespannungen und können durch diese leicht beschädigt werden [8].

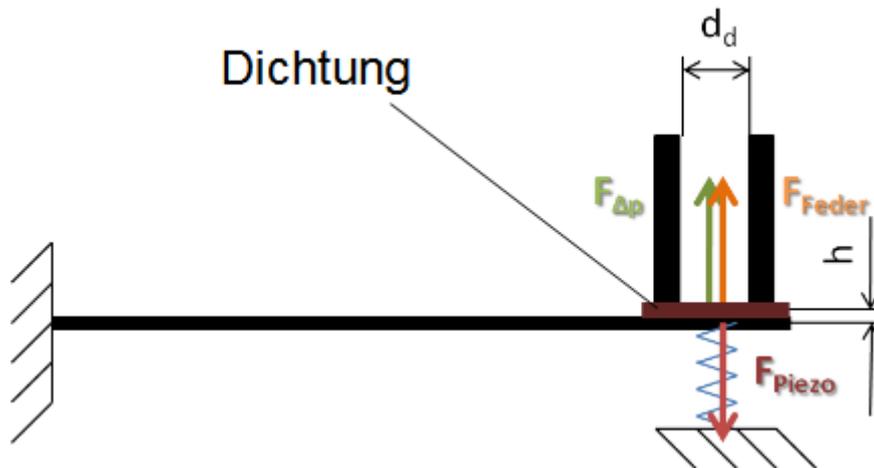


Abbildung 3.2 Prinzipdarstellung der Dichtstelle

Um das Volumen zwischen dem Piezoaktuator und den Bohrungen im Saugrohr gering zu halten wurde die Kraftstoffkammer auf einen geringstmöglichen Abstand an das Saugrohr herangebracht. Totvolumina nach der Düse wirken auf den zeitlichen Verlauf des Kraftstoffstromes wie Tiefpässe und verringern damit die maximale Arbeitsfrequenz des Modules. Deshalb sollte der Piezoaktuator auch ausschließlich vor der Düse in der Kraftstoffkammer sitzen. Sonst müsste für Einbau und Hub des Aktuators ein Freiraum gelassen werden, der nicht zum Leiten des Kraftstoffes genutzt wird.

Nach Möglichkeit sollte der Vergaser nur mit einer einzigen Bohrung zur Querschnittsverengung an der Venturidüse ausgeführt werden. Jedoch wird es wegen der geringen Wirksamkeit des Venturi-Effekts bei niedrigen Drehzahlen mit höchster Wahrscheinlichkeit notwendig, mindestens eine Nebendüse zu fertigen, um einen ausreichenden Kraftstoffstrom in niedrigen Lastbereichen zu sichern. Die Nebendüse wird über einen Kanal, der vom Kanal zur Venturidüse abzweigt, mit Kraftstoff versorgt. So kann noch immer mit einem Aktuator der gesamte Kraftstoffstrom geregelt und notfalls vollständig unterbrochen werden. Die Nebendüse wird kurz hinter der Drosselklappe in das Saugrohr geführt. So kann der Saugrohrunterdruck bei geringer Öffnung der Drosselklappe auf die Nebendüse wirken. Eine zweite Bohrung in Strömungsrichtung vor der Drosselklappe ermöglicht zusätzlich Luft anzusaugen und so ein Mischen von Kraftstoff und Luft durchzuführen.

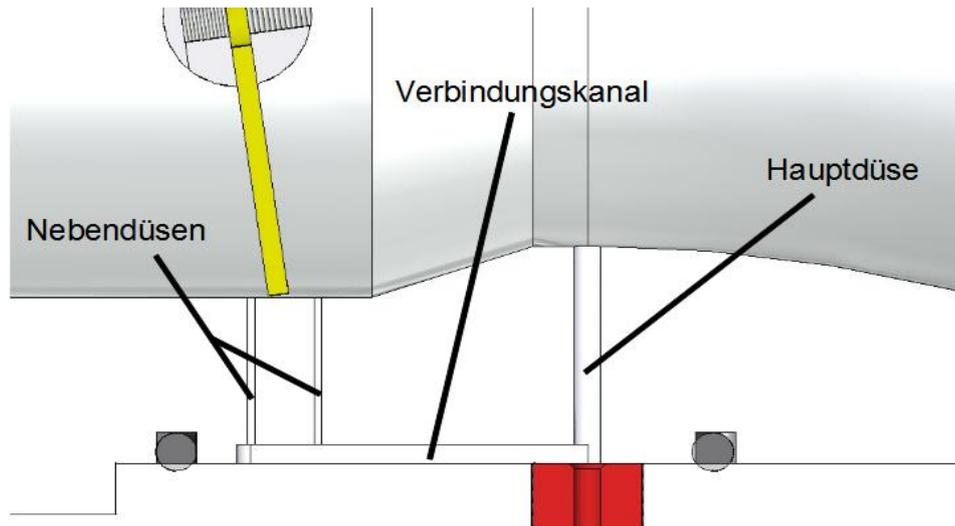


Abbildung 3.3 Ansicht der Düsengeometrie

Die konkrete Auslegung der einzelnen Konstruktionsgrößen wie Düsenquerschnitt und Aktuatorhub hängt von dem gewählten Versuchsträger ab. Als erstes Anwendungsbeispiel wurde ein Vergaser für das Hero Honda Glamour Motorrad ausgelegt.

Aufgrund des Hubraums und der maximalen Drehzahl wird für die Hauptdüse ein Querschnitt von 1mm benötigt. Der notwendige Aktuatorhub kann über den Strömungsquerschnitt des Einlasses Zwischen Aktuator und Düse berechnet werden. Damit der Piezoaktuator den maximalen Durchfluss der Düse nicht einschränkt, muss mindesten ein Hub von einem Viertel des Düsendurchmessers möglich sein (Widerstandbeiwerte nicht berücksichtigt).

$$A_{Düse} = A_{Ringspalt}$$

$$\frac{\pi \cdot d_{Düse}^2}{4} = \pi \cdot d_{Düse} \cdot h_{Spalt}$$

$$h \geq \frac{d_{Düse}}{4}$$

$$h \geq \frac{1mm}{4} \approx 0,25mm$$

Sind die Durchflusszahlen zu berücksichtigen, so ist ein etwas höherer Hub zu veranschlagen, da eine Verkleinerung des Strömungsquerschnittes durch Turbulenzen auftritt.

Wird die Federkraft und die Kraft durch den angesaugten Kraftstoffstrom beachtet, so errechnet sich der Hub des Aktuators durch:

$$\Delta x = \Delta x_0 - \frac{F}{c_F}, \Delta x_0 = d_T \cdot U; F_B = d_T \cdot U \cdot c_P$$

$$\Delta x = \Delta x_0 - \frac{F_{Feder} + F_{Feder}(\Delta x = 0) + F_{\Delta p}}{c_P}$$

$$\Delta x = \Delta x_0 - \frac{\Delta p A_D + F_{F0} + \Delta x c_F}{c_P}$$

$$\Delta x \left(1 + \frac{c_F}{c_P}\right) = \Delta x_0 - \frac{\Delta p A_D + F_{F0}}{c_P}$$

$$\Delta x(\Delta p) = \frac{c_P \Delta x_0 - \Delta p A_D - F_{F0}}{c_P + c_F}$$

Um eine optimale Funktion zu erreichen muss die Feder zwar die geforderte Anpresskraft aufbringen, darf aber trotzdem nur eine kleinstmögliche Federrate haben. So steigt die Federkraft nach Überwinden der Haltekraft nicht stark an und beschränkt den maximalen Stellweg nicht.

Eine zusätzliche Druckbelastung schränkt den Piezoaktuator aufgrund der kleinen Wirkfläche kaum ein. Die Auslenkung wird hauptsächlich durch die Feder beeinflusst. Mit einem im Beispiel verwendeten Federelement und einer angenommenen maximalen Druckkraft von 90mN (0.5 bar bei 1,5mm Düsendurchmesser) könnten an der Düse noch immer ca. 0,8 mm gestellt werden. Es ist also ein ausreichender Hub vorhanden. Bei der Montage sollte aber darauf geachtet werden, dass der Piezoaktuator ohne Ansteuerung und Federelement keinen Druck auf die Düse ausübt. Sonst wird wegen der Vorspannung der verfügbare Hub verkleinert [8].

## 4. Konstruktion und Realisierung

### 4.1. Grundkonstruktion

Grundlegend für die Konstruktion war zunächst die Wahl des Drosselementes. Als Bauart wurde ein Drosselklappenvergaser gewählt, da dieser über einen einfacheren Aufbau als ein Schiebervergaser verfügt. Für Drosselklappenvergaser sind Einzelteile wie Drosselklappen und Drosselklappenwellen in verschiedenen Größen leicht erhältlich und fertigbar. Zudem vereinfacht sich die Fertigung des Vergaserkörpers sehr, da keine Führung für einen Schieber gefertigt werden muss. Die Verschraubungen für die Befestigung des Piezomodules wurden so angeordnet, dass ein Ausrichten der Kraftstoffkammer parallel oder senkrecht zum Saugrohr mit einer Drehung von jeweils  $90^\circ$  möglich ist. So können abhängig von den Einbauverhältnissen die Kabelzuführung und der Kraftstoffzulauf ausgerichtet werden (siehe Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2) [8].

