

BING Power Systems GmbH, Nürnberg
SACHS engineering GmbH, Engen
Institut für Fahrzeugtechnik (IFZN) der Fachhochschule Nürnberg

Verbrauchs- und schadstoffarmer Viertakt- Kleinmotor

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt
gefördert unter AZ 24376-21 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Martin Fischer, Dipl.-Ing. (FH) Wolfgang Sachs,
Prof. Dr.-Ing. Miroslaw Weclas und Dr.-Ing. Klaus Mager

November 2008

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	24376	Referat	21/0	Fördersumme	287.105,00 €
Antragstitel	Entwicklung eines verbrauchs- und schadstoffarmen Viertakt-Kleinmotors				
Stichworte	Produkt, Motor, Vergaser, Verbrauch, Emissionen, Effizienz				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
27 Monate	01.07.06	30.09.08			
Zwischenbericht:	Alle 6 Monate Kurzbericht				
Bewilligungsempfänger	BING Power Systems GmbH Dorfäckerstr. 16 90427 Nürnberg			Tel	0911/3267-0
				Fax	0911/3267-299
				Projektleitung	Martin Fischer
				Bearbeiter	Martin Fischer
Kooperationspartner	sachs engineering GmbH, Engen Fachhochschule Nürnberg, Institut für Fahrzeugtechnik (IFZN)				

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Angesichts der Verknappung der fossilen Brennstoffe sowie zunehmender Forderungen nach Schadstoffreduktion und Klimaschutz treten ein sparsamer Verbrauch und geringe Emissionen auch bei Kleinmotoren in den Vordergrund. Gemeint sind damit Anwendungen wie Mopeds und Motorräder, aber auch Rasenmäher oder Motorsägen mit Ottomotoren. Im Gegensatz zu größeren Motoren können keine aufwendigen und kostenintensiven Techniken, wie z.B. Katalysatoren, zum Einsatz kommen, da dies von den Kunden nicht akzeptiert würde, denkt man beispielsweise an Massenmärkte für Motorräder in Asien. Dort ist das Motorrad das Hauptfortbewegungsmittel.

Ottomotoren werden entweder mit Saugrohr-Vergasern oder mit Benzineinspritzern betrieben. Für Motorräder kostet ein normaler Vergaser zwischen 10-20 EUR, ein Einspritzer dagegen 100-150 EUR, weshalb letzterer nur für größere Motorräder eingesetzt wird. Die technisch aufwendigere Einspritzung trägt durch genaue Dosierung des Kraftstoffes zur Einsparung bei, während in konventionellen Vergasern, die starr auf einen Hauptlastfall eingestellt sind, Kraftstoff vergeudet wird. Jedoch werden die meisten kleineren Ottomotoren aus Kostengründen mit Vergasern ausgerüstet.

Die Firma BING GmbH ist der größte Vergaserhersteller in Deutschland. Zusammen mit dem Institut für Fahrzeugtechnik (IFZN) der Fachhochschule Nürnberg und der sachs engineering GmbH sollte ein elektronisch gesteuerter Vergaser entwickelt werden, der nur ca. 30% eines Einspritzsystems kostet. Durch die Steuerung sollten 10-15% Kraftstoff und Emissionen eingespart werden. Die Kombination dieser ökologischen und ökonomischen Vorteile bietet weltweit beste Vermarktungsaussichten, gerade angesichts tendenziell steigender Ölpreise.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im Vergaser sollte ein Magnetventil vorgesehen werden, wie es gemäß dem Stand der Technik in einfacher Ausführung zur Verhinderung des Nachlaufens eines Motors oder zur Vermeidung von Fehlzündungen nach dem Abstellen üblich ist. Neu ist, dass die Öffnung des Magnetventils mittels eines Aktuators und einer Nadel auch während des Betriebs gesteuert wird. Die Steuerung des Vergasers sollte mit Hilfe von Signalen aus der Zündelektronik erfolgen.

Die Kooperation lief in der Weise ab, dass die BING GmbH die Vergasertechnologie entwickelte, die sachs engineering GmbH die Strömungsverhältnisse bei der gesteuerten Gemischaufbereitung und weitere Vergaserdetails simulierte und das IFZN Prüfstandsversuche durchführte und die wissenschaftliche Beratung bei der Abstimmung des Vergasers übernahm.

Ergebnisse und Diskussion

Im Ergebnis ist ein elektronisch gesteuerter Vergaser mit der Bezeichnung EFC System (**E**lectronic **F**uel **C**ontrol) entstanden, der durch die Steuerung des Luft-Kraftstoff Gemisches eine deutliche Reduzierung von CO und HC erzielt, wenngleich die NO_x-Emissionen durch die höhere Verbrennungstemperatur ansteigen. Im Vergleich mit dem Originalvergaser eines Kleinmotorrads verringert der elektronisch gesteuerte BING-Vergaser beispielhaft an einem Punkt maximaler Leistung bei einer Motordrehzahl von 5000 U/min den spezifischen Kraftstoffverbrauch um 15,9 %.

Durch die Umsetzung der Ergebnisse in die Serienproduktion erwartet BING, dass mittelfristig ca. eine Million gesteuerte Vergaser verkauft werden können. Damit könnten innerhalb von drei bis vier Jahren ca. 109 Mio. Liter Benzin eingespart werden, entsprechend einer Verminderung des CO₂-Ausstoßes um ca. 270.000 Tonnen.

Im Vorhaben kam es durch die für die Steuerung benötigten zusätzlichen mechanischen Komponenten zu Schwingungsproblemen, deren Beherrschung einigen Aufwand verursachte. Zur Erzielung der Serienreife des gesteuerten Vergasers müssen noch wirksame Maßnahmen zur Unterdrückung von Schwingungsneigungen getroffen werden.

In den Versuchen kam ein Klappenvergaser für die elektronische Steuerung zum Einsatz. Ursprünglich war der Klappenvergaser für den Stationärbetrieb geplant, z.B. von Rasenmähern. Im Vorhaben wurde er aber aus Gründen des einfacheren Aufbaus auch mit dem originalen Schiebervergaser eines Kleinmotorrads verglichen. Für den praktischen Einsatz in Motorrädern ist jedoch geplant, mit der Steuerung auf Schiebervergaser überzugehen, die beim Beschleunigen bessere Ergebnisse erzielen. Der gesteuerte Vergaser ist dafür noch umzubauen.

Der neue Vergaser besitzt gegenüber konventionellen Saugrohr-Vergasern von Viertakt-Kleinmotoren deutlich bessere Verbrauchs- und Emissionswerte, wenngleich er die Werte von Einspritzern nicht ganz erreichen dürfte. Allerdings besitzt der gesteuerte Vergaser gegenüber einem Einspritzer wesentliche Kostenvorteile.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Vorhabensergebnisse sollen für zwei Anwendungsgebiete auf den Markt gebracht werden:

1. Kleinere Motorräder und Motorroller mit 125 bis 200 ccm Hubraum (EFC-Modul als Schiebervergaser)
2. Stationär betriebene Motoren, wie Rasenmäher, Motorsägen, Laubbläsergeräte, Häcksler oder Rasentrimmer (EFC-Modul als Klappenvergaser)

Zu Firmen aus diesen Gebieten bestehen gute Kontakte, so dass die Firma BING nach dem kompletten Abschluss der Entwicklungsarbeiten aufgrund des Einsparpotenzials von Kraftstoff und Emissionen sofort ins Geschäft kommen kann. Einige der Kunden wurden bereits von den Ergebnissen unterrichtet und zeigten großes Interesse. Weitere Interessenten sollen durch Fachveröffentlichungen in der Motortechnischen Zeitschrift MTZ oder auf der SAE-Konferenz (Society of Automotive Engineers) angesprochen werden. Der gesteuerte Vergaser soll als EFC-Modul in etwa einem Jahr auf den Markt gebracht werden.

Fazit

Mit dem Vorhaben wurde das Prinzip der Steuerbarkeit der Gemischzufuhr für Viertakt-Kleinmotoren mit einer getakteten Düse auf Basis von Signalen aus der Zündelektronik nachgewiesen, so dass auch ohne Verwendung einer Lambda-Sonde ein Motorbetrieb mit $\lambda \approx 1$ für annähernd alle Lastfälle eingestellt werden kann. Es ist ein effizienter Kompromiss zwischen Saugrohr-Vergaser und Einspritzer entstanden, der in puncto Kraftstoffverbrauch und Emissionen bessere Werte erzielt als der Saugrohr-Vergaser, aber kostengünstiger angeboten werden kann als der technisch aufwendigere Einspritzer. Mit dem neuen System werden für kleine Viertakt-Motoren auch in Zukunft verschärfte Abgasnormen eingehalten werden können.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Bilder, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen	2
Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen	4
1 Zusammenfassung	5
2 Einleitung.....	6
3 Hauptteil	11
3.1 Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte sowie angewandter Methoden ...	11
3.1.1 Aufbau von Prüfständen durch die Firma BING	11
3.1.2 Untersuchungen zu Nadel und Nadelsitz	11
3.1.3 Erste Versuche mit einem gesteuerten Vergaser.....	13
3.1.4 Simulation von Strömungseffekten.....	14
3.1.5 Entwicklung Seitenschwimmer-Vergaser	15
3.1.6 Versuche mit dem gesteuerten Seitenschwimmer-Vergaser.....	16
3.1.7 Simulationen zum EFC-Vergaser.....	22
3.1.8 Umkonstruktion	24
3.1.9 Versuche mit optimiertem gesteuerten Seitenschwimmer-Vergaser....	25
3.1.10 Simulationen zur Bestimmung der Nadelbeanspruchung.....	29
3.1.11 Aufbau eines Prüfstandes durch das IFZN der FH Nürnberg.....	30
3.1.12 Grundmotorvermessung auf dem Prüfstand des IFZN.....	34
3.2 Darstellung der erzielten Ergebnisse.....	39
3.3 Diskussion der Ergebnisse.....	49
3.4 Ausführliche ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse.....	51
3.4.1 Ökologische Bewertung	51
3.4.2 Technologische Bewertung.....	53
3.4.3 Ökonomische Bewertung	54
3.5 Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse	54
4 Fazit.....	56
Literaturverzeichnis.....	57
Anhang.....	57

Verzeichnis der Bilder, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abbildung 1:	Vergaserquerschnitt mit Steuerung der Kraftstoffzufuhr	8
Abbildung 2:	Motorenprüfstand der BING GmbH mit Rasenmähermotor	12
Abbildung 3:	Vergaser mit gesteuertem Leerlauf- und Bypass-System	13
Abbildung 4:	Dosierung des Kraftstoffes mit Nadel	14
Abbildung 5:	Verteilung der Luftgeschwindigkeit im Vergaser.....	15
Abbildung 6:	Trajektorien der Luftbewegung.....	15
Abbildung 7:	Schematische Darstellung eines alternativen Lösungsansatzes	15
Abbildung 8:	3D-Modell des neuen Seitenschwimmer-Vergasers.....	16
Abbildung 9:	Vergasergehäuse als gefrästes Muster mit Seitenschwimmer	16
Abbildung 10:	Saugrohrunterdruck und Ein-Ausschaltzeitpunkt des Magnetventils..	17
Abbildung 11:	Druckverlauf der Kraftstoffzuleitung im Vergaser	18
Abbildung 12:	Verbrauchskurve bis 50° Drosselklappenwinkel.....	19
Abbildung 13:	Differenzdruckkurve bis 50° Drosselklappenwinkel	19
Abbildung 14:	Druckverlaufskurven innerhalb Vergaser (Hauptdüse offen)	20
Abbildung 15:	Druckverlaufskurven innerhalb Vergaser (Hauptdüse geschlossen) ..	20
Abbildung 16:	Messergebnisse mit dem gesteuerten Vergaser.	21
Abbildung 17:	Querschnitt durch das Modell des EFC-Systems	23
Abbildung 18:	Vernetztes Volumenmodell für die Luftströmung im EFC-Vergaser..	23
Abbildung 19:	Statische Druckverteilung im neuen Vergaser.....	23
Abbildung 20:	Vektoren der Luftgeschwindigkeit.....	23
Abbildung 21:	Druckverteilung am Hauptventil.....	24
Abbildung 22:	Verteilung der Luftgeschwindigkeit am Leerlaufventil.....	24
Abbildung 23:	EFC-Modul als Seitenschwimmervergaser.....	25
Abbildung 24:	Original Vergaser bei zunehmendem Bremsmoment	26
Abbildung 25:	Vergaser zunächst mit unbetätigtem EFC Modul	26
Abbildung 26:	Vergaser mit gesteuertem EFC Modul	27
Abbildung 27:	Vergaser mit gesteuertem EFC Modul bei schneller Belastung	28
Abbildung 28:	Modell von Nadel und Nadelsitz	29
Abbildung 29:	Kontaktpressung an der Auflagestelle von Nadel und Nadelsitz	30
Abbildung 30:	Motorrad mit 125 ccm Motor.....	31
Abbildung 31:	Aufspannvorrichtung des Motors am Prüfstand.....	31
Abbildung 32:	Anschließen des Kabelbaumes und des Fahrthebelstellers	31
Abbildung 33:	Komplett aufgebauter Prüfstand mit 125 ccm Motor	32
Abbildung 34:	Regelungsarten und Funktionen der Steuerung des Prüfstandes	32
Abbildung 35:	Oberfläche der Prüfstandssteuerung.....	33
Abbildung 36:	Drehmomentenwelle am Prüfstand	33
Abbildung 37:	Weitere Messtechnik am Prüfstand.....	33
Abbildung 38:	Entkoppelte Motoraufspannung.....	34
Abbildung 39:	Kupplung zwischen Kurbel- und Bremswelle des Prüfstandes.....	34
Abbildung 40:	Komplett aufgebauter Prüfstand mit 125 ccm Motor	35
Abbildung 41:	Drehmoment aus der Vermessung des Grundmotors	35
Abbildung 42:	Leistung aus der Vermessung des Grundmotors	36
Abbildung 43:	Lambda-Wert aus der Vermessung des Grundmotors	36
Abbildung 44:	CO-Werte aus der Vermessung des Grundmotors.....	37
Abbildung 45:	CO ₂ -Werte aus der Vermessung des Grundmotors	37
Abbildung 46:	Verbrauchskennfeld des Grundmotors	37
Abbildung 47:	Systemaufbau des Kraftstoffmesssystems	38

Abbildung 48: Optimierter Seitenschwimmervergaser.....	40
Abbildung 49: Prototyp des neuen EFC-Systems	40
Abbildung 50: Schadstoffkomponenten beim Ottomotor in Bezug auf λ	41
Abbildung 51: Vergleich des Verbrennungsluftverhältnisses λ	43
Abbildung 52: Konvertierung eines Drei-Wege-Katalysators.....	43
Abbildung 53: CO Ausstoß in Abhängigkeit der Motorlast bei 5000 U/min.....	44
Abbildung 54: HC Ausstoß in Abhängigkeit der Motorlast bei 5000 U/min	45
Abbildung 55: NO _x Ausstoß in Abhängigkeit der Motorlast bei 5000 U/min	45
Abbildung 56: Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit der Motorlast bei 5000 U/min	46
Abbildung 57: Motorleistung in Abhängigkeit der Motorlast bei 5000 U/min.....	47
Abbildung 58: Spezif. Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit der Motorlast	47
Abbildung 59: Punkte maximaler Leistung bei 5000 U/min	48
Abbildung 60: Spezifischer Kraftstoffverbrauch an Punkten maximaler Leistung.....	48
Tabelle 1: Antragsgemäße Arbeits- u. Zeitplanung für die drei Projektpartner....	10
Tabelle 2: Schließdauer des Magnetventils bei 5000 U/min	42
Tabelle 3: Geschätzte Energieeinsparung bei erfolgreicher Serienumsetzung...	52
Tabelle 4: Kostenvorteile des gesteuerten Vergasers gegenüber Einspritzern ...	54

Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
d	Tag
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DIN	Deutsche Industrie Norm
EFC System	E lectronic F uel C ontrol System (elektronisch gesteuerter Vergaser)
EN	Europäische Norm
Fettes Gemisch	$\lambda < 1$ (Gemisch enthält weniger Luft als stöchiometrisch erforderlich)
FuE	Forschung und Entwicklung
g	Erdbeschleunigung in [m/s ²]
h	Stunde
HC	Kohlenwasserstoffe
KW	Kurbelwinkel in [°]
λ (Lambda)	Luftzahl (Verhältnis aus zugeführter Luftmenge und theoretischem Luftbedarf bei der Verbrennung)
Mageres Gemisch	$\lambda > 1$ (Gemisch enthält mehr Luft als stöchiometrisch erforderlich)
μm	Mikrometer (10 ⁻⁶ Meter)
nm	Nanometer (10 ⁻⁹ Meter)
NO _x	Stickoxide
s	Sekunde
U/min	Umdrehungen pro Minute
W	Watt

1 Zusammenfassung

Angesichts der Verknappung der fossilen Brennstoffe sowie zunehmender Forderungen nach Schadstoffreduktion und Klimaschutz treten ein sparsamer Verbrauch und geringe Emissionen auch bei Kleinmotoren in den Vordergrund. Gemeint sind damit Anwendungen wie Mopeds und Motorräder, aber auch Rasenmäher oder Motorsägen mit Ottomotoren. Im Gegensatz zu größeren Motoren können keine aufwendigen und kostenintensiven Techniken, wie z.B. Katalysatoren, zum Einsatz kommen, da dies von den Kunden nicht akzeptiert würde, denkt man beispielsweise an Massenmärkte für Motorräder in Asien. Dort ist das Motorrad das Hauptfortbewegungsmittel.