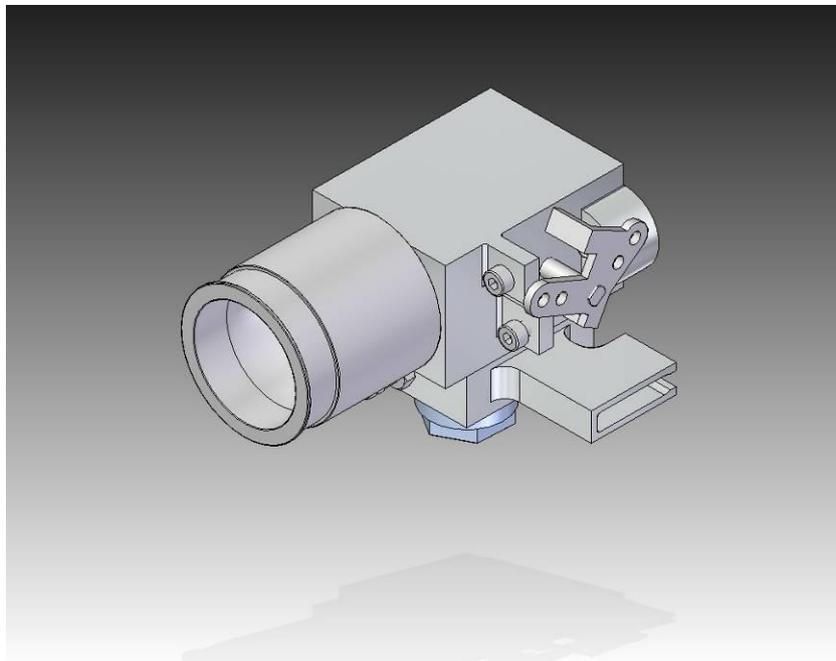


Abbildung 4.1 Vollständiger Vergaser

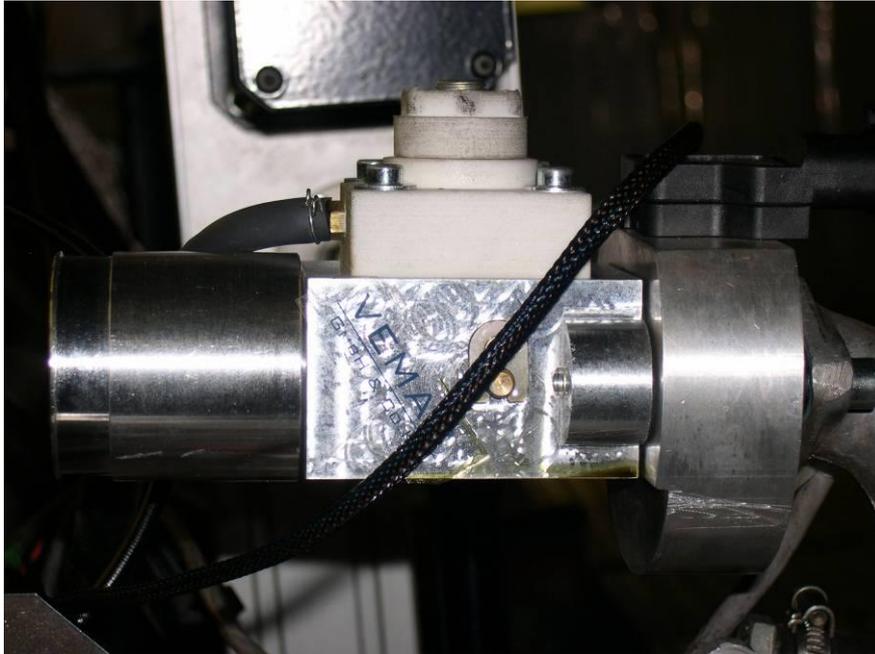


Abbildung 4.2 Piezovergaser am Prüfstand

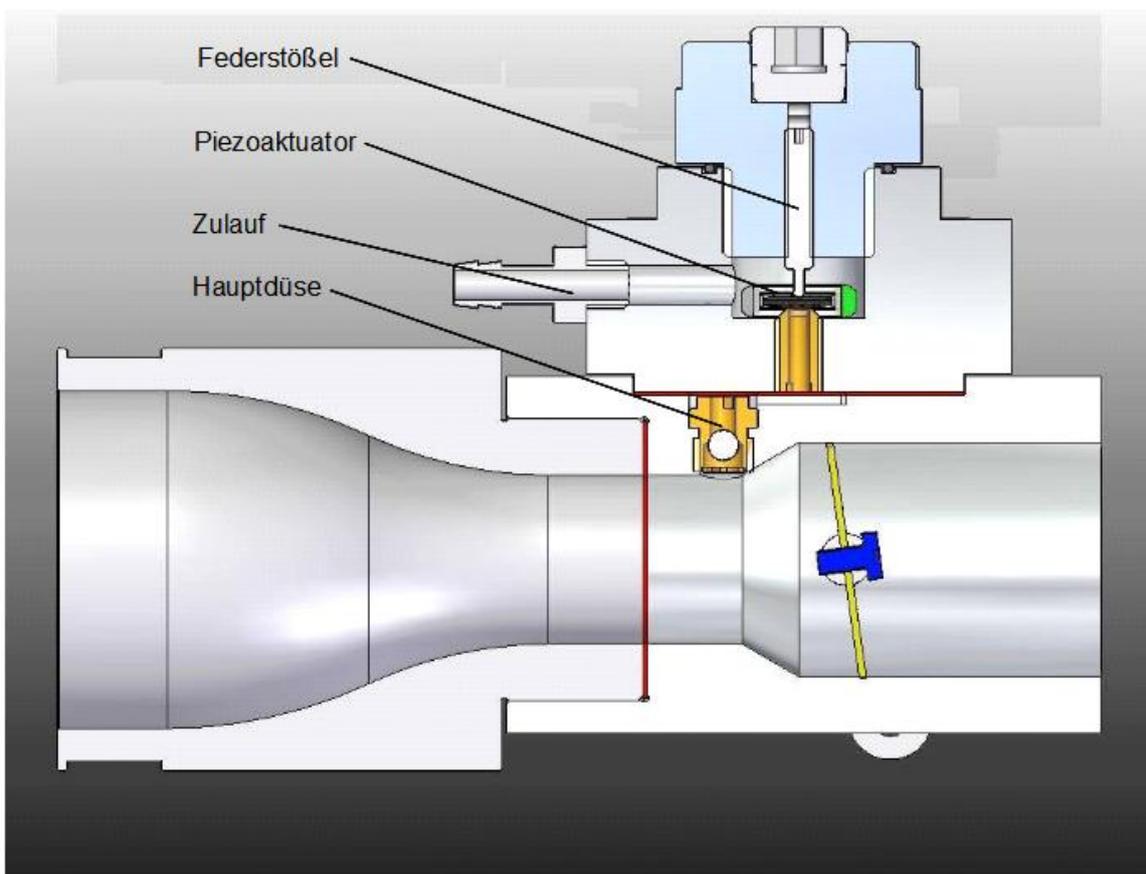
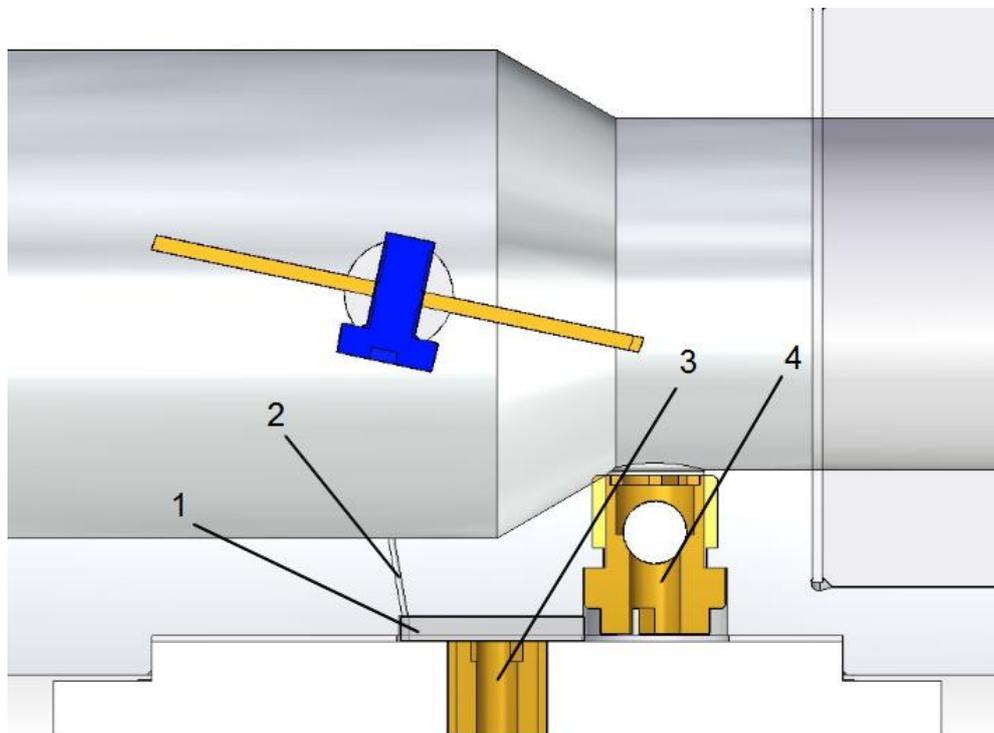


Abbildung 4.3 Schnitt durch den Piezovergaser

Nach Möglichkeit sollte der Vergaser nur mit einer einzigen Bohrung zur Querschnittsverengung an der Venturidüse ausgeführt werden. Eine Nebendüse kann bei Bedarf kurz hinter der Drosselklappe in das Saugrohr geführt werden (siehe Abbildung 4.3). So kann der Saugrohrunterdruck bei geringer Öffnung der Drosselklappe auf die Nebendüse wirken. Die Venturidüse und die optionale Nebendüse werden über einen gemeinsamen Kanal mit Kraftstoff versorgt. So kann

mit nur einem Aktuator der gesamte Kraftstoffstrom geregelt und notfalls vollständig unterbrochen werden. Um in diesem Zustand ein Auslaufen über die Hauptdüse zu vermeiden, wurde die Hauptdüse mit einem Rückschlagventil versehen. Ist der Unterdruck an der Nebendüse geringer, so wird die Hauptdüse verschlossen. Mit Einsetzen des Venturi-Effektes öffnet zunehmend das Rückschlagventil. Da bei höheren Drehzahlen die Drosselöffnung größer ist, würde dann auch weniger Kraftstoff durch die Nebendüse gefördert.

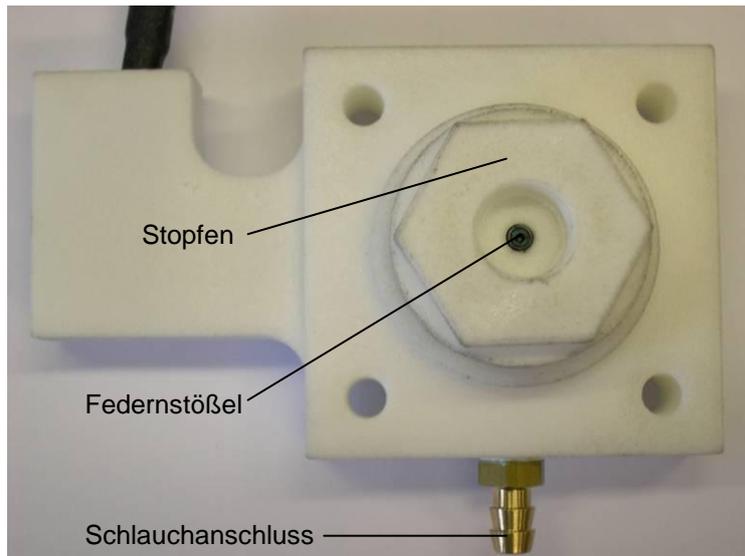


- 1 – Kanal
- 2 – Nebendüsenbohrung (optional)
- 3 – Hauptdüse mit Piezo
- 4 – Venturidüse mit Rückschlagventil

**Abbildung 4.4** Schnittdarstellung der Düsengeometrie

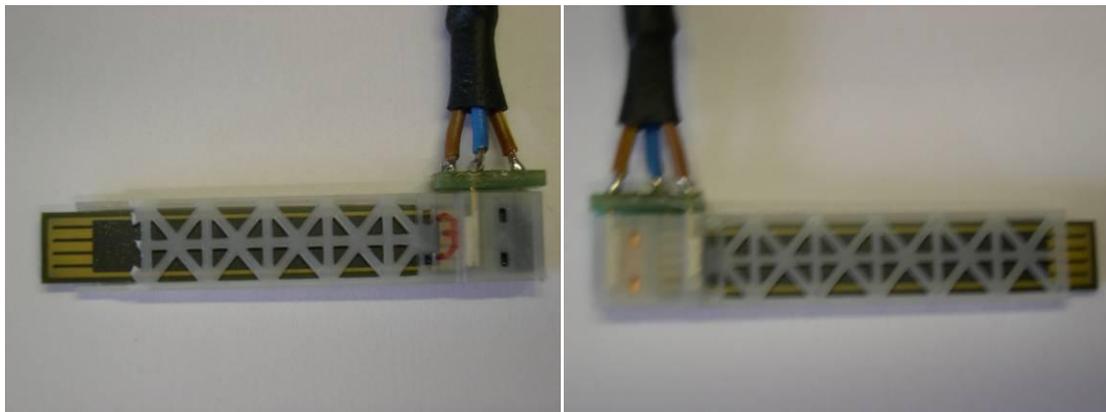
#### 4.2. Piezomodul

Das Piezomodul beinhaltet den Piezoaktuator (siehe Abbildung 4.6), mit dem der Kraftstoffmassenstrom im Vergaser geregelt wird. Das Modul wird durch einen einschraubbaren Stopfen verschlossen (siehe Abbildung 4.5) Der Zulauf von Kraftstoff findet direkt über einen angeschlossenen Schlauch statt.



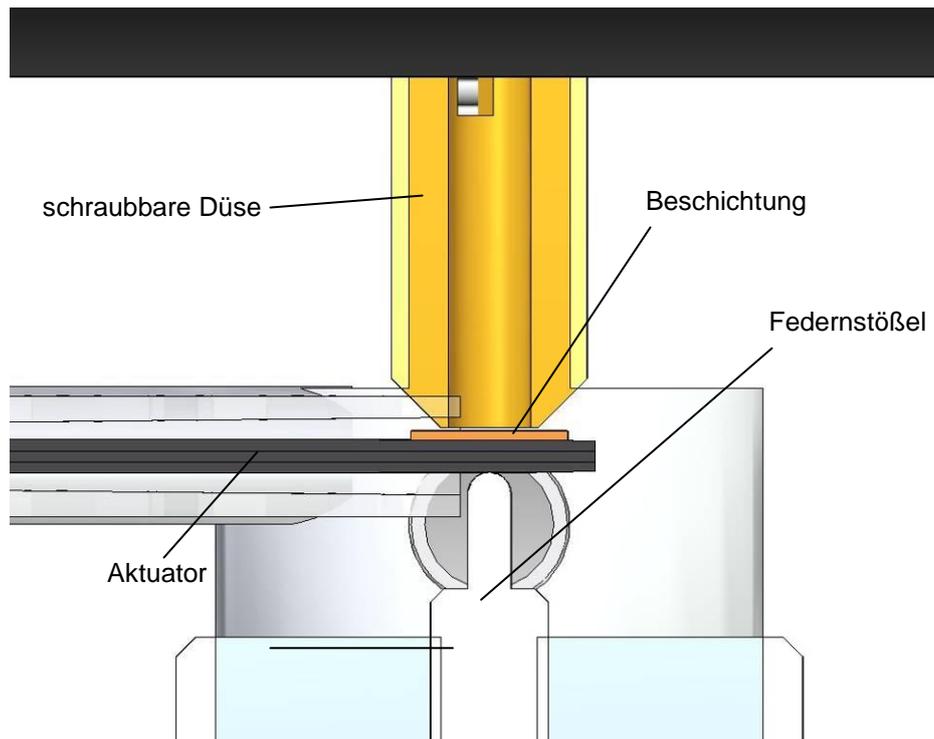
**Abbildung 4.5 Piezomodul**

Als Aktuatoren wurden die aus früheren Projekten bekannten Trimorph-Biegeaktuatoren verwendet (siehe Abbildung 4.6), welche mit einem Käfig für Führung und Schutz des Aktuators ausgestattet sind. Wegen der späteren Beschichtung des Aktuators und um Raum für die Düse zu schaffen wurde ein Teil des Käfigs entfernt. Durch einen Schutzkäfig wird der Aktuator auf den Leerlaufhub begrenzt, sodass das ein Driftverhalten bei Maximalauslenkung nicht auftreten kann.



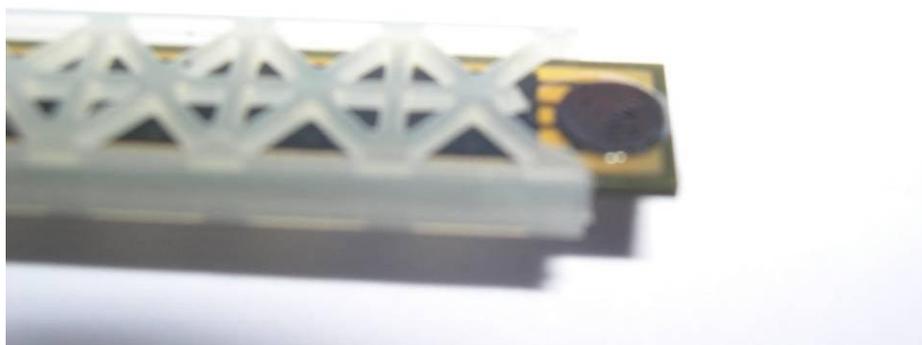
**Abbildung 4.6 Biege-Piezoaktuator mit modifiziertem Käfig**

Die Düse, auf der der Piezoaktuator anliegt, ist zunächst als einschraubbare Düse aus Messing gestaltet (siehe Abbildung 4.7). So können Höhenunterschiede zwischen Aktuator und Düse in der Nullstellung durch Einschrauben ausgeglichen werden. Die Kraftstoffkammer im Modul ist kurz gehalten, um das enthaltene Kraftstoffvolumen zu minimieren und Raum zu sparen. So wird auch das Anlagern von Luftblasen verhindert.



**Abbildung 4.7 Aktuator über Düse**

Um der Forderung einer verbesserten Dichtwirkung nachzukommen wurde der Piezoaktuator direkt über der Düse mit einem kreisförmigen Stück Gummifolie (NBR) beklebt (siehe Abbildung 4.8). Durch Anpressen des Aktuators an die Düse erfolgt das Abdichten. Der Aktuator wird damit zugleich vor dem direkten Kontakt mit der Düse geschützt, welcher eine Beschädigung der Schutzlackierung (coating) und letztendlich einen Kurzschluss verursachen könnte. Messungen des Aktuatorhubes zeigten, dass das Aktuatorverhalten durch die NBR-Beschichtung nicht beeinflusst wird.



**Abbildung 4.8 Beschichteter Aktuator**

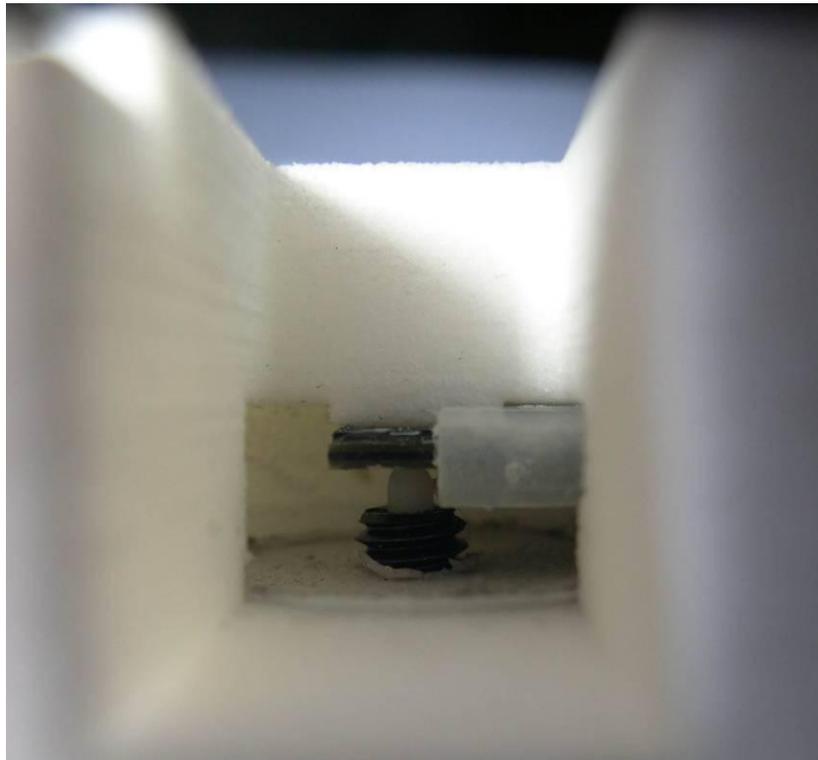
Der Rand der Düse ist möglichst spitz ausgeführt, um die Dichtfläche an der Düse klein zu halten. So kann eine möglichst hohe Flächenpressung an der Dichtung erzielt werden.

Da im deaktivierten Zustand die Dichtkraft des Aktuators nicht ausreichen könnte, um die Kraftstoffdüse abzudichten, wird durch ein zusätzliches Federelement eine Vorspannkraft erzeugt. Das Federelement muss allerdings senkrecht über der zu dichtenden Stelle angebracht werden (siehe Abbildung 4.10). Andernfalls würde auf

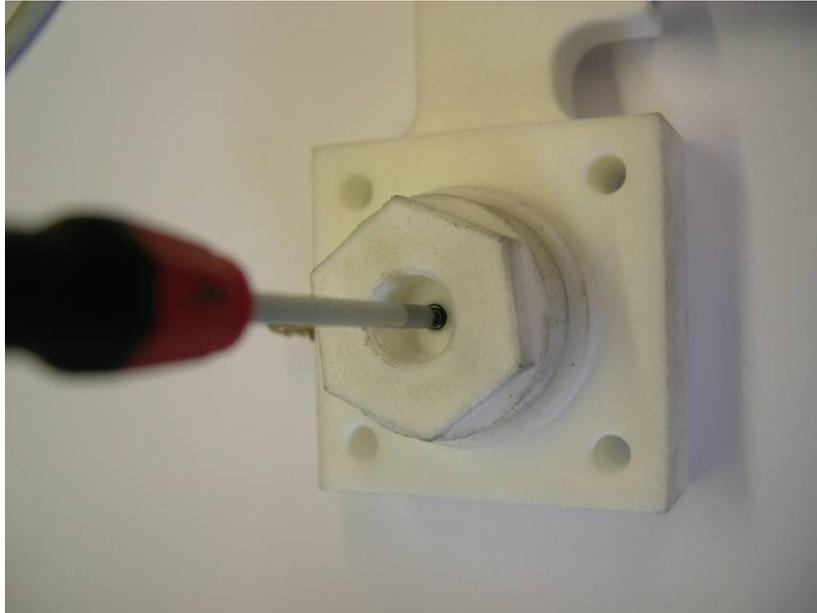
den Piezoaktuator eine Biegespannung einwirken. Diese kann den Aktuator auf Dauer schädigen und gefährdet so seine Funktion. Deshalb wurde ein einschraubbarer Federnstößel (siehe Abbildung 4.9) in den Verschluss der Kraftstoffkammer eingelassen. Um am Prototypen die Federkraft variieren zu können ist die Gewindebohrung durchgehend, sodass der Federnstößel mit einem Schlüssel gedreht werden kann (siehe Abbildung 4.11). In späteren Realisierungen könnte der Federnstößel gegen einen Anschlag geschraubt oder durch eine fest positionierte Feder ersetzt werden.



**Abbildung 4.9 Federnstößel**



**Abbildung 4.10 Federnstößel über Aktuator**



**Abbildung 4.11 Einstellen der Feder**

Der höchste sinnvolle Aktuatorhub über der Düse beträgt wie bereits erwähnt ein Viertel des Düsendurchmessers.

Wird die Federkraft beachtet, so errechnet sich, unter Annahme einer linearen Spannungs-Weg-Kennlinie, der mögliche Hub des Aktuators durch:

$$\Delta x = x_0(U) - \frac{\sum F_x}{c_p}$$

$$\Delta x = x_0(U) - \frac{F_F + F_D}{c_p}$$

$$\Delta x \cdot c_p = x_0(U) \cdot c_p - F_F; \text{ mit } F_B(U) = x_0(U) \cdot c_p$$

$$\Delta x \cdot c_p = F_B(U) - (F_{F0} + \Delta x \cdot c_F)$$

$$\Delta x = \frac{F_B(U) - F_{F0}}{c_p + c_F}$$

Die Auswirkungen des Differenzdruckes auf den Aktuator werden hier wegen der kleinen Wirkfläche am Aktuator vernachlässigt.

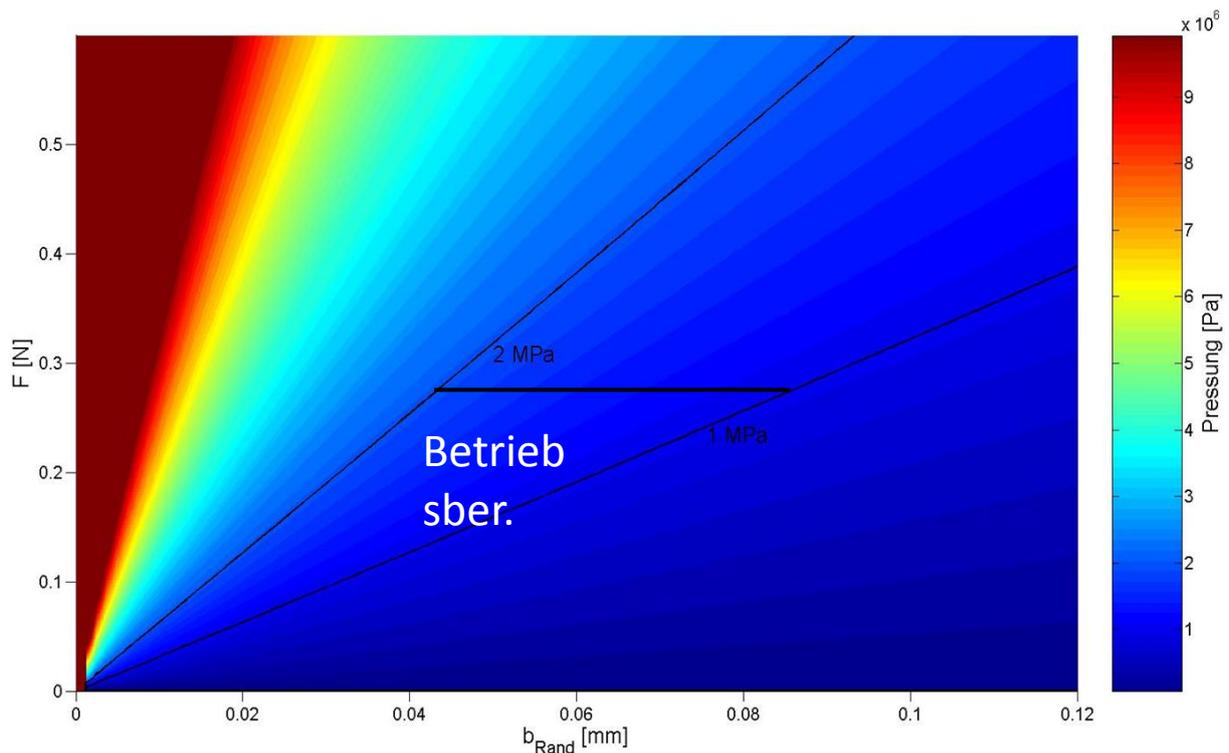
Die minimale Federkraft ist über die zur Dichtung notwendige Flächenpressung bestimmt:

$$p_{Dicht} = \frac{F_{Dicht}}{A_{Dicht}}$$

Diese ist wiederum von der Dichtfläche abhängig (siehe Abbildung 4.12):

$$A_{Dicht} = \pi \cdot ((d_D + b_{Rand})^2 - d_D^2) / 4$$

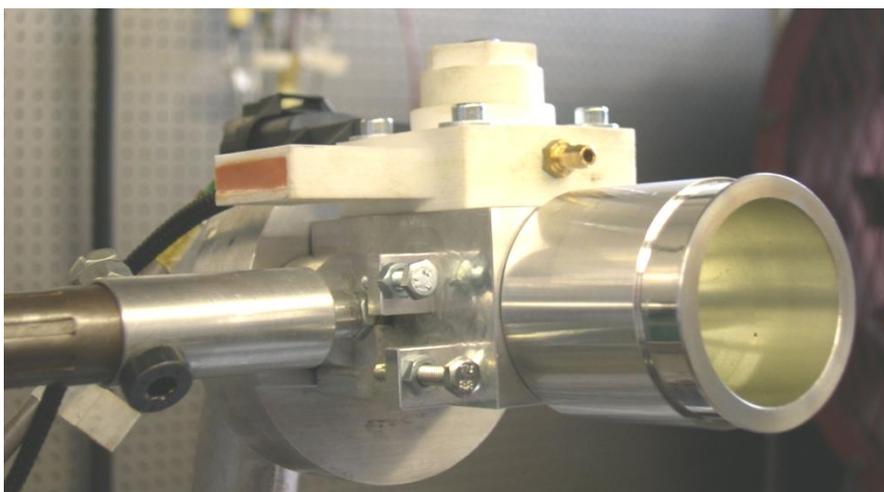
Die geforderte Flächenpressung für Flachdichtungen ist üblicherweise mit einigen MPa angesetzt. Daher wurde eine Flächenpressung von 1 bis 2 MPa veranschlagt. Wegen der geringen Kräfte (<1N) ist auch eine sehr geringe Dichtfläche notwendig. Die Randbreite auf der Düse ist unter 0,1mm zu halten, um mit dem verwendeten Aktuator eine zufriedenstellende Dichtwirkung zu erzielen. Der Düsenrand wurde daher zusätzlich spitz angefasst. Bei stärkeren Aktuatoren wären auch größere Vorspannkräfte und Flächenpressungen möglich.



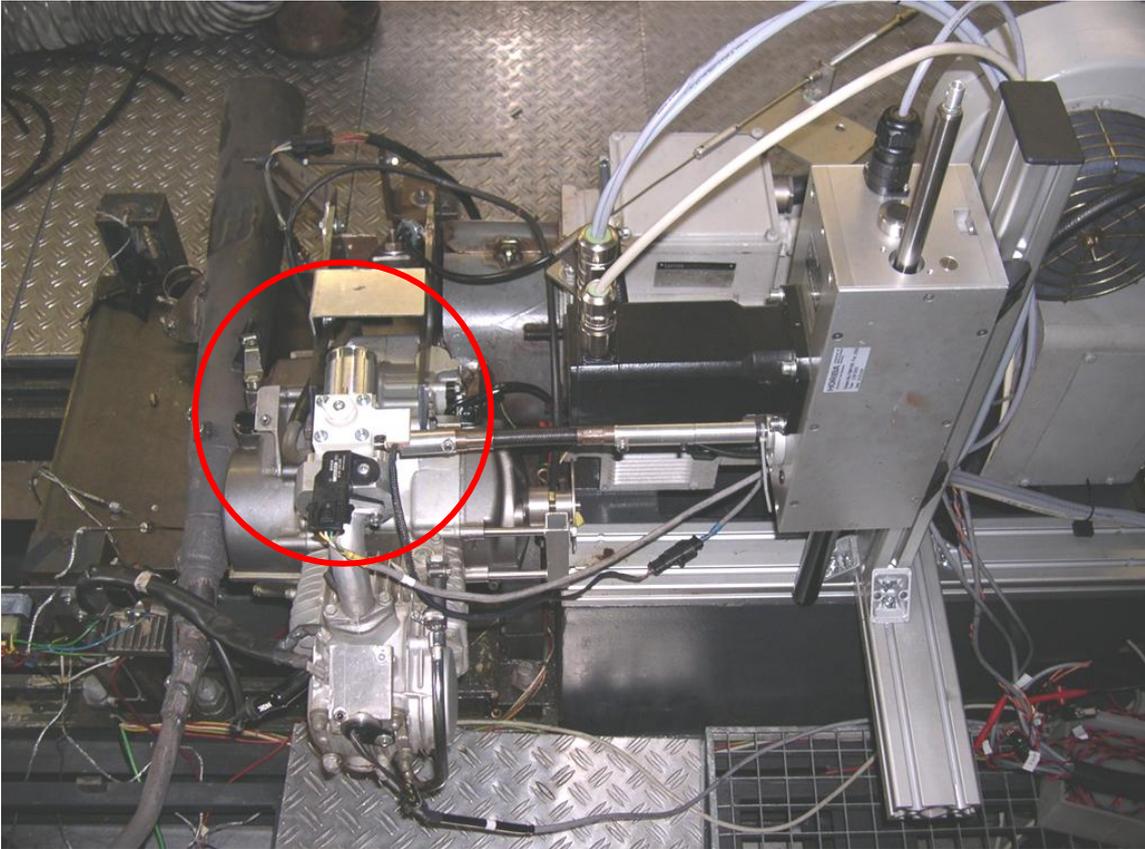
**Abbildung 4.12 Flächenpressung in Abhängigkeit von der Düsenrandbreite und Vorspannkraft (Düsendurchmesser 2.0mm)**

#### 4.3. Vergaser für den Hero Honda Versuchsträger

Um den Vergaser am realen Motor und auch am Motorrad montieren zu können, sollte der vom Originalvergaser verwendete Bauraum nicht überschritten werden. Zudem musste es möglich sein den Vergaser (vgl. Abbildung 4.13) am Prüfstand für die Fahrversuche mit dem automatischen Fahrhebelsteller zu verbinden (siehe Abbildung 4.14).