Ottomotoren werden entweder mit Saugrohr-Vergasern oder mit Benzineinspritzern betrieben. Für Motorräder kostet ein normaler Vergaser zwischen 10-20 EUR, ein Einspritzer dagegen 100-150 EUR, weshalb letzterer nur für größere Motorräder eingesetzt wird. Die technisch aufwendigere Einspritzung trägt durch genaue Dosierung des Kraftstoffes zur Einsparung bei, während in konventionellen Vergasern, die starr auf einen Hauptlastfall eingestellt sind, Kraftstoff vergeudet wird. Jedoch werden die meisten kleineren Ottomotoren aus Kostengründen mit Vergasern ausgerüstet.

Die Firma BING GmbH ist der größte Vergaserhersteller in Deutschland. Zusammen mit dem Institut für Fahrzeugtechnik (IFZN) der Fachhochschule Nürnberg und der sachs engineering GmbH sollte ein elektronisch gesteuerter Vergaser entwickelt werden, der nur ca. 30% eines Einspritzers kostet. Dazu sollte im Vergaser ein Magnetventil vorgesehen werden, dessen Öffnung während des Betriebs in Abhängigkeit von Signalen aus der Zündelektronik gesteuert wird. Durch die Steuerung sollten 10-15% Kraftstoff und Emissionen eingespart werden. Die Kombination dieser ökologischen und ökonomischen Vorteile bietet weltweit beste Vermarktungsaussichten, gerade angesichts tendenziell steigender Ölpreise. Die Kooperation lief ab, dass die BING GmbH die Vergasertechnologie entwickelte, die sachs engineering GmbH die Strömungsverhältnisse bei der gesteuerten Gemischaufbereitung und weitere Vergaserdetails simulierte und das IFZN Prüfstandsversuche durchführte und die wissenschaftliche Beratung bei der Abstimmung des Vergasers übernahm.

Im Ergebnis ist ein elektronisch gesteuerten Vergaser mit der Bezeichnung EFC System (**E**lectronic **F**uel **C**ontrol) entstanden, der durch die Steuerung des Luft-Kraftstoff Gemisches eine deutliche Reduzierung von CO und HC erzielt, wenngleich die NO_x-Emissionen durch die höhere Verbrennungstemperatur ansteigen. Im Vergleich mit dem Originalvergaser eines Kleinmotorrads verringert der elektronisch gesteuerten BING-Vergaser beispielhaft an einem Punkt maximaler Leistung bei einer Motordrehzahl von 5000 U/min den spezifischen Kraftstoffverbrauch um 15,9%. Durch die Umsetzung der Ergebnisse in die Serienproduktion erwartet BING, dass mittelfristig ca. eine Million gesteuerte Vergaser verkauft werden können. Damit könnten innerhalb von drei bis vier Jahren ca. 109 Mio. Liter Benzin eingespart werden, entspr. einer Verminderung des CO₂-Ausstoßes um ca. 270.000 Tonnen.

Das Entwicklungsvorhaben wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Aktenzeichen 24376-21 gefördert.

2 Einleitung

Kleinere Ottomotoren von Kleinmotorrädern oder stationären Anwendungen werden meist mit Saugrohr-Vergasern ausgerüstet und werden werkseitig auf einen bestimmten Belastungsfall eingestellt. Daher wird bei maximaler Belastung, d.h. nur in einem bestimmten Betriebsfall, eine Luftzahl¹ $\lambda \approx 0,9$ erreicht, während der Motor in anderen Bereichen eher fetter gefahren wird. Auch besteht bei Motorherstellern die Tendenz, den Motor eher mit einem fetteren Gemisch zu versorgen, um einen sauberen Rundlauf und ein gutes Ansprechverhalten zu erreichen. Denn das maximale Drehmoment und ein guter Rundlauf des Motors ergeben sich im fetten Bereich bei $\lambda \approx 0,9$. Dort sind aber die CO- und HC-Emissionen und der spezifische Kraftstoffverbrauch ungünstig. Im mageren Bereich bei Werten von $\lambda > 1$ kann sich die Stickoxidfracht (NO_x) erhöhen, und die Rundlaufeigenschaften verschlechtern sich. Daher werden größere Ottomotoren (mit 3-Wege-Katalysator) unter Nutzung von Lambda-Sonden bei stöchiometrischem Luftverhältnis $\lambda = 1$ betrieben, während bei kleineren Ottomotoren in Belastungsfällen, in denen die Luftzahl $\lambda \approx 1,0$ nicht erreicht wird, unnötig Emissionen verursacht und bei zu fettem Betrieb Kraftstoff vergeudet werden.

Im Auftrag des Umweltbundesamtes hat der RWTÜV Fahrzeug GmbH, Essen, Schadstoffemissionsmessungen an kleinen Verbrennungsmotoren (Ottomotoren) im Unterauftrag durch die Abgasprüfstelle Berlin-Adlershof ausgeführt [UBA]. Die untersuchten Motoren werden für verschiedene Zwecke eingesetzt, z.B. als Rasenmäher, Kettensägen, Häcksler, Blasegeräte, Generatoren und Vibrationsverdichter. Der Einsatz konzentriert sich dabei auf bestimmte Jahreszeiten und begrenzte Gebiete (beispielsweise Rasenmäher an sonnigen Sommersamstagen in Gärten im Stadtgebiet). So können die Schadstoffemissionen dieser Motoren erheblichen Einfluss auf die lokale Bildung des bodennahen Ozons haben. Der Anteil der von mobilen Maschinen und Geräten emittierten Kohlenwasserstoffe kann an bestimmten Tagen bis zu 20 % der von allen mobilen Quellen (Pkw, Nutzfahrzeuge, Motorräder und sonstiger Verkehr) emittierten Kohlenwasserstoffe ausmachen.

Die Studie hat 19 Zweitakt- und neun Viertakt-Ottomotoren hinsichtlich der Emissionen von unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC), Kohlenmonoxid (CO) und Stickstoffoxiden (NO_x) untersucht. Die Leistung der vermessenen Motoren lag zwischen 0,7 und 12,0 kW. Die Ergebnisse belegen, dass von derartigen Motoren, wie erwartet, große Mengen an unverbrannten Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxid emittiert werden. Im Vergleich zu den Emissionen für Straßenfahrzeuge lagen die CO-Emissionen bis zum 90fachen höher als die im Straßenverkehr zulässigen Emissionen. Die NO_x -Emissionen dieser Motoren waren dagegen allgemein auf einem niedrigen Niveau. Insgesamt hat sich gezeigt, dass

¹ Die vollständige Verbrennung von 1 kg Benzin erfordert etwa 14,5 kg Luft. Bei diesem stöchiometrischen Luft-Kraftstoff-Verhältnis ist die Luftzahl λ

$$\lambda = \frac{\text{zugeführte Luftmenge}}{\text{theoretischer Luftbedarf}} = 1$$

Mageres Gemisch ($\lambda > 1$) enthält mehr Luft, fettes Gemisch ($\lambda < 1$) weniger Luft. Das Luft-Kraftstoffverhältnis bestimmt entscheidend das Betriebsverhalten des Motors.

das Abgasniveau der untersuchten Motoren sehr unterschiedlich ist und durch eine bessere Abstimmung der Motoren (Vergasereinstellung usw.) eine Verbesserung im Abgasverhalten erreichbar ist.

Das Entwicklungsziel des FuE-Vorhabens bestand in einem effizienten Gemischaufbereitungssystem für kleine Viertaktmotoren bis ca. 20 PS. Es sollte eine Kraftstoffersparnis von 10-15% erreicht werden, mit der eine Einsparung von Emissionen im gleichen Umfang einhergehen sollte.

Die BING GmbH ging davon aus, dass im Falle eines erfolgreichen Abschlusses des Vorhabens in drei bis vier Jahren nach der Markteinführung mindestens eine Million gesteuerte Vergaser verkauft werden könnten, u.a. an die Firmen Piaggio oder Peugeot. Dies betrifft zum einen kleinere Motorräder und Motorroller mit 125 bis 200 ccm Hubraum und zum anderen eher stationär betriebene Motoren, wie Rasenmäher, Motorsägen, Laubblasegeräte, Häcksler oder Rasentrimmer. Legt man eine Stückzahl von etwa einer Million gesteuerter Vergaser zugrunde, könnten durch den Einsatz gesteuerter Vergaser ca. 109 Mio. Liter Benzin innerhalb eines überschaubaren Zeitraumes von drei bis vier Jahren nach der Markteinführung eingespart werden, entsprechend einer Verminderung des CO₂-Ausstoßes um ca. 270.000 Tonnen.

Der Verkaufspreis des Gemischaufbereitungssystems sollte bei ca. 50-60 EUR liegen. Damit sollten unter Verwendung relativ einfacher technischer Ansätze die Zielmärkte kleiner Viertaktmotoren für Mopeds, Motorroller und Rasenmäher in Europa und für kleinere Motorräder in Asien angesprochen werden.

Nach Angaben der Fachhochschule Nürnberg beträgt die gesamte Weltproduktion an kleinen Verbrennungsmotoren ca. 60 Mio. Stück pro Jahr und übersteigt damit die Fahrzeugproduktion. Das Projekt orientierte sich zwar an Viertaktmotoren, der gesteuerte Vergaser könnte jedoch später auch für Zweitakter angepasst werden, die einen Großteil der Weltproduktion ausmachen. Es ist allerdings abzusehen, dass in Zukunft z.B. auch für Kleinmotorräder strengere Abgasvorschriften erlassen werden, die mit Zweitaktmotoren schwieriger zu erfüllen sein werden. Bei den höher drehenden Zweitaktern steigen die Emissionen mit zunehmender Drehzahl, da eine zeitliche Abhängigkeit von der Druckdifferenz zwischen Zylinder und Auspuff besteht. Bei ungünstigen Druckdifferenzen resultiert eine schlechte Durchspülung, was auch die Leistung mindert. Um ein günstigeres Druckverhältnis zu erreichen, kommen aufwendige Schieberventile (halbrunde Ventilwellen im Abgassystem) und Schwingungsresonatoren zum Einsatz. Sie sind allerdings nur für bestimmte Drehzahlen ausgelegt, so dass sich bei schwankenden Lastfällen ein insgesamt suboptimaler Betrieb ergibt. Weitere Emissionen rühren von dem für Zweitaktmotoren erforderlichen Schmiermittel im Kraftstoff, denn ein Teil von Kraftstoff und Schmieröl gelangt unverbrannt ins Abgas. Viertaktmotoren haben dagegen mit ihrer besseren Gemischbildung deutlich geringere HC-Emissionen.

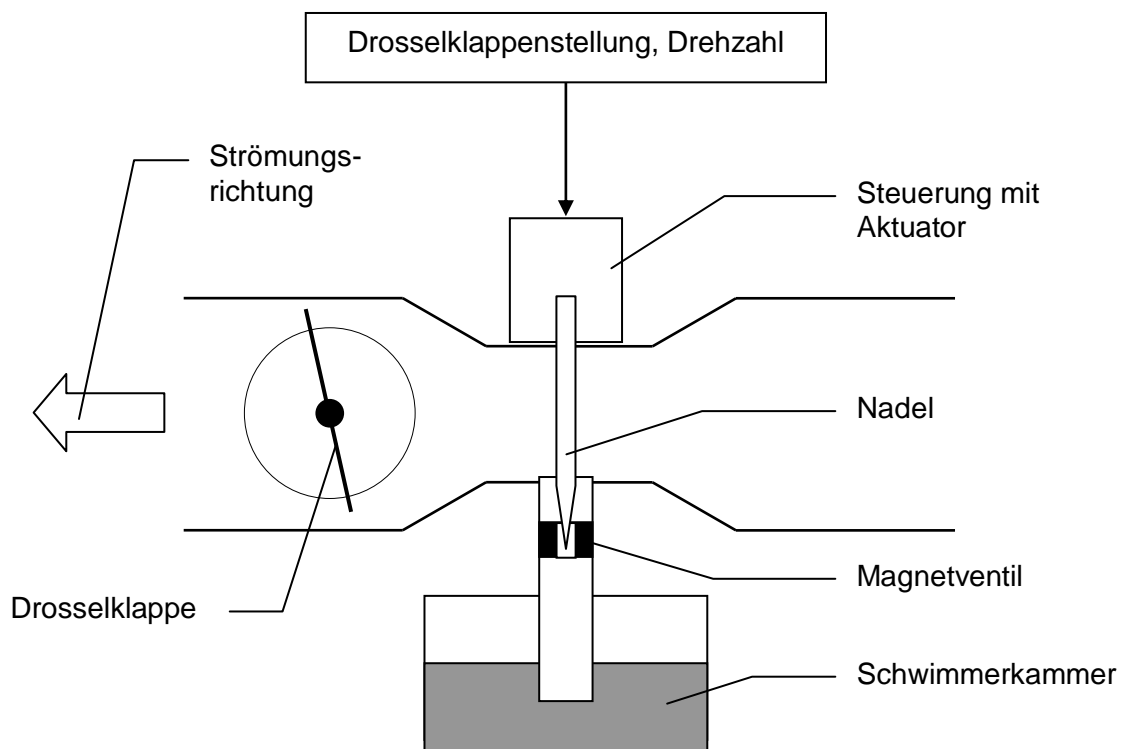


Abbildung 1: Vergaserquerschnitt mit Steuerung der Kraftstoffzufuhr

Der Lösungsansatz zur Erreichung der Projektziele bestand in einem elektronisch gesteuerten Vergaser als Zwischenlösung zwischen einem konventionellen, ungesteuerten Vergaser, der einen vergleichsweise hohen Verbrauch aufweist, und einem Einspritzer, der zwar sparsam, aber für die vorgesehenen Zielmärkte kleiner Viertaktmotoren zu teuer ist. Während der Herstellungspreis eines gesteuerten Vergasers auf ca. 50 EUR geschätzt wird, müsste für eine Einspritzanlage etwa das Zwei- bis Dreifache veranschlagt werden.

Die Steuerung sollte auf einer Sensorik im Bereich der Zündanlage basieren. Im Vergaser wurde ein Magnetventil vorgesehen (siehe Abbildung 1), wie es gemäß dem Stand der Technik in einfacher Ausführung zur Verhinderung des Nachlaufens eines Motors oder zur Vermeidung von Fehlzündungen nach dem Abstellen üblich ist. Als Neuheit wird die Öffnung des Magnetventils mittels eines Aktuators und einer Nadel auch während des Betriebs gesteuert. Dazu wird die Nadel vom Aktuator in Abhängigkeit von der Drehzahl und der Drosselklappenstellung ausgelenkt, beides Messgrößen, die in der Zündanlage abgegriffen werden können. Eine ausreichend hohe Spannung erlaubt eine schnelle Reaktion der Steuerung. Das Magnetventil sollte mit Puls-Weiten-Modulation angesteuert werden. Als Vorgabe für die Steuerung wurde ein stöchiometrisches Luft-Kraftstoff-Verhältnis für alle Belastungssituationen angestrebt.

Während konventionelle Vergaser so eingestellt werden, dass sie bei maximalem Lastpunkt, d.h. nur in einem bestimmten Betriebsfall, eine Luftzahl $\lambda \approx 0,9$ bis $1,0$ erreichen, der Motor aber in anderen Bereichen eher zu fett gefahren wird, sollte die Steuerung dazu dienen, dass das aus verbrauchs- und emissionstechnischer Sicht optimale Verhältnis von $\lambda \approx 1,0$ in sämtlichen Fahrsituationen eingehalten wird. Das Magnetventil sollte so angesteuert werden, dass die Kraftstoffzufuhr in Form des Zustroms der Kraftstoffmenge aus der Schwimmerkammer in die Venturidüse gesteuert werden kann, während konventionelle Vergaser von Kleinmotoren starre Systeme ohne derartige Steuermöglichkeiten sind, sieht man von Pumpen für die Beschleunigung ab.

Für die Entwicklungsaufgaben wurde der auf der folgenden Seite dargestellte Arbeitsplan erstellt, der allerdings von der DBU um die Entwicklung einer Referenzapplikation mit Saugrohreinspritzung gekürzt wurde. Von der Kürzung betroffen waren bei der Firma BING die Arbeitspakete 1-3, bei der Firma Sachs die Arbeitspakete 1-2, 4 und 9 und beim IFZN die Arbeitspakete 1, 2 und 5. Nach einer etwa anderthalbjährigen Laufzeit wurde erkannt, dass die Projektbudgets der Firma BING und des IFZN zur Erreichung der Projektziele nicht ausreichten. Die DBU gab einem Aufstockungsantrag mit Erhöhung der Budgets der Firma BING und des IFZN um 20% sowie einer Verlängerung der zweijährigen Projektlaufzeit um drei Monate statt.

Arbeitspakete			Monate der Projektlaufzeit																								
sachs engineering	BING	IFZN FH Nürnberg	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1. Entwicklungsplang.	1. Entwicklungsplanung	1. Literaturstudie	■	■	■	■																					
2. Spezifikationen / Pflichtenheft	2. Spezifikationen / Pflichtenheft	2. Spezifikationen, Versuchsplanung	■	■																							
3. Konstruktion von Versuchsständen			■	■	■																						
4. Konstruktion Referenzapplikation	3. Entwicklung Referenzapplikation	3. Aufbau von Prüfständen		■	■	■	■																				
	4. Entwicklung Magnet- ventilsteuerung	4. Grundmotorver- messung (Vergaser)				■	■	■	■																		
5. Entwicklung von FE- Modellen	5. Konstruktion Magnetventil	5. Durchführung Mess- reihen Einspritzer						■	■	■	■	■	■														
	6. Steuerung Leerlaufverh.								■	■	■																
6. Strömungstechn. Simulationen.	7. Optimierung Nadel- geometrie und -sitz									■	■	■															
	8. Konstruktion neuer Vergaser mit Aktorik										■	■	■														
	9. Aufbau und Montage von Prototypen												■	■													
	10. Implementierung Magnetventilsteuerung													■	■	■											
7. Optimierung Vergasergeometrie	11. Messung Durchfluss- verhalten auf Fließbank	6. Messreihen mit gesteuertem Vergaser													■	■	■	■	■	■							
8. Ermittlung Kennfeld	12. Ermittlung Kennfeld	7. Optimierung 3D- Kennfeld für Steuerg.																		■	■	■	■	■	■		
	13. Konstruktive Optimierg.																					■	■	■	■		
9. Umrüstung besteh- ender Motoren	14. Anpassung als Umrüstsatz																					■	■	■	■		
10. Ström.Simulation weiterer Motgrößen	15. Anpassungsentwicklg. für weitere Mot.größen																							■	■	■	
11. Vorhabensabschluss	16. Vorhabensabschluss	8. Vorhabensabschluss																								■	■

Tabelle 1: Antragsgemäße Arbeits- und Zeitplanung für die drei Projektpartner

3 Hauptteil

Die Entwicklungskooperation lief in der Weise ab, dass die BING GmbH die Vergasertechnologie entwickelte, die sachs engineering GmbH die Strömungsverhältnisse bei der gesteuerten Gemischaufbereitung und weitere Vergaserdetails simulierte und das IFZN Prüfstandsversuche durchführte.

3.1 Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte sowie der angewandten Methoden

3.1.1 Aufbau von Prüfständen durch die Firma BING

Die Firma BING hat zunächst einen eigenen Prüfstand mit einem Rasenmähermotor aufgebaut (siehe Abbildung 2), um den Vergaser hinsichtlich des Luft- und Kraftstoffbedarfs vorkonditionieren zu können. Der für Rasenmähtraktoren geeignete Einzylinder-Motor mit 17 PS, 500 ccm und 34 Nm Drehmoment besitzt eine vertikale Antriebsachse. Im Gegensatz zu anderen Prüfständen trieb der Motor jedoch keine Welle an, sondern wurde selbst durch einen Elektromotor leer gedreht. Im Auspuff wurde eine Klappe installiert, um einen Rückstau simulieren zu können. Im realen Betrieb treten Rückströmungen auf, die sich bis in den Vergaser auswirken. Solche Stauwellen durchziehen das gesamte System.

Das auf dem Prüfstand betrachtete System sollte sehr genau den realen Betriebsbedingungen entsprechen. Originalbauteile, die der Endkunde einsetzt, wurden verwendet. Denn das Gesamtsystem reagiert sehr sensibel, und Abweichungen von Auspuff, Kolben, Luftfilter oder Zündanlage haben Einfluss auf den Vergaserbetrieb.

3.1.2 Untersuchungen zu Nadel und Nadelsitz

Für Grundversuche zur Steuerung von Vergasern wurden von der Firma BING Versuchsmuster zur Aufnahme von Aktorik und Magnetventil konstruiert. Die Einlasskanalgeometrie des vorhandenen Vergasers blieb erhalten.

Für die Feinsteuerung des Vergasers wurde eine getaktete Nadel vorgesehen. Für die Versuche wurde zunächst eine Steuerungssoftware entwickelt, die sich am oberen Totpunkt des Motors orientierte. Später sollte jedem Lastfall (gemessen anhand der Stellung der Drosselklappe) und jeder Drehzahl in Schritten von 100 U/min eine spezifische Nadelbewegung in Form einer Verschiebung oder Verlängerung des Schließfensters der Nadel zugeordnet werden, um eine Feinregulierung mit Software-Mapping vorzunehmen.



Abbildung 2: Motorenprüfstand der BING GmbH mit Rasenmähermotor für Grundversuche und Vergaserabstimmung

Auf dem in Abbildung 2 gezeigten Prüfstand und auf einer Fließbank wurden Untersuchungen zur Nadelgeometrie, zum Nadelsitz und zur Vergaserregulierung angestellt. Die Auswirkungen verschiedener Bohrungen, Nadelpositionen und strömungsbeeinflussender Maßnahmen auf die Vermischung von Luft und Kraftstoff wurden untersucht. Dann wurden erste Prototypen des gesteuerten Vergasers realisiert.

Die Nadel wurde im Vergleich zur Düse mit einem relativ großen Durchmesser ausgeführt. Sie kann im Leerlauf nicht hochgenau reguliert werden, sonst stünde im Vollastbereich nicht genügend Kraftstoff zur Verfügung. Auch sollte in erster Linie die Bedüsung und nicht der Spalt zwischen Nadel und Führung entscheidend für die Regulierung des Vergasers sein. Die Leerlaufluftbohrung hat einen Durchmesser von ca. 0,6-1mm. Der von der Nadel erzeugte Spalt liegt im Bereich von 4-5 mm im Durchmesser. Es ist zu beachten, dass Fertigungstoleranzen von 3/100 - 4/100 mm in der Fläche einen relativ großen Einfluss haben.

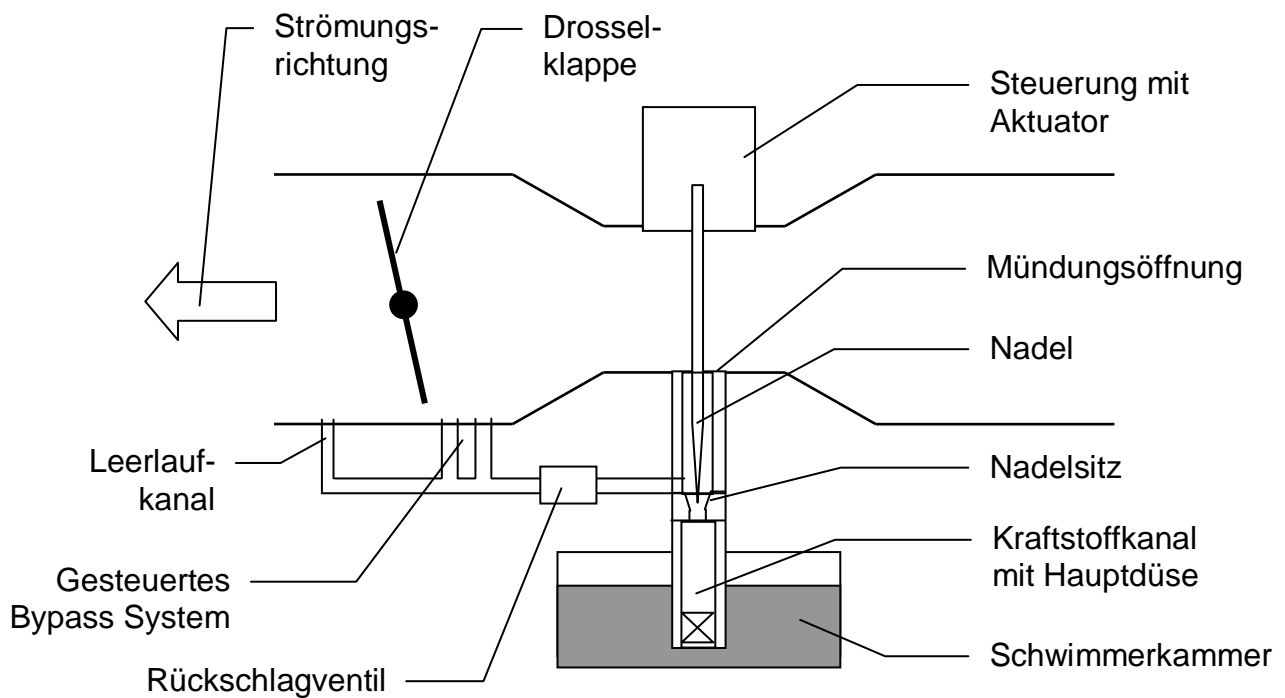


Abbildung 3: Vergaser mit gesteuertem Leerlauf- und Bypass-System

3.1.3 Erste Versuche mit einem gesteuerten Vergaser

Das Ergebnis von Tests mit ersten Prototypen des gesteuerten Vergasers war, dass der Motor im Leerlauf nach einigen Minuten unkontrolliert seine Drehzahl steigerte und wieder abfallen ließ. Es war kein konstanter Lauf im Leerlauf und im unteren Teillastbereich möglich. Je weiter die Drosselklappe dagegen geöffnet wurde, desto weniger trat dieses Problem auf.

Zur Erklärung dieses Phänomens kann die schematische Darstellung des ersten Lösungsansatzes beitragen (siehe Abbildung 3). Bei handelsüblichen Vergasern ist neben dem Kraftstoffkanal ein weiterer Nebenkanal (Bypass) vorgesehen, über den eine geringe Kraftstoffmenge für den Leerlauf zugeführt wird, wenn die Drosselklappe geschlossen ist. Aus Kostengründen sollte die Steuerung des Leerlaufkanals möglichst mit der gleichen Nadel bewerkstelligt werden, die auch die Hauptkraftstoffzufuhr steuert. Dazu sollte der Leerlaufkanal nahe dem Ventilsitz im Kraftstoffkanal abzweigt werden und auf der dem Verbrennungsmotor zugewandten Seite der Drosselklappe münden.

Im Leerlauf ist die Drosselklappe geschlossen, d.h. in der Venturidüse herrscht Umgebungsdruck, auf der Motorseite der Klappe dagegen starker Unterdruck. Aufgrund dieser Druckverhältnisse konnte der Motor über das Leerlauf-System Kraftstoff und durch die Mündungsöffnung unkontrolliert Luft ansaugen, was bei einem normalen Vergaser durch getrennte Ausführung von Hauptdüsen- und Leerlaufsystem unterbunden werden kann. Die Folge war ein inkonstanter Motorlauf im Leerlauf und unteren Teillastbereich. Je weiter dagegen die Drosselklappe geöffnet wurde, desto weniger trat dieses Problem aufgrund der veränderten Druckverhältnisse auf.

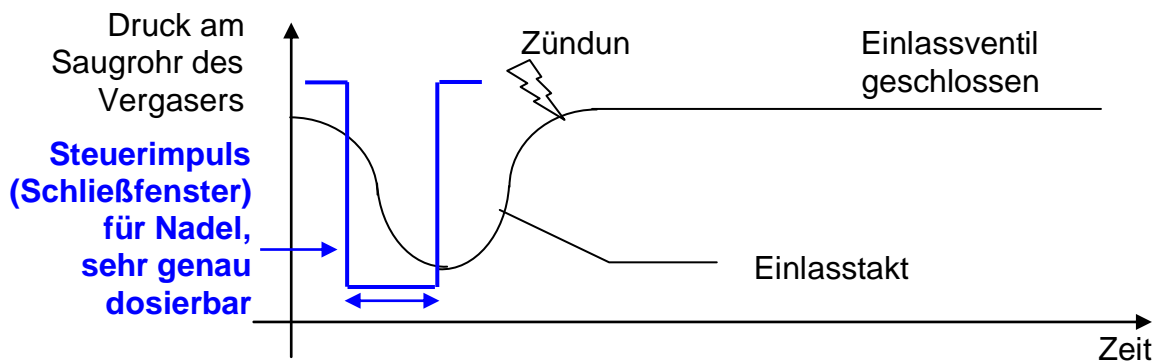


Abbildung 4: Die Steuerung des Vergasers erlaubt durch gezieltes Öffnen und Schließen der Nadel während des Einlasstaktes eine sehr genaue Dosierung des Kraftstoffes

Dieses Problem konnte teilweise durch definierte Durchmessergeometrien der Nadel und deren Führung begrenzt, aber nicht unterbunden werden. Man wollte den definierten Luftspalt zwischen Nadel und Nadelsitz als Leerlaufuftzufuhr nutzen.

Als positives Ergebnis der ersten Prototypen des gesteuerten Vergasers zeigte sich in allen Lastbereichen, dass mit der Nadelsteuerung das Anfetten und Abmagern des Motors in einem relativ weiten Bereich gelingt und dass problemlos ein Luftverhältnis von $\lambda \approx 1$ eingestellt werden kann. Damit erwies sich das Prinzip der Nadelsteuerung, das - wie in Abbildung 4 gezeigt - mit dem Einlasstakt gekoppelt wurde, als wirksam.