**Abbildung 4.13 Realisierung des modular integrierten Vergaser für den Hero Honda Versuchsträger**



**Abbildung 4.14 Hero Honda Versuchsträger mit neuem Vergaser auf dem Prüfstand**

Gleichzeitig sollte der Vergaser aber auch so ausgelegt werden, dass er auch am Motorrad verwendet werden kann. Dafür musste neben dem Bauraum auch der Gaszug des Motorrads mit dem neuen Vergaser verbunden werden.

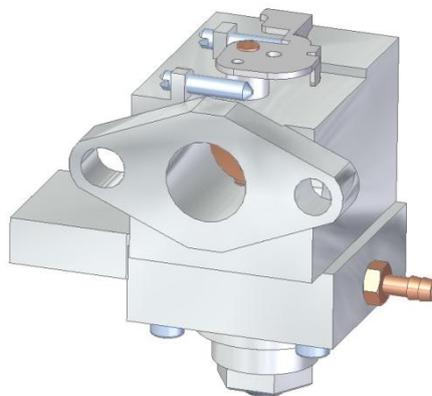


**Abbildung 4.15 Neuer Vergaser auf Hero Honda Versuchsträger montiert**

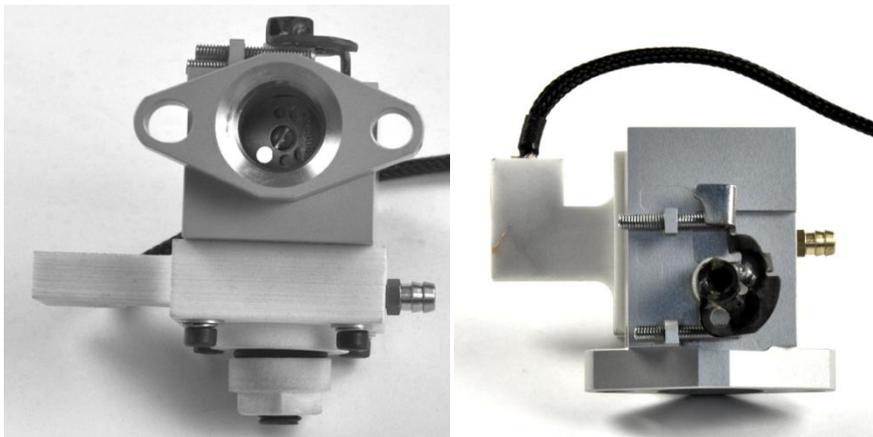
Der Vergaser im Einbau am Motorrad ist in Abbildung 4.15 dargestellt. Der vom Originalvergaser verwendete Bauraum wurde dabei sogar unterschritten, da auf die Schwimmerkammer verzichtet wurde.

#### 4.4. Vergaser für den Briggs&Stratton Versuchsträger

Der Hubraum des Briggs&Stratton Motors ist sehr viel geringer als der des Hero Honda Versuchsträgers. Daher musste der Querschnitt der Drosselklappe für diesen Versuchsträger sehr viel kleiner gewählt werden. Aufgrund des modularen Konzepts konnte jedoch das gleiche Piezomodul auch für diesen Vergaser verwendet werden (siehe Abbildung 4.16). Ein Foto des realen Vergasers ist in Abbildung 4.17 dargestellt.

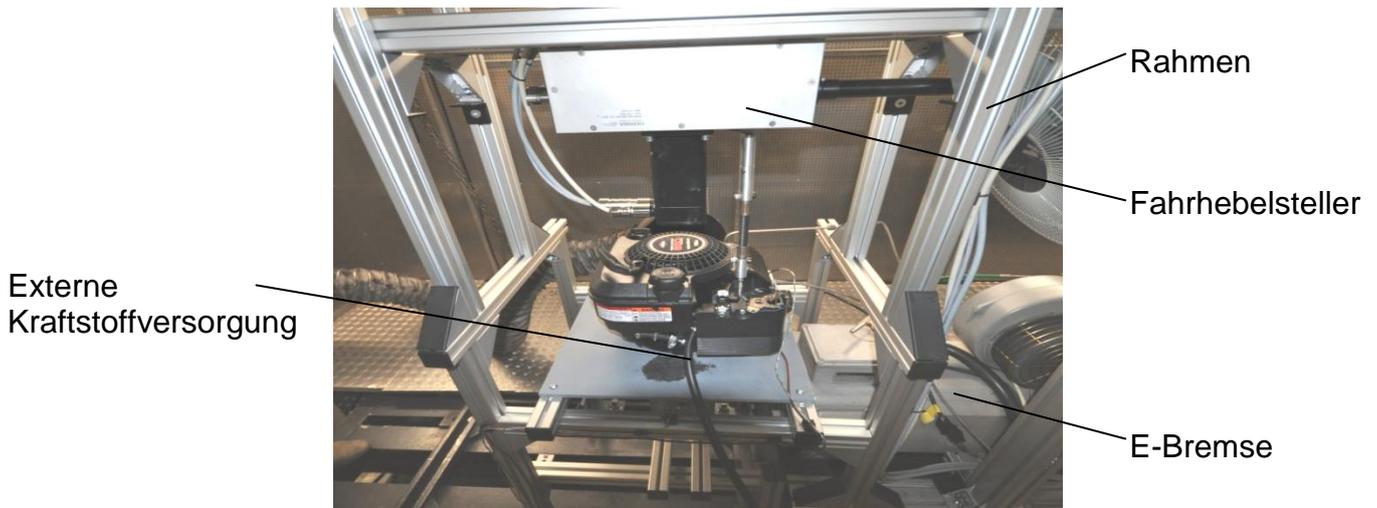


**Abbildung 4.16 CAD Konstruktion des Vergasers für den Briggs&Stratton Versuchsträger**



**Abbildung 4.17 Fotos des Vergasers für den Briggs&Stratton Versuchsträger**

Auch bei diesem Versuchsträger war es eine besondere Herausforderung den Vergaser auch am Motorprüfstand mit dem automatischen Fahrhebel zu verbinden (siehe Abbildung 4.18). Die Platzverhältnisse waren an diesem kleinen Versuchsträger naturgemäß noch beengter als bei der Hero Honda. Hierbei hat sich die Konstruktion ohne Schwimmerkammer ebenfalls bewährt, da der Vergaser, trotz Piezo-Moduls, nicht wesentlich größer ausfiel als die Schwimmerkammer des Originalvergasers.



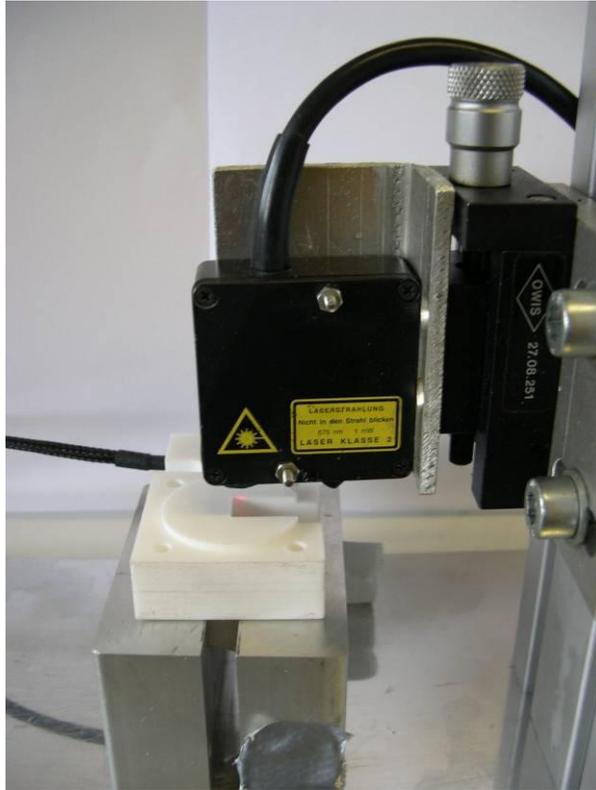
**Abbildung 4.18 Briggs&Stratton Versuchsträger mit neuem Vergaser auf dem Motorprüfstand**

## 5. Versuchsergebnisse

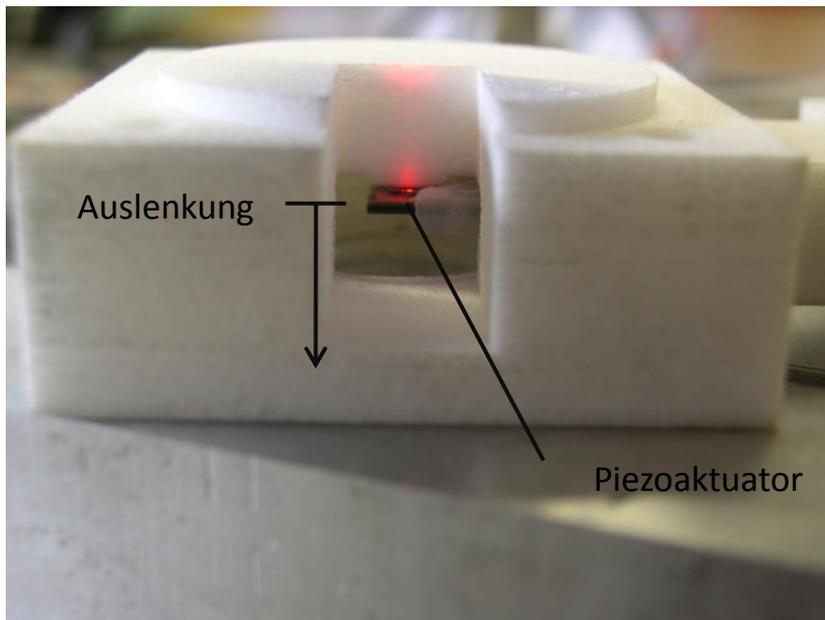
In diesem Kapitel werden zunächst die Ergebnisse der Vermessung des Piezos in der neuen Einbausituation vorgestellt. Anschließend erfolgt die Darstellung der Durchflussuntersuchungen des integrierten PCC-Vergasers. Abschließend werden dann die Motorprüfstandsergebnisse für die beiden unterschiedlichen Versuchsträger Hero Honda und Briggs&Stratton dargestellt.

### 5.1. Der Piezo in neuer Einbausituation

Um das Aktuatorverhalten im Piezomodul bewerten zu können, wurde ein Messmodul konstruiert (Abbildung 5.2), an welchem mit einem Laser der Aktuatorhub gemessen werden konnte (Abbildung 5.1). Dabei wurde die auf der Düse anliegende Fläche gemessen, sodass sich als Messgröße direkt die freie Höhe über der Hauptdüse ergibt.



**Abbildung 5.1 Messanordnung**



**Abbildung 5.2 Messmodul am Prüfstand**

Mit der am Prüfstand der VEMAC vorhandenen Messsoftware (Abbildung 5.3) wurden automatisiert Hysteresedurchläufe mit vorgegebener Maximalspannung und äquidistanter Stützstellen (Spannung) gemessen.

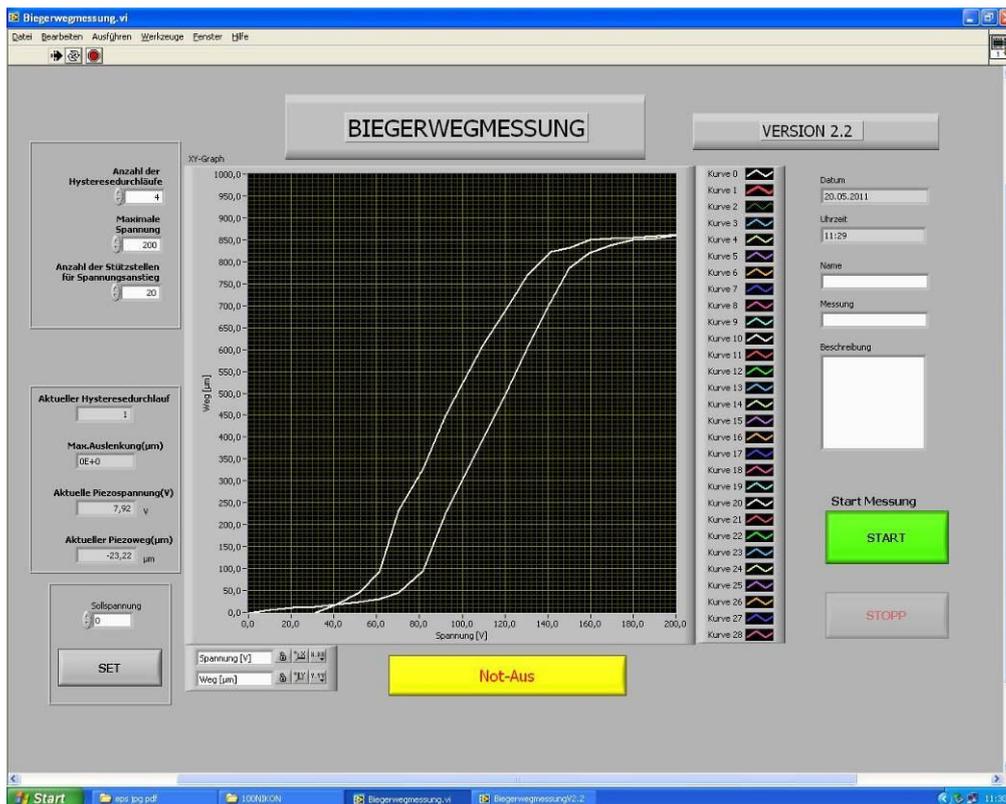


Abbildung 5.3 Prüfstandssoftware

Zunächst wurde der Einfluss der Beschichtung auf den Aktuator überprüft. Dazu wurden jeweils ein beschichteter und ein unbeschichteter Aktuator ohne Belastung oder zusätzlichen Anschlag vermessen (siehe Abbildung 5.4). Der Messpunkt war ca. 2,5 mm von der Piezospitze entfernt. An dieser Stelle befindet sich der Mittelpunkt der Beschichtung.

Das Beschichten des Aktuators hat keinen erkennbaren Einfluss auf den Aktuatorhub (siehe Abbildung 5.5). Das Abflachen der Kennlinie in den Randbereichen entsteht, da die Aktuatoren im unbelasteten Zustand bei Maximalspannung an den Piezokäfig anschlagen. Dieser soll den Maximalhub auf einen einheitlichen Wert beschränken. Der größere Maximalhub des beschichteten Aktuators bei 0V entsteht durch das teilweise Entfernen des Käfigs.