3.1.4 Simulation von Strömungseffekten

Den Effekt des unkontrollierten Ansaugens von Luft durch die Venturidüse im unteren Lastbereich konnte der Kooperationspartner sachs engineering auch in der Simulation nachweisen. Die Simulation der Firma sachs beruhte auf CAD-Daten des Vergasers von BING. Von dem Vergaser wurde ein Negativ als Strömungskanal (Abzugsvolumen) modelliert. Dieses wurde vernetzt, wobei filigrane Stellen, wie z.B. die Drosselklappe, feiner aufgelöst wurden, damit die Geschwindigkeitsgradienten genauer erfasst werden können. Die Druckbeaufschlagung floss als Randbedingung in die Berechnung ein. Die Strömungssimulationen wurden mit der FE-Software ANSYS-CFX durchgeführt. Als Ergebnis entstanden Verteilungen von Druck und Geschwindigkeit im Vergaser, wie in Abbildung 5 und Abbildung 6 gezeigt. Die Farben grün, gelb, rot zeigen steigende Strömungsgeschwindigkeiten an (in Korrelation mit dem Druck). Es wird deutlich, dass der Motor über die definierte Luftmenge hinaus Falschluff ansaugt, die den Betrieb unkontrollierbar macht.

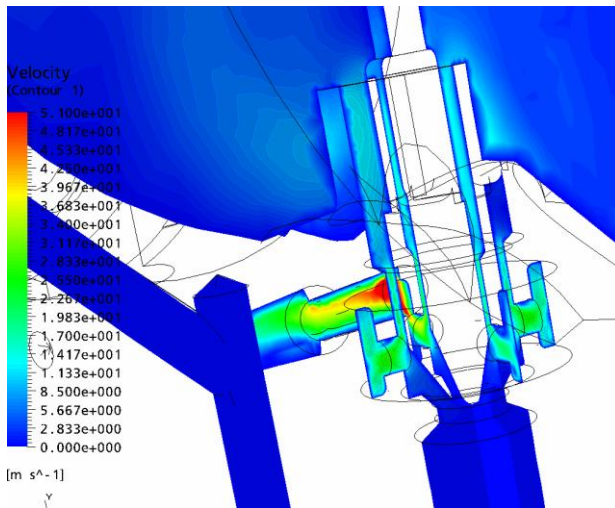


Abbildung 5: Verteilung der Luftgeschwindigkeit im Vergaser (erkennbar sind 4 Bohrungen in einer Ringnut für das Bypass-System)

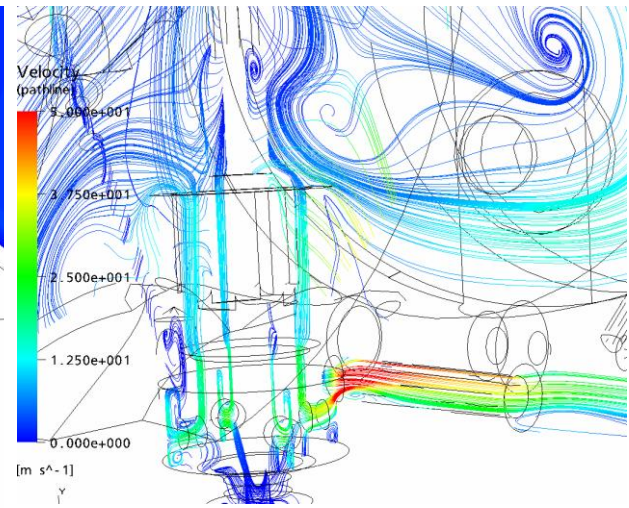


Abbildung 6: Trajektorien der Luftbewegung (rechts befinden sich die Drosselklappe und der Motor)

3.1.5 Entwicklung Seitenschwimmer-Vergaser

Aus den Ergebnissen der Versuche von BING und der strömungstechnischen Untersuchungen von Sachs Engineering wurde ein neuer Lösungsansatz entwickelt (siehe Abbildung 7). Das Nadelsystem, bestehend aus Magnetventil, Verbindungsstange, Nadel und Nadelsitz wurde komplett aus dem Bereich der Venturidüse und des Hauptdüsenaustritts herausgenommen und seitlich versetzt. Im Hauptdüsenaustritt wurde ein Rückschlagventil angebracht, um das Einsaugen von Luft im Leerlauf zu vermeiden.

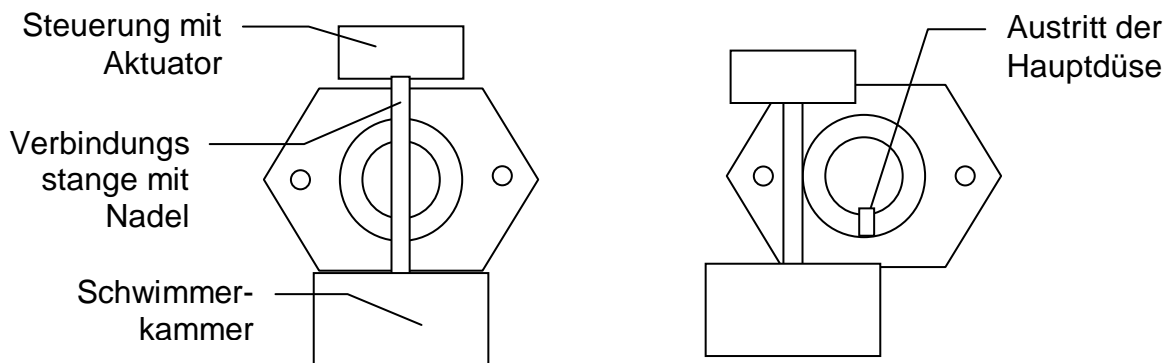


Abbildung 7: Schematische Darstellung eines alternativen Lösungsansatzes für den nadelgesteuerten Vergaser (links der erste Ansatz, rechts der neue Ansatz als Seitenschwimmer-Vergaser zur Verhinderung des Falschlufteintrages mit seitlich versetztem Nadelsystem)

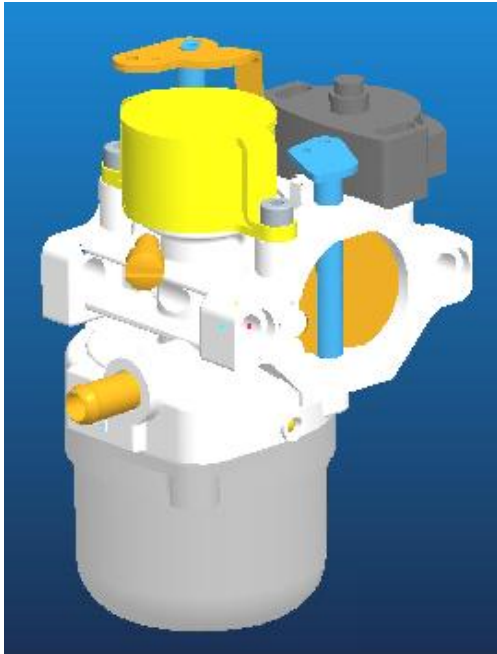


Abbildung 8: 3D-Modell des neuen Seitenschwimmer-Vergasers



Abbildung 9: Vergasergehäuse als gefrästes Muster mit Seitenschwimmer

Bei dem neuen System spielen Fertigungstoleranzen eine geringere Rolle, da die Nadel im unteren Teillastbereich nicht mehr zur Verhinderung der Rückströmung der Luft dienen muss. Als weiterer Vorteil kann das Magnetventil weiter nach unten gesetzt werden. Dadurch werden kürzere Wege und ein geringeres Gewicht der Verbindungsstange möglich, so dass schnellere Reaktionen entstehen.

Der Vergaser wurde gemäß dem neuen Lösungsansatz umkonstruiert. Die Firma sachs erhielt die neuen CAD-Daten (siehe Abbildung 8) und führte damit strömungstechnische Berechnungen und Optimierungen durch. Ein erstes Versuchsmuster des Seitenschwimmer-Vergasers zeigt Abbildung 9.

Zur Vorbereitung weiterer Prüfstandsversuche wurde ein Entwicklungsauftrag an das Technische Büro Engerer, Weihenzell, vergeben, um die Steuerungstechnik und die Datenerfassung für die Versuche zu entwickeln. Durch Messung der Kraftstoffzufuhr (g/h), der Druckdifferenz vor und nach der Drosselklappe und des Drosselklappenwinkels sollte das System die Luftmasse und zusammen mit der Kraftstoffmasse den Lambda-Wert berechnen.

3.1.6 Versuche mit dem gesteuerten Seitenschwimmer-Vergaser

Mit dem modifizierten Vergaser, der als EFC System (**E**lectronic **F**uel **C**ontrol System) bezeichnet wird, wurden Versuche unter Verwendung des Einzylinder Stationärmotors gemäß Abbildung 2 bei einer Arbeitsdrehzahl von 3000 U/min auf dem Prüfstand unternommen.



Abbildung 10: Saugrohrunterdruck und Ein-Ausschaltzeitpunkt des Magnetventils

Der Vergaser wurde zunächst auf ein handelsübliches Niveau einreguliert. Die Grundregulierung entsprach dabei in etwa der des Serienvergasers. Mit der zunächst manuellen Ansteuerung des im Vergaser integrierten Magnetventils wurde versucht, den Kraftstoffverbrauch bei unterschiedlichen Lastfällen zu regulieren. Dies geschah über das variable Schließfenster der Kraftstoffzufuhr, welches in Abhängigkeit des Kurbelwinkels der Kurbelwelle nach Bedarf verändert wurde. Somit konnte die Kraftstoffzufuhr bedarfsabhängig für die entsprechende Drehzahl und Last gesteuert werden.

Am Motor bzw. Prüfstand wurden ein Drucksensor zur Messung des Saugrohrunterdrucks, ein Drehzahlgeber zur Bestimmung der Motordrehzahl, ein Potentiometer zur Erfassung des Drosselklappenwinkels und ein weiterer Drucksensor zur Messung des Differenzdrucks zwischen innerem Kraftstoffsystem des Vergasers und der Umgebung angebracht. Die Datenerfassung (je Grad Kurbelwinkel) erfolgte über ein externe, echtzeitfähige compact Fieldpoint Hardware, zusammen mit der LabView software der Firma National Instruments.

Wie in Abbildung 10 gezeigt ließ sich mit dieser Sensorik der Unterdruck im Saugrohr (roter Verlauf) sowie der Einschalt- und Ausschaltzeitpunkt des Magnetventils (blauer Verlauf) relativ zum Kurbelwinkel ablesen. Der Einschaltzeitpunkt des Ventils liegt bei 355°KW, das Ventil bleibt in diesem Fall für 495°KW geschlossen.



Abbildung 11: Druckverlauf der Kraftstoffzuleitung im Vergaser

In einem weiteren Anzeigemenü konnte man den Druckverlauf der Kraftstoffzuleitung ablesen. Der mittlere Verlauf zeigt gemittelte Druckwerte, während der obere Verlauf die realen Druckwerte sichtbar macht (siehe Abbildung 11).

Um den Kraftstoffverbrauch des Motors sowie den Druckverlauf des Kraftstoffsystems in Abhängigkeit des Drosselklappenwinkels darzustellen, wurden die aufgezeigten Messdaten in die LabView Software eingelesen und entsprechend verarbeitet. Als Anzeige erhielt man eine Verbrauchs- (siehe Abbildung 12) und eine Differenzdruckkurve (siehe Abbildung 13). Diese Kurven zeigen den Verbrauch des Motors über einen Lastbereich von Leerlauf bis hin zu 50° Drosselklappenwinkel und den vergaserinternen Druckverlauf des Kraftstoffsystems, ebenfalls von Leerlauf bis 50° Drosselklappenwinkel gemessen.

Weitere Druckverlaufskurven innerhalb des Vergasers, aufgetragen über der Zeit, zeigen Abbildung 14 (offener Hauptdüsenaustritt) und Abbildung 15 (geschlossener Hauptdüsenaustritt).

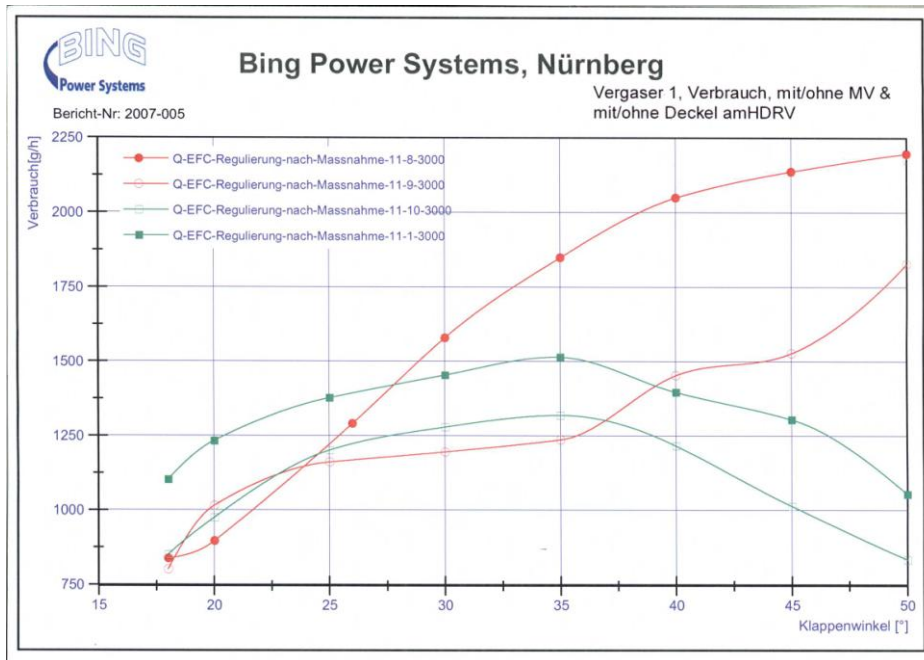


Abbildung 12: Verbrauchskurve bis 50° Drosselklappenwinkel

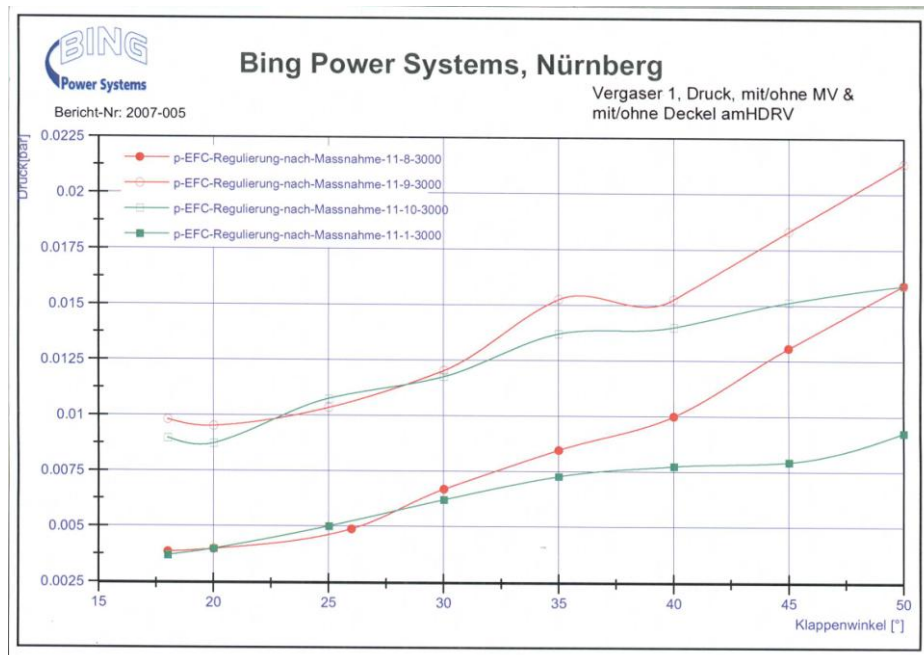


Abbildung 13: Differenzdruckkurve bis 50° Drosselklappenwinkel

- = Magnetventil nicht aktiv, Hauptdüsenaustritt offen
- = Magnetventil aktiv, Hauptdüsenaustritt offen
- = Magnetventil nicht aktiv, Hauptdüsenaustritt geschlossen
- = Magnetventil aktiv, Hauptdüsenaustritt geschlossen

Vergaser 1- mit Kappe- 25°-mit/ ohne MV

Magnet-ventil aktiv

Magnet-ventil inaktiv

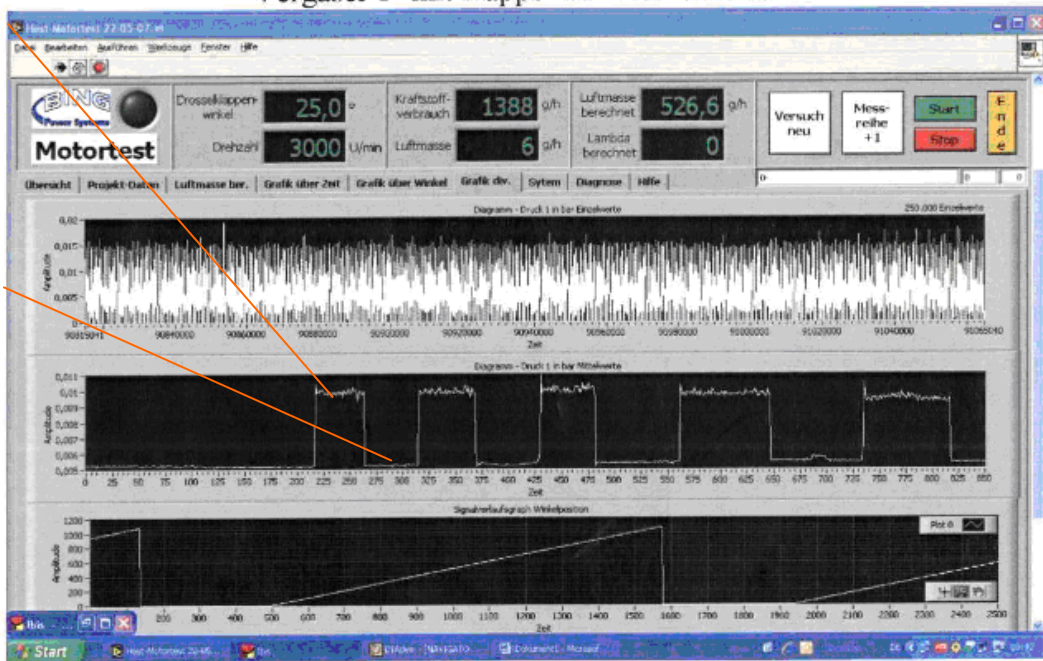


Abbildung 14: Druckverlaufskurven innerhalb des Vergasers bei ein- und ausgeschaltetem Magnetventil (Hauptdüsenaustritt offen)

Wiederholung-Vergl-25°-ohne Kappe-mit/ohne MV

Magnet-ventil aktiv

Magnet-ventil inaktiv

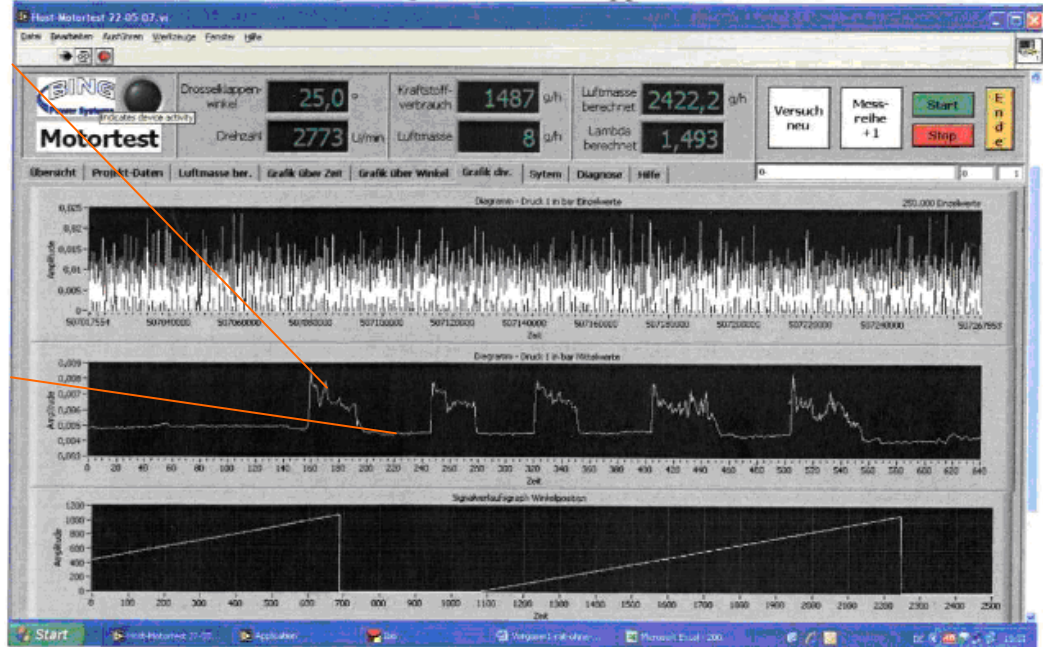


Abbildung 15: Druckverlaufskurven innerhalb des Vergasers bei ein- und ausgeschaltetem Magnetventil (Hauptdüsenaustritt geschlossen)

Aus den dargestellten Kurven kann man eine deutliche Veränderung im Verbrauchsverhalten des Motors nach Aktivierung des Magnetventils erkennen. Auch der Druckverlauf im Inneren des Vergasers verändert sich entsprechend, bedingt durch den Verschluss des Zulaufs aus der Schwimmerkammer in den Vergaser. Als wichtiges Ergebnis ist eine Verringerung des Verbrauchs in allen Lastbereichen möglich, z.B. bei 35° Drosselklappenwinkel von 1850 g/h auf 1240 g/h, entsprechend 33% (siehe Abbildung 12, Hauptdüsenaustritt offen). Somit ist es möglich, die Kraftstoffzufuhr durch das EFC System in der vorgesehenen Art und Weise zu kontrollieren.

Die Funktion des EFC-Systems wurde noch in weiteren Prüfstandtests bei einem Partner der BING GmbH aus dem Bereich der Zündtechnik untermauert. Diese Versuche wurden auf einem herkömmlichen Motorenprüfstand vorgenommen. Dabei wurde zusätzlich der Lambda-Wert des Abgases gemessen. In Abbildung 16 ist deutlich zu erkennen, wie sich der Kraftstoffverbrauch nach dem Einschalten des Magnetventils verringert und sich entsprechend der Lambda-Wert erhöht.

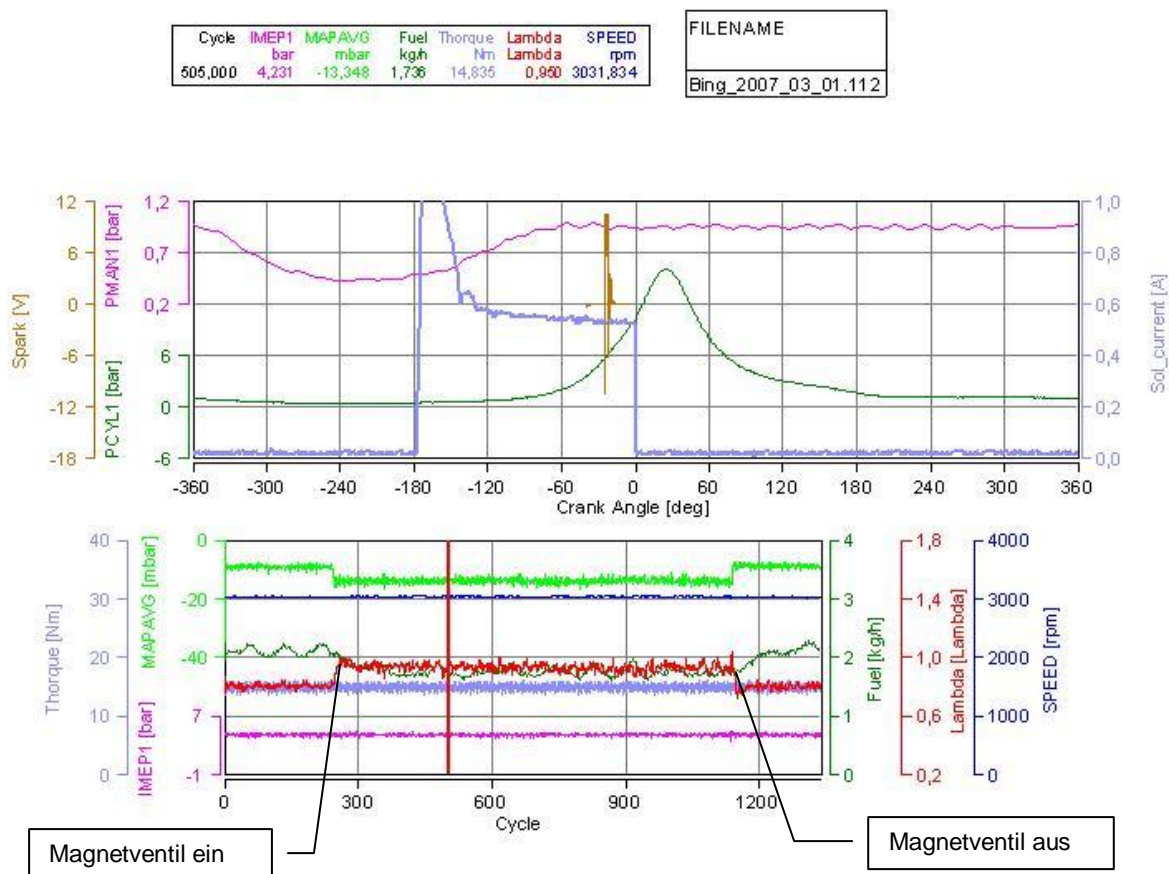


Abbildung 16: Messergebnisse mit dem gesteuerten Vergaser auf einem herkömmlichen Motorenprüfstand. Es ist deutlich zu erkennen, wie sich der Kraftstoffverbrauch (dunkelgrüne Linie) nach dem Einschalten des Magnetventils verringert und sich entsprechend der Lambda-Wert (rote Linie) erhöht.

Allerdings stellte sich auf dem Prüfstand der Firma BING bei Normalbetrieb in manchen Lastbereichen und aktiviertem Magnetventil eine gewisse Instabilität des Kraftstoffverbrauchs ein. D.h. der Motor magerte ab, obwohl an der Einstellung des Magnetventils keine Veränderung stattfand. Dieses Verhalten wird deutlich, wenn man die Druckkurven in Abbildung 15 betrachtet. Das mittlere Fenster zeigt den internen Druckverlauf im Vergaser bei wechselndem Ein- und Ausschalten des Magnetventils. Im eingeschalteten Zustand sind sehr deutliche Druckschwankungen zu erkennen. Diese entfallen weitgehend, sobald das Ventil deaktiviert ist.

Da die Vermutung nahe lag, dass das Rückschlagventil im Hauptdüsenaustritt etwas damit zu tun haben könnte, wurde es zu Versuchszwecken mit einer Kappe verschlossen. Dieses Ventil unterbindet das Ansaugen von Luft im Leerlauf. Die Folge war eine wesentliche Verbesserung des Druckverlaufs (siehe Abbildung 14, mittleres Fenster). Die Druckschwankungen bei eingeschaltetem Magnetventil wurden auf ein Minimum reduziert. Dieses Ergebnis bestätigt sich auch, wenn man Abbildung 12 und Abbildung 13 betrachtet. Vor allem der Druckverlauf über dem Drosselklappenwinkel ist bei verschlossenem Hauptdüsenaustritt wesentlich stabiler.

Ziel weiterer Untersuchungen musste nun sein, den Hauptdüsenaustritt so umzugestalten, dass keine Instabilitäten mehr bei extrem magerer Einstellung auftreten können. Denn der Motor lief mit einem Lambda-Wert $< 0,95$ stabil. Im Vergleich kam der serienmäßige Vergaser auf einen durchschnittlichen Lambda-Wert von 0,80, was bereits eine Kraftstoffeinsparung von durchschnittlich ca. 10% bedeutete.

3.1.7 Simulationen zum EFC-Vergaser

Die Firma Sachs baute vom neuen Vergasertyp (EFC-System), das als komplette Neukonstruktion ein Leerlauf- und ein Hauptventil aufwies, ein neues Simulationsmodell auf. Abbildung 17 zeigt einen Querschnitt durch das Modell, aus dem als Negativ (Abzugsvolumen) ein Volumenmodell für die Luftströmung erzeugt wurde, wie in Abbildung 18 gezeigt.

Mit dem neuen Simulationsmodell wurden insgesamt 12 Lastfälle als Varianten der Drosselklappen- und Ventilstellung berechnet. Zusätzlich wurden verschiedene Parametereinstellungen betrachtet. Für die numerischen Analysen wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- Die Analyse wird für den Beharrungszustand durchgeführt.
- Die Luftströmung ist inkompressibel.
- Die Luftströmung wird bei thermodynamischem Gleichgewicht analysiert.
- Die Luftströmung ist turbulent.
- Das Luftverhalten wird für eine Temperatur von 25°C bestimmt.

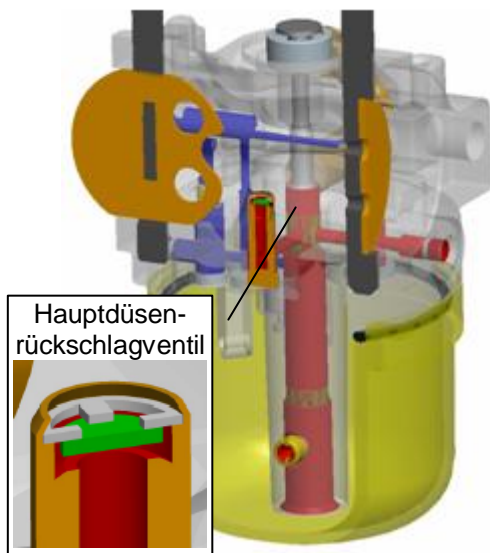


Abbildung 17: Querschnitt durch das Modell des EFC-Systems (rot: Benzinzufuhr, dunkelblau: Frischluftzufuhr)



Abbildung 18: Vernetztes Volumenmodell für die Luftströmung im EFC-Vergaser. Filigrane Stellen, wie z.B. die Drosselklappe, wurden feiner aufgelöst.

Ein Ergebnis zur Simulation der Druckverteilung zeigt Abbildung 19. Die Strömungsgeschwindigkeiten im Vergaser, die mit dem Druck korreliert sind, sind aus Abbildung 20 erkennbar. Von Interesse war das Strömungsverhalten, wenn die Drosselklappe über Beipassbohrungen verfährt. Je nach Klappenwinkel sind die Beipassbohrungen mehr oder weniger aktiv, was zum Abmagern oder Anfetten des Gemisches führt.