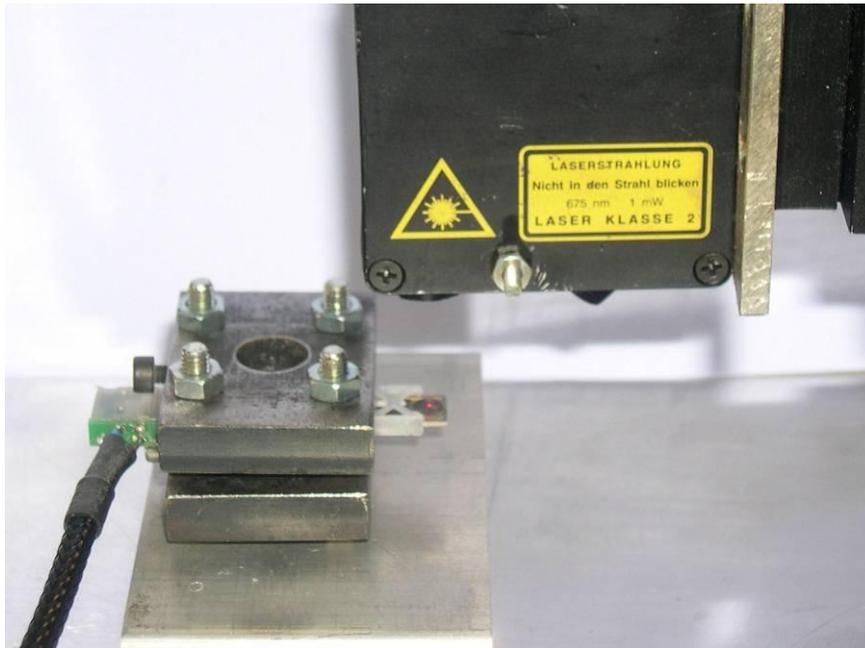


Abbildung 5.4 Messanordnung ohne Vorbelastung des Aktuators

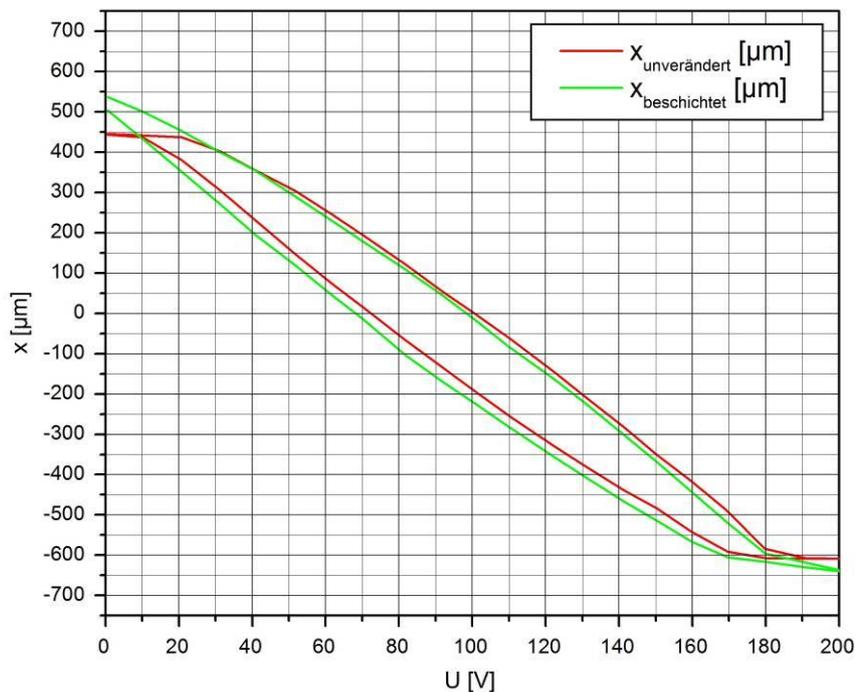


Abbildung 5.5 Aktuatorhub ohne Vorbelastung

## 5.2. Durchflussmessungen

Um das Durchflussverhalten zu charakterisieren und die Dichtheit der Piezomodule nachzuweisen, wurden die Piezomodule auf dem Durchflussprüfstand der VEMAC vermessen. Auf diesem kann mit einem Schrittmotor ein Kraftstoffbehälter über einen Zahnriemen in verschiedenen Höhen positioniert werden. Dadurch wird der Überdruck auf dem Piezomodul eingestellt, gemäß folgender Formel:

$$\Delta p = \rho_B \cdot g \cdot h$$

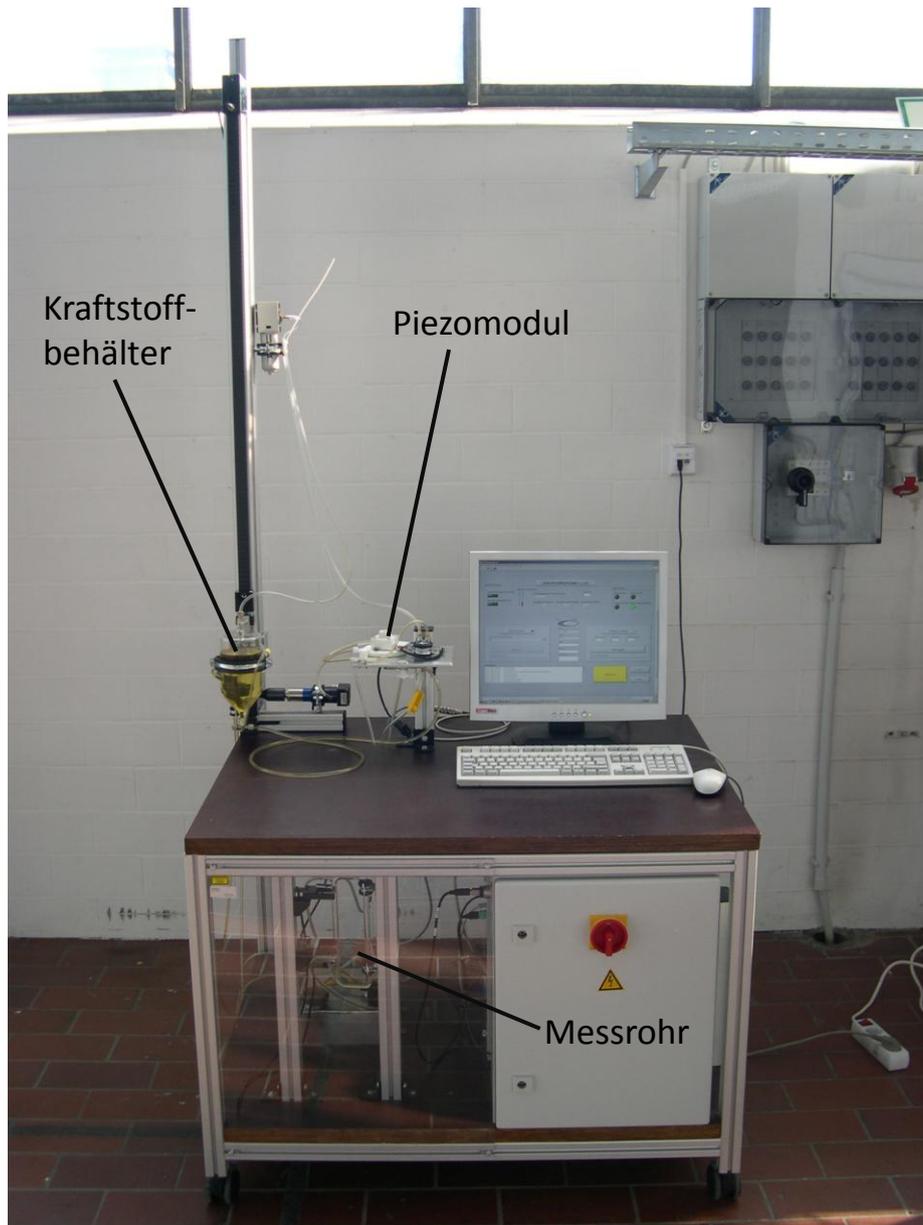
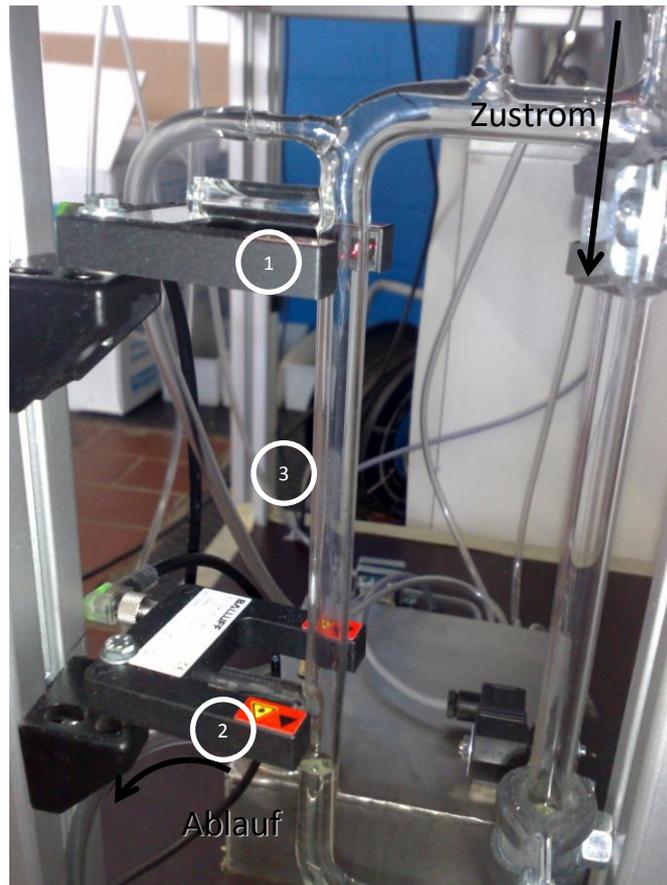


Abbildung 5.6 Durchflussprüfstand

Hat sich ein konstanter Kraftstoffmassenstrom eingestellt wird dieser mit Hilfe zweier Lichtschranken (Abbildung 5.7) über die Füllzeit eines Messvolumens ermittelt:

$$\dot{V}_B = \frac{V_{Mess}}{\Delta t}$$



**Abbildung 5.7 Messanordnung zur Massenstromermittlung  
(1,2: Lichtschranken 3: Messvolumen)**

Die Abhängigkeit des Massenstromes vom Differenzdruck und der Aktuatorspannung wurde automatisiert mit der Prüfstandssoftware vermessen. Dabei wurden jeweils 3 Messungen für eine Druck-Spannungs-Kombination durchgeführt. Aus diesen wurde der Mittelwert gebildet.

Im Folgenden werden die Druck-Massenstrom-Kurven des aktuellen Piezomoduls unter Variation der Druckdifferenz dargestellt. Die Vorspannung des Federelementes wird dabei jeweils auf den Kontakt des Federnstößels mit dem Aktuator bei 100V Aktuatorspannung (Neutralstellung) ohne Federkraft bezogen.

Auch in den Durchflussmessungen ist die Hysterese der Piezoaktoren deutlich zu erkennen (siehe Abbildung 5.8). Da die Kurven im Spannungs-Massenstrom-Diagramm den Kurven der Spannungs-Hub-Kurven in der Form gleichen, wird davon ausgegangen, dass die Hauptdüse im Piezomodul durchgängig im linearen Bereich des Düse-Prallplatte-Systems arbeitet. Andernfalls wäre eine Sättigung des Massenstromes nahe der Maximalspannung zu erkennen.

Das realisierte Piezomodul ist mit Federvorspannung in der Lage die geforderten Kraftstoffmassenströme (horizontale Linien in Abbildung 5.8) durchzulassen. Mit einer höheren angelegten Druckdifferenz verschiebt sich der Arbeitsbereich zu niedrigeren Spannungen hin, da die erreichbaren Kraftstoffmassenströme dann zum Teil den höchsten zulässigen Wert überschreiten.

Der Regelbereich der Aktuatorspannung liegt, bei Vordruck auf der Kraftstoffleitung, ungefähr zwischen 140V und 185V. Wird der Kraftstoff nur durch kleinere Druckdifferenzen angesogen, wie sie ohne Vordruck auftreten, so kann das Modul bis fast 200V betrieben werden (Kurve für 10 mbar).

Piezo 6, NPJS3-3: 3 Umdr --> 205mN  
 $d_{HD}=2,1mm$   
 $\Delta p=6000Pa$

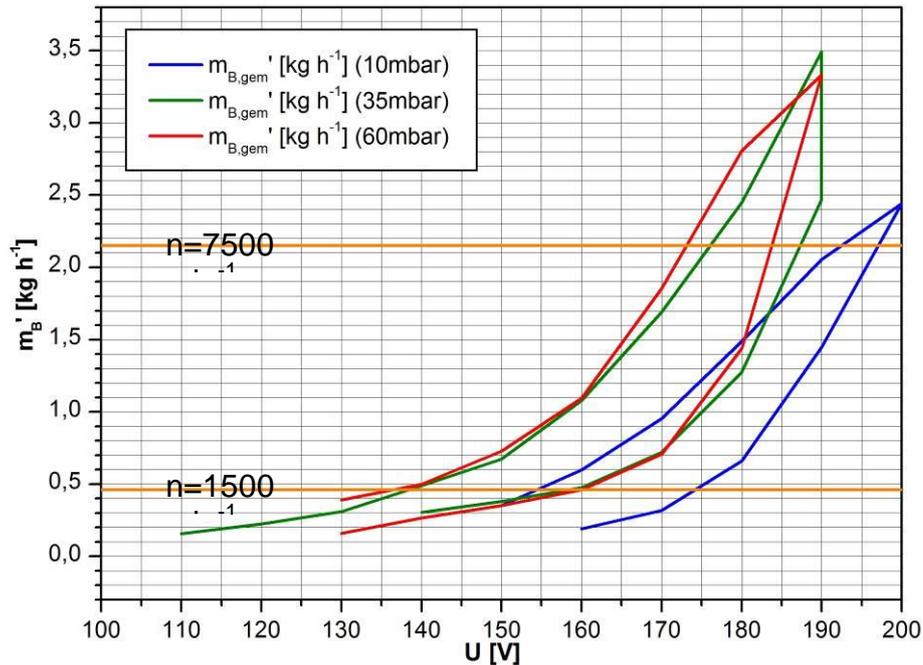


Abbildung 5.8 Gemessene Kraftstoffmassenströme durch Piezomodul

Der Düsendurchmesser hat, zumindest bei größeren Düsendurchmessern, einen vernachlässigbaren Einfluss auf den fließenden Massenstrom (siehe Abbildung 5.9), da die steigende Querschnittsfläche durch einen geringeren Durchflusskoeffizienten kompensiert wird.