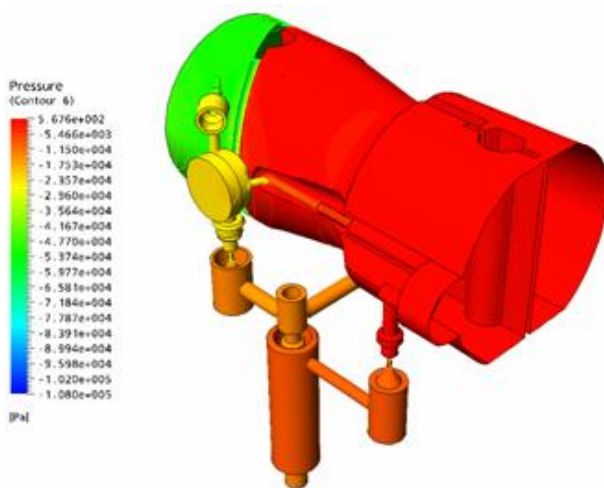


Abbildung 19: Statische Druckverteilung im neuen Vergaser

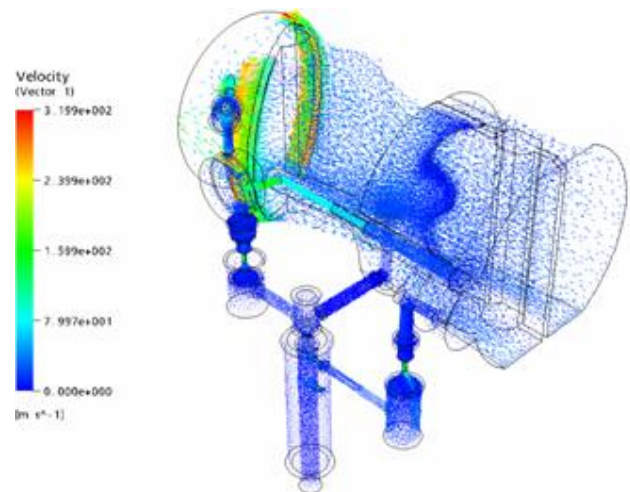


Abbildung 20: Vektoren der Luftgeschwindigkeit (Die Farben von blau über grün und gelb, bis rot zeigen steigende Geschwindigkeiten.)

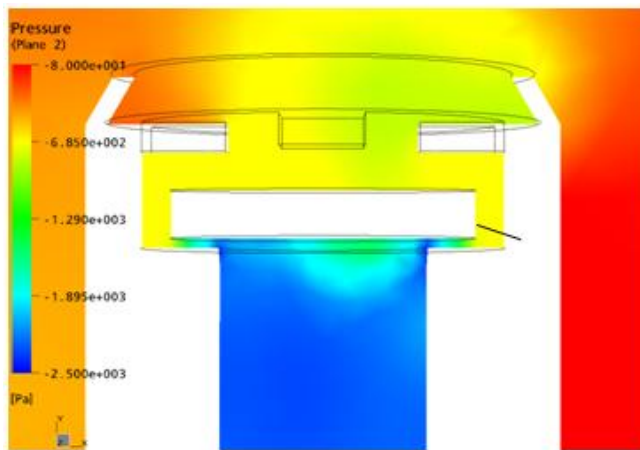


Abbildung 21: Druckverteilung am Hauptventil

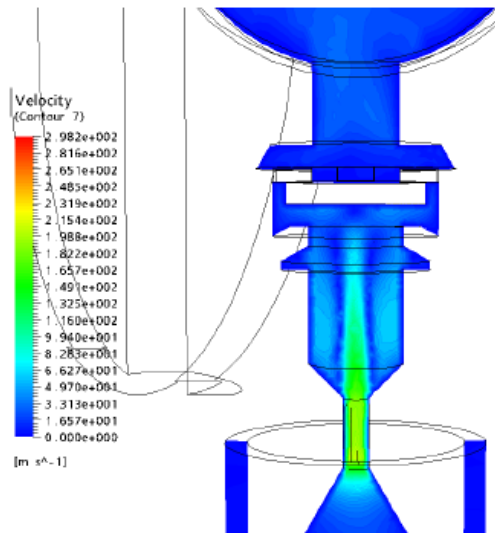


Abbildung 22: Verteilung der Luftgeschwindigkeit am Leerlaufventil

Die Vorgänge am Hauptdüsenrückschlagventil wurden ebenfalls in der Simulation untersucht (siehe Abbildung 21). Von Interesse war der Öffnungspunkt des Rückschlagventils in Abhängigkeit der herrschenden Druck- und Saugkräfte, der z.B. durch die Materialwahl bzw. die Dichte des Ventilplättchens beeinflusst werden kann. Ohne Berücksichtigung der Gravitationskraft bleibt das Hauptventil über den Drosselklappenöffnungsbereich zwischen 15 und 35° geschlossen. Überlegungen zur besseren Führung des Plättchens gegen Druckschwankungen wurden angestellt. Auch die Vorgänge am Leerlaufventil wurden analysiert (siehe Abbildung 22).

Die Untersuchungen der sachs engineering GmbH wurden von der Firma BING zur Optimierung der Konstruktion des neuen Vergasers genutzt.

3.1.8 Umkonstruktion

Die Konstruktion des Vergasers wurde optimiert, wobei das Seitenschwimmer-Prinzip beibehalten wurde. Versuche zeigten, dass das bisherige Magnetventil den Anforderungen eines Serienbetriebs nicht gewachsen war. Zu viel Verschleiß zerstörte einige Bauteile und die Baugröße war ebenfalls zu optimieren. Daher wurde ein kompakteres und verschleißfesteres Magnetventil eingebaut. Am Gehäuse wurden konstruktive Änderungen vorgenommen, um die bei den Tests erhaltenen Erkenntnisse umzusetzen. Die Geometrie der Reguliernadel und des Nadelsitzes wurden optimiert. Ein Drucksensor aus dem Automotive-Bereich zur besseren Höhenkompensation wurde installiert, der den Druck vor der Drosselklappe misst. Die Höhenkompensation erlaubt eine der Meereshöhe angepasste Regulierung des Vergasers, denn bei höherem Luftdruck muss auch mehr Kraftstoff zugeführt werden und umgekehrt. Zur Messung des Winkels der Drosselklappe wurde ein anderes Potentiometer eingebaut, wobei allerdings die sich einstellende Reibung im Regler zu Problemen führte. Daher wurde das Potentiometer später durch einen berührungslos messenden Hall-Sensor ersetzt, der unter der Drosselklappe fixiert wurde. Das CAD-Modell des optimierten Vergasers ist in Abbildung 23 gezeigt.

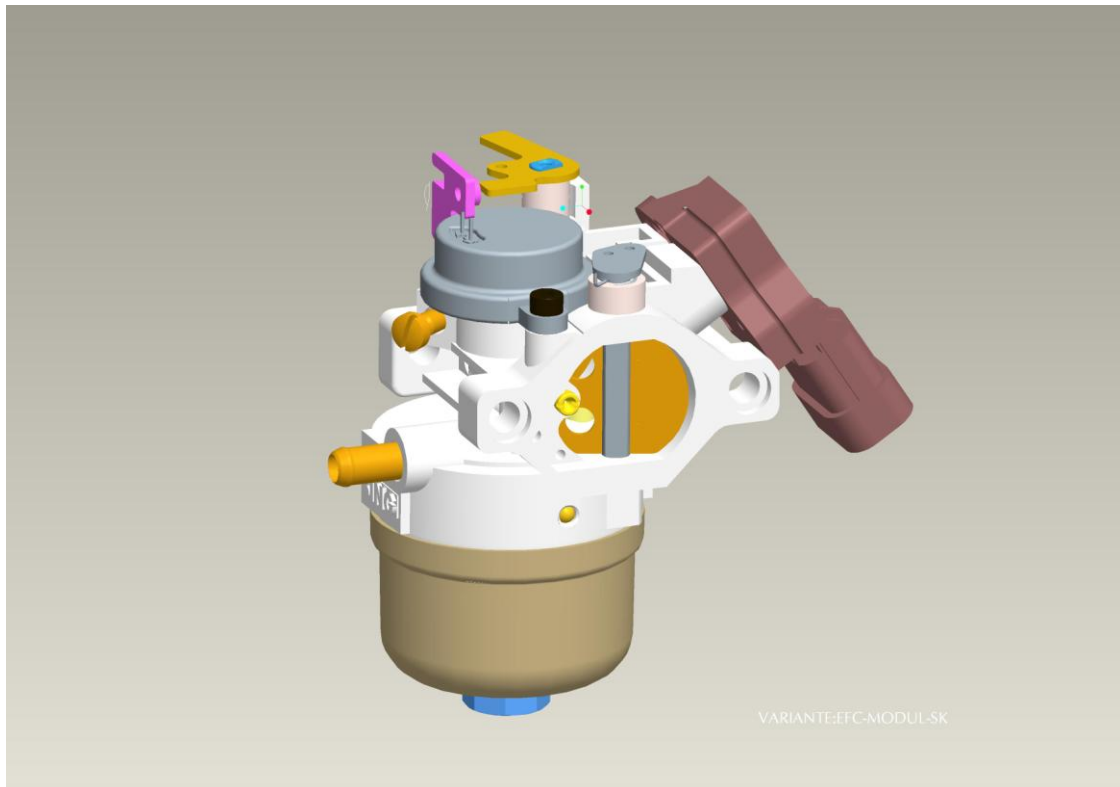


Abbildung 23: EFC-Modul als Seitenschwimmervergaser (rechts Drucksensor (braun), oben Ansteuerung Drosselklappe (gelb) mit Anschlag (rot), darunter Magnetventil (grau), Leerlaufluftbohrung (gelb), Startklappe (dunkelgelb), links Schlauchanschluss für Benzinzulauf (dunkelgelb), darüber Gemischregulierschraube (dunkelgelb))

3.1.9 Versuche mit dem optimierten gesteuerten Seitenschwimmer-Vergaser

Mit dem gesteuerten Vergaser (EFC-System) wurden wiederum bei der Partnerfirma der BING GmbH Versuche mit einem Stationärmotor gemacht, wobei gute Ergebnisse erzielt wurden. Der gesteuerte Vergaser wurde mit einem originalen Vergaser verglichen. Untersucht wurde erneut der 500 ccm Stationärmotor eines Rasenmähertraktors (1 Zylinder, 17 PS), der bei geregelter Drehzahl mit einem linear zunehmenden Bremsmoment beaufschlagt wurde, um einen kontinuierlichen Beschleunigungsvorgang zu simulieren.

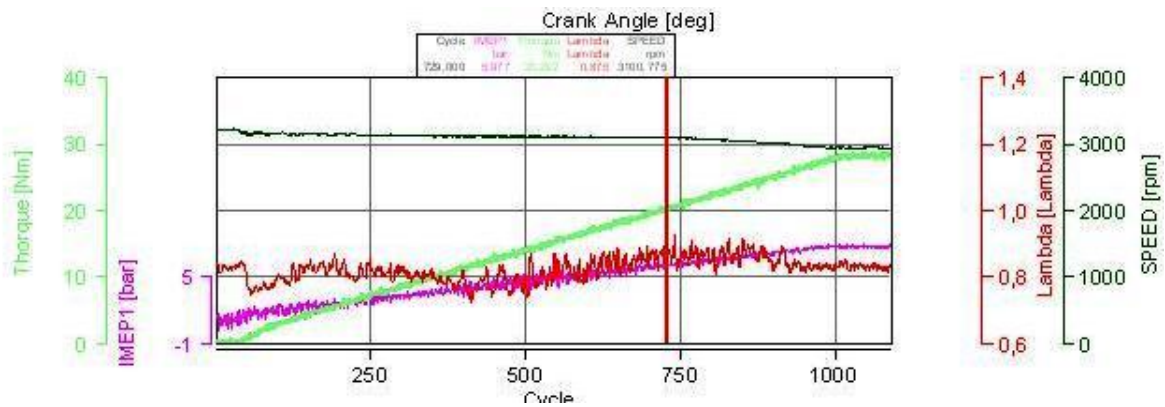


Abbildung 24: Original Vergaser bei zunehmendem Bremsmoment (hellgrün: Bremsmoment; dunkelgrün: Motordrehzahl; rot: Lambda Wert, gemessen über eine Dauer von 1.000 Zyklen, was ca. 20 s entspricht)

Zunächst wurde nur die ungesteuerte Grundregulierung gemessen, d.h. das Magnetventil wurde nicht betätigt. Abbildung 24 zeigt die Messwerte des originalen Vergasers, Abbildung 25 des EFC-Systems. Die Lambda-Kurve zeigt einen stetigeren Verlauf des neuen Vergasers (ungesteuert) als beim originalen Vergaser. Im Leerlaufbereich wurde ein fetteres Gemisch angestrebt, da beim Beschleunigen genügend Kraftstoff verfügbar sein muss. Dazu hielt das Magnetventil den Nadelsitz ständig geöffnet. Nachdem im unteren Teillastbereich ein relativ fettes Gemisch vorlag, magerte der Vergaser bei höherer Last ab bis auf ca. $\lambda=0,9$. Ideal wäre ein waagrechter Verlauf der Lambda-Kurve, unabhängig von der Last bzw. der Stellung der Drosselklappe. Bei Volllast hielt das Magnetventil die Nadel aus Verschleißgründen geöffnet.

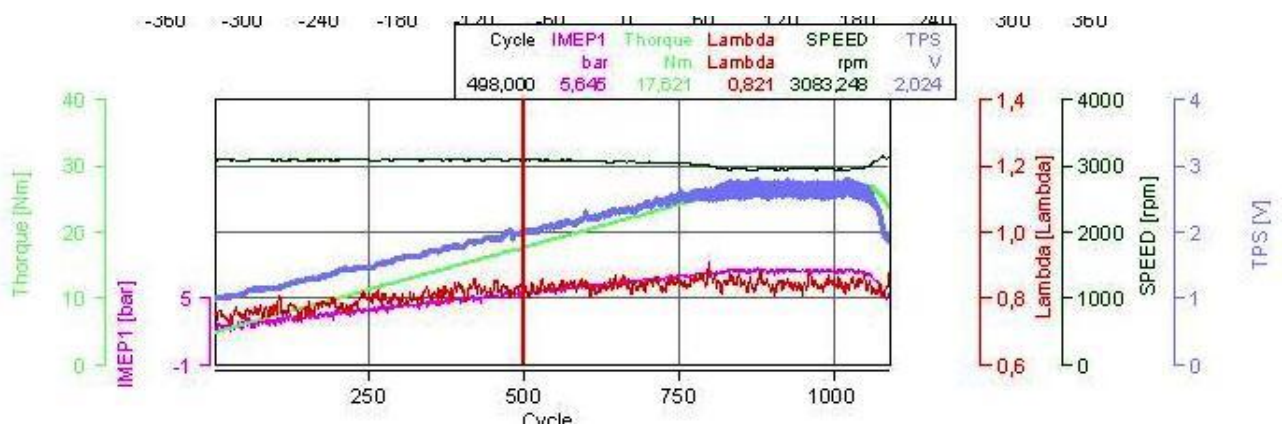


Abbildung 25: Vergaser zunächst mit unbetätigtem EFC Modul bei zunehmendem Bremsmoment (hellgrün: Bremsmoment; dunkelgrün: Motordrehzahl; rot: Lambda Wert, blau: Verlauf des Potentiometers, das die Drosselklappenstellung misst)

	Lambda	Fuel	Torque	SPEED	Oil Temp	Wet Temp	Amb. pres	Amb. Temp
	Lambda	kg/h	Nm	rpm	Deg_C	Deg_C	mbar	Deg_C
Min	0.813	1.01	0.095	2963.3	68.76	18.57	1001.4	20.28
Mean	0.916	2.07	45.38	3128.7	70.10	19.99	1002.5	20.38
Max	1.06	3.48	30.06	3277.8	71.22	20.79	1003.1	20.52
Std	0.057	0.779	9.34	113.0	0.677	0.623	0.238	0.069
Min%	88.85	48.60	0.629	91.81	98.10	92.86	99.89	99.12

FILENAME	TIMESTAMP
Bing_2007_08.122	20070919105032

Bank Angle	PCYL1	PMAN1	Sol_current	Spark
deg	bar	bar	A	V
-315,751	0,730	0,727	0,024	*
-74,718	1,743	0,944	0,128	*
241,033	1,013	0,217	0,104	*

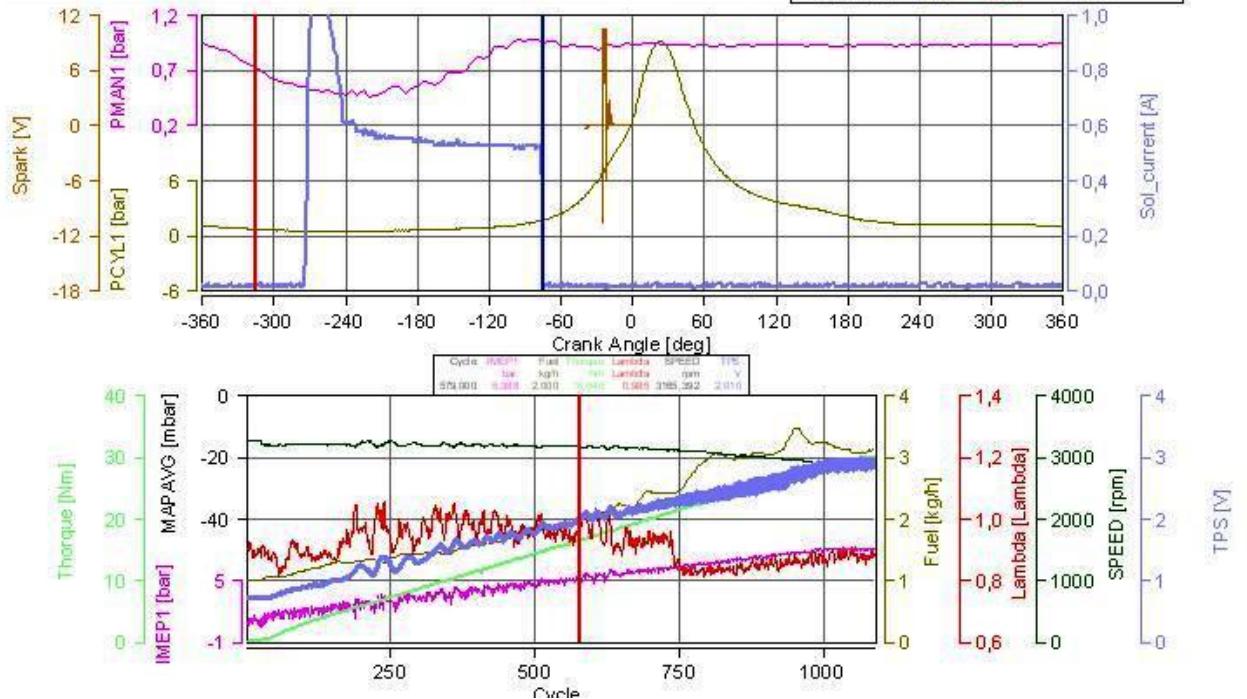


Abbildung 26: Vergaser mit gesteuertem EFC Modul zwischen ca. 200 und 750 Zyklen bei zunehmendem Bremsmoment (hellgrün: Bremsmoment; dunkelgrün: Motordrehzahl; rot: Lambda Wert, blaue: Verlauf des Potentiometers, das die Drosselklappenstellung misst)

Als nächstes wurde der mit dem EFC-Modul gesteuerte Vergaser untersucht (siehe Abbildung 26). Ziel war eine Abmagerung im Normalbetrieb, während der untere Teillastbereich im nicht gesteuerten Betrieb (Nadel offen) extra fetter eingestellt wurde, um eine bessere Beschleunigung zu erhalten. Die Steuerung des Magnetventils wurde zwischen ca. 200 und 750 Viertakt Zyklen eingeschaltet, wiederum bei einem zunehmenden Bremsmoment als Belastung. Ein Anstieg des Lambda-Wertes auf Werte um $\Lambda = 1,0$ durch die Regulierung ist erkennbar. Die Schwankungen im gesteuerten Betrieb rühren teilweise daher, dass der Regler durch die Reibung im Potentiometer an seiner freien Einstellbewegung der Drehzahl durch Bewegungen der Drosselklappe behindert wurde. Wegen dieser Unzulänglichkeit wurde das Potenziometer später durch einen Hall-Sensor ersetzt. Der Motor lief dagegen ruhig.

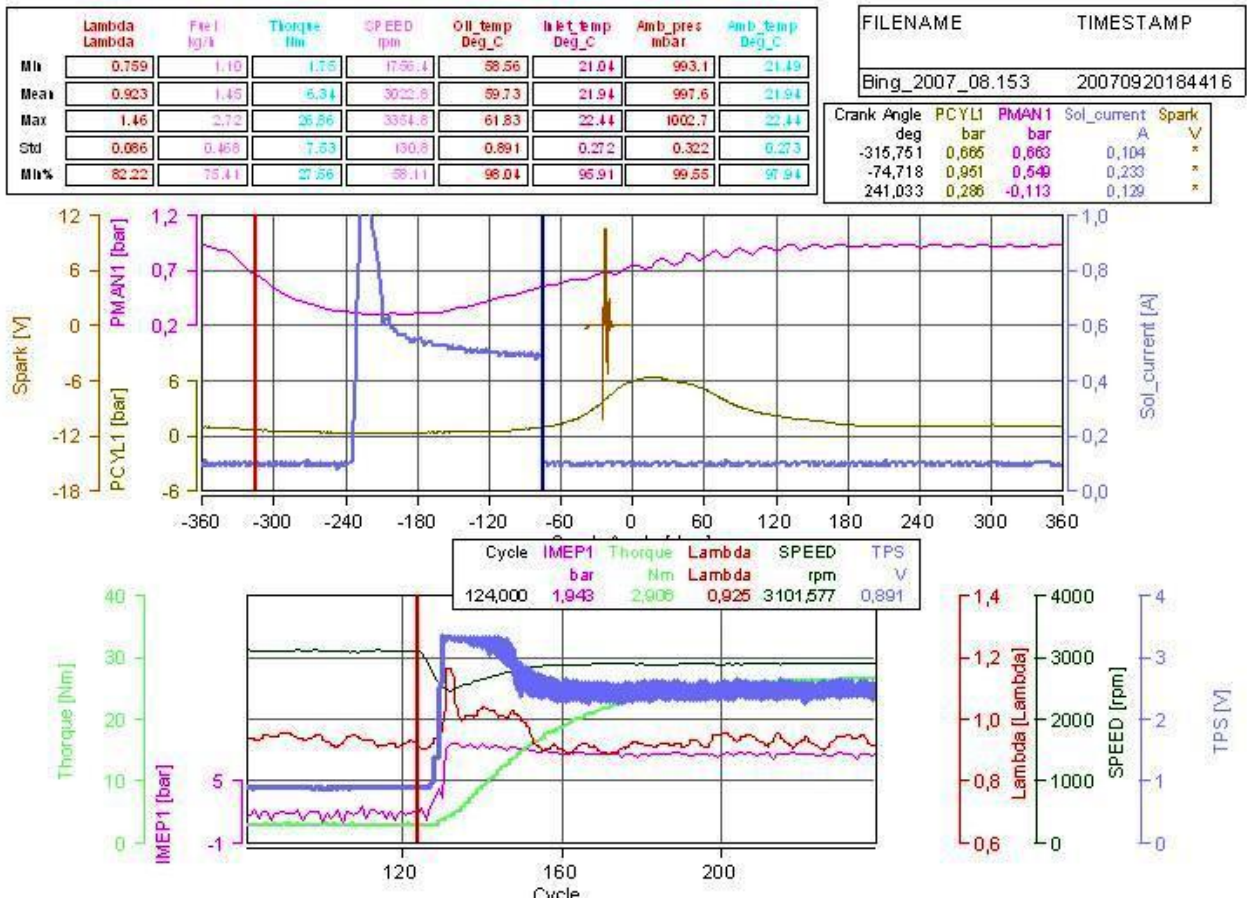


Abbildung 27: Vergaser mit gesteuertem EFC Modul bei schneller Belastung (hellgrün: Bremsmoment; dunkelgrün: Motordrehzahl; rot: Lambda Wert, blaue: Verlauf des Potentiometers, das die Drosselklappenstellung misst)

Ferner wurde ein schlagartiger Bremsvorgang untersucht, der eine schnelle Beschleunigung aus dem gesteuerten (und somit mageren) Betrieb von $\lambda=0,92$ heraus simulieren sollte (siehe Abbildung 27). Das Potentiometer und damit die Drosselklappe zeigen einen sprungförmigen Verlauf entsprechend der hohen Beschleunigungsrate. Dabei wurde das Magnetventil kurz vollständig geöffnet, bis der Beschleunigungsvorgang abgeschlossen ist. Entscheidend ist der Verlauf des Lambda-Wertes: Er steigt kurz auf einen Wert von ca. 1,2 an und wird dann relativ schnell wieder auf $\lambda=0,95$ abgemagert. Die Beschleunigung bei gesteuertem Magnetventil funktionierte sehr gut. Es traten keine Fehlzündungen auf (erkennbar durch den moderaten Anstieg des Lambda Werts während der Beschleunigungsphase).

Zusammenfassend ist aus den Versuchen festzuhalten, dass es mit der Vergasersteuerung gelingt, den Motor in einen mageren Betrieb gegen $\lambda=1,0$ zu trimmen, wobei dieser Wert wegen drohender Überhitzung vor allem bei Vollast nicht ganz erreicht werden sollte. Bei einem Wert von $\lambda=0,95$ im Teillastbereich ergab sich eine Kraftstoffeinsparung von ca. 10% und etwa 15-20% weniger Emissionen, was noch durch Messungen beim IFZN untermauert werden sollte.

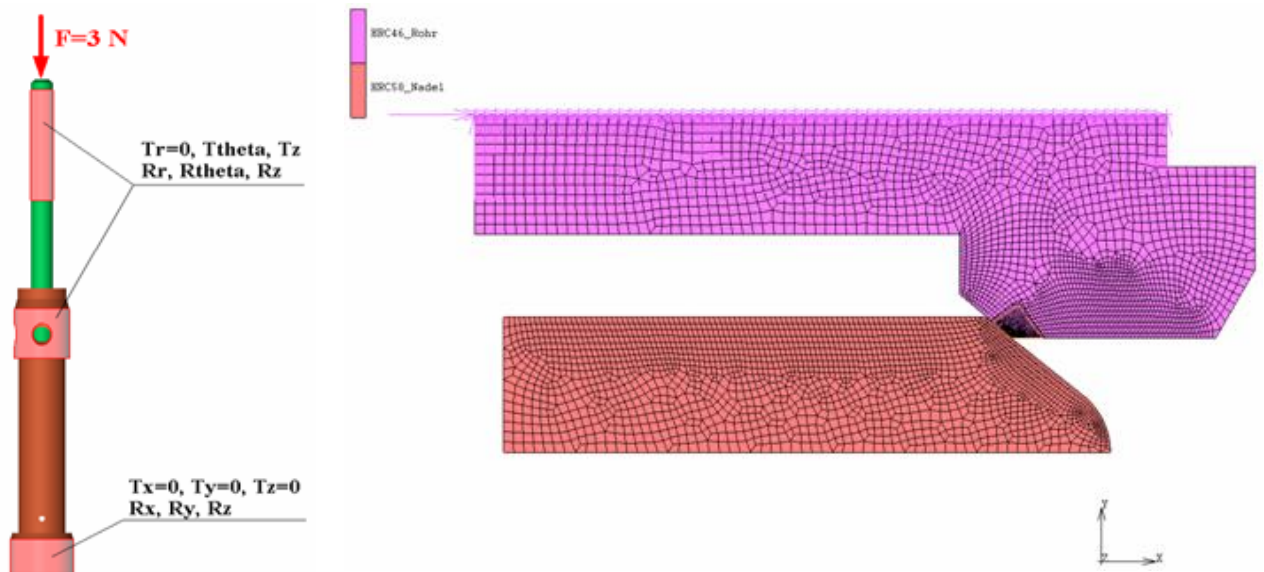
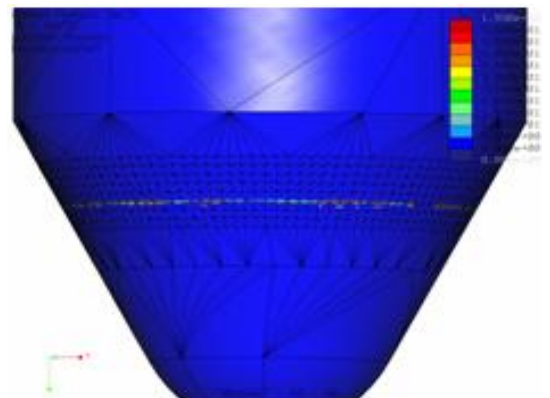


Abbildung 28: Modell von Nadel (grün) und Nadelsitz, rechts Elementierung

3.1.10 Simulationen zur Bestimmung der Nadelbeanspruchung durch die elektronische Steuerung

Zur Bestimmung der nicht unerheblichen Beanspruchungen von Nadel und Nadelsitz durch die elektronische Steuerung hat die Firma sachs FEM-Berechnungen durchgeführt. Von Interesse waren die Setzungseffekte an der Kontaktstelle zwischen Nadel und Nadelsitz. Die Nadel arbeitet sich mit der Zeit in den Sitz ein, so dass eine größere Fläche entsteht, die durch eine genaue Passform eine gute Dichtwirkung erzielt. Von der Firma BING wurden verschiedene Auflagegeometrien angefertigt und getestet, zu denen von der Firma sachs FEM-Berechnungen erstellt wurden. Auch die Materialien und Oberflächenbeschaffenheiten von Nadel und Sitz wurden variiert. In Abbildung 28 sind die FE-Modelle von Nadel und Nadelsitz gezeigt, aus denen die Elementierung erkennbar ist. Da die Spannungen nur sehr gering ins Material eindringen, wurden die Bauteile als durchgehärtet betrachtet.

Die Nadel liegt auf dem Sitz bzw. dem Düsenrohr auf. An der Kontaktpressstelle von Düsenrohr und Nadel wurde eine Untersuchung durchgeführt. Die Nadel wird von einer Federkraft mit ca. 3 N in den Nadelsitz gedrückt. Zunächst wurde eine lineare Berechnung durchgeführt (rechts im Bild), die aufgrund der als elastisch angenommenen Körper keine verwertbaren Ergebnisse lieferte. Aussagefähig ist ausschließlich die nichtlineare Berechnung, bei der plastische Verformungen oberhalb der Fließgrenze auftreten können.