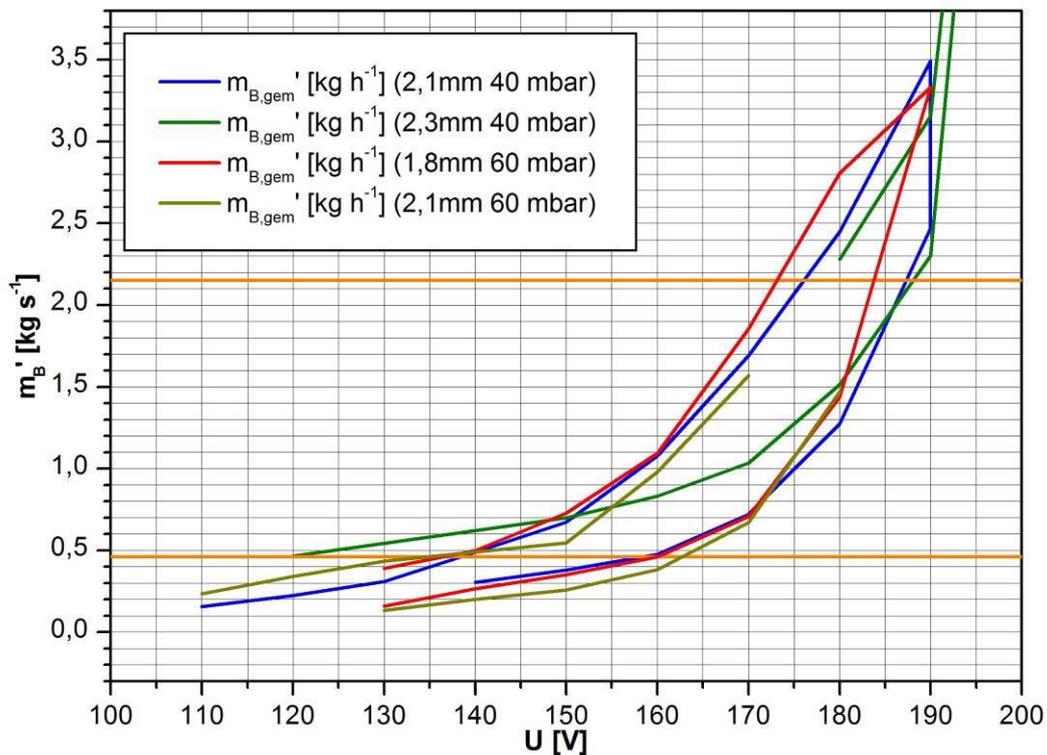


Abbildung 5.9 Variation von Düsendurchmesser ( $F_{F0}=167mN$ )

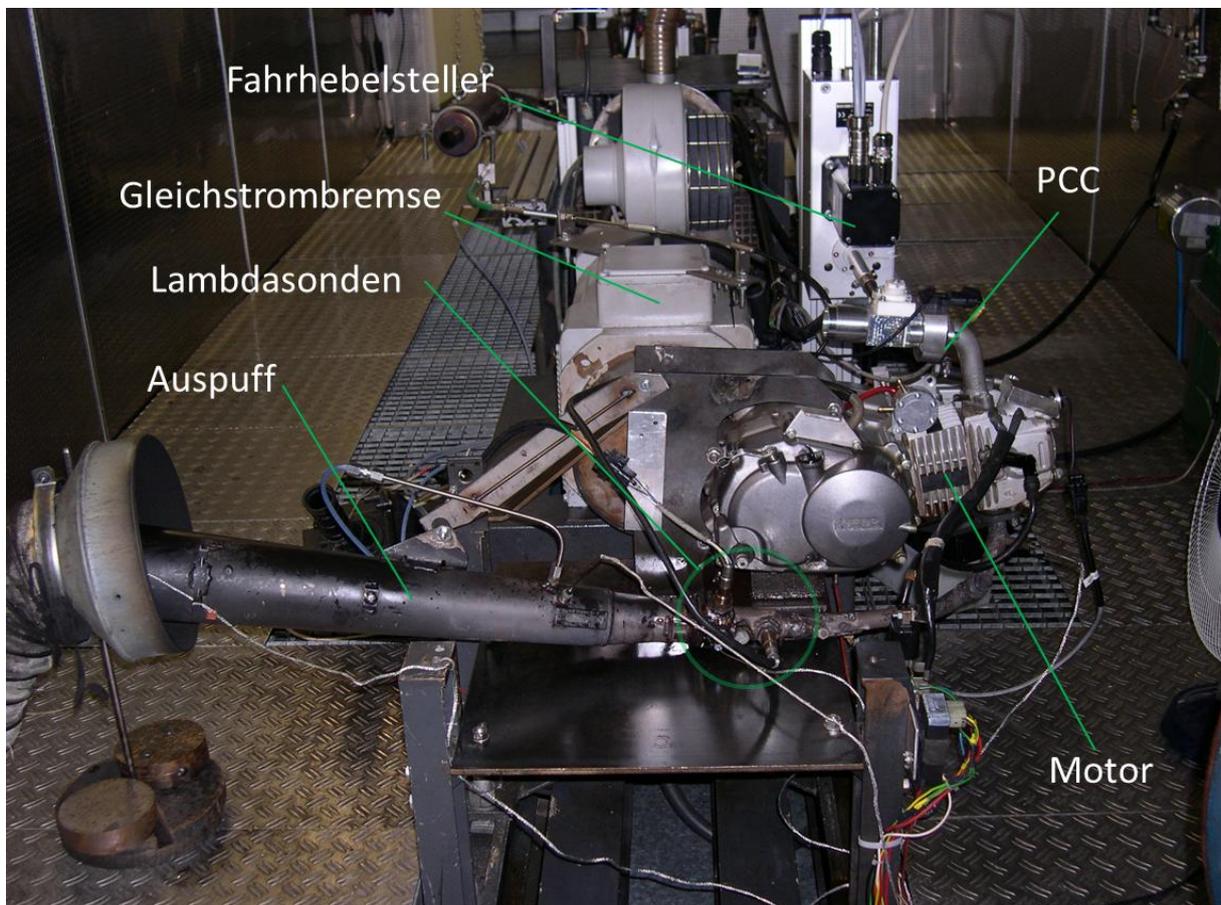
### 5.3. Motorprüfstandsergebnisse Hero Honda

Der aufgebaute Versuchsvergaser (PCC) wurde mit den in der Simulation festgelegten Parametern eingestellt und auf dem Motorenprüfstand der VEMAC zusammen mit dem Motor des Motorrades Hero Honda Glamour verbaut (siehe Abbildung 5.10). Der Verbrennungsmotor kann durch eine Gleichstrombremse geschleppt oder im gefeuerten Betrieb auf konstanter Drehzahl gehalten werden. Das Gemischverhältnis wird mit einer Lambdasonde im Abgas bestimmt [8].

#### Statischer Motorbetrieb

Um die grundlegende Funktionsweise des neuen PCC zu bewerten, wurden zunächst statische Lastkurven bei konstanter Drosselklappenstellung aufgenommen. Dazu wurde eine Kurve für die maximale Leistung bei 100% Fahrhebelstellung von  $2500 \text{ min}^{-1}$  bis  $7500 \text{ min}^{-1}$  gefahren. Der Motor wurde von einem Gleichstrommotor auf konstantem Drehzahlniveau gehalten. Dabei wurden das Abtriebsmoment und die resultierende Leistung ermittelt.

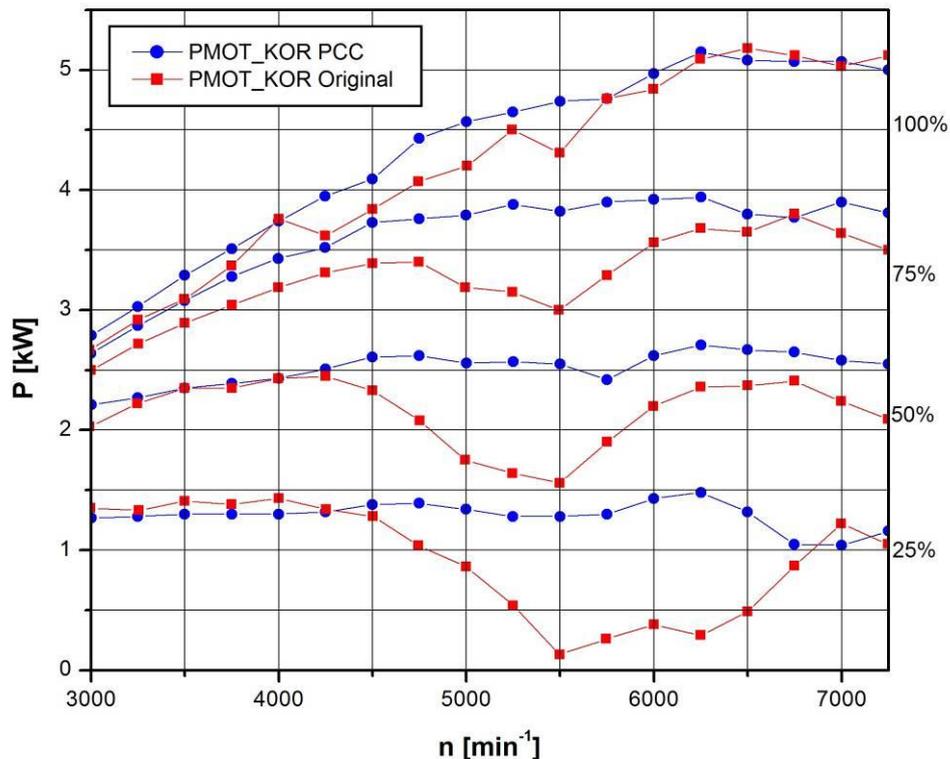
Es wurde das Drehzahlniveau mit der höchsten Leistung gesucht, in diesem Fall  $6500 \text{ min}^{-1}$  mit  $P_{\text{max}} = 5,18 \text{ kW}$ . Anschließend wurden Fahrhebelstellungen ermittelt, welche für  $6500 \text{ min}^{-1}$  75%, 50% und 25% der Maximalleistung bewirken (jeweils 60%, 42%, 20% Fahrhebelstellung). Mit diesen Fahrhebelstellungen wurden Leistungskurven zwischen  $3000 \text{ min}^{-1}$  und  $7000 \text{ min}^{-1}$  aufgenommen. Die Messungen fanden auf dem Motorenprüfstand der VEMAC mit dem Motor des Motorrades Hero Honda Glamour statt. Diese Messungen wurde zunächst ohne eine Optimierung der Reglerparameter durchgeführt (verwendete Reglereinstellung: KR=200 TI=300). Es wurde nur lambdageregelt ( $\lambda_{\text{soll}}=1$ ) gefahren.



**Abbildung 5.10 Aufbau am Prüfstand**

Die beschriebene Messung wurde in der Vergangenheit bei der VEMAC bereits für den Standardvergaser des Motorradmotors durchgeführt. Im Folgenden werden die Messergebnisse gegenübergestellt.

Gegenüber dem Standardvergaser konnte der Piezovergaser die Leistung des Testmotors steigern. Es tritt zwischen  $4500 \text{ min}^{-1}$  und  $6500 \text{ min}^{-1}$  kein Einbrechen der Motorleistung mehr auf. Besonders bei geringen Fahrhebelstellungen (unter 50%) ist der Leistungseinbruch beim Standardvergaser besonders stark ausgeprägt. Verursacht wird die Minderleistung durch ein Abmagern des Kraftstoff-Luft-Gemisches im Bereich zwischen  $4500 \text{ min}^{-1}$  und  $6500 \text{ min}^{-1}$  (siehe Abbildung 5.12). Mit Verringerung der Fahrhebelstellung wird das im Originalvergaser erzeugte Gemisch zunehmend magerer. Bei dem neu konstruierten Piezovergaser gibt es keine Leistungseinbrüche mehr, die Motorleistung hat einen stetigen Verlauf (siehe Abbildung 5.11). Bei den Fahrhebelstellungen für 25% und 50% Maximalleistung ist bei diesem die Motorleistung über nahezu den gesamten Drehzahlbereich konstant. Selbst mit nicht optimierten Reglerparametern ist ein verbesserte Regelung auf ein mittleres Kraftstoff-Luftverhältnis  $\lambda=1$  möglich. Der neu konstruierte Vergaser hält das mittlere Luftmassenverhältnisses über den gesamten gemessenen Drehzahlbereich im Mittel zwischen ca.  $\lambda=1,05$  und  $\lambda=0,95$ . Damit ist er dem rein mechanischen Vergaser bereits überlegen, der wegen der fest eingestellten Düsen nicht über alle Betriebsbereiche ein konstantes Kraftstoff-Luft-Verhältnis erzeugen kann.



**Abbildung 5.11 Gegenüberstellung der Motorleistung**

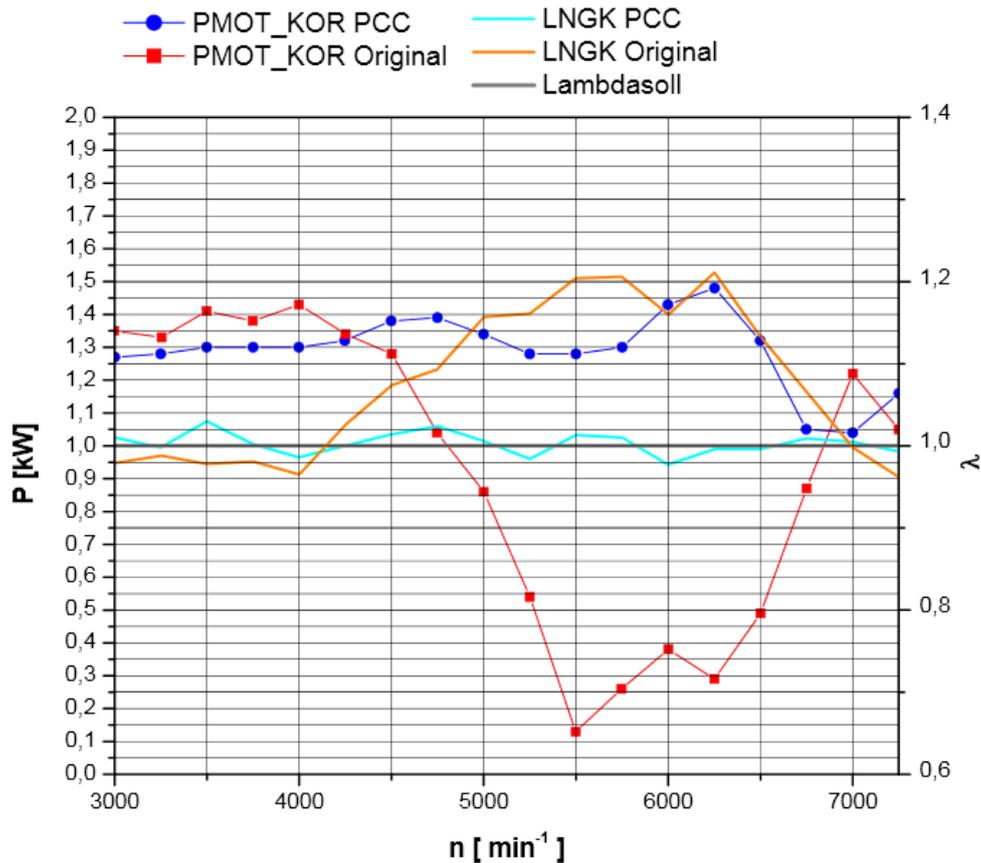
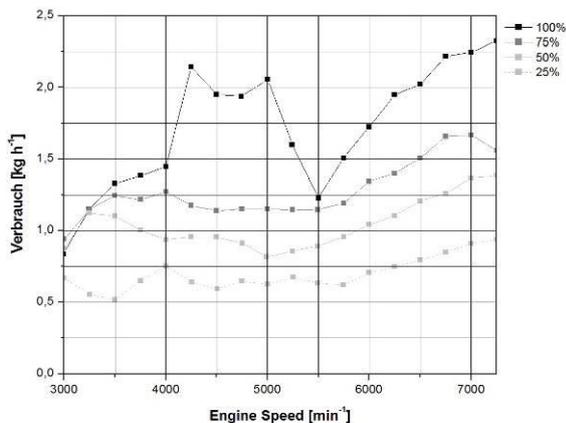


Abbildung 5.12 Kraftstoff-Luft-Verhältnis bei 25% Drosselklappenstellung

Gegenüber dem Originalvergaser ist eine deutliche Verringerung des maximalen Kraftstoffverbrauches zu erkennen (siehe Abbildung 5.13). Der Anstieg des Kraftstoffverbrauches geht bei dem piezoelektrisch geregelten Vergaser linear mit der Drehzahl, was dem Idealfall entspricht. Die Maximalleistung konnte dabei allerdings nicht merklich erhöht werden (siehe Abbildung 5.12). Der verwendete Motor arbeitet unter der verwendeten Abstimmung schon nahe seiner Maximalleistung.

#### Originalvergaser



#### PCC-Vergaser

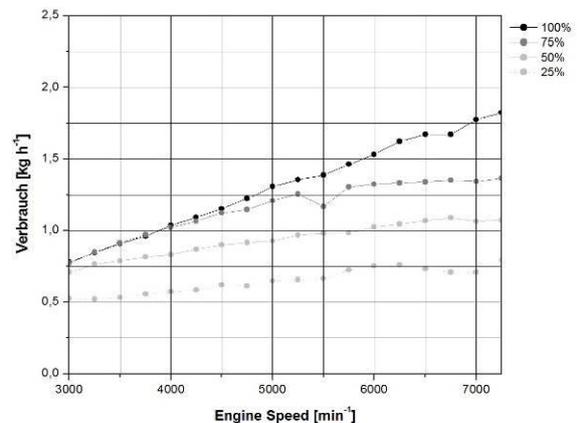


Abbildung 5.13 Gegenüberstellung des Kraftstoffverbrauches

Die tendenziell größte Kraftstoffersparnis ergibt sich in einem Drehzahlbereich zwischen 3000 min<sup>-1</sup> und 4000 min<sup>-1</sup>. Je nach eingelegtem Gang entspräche dies auf

dem Motorrad mit Originalmotor einer Straßengeschwindigkeit von 12 km/h (1. Gang) bis 50 km/h (4. Gang), also dem in der Stadt üblichen Geschwindigkeitsbereich bei schonender Fahrweise und niedrigen Drehzahlen. Im Bereich zwischen  $4500 \text{ min}^{-1}$  und  $6000 \text{ min}^{-1}$  muss mehr Kraftstoff aufgewendet werden. Dies ist zur Absenkung des Kraftstoff-Luftverhältnisses notwendig, um in diesem Bereich den Leistungseinbruch zu beseitigen und das Kraftstoff-Luftverhältnis auf einen für einen Katalysator verträglichen Wert zu senken. Auch in höheren Drehzahlbereichen über  $6000 \text{ min}^{-1}$  konnte der Kraftstoffverbrauch vermindert werden. Bei Fahren unter Vollast kann der Kraftstoffverbrauch ebenfalls deutlich vermindert werden. Hier erzeugte der Originalvergaser ein deutlich zu fettes Gemisch ( $\lambda \approx 0.8$ ). Bei Fahren unter Vollast bei  $4000 \text{ min}^{-1}$  bis  $5000 \text{ min}^{-1}$  kann der Kraftstoffverbrauch beschränkt werden. Ein Fahrer würde diesen Betriebspunkt beispielsweise bei voller Beschleunigung im 1. Gang durchfahren.

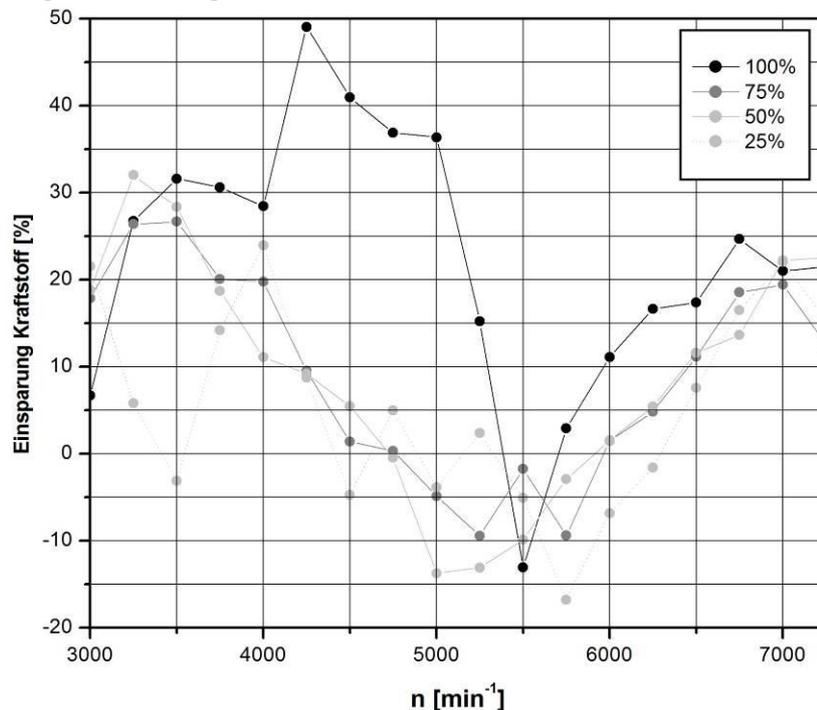


Abbildung 5.14 Prozentuale Kraftstoffersparnis

#### 5.4. Motorprüfstandsergebnisse Briggs&Stratton

Für die Vermessung des Motors auf dem Prüfstand wurden Vergleichsmessungen der Originalkonfiguration mit der PCC-Vergaserkonfiguration durchgeführt. Dabei kam der für die Zulassung des Motors relevante Fahrzyklus zum Einsatz.

Für die Zulassung des Briggs&Stratton Motors muss in Europa die EU Richtlinie 97/68/EG eingehalten werden, in der der zu verwendende Fahrzyklus genau beschrieben ist. Die Abgasprüfung wird in sechs einzelne Prüfphasen à 180s unterteilt. In der ersten Phase wird mit 100%, in der zweiten mit 75%, in der dritten mit 50%, in der vierten mit 25% in der fünften mit 10% und in der sechsten Phase mit 0% Last gemessen. Die Drehzahl beträgt konstant  $3060 \text{ min}^{-1}$ , was der Nenndrehzahl des Motors entspricht

#### EU

Die EU Richtlinie 97/68/EG unterteilt die Hauptklasse der kleineren Motoren mit einer Nutzleistung  $\leq 19 \text{ kW}$  (Klasse S) in die beiden Kategorien:

- Motoren für handgehaltene Maschinen (Kategorie H)
- Motoren für nichthandgehaltene Maschinen (Kategorie N)

Der Briggs&Stratton 650 wird in nichthandgehaltenen Maschinen eingesetzt und fällt damit in die Klasse SN:3 für Motoren mit einem Hubraum zwischen 100ccm und 225ccm.

Seit dem 1.August 2007 gilt für die Motorklassen SH:1, SH:2 und SN3 die Typengenehmigung der Stufe II. Diese gibt die Emissionsgrenzwerte für Kohlenmonoxid (CO) sowie die Summe der Kohlenwasserstoffe und Stickstoffoxide (HC + NO<sub>x</sub>) an. Für die Klasse SN:3 betragen die Maximalwerte der Kohlenmonoxidemission 610 g/kWh und für die Summe der Kohlenwasserstoffe und Stickoxide gilt die obere Grenze von 16,1 g/kWh, wobei die NO<sub>x</sub>-Emission 10 g/kWh nicht übersteigen darf.

Der Prüfzyklus für den betrachteten Motor ist nach der EU Richtlinie der Zyklus G2. Dieser wird bei nicht handgehaltenen Geräten für Nenndrehzahlenwendungen verwendet und gliedert sich in 6 Prüfphasen.

Prüfphase	1	2	3	4	5						6
Motordrehzahl	Nenndrehzahl					Zwischendrehzahl					Untere Leerlaufdrehzahl
Last %	100	75	50	25	10						0
Wichtungsfaktor	0,09	0,2	0,29	0,3	0,07						0,05

Die Probenahmezeit in jeder Prüfphase beträgt mindestens 180 s. Die Konzentrationswerte der Abgasemissionen sind für die letzten 120 s der jeweiligen Probenahmezeit zu messen und zu protokollieren.

## USA

Seit Beginn des Jahres 2012 müssen die Motoren in den USA die Abgasnorm 40 CFR part 1054 der EPA in der Phase 3 einhalten. Diese, zunächst letzte Phase der Abgasgesetzgebung, schreibt für Class 1 Motoren, unter die auch unser Versuchsträger fällt, einen Grenzwert von 610g/kWh für CO und einen Summengrenzwert für NO<sub>x</sub> und HC von 10g/kWh vor. Diese derzeit geltenden Grenzwerte sind somit strenger als die europäischen Grenzwerte.

Max. Werte nach 97/68/EG (SN 3)			Ab 01.2012		
CO	610	g/KWh	Richtlinie der USA (Class 1)		
NO <sub>x</sub>	Max 10	g/KWh	CO	610	g/KWh
NO <sub>x</sub> + HC	16,1	g/KWh	NO <sub>x</sub>		g/KWh
			NO <sub>x</sub> + HC	10	g/KWh

Abbildung 5.15 Die aktuellen Grenzwerte in der EU und in den USA im Vergleich

## Basisvermessung

Bei der Basisvermessung des Motors wurden zum einen die Lambdawerte in den einzelnen Zyklen des gesamten Prüfzyklusses aufgezeichnet und zum anderen wurden die Emissionen gemessen.

In Abbildung 5.16 Sind die Ergebnisse der Lambdavermessung dargestellt. Die 6 unterschiedlichen Stufen (Zyklen) sind durch die unterschiedlichen Farben

dargestellt. Dabei wird in dem oberen Diagramm der Lambdawert über der Zeit dargestellt. In dem unteren Diagramm ist der Mittelwert und die Standardabweichung des Lambdawertes während der unterschiedlichen Stufen dargestellt.

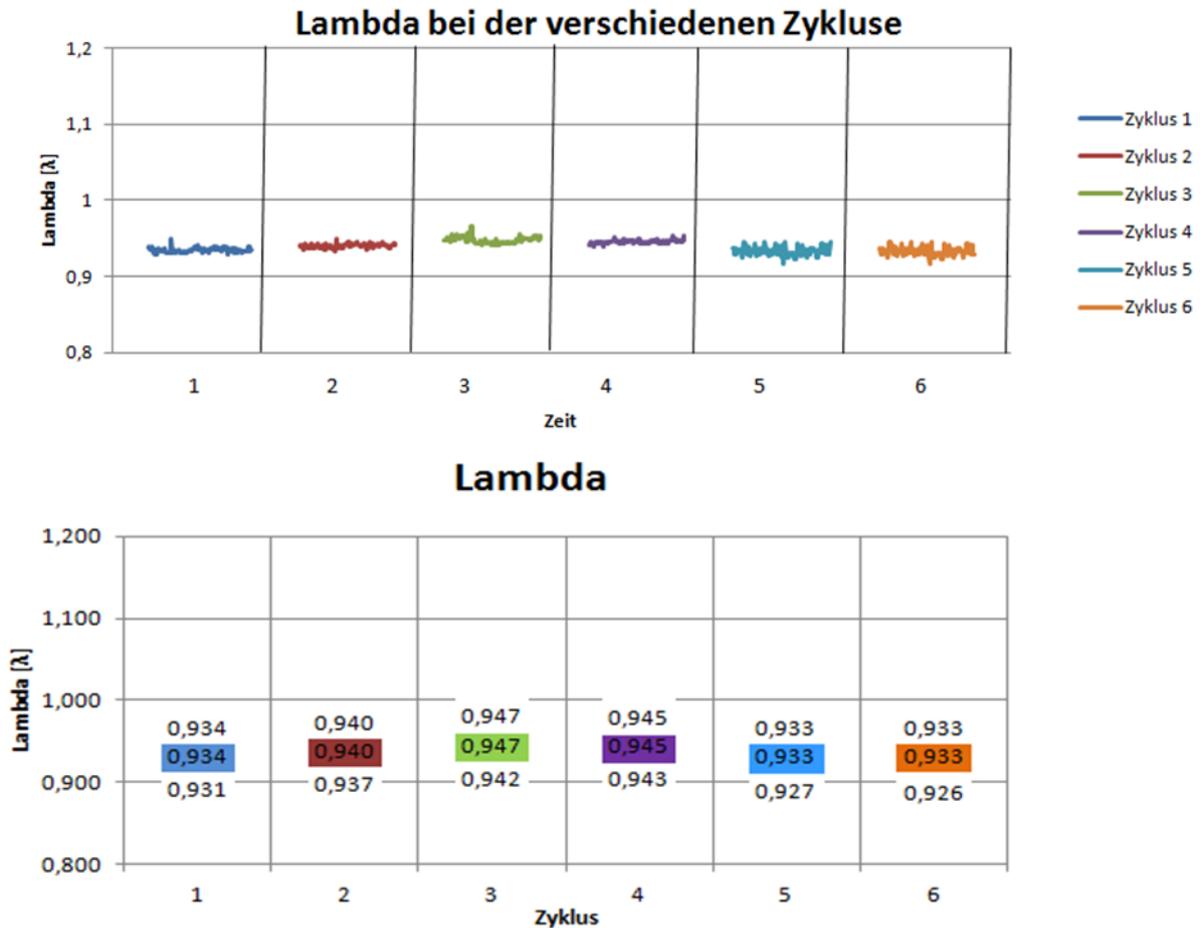


Abbildung 5.16 Lambdawerte mit Originalvergaser

Weiterhin wurde auch das Emissionsverhalten während des Testzyklus gemessen. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.17 dargestellt. Leider konnten die Werte, die Briggs&Stratton für den Motor angibt, auf dem Prüfstand nicht ganz nachvollzogen werden. Die Messwerte sind jedoch geeignet um einen vergleichenden Test mit dem Piezovergaser durchzuführen.

Emissionen Originalvergaser		
Bestandteile		λ
		0,93
CO	g/KWh	234,53
NO <sub>x</sub>	g/KWh	10,42
HC	g/KWh	2,26
CO <sub>2</sub>	g/KWh	1431,6
NO <sub>x</sub> + HC	g/KWh	12,68
Gfuel (gesamt)	kg/h	4,27

Abbildung 5.17 Ergebnis der Emissionsmessung mit Originalvergaser

### Messung mit dem Piezovergaser

Bei der Messung mit dem Piezovergaser wurden die gleichen Versuche, wie mit dem Originalvergaser durchgeführt. Dabei wurden für den Lambdasollwert jeweils unterschiedliche Werte untersucht.

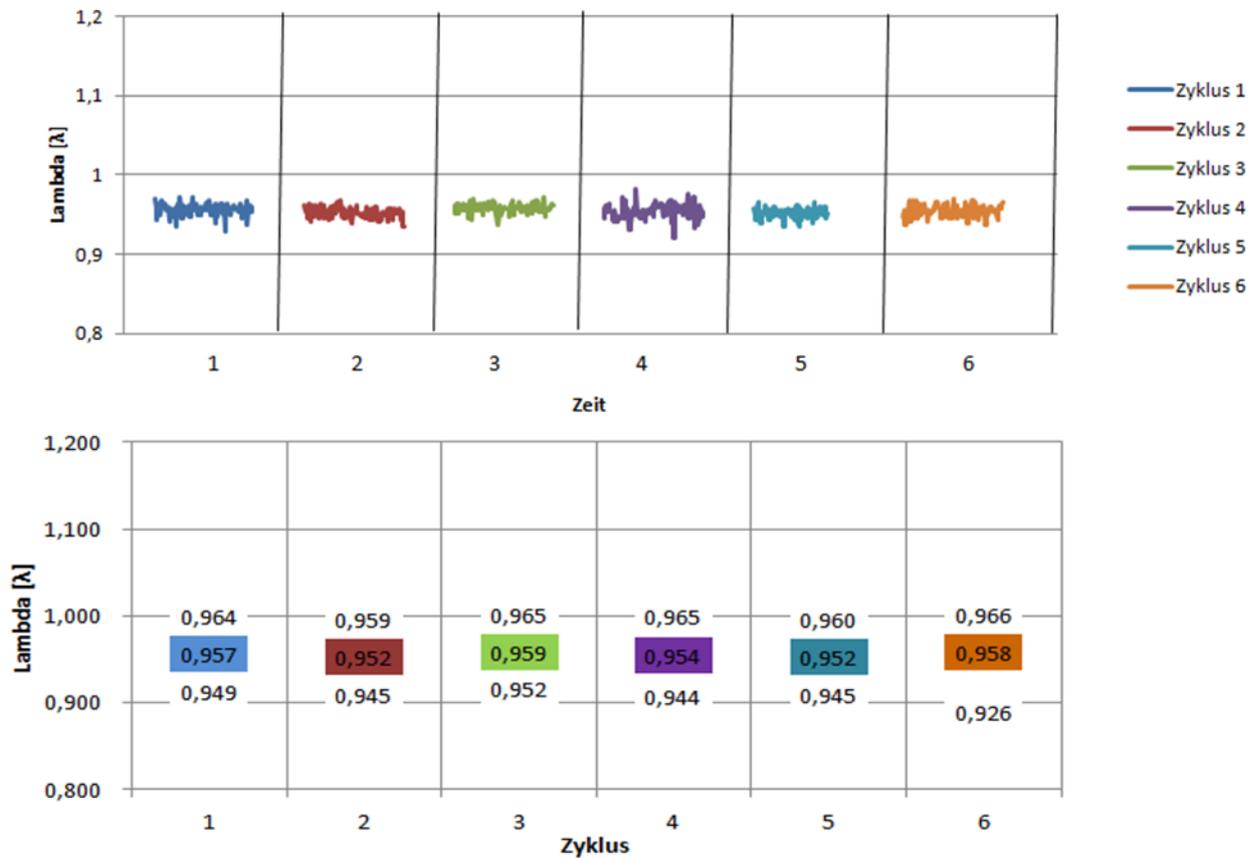


Abbildung 5.18 Lambdastabilitätsuntersuchung bei einem Sollwert von  $\lambda=0,95$

In Abbildung 5.18 ist das Ergebnis der Lambdastabilitätsuntersuchung bei einem Sollwert von  $\lambda=0,95$  dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Stabilität des Wertes nicht schlechter als beim unregelmäßigen Originalvergaser ist. Die Schwankungen der Mittelwerte um den Sollwert sind etwas geringer als beim unregelmäßigen Originalvergaser. Es muss jedoch auch festgestellt werden, dass der Originalvergaser aufgrund des kleinen Betriebsbereichs (konstante Drehzahl) bereits eine sehr gute Lambdastabilität besitzt. Die für Vergasermotoren typischen Schwankungen im Lambda bei unterschiedlichen Lasteinstellungen konnten bei diesem Motor nicht festgestellt werden.

Emissionen Piezovergaser					
Bestandteile		$\lambda$			US Grenzwert nach EPA stage III
		0,85	0,95	1	
CO	g/KWh	633,53	181,09	43,21	610
NO <sub>x</sub>	g/KWh	3,08	15,33	21,74	
HC	g/KWh	5,29	2,73	1,67	
CO <sub>2</sub>	g/KWh	1112,3	1444,19	1697,41	
NO <sub>x</sub> + HC	g/KWh	8,37	18,06	23,42	10
Gfuel (gesamt)	kg/h	5,14	4,3	3,92	

**Abbildung 5.19 Ergebnis der Emissionsmessung mit Piezovergaser**

Das Ergebnis der Emissionsmessung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Lambdawerten ist in Abbildung 5.19 dargestellt. Besonders auffällig ist hierbei die starke Abhängigkeit des CO Wertes von Lambda. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Emissionswert bei Werten von über  $\lambda=0,85$  stark abfällt und damit weit entfernt vom zulässigen Grenzwert ist. Gleichzeitig steigt der Wert für NO<sub>x</sub> stark an und ist bei Werte von über  $\lambda=0,85$  sogar deutlich über dem zulässigen Summengrenzwert von NO<sub>x</sub> + HC. Der optimale Wert wird bei ca.  $\lambda=0,93$  erreicht, was auch der Serienabstimmung mit Originalvergaser sehr nahe kommt.

Insgesamt bedeutet dies, dass die aktuell geltenden Grenzwerte einen Betrieb des Motors im fetten Bereich voraussetzen.

## 6. Ökologische und ökonomische Gesamtbetrachtung

Aus der vorgelegten Studie geht eindeutig hervor, dass bezüglich der „Ökologischen Wirksamkeit“ deutlich zwischen den verschiedenen Anwendungen unterschieden werden muss. Als wichtigstes Unterscheidungskriterium könnte vereinfacht der genutzte Drehzahlbereich genannt werden.

Bei der Anwendung im motorisierten Zweirad (Hero Honda) wird der Vorteil des Piezovergasers sehr gut sichtbar. Gegenüber dem Originalvergaser zeigt Piezovergaser ein lineares Verhalten und liegt im Verbrauch signifikant unter dem des Originalvergasers. Bei dieser Anwendung ist gut zu erkennen, dass die gesetzten Einsparziele übertroffen werden und die ökologische Wirkung erreicht werden könnte. Aufgrund der deutlichen Verbrauchsreduktion ist auch davon auszugehen, eine kurzfristige Finanzierung dieser Technologie möglich ist. Wie so häufig existieren jedoch erhebliche Barrieren für die Einführung neuer Technologien, wie z.B.

- Produktion auf abgeschriebene Anlagen
- reduzierte Umsätze der Mineralölindustrie
- reduzierte Steuereinnahmen
- Unsicherheit/Risiken bei der Einführung neuer Technologien,

die sich nur über Anreizmodelle (Subventionen, etc. ) oder hohen Aufwand über einen langen Zeitraum überwinden lassen.

Wird der Piezovergaser in einer Anwendung (Briggs&Stratton, Rasenmäher) mit weitestgehend konstanter Drehzahl eingesetzt, bietet er keine Vorteile in Bezug auf Kraftstoffverbrauch und Abgaswerte. Die bisher eingesetzten mechanischen Vergaser sind für den genutzten Drehzahl ausreichend optimiert. Es ist davon auszugehen, dass der Piezovergaser aufgrund seiner elektronischen Regelung bei Komfort wie z.B. (Kalt-)startverhalten Vorteile bringen würde.

Präsentiert wurde der Vergaser bzw. das gesamte Projekt auf diversen Messen und Kongressen. Hervorheben möchten wir hierbei die SETC (Small Engine Technologie Conference) in Sapporo (Japan) [9] und die Präsentation während der DBU Sommertagung im Kloster St. Marienthal (Deutschland).

Die VEMAC steht derzeit in Gesprächen/Verhandlungen mit unterschiedlichen Firmen und das Interesse an der entwickelten Technologie ist groß. Je nach rechtlichem Schutz (länderabhängiges Patent) arbeitet die VEMAC daran, die entwickelte Technologie zu vermarkten.

Abschließend ist festzustellen, dass im Bereich der Kleinmotoren eine Entwicklung eingesetzt hat, die sowohl ökonomisch als auch ökologisch in die richtige Richtung geht. Interessanterweise wird der Zugang zum Markt auch stark über Komfortfunktionen gesucht. Firmen wie Stihl [9] gehen diesen Weg sehr konsequent und die Trennung zwischen Vergaser und Einspritzanlage löst sich immer mehr auf.

## 7. Fazit

Als Fazit dieses Projektes hat sich der Piezovergaser als ein tragender Baustein in der Erfüllung kommenden Emissionsgrenzwerte bewiesen. Durch ihn ist es jetzt möglich die für den nächsten Schritt definierten Grenzwerte zu erreichen bzw. zu unterschreiten. Für mittelfristige Erfolge in diesem Bereich muss man jedoch die komplette Einheit aus Motor, Gemischbildner und Abgasanlage in Ihrer Gesamtheit betrachten und auch als Einheit für die Optimierung der Emissionswerte einbeziehen. Herausstellen möchten wir an dieser Stelle das Potential welches der Piezovergaser aus technischer Sicht gegenüber dem standardmäßig eingesetzten mechanischen Vergaser besitzt. Trotz einer über viele Jahre und vielen Entwicklungszyklen perfektioniertem Aufbaus konnte allein schon während dieser Studie der Vorteil des Piezovergaser gegenüber dem mechanischen Vergaser aufgezeigt werden. Gerade die deutlich reduzierten NOx Werte und der niedrigere Verbrauch prädestinieren dieses System um die künftigen Richtwerte zu erreichen. Der nächste logische Schritt im Rahmen des Optimierungsprozesses wäre die Weiterentwicklung des derzeitigen Prototypen in Zusammenarbeit mit einem Vergaserhersteller oder einem Motorhersteller welcher Vergaser in Eigenregie entwickelt und fertigt.

Um eine endgültige Aussage über den Erfolg dieses Systems liefern zu können, darf man aber die politischen Randbedingungen nicht ausblenden. Da hier Einflüsse aus Politik und Wirtschaft ein entscheidendes Stellglied darstellen, konnte dieses Forschungsprojekt nur den technologischen und ökonomischen Bereich abdecken, aber nicht die zum endgültigen Erfolg notwendigen Randbedingungen erörtern.

## 8. Literaturverzeichnis

- [1] N.N., Umweltfakten, Daten zum Umweltzustand, Deutschland 2000, Umweltbundesamt, 2001.
- [2] OECD, „Trends in Motorcycles Fleet Worldwide,“ Lillehammer, 2008.
- [3] FADA, „Indian Two-Wheeler Industry: A Perspective,“ 2010.
- [4] N.N., „Indien lässt Luftverpester zahlen,“ *Handelsblatt*, Nr. 10.02.2010, 2010.
- [5] ACEM, „Contribution to the Public consultation on a proposal for a Framework Regulation of the European Parliament and of the Council on type-approval of two- and three-wheel motor vehicles,“ 2009.
- [6] N. Adolph und M. Düsterhöft, „Vergaser für Otto-Motoren mit einstellbarer Brennstoffdüse“. Patent EP 1 353 058, März 2003.
- [7] B. Last, Analyse und Modellierung von Hytereseerscheinungen in piezoelektrischen Aktoren zum Zweck der Reglersynthese, Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 1998.
- [8] S. Riebenstahl, Konstruktion und Untersuchung eines modularen, piezoelektrisch geregelten Vergasers für die Gemischregelung an Ottomotoren, Bachelorarbeit, 2011.
- [9] M. Reke, S. Grobosch und K. Niegetiet, „Piezoelectric Controlled Carburettor,“ in *s Small Engine Technology Conference*, Sapporo, Japan, 2011.
- [10] W. Zahn, H. Däschner, W. Layher und A. Kinnen, „Elektronisches Einspritzsystem für handgehaltene Arbeitsgeräte,“ *MTZ*, Nr. 9, 2012.