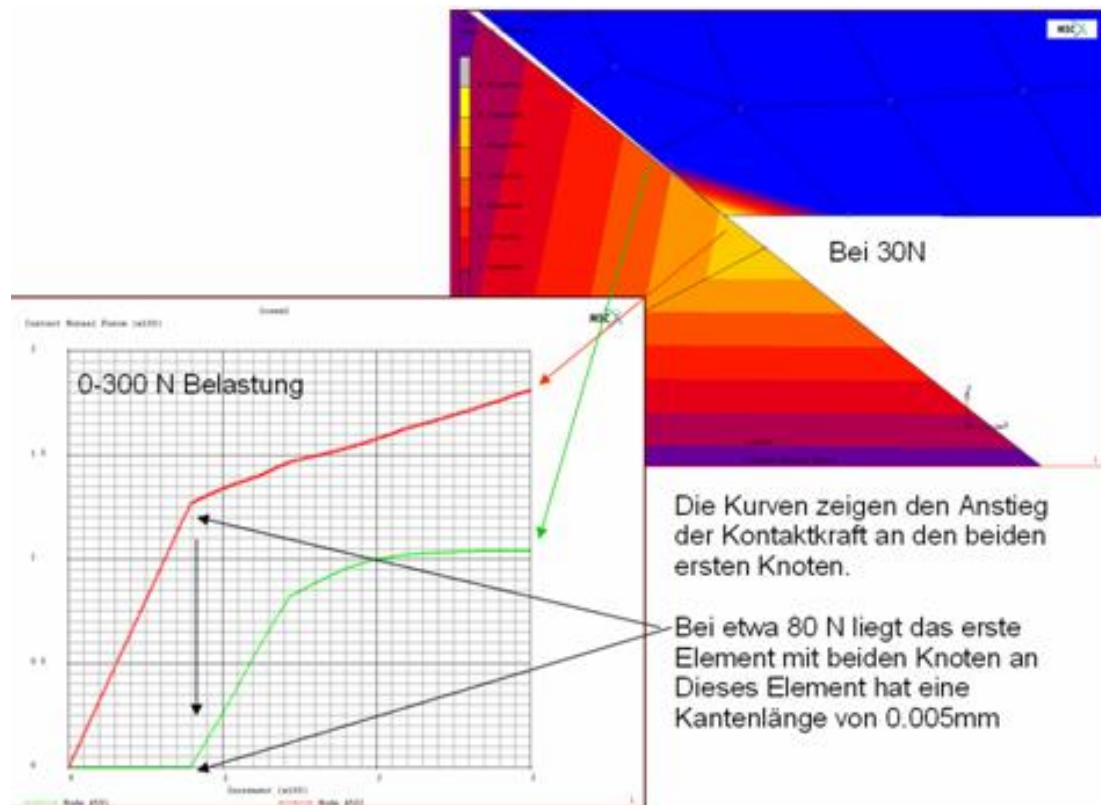


Abbildung 29: Kontaktpressung an der Auflagestelle von Nadel und Nadelsitz (blau)

Da bei der Federkraft von 3 N noch keine plastischen Verformungen auftraten, wurde die Belastung schrittweise in 300 Inkrementen bis auf eine virtuelle Kraft von 300 N erhöht. Eine Plastifizierung (erste bleibende Verformung) trat bei einer Last von 30 N ein (siehe Abbildung 29).

In der Praxis wird die Nadel mit einer Federkraft von 3N über 1mm beschleunigt und trifft dann auf das Düsenrohr. Eine Belastung durch die Nadel mit einer Kraft von 30 N ist daher unwahrscheinlich. Daher konnte als Ergebnis aus der Kontaktsimulation festgehalten werden, dass die Setzungseffekte zwischen Nadel und Nadelsitz nicht aufgrund von plastischen Verformungen zustande kommen, sondern durch Verschleiß mit Mikroabtrag in jedem Hub begründet sind.

3.1.11 Aufbau eines Prüfstandes durch das IFZN der FH Nürnberg

Zu Versuchszwecken stellte die sachs engineering GmbH dem IFZN der Fachhochschule Nürnberg einen kleinen Viertakt-Motor mit Saugvergaser zur Verfügung. Es handelte sich um ein fernöstliches Fabrikat, wie es z.B. im Iran zum Einsatz kommt. Das IFZN baute einen Prüfstand für den Motor auf und stattete ihn mit einer elektromagnetischen Bremse aus. Allerdings fehlten zunächst noch einige Anbauteile des Kleinmotors, so dass sich die Grundmotorvermessung verzögerte. Die fehlenden Teile wurden zwar nachträglich besorgt, jedoch konnte der Motor aufgrund fehlender technischer Beschreibungen nicht in Betrieb genommen werden.

Daher beschaffte die Firma Sachs ein komplettes Motorrad mit 125 ccm Motor und lieferte es an das IFZN. Dort wurden zunächst Funktionstests des Motors am Fahrzeug durchgeführt. Dann wurde der Motor ausgebaut und in den Prüfstand eingebaut. Die Steuerung musste angeschlossen und getestet werden.



Abbildung 30: Motorrad mit 125 ccm Motor

Für den Motor wurde eine Aufspannvorrichtung gebaut (siehe Abbildung 31). Der aus dem Motorrad ausgebaute Kabelbaum wurde an den Prüfstand angeschlossen (siehe Abbildung 32). In Abbildung 33 ist der komplette Prüfstand mit den Funktionseinheiten Motor, elektromagnetische Bremse, Drehmomentenwelle und Durchflussmessgerät gezeigt.

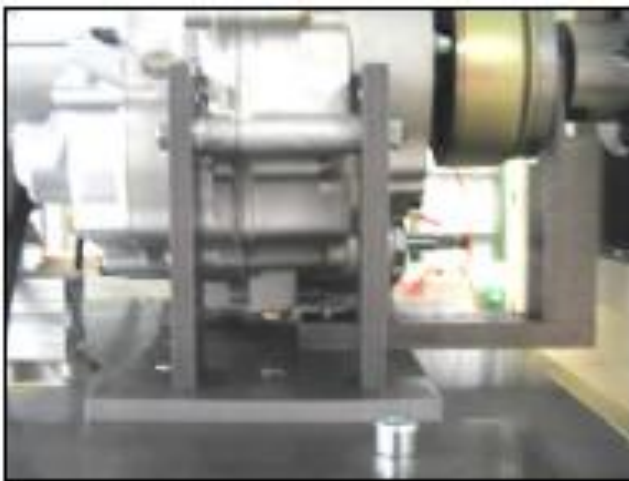


Abbildung 31: Aufspannvorrichtung des Motors am Prüfstand



Abbildung 32: Anschließen des Kabelbaumes und des Fahrthebelstellers



Abbildung 33: Komplett aufgebauter Prüfstand mit 125 ccm Motor

An dem Kleinmotorprüfstand standen die folgenden Regelungsarten zur Verfügung:

- Drehzahlregelung für Schleppbetrieb
- Regelung auf Null Drehmoment bei Null alpha für geregelten Leerlauf
- Regelung von Drehzahl und alpha ($n - \alpha$)
- Regelung von Drehzahl und Drehmoment ($n - M$)
- Erhöhte Leerlaufdrehzahl zum Abkühlen für den Kaltlauf.

Zusätzlich können Grenzwerte überwacht werden. Diese Funktionen sind als Blockschaltbild in Abbildung 34 gezeigt. Für die Prüfstandssteuerung wurde das Programm dspace eingesetzt. Die Oberfläche der dspace-Steuerung ist in Abbildung 35 gezeigt.

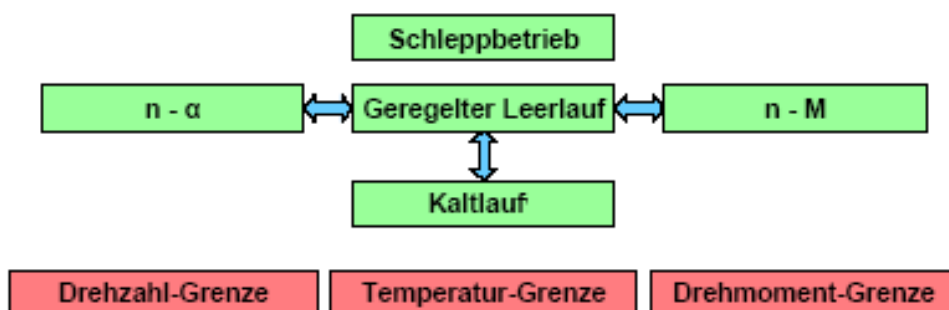


Abbildung 34: Regelungsarten und Funktionen der Steuerung des Prüfstandes

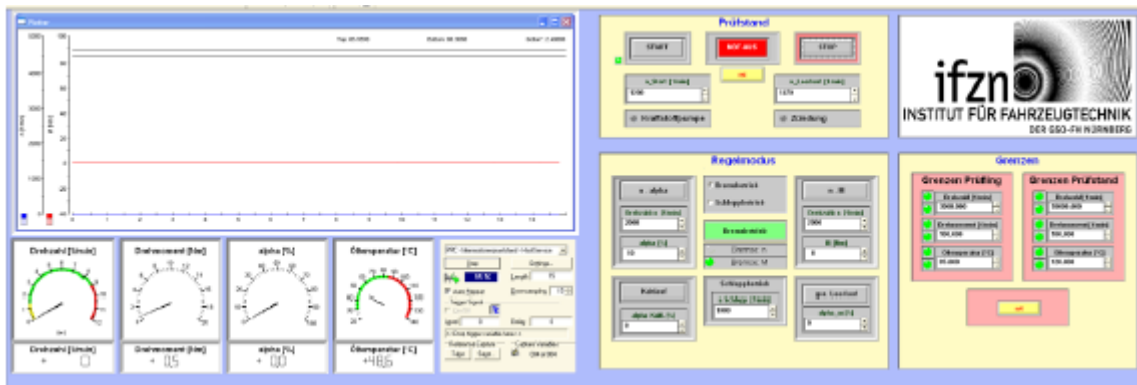


Abbildung 35: Oberfläche der Prüfstandssteuerung (dspace)



Abbildung 36: Drehmomentenwelle am Prüfstand

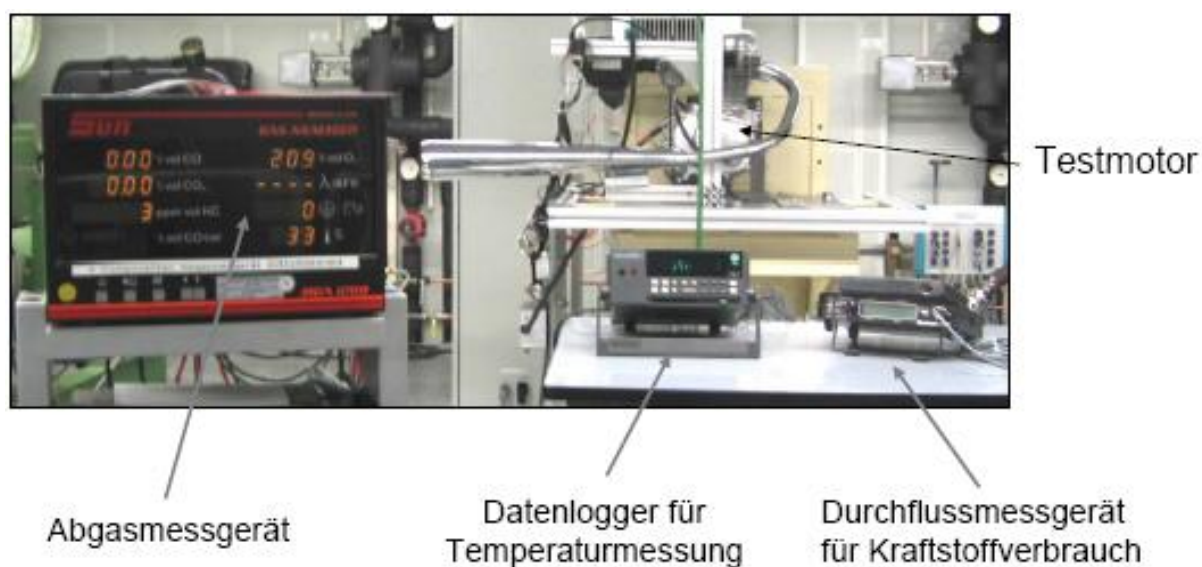


Abbildung 37: Weitere Messtechnik am Prüfstand

3.1.12 Grundmotorvermessung auf dem Prüfstand des IFZN

Nach der Inbetriebnahme des Prüfstandes konnte mit der Grundmotorvermessung (zuerst mit dem konventionellem Vergaser) begonnen werden. Eingesetzt wurde ein berührungsloser Drehmomentenaufnehmer DRFL-III von „disynet“ mit einem Messbereich von 200 Nm und einer Drehwinkelerfassung von 60 Impulsen/Umdrehung (siehe Abbildung 36) sowie ein Abgasmessgerät, ein Datenlogger für die Temperaturmessung und ein Durchflussmessgerät für den Kraftstoffverbrauch (siehe Abbildung 37). Zunächst wurden Funktionstests auf dem Prüfstand durchgeführt. Ein Messprogramm für ein Kennfeld und für Abgaskomponenten wurde entworfen.

Bevor mit den Messungen richtig begonnen werden konnte, kam es am Motor zu einem Ausfall, da die Verbindungsstange zum Ein-/Auslassventil abbrach. Der komplette Motor musste ausgetauscht werden, was zu Verzögerungen führte. Am Prüfstandaufbau mussten einige Änderungen vorgenommen werden:

Der Aufbau des Testmotors musste geändert werden. Der Motor wurde vom Prüfstand durch Einbau von Elastomerlagen entkoppelt, um die motorspezifischen Vibrationen zu senken.

Abbildung 38: Entkoppelte Motoraufspannung



Auf dem Prüfstand wurde zwischen der Kurbelwelle und der Messwelle eine Kupplung vorgesehen. Wegen der zu großen Übersetzung der Getriebeausgangswelle im vierten Gang musste der Motor direkt an der Kurbelwelle angekuppelt werden. Nach der Modifikation der Motoraufspannung musste die Kupplung motorspezifisch angepasst werden.

Abbildung 39: Kupplung zwischen Kurbelwelle und Bremswelle des Prüfstandes



An dem modifizierten Prüfstand (siehe Abbildung 40) konnte dann mit der Vermessung des Grundmotors mit konventionellem Klappenvergaser begonnen werden. Da es sich um ein fernöstliches Fabrikat handelte und keine technischen Daten mitgeliefert worden waren, musste zunächst eine Grundeinstellung am Vergaser vorgenommen werden. Es wurde eine Einstellung gewählt, mit der im Leerlauf eine einigermaßen niedrige Drehzahl mit $\lambda=0,95-0,98$ bei einem CO-Wert von etwa 2 erreicht wurde. Allerdings würde der Motor bei dieser sehr mageren Einstellung ein schlechtes Beschleunigungsverhalten zeigen.

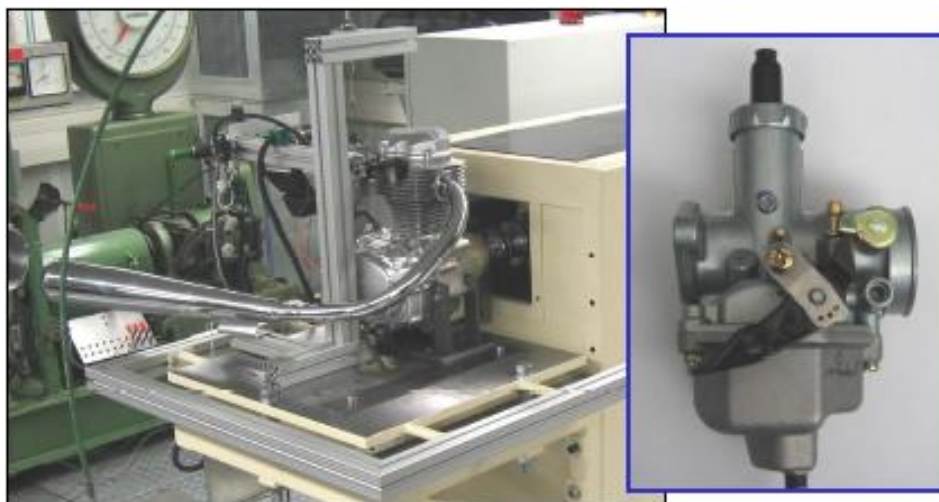


Abbildung 40: Komplett aufgebauter Prüfstand mit 125 ccm Motor, rechts im Bild der für die Grundmotorvermessung verwendete konventionelle Klappenvergaser

Erste Versuche, den Motor auf dem Prüfstand mit dem neuen gesteuerten Vergaser zu betreiben, waren noch nicht erfolgreich. Der Motor lief im Leerlauf instabil, da sich an der Unterseite der Drosselklappe Kraftstoff angesammelt hat, der dann plötzlich in größeren Portionen mitgerissen wurde. Durch das Hauptdüsenrückschlagventil wurde dann wieder Luft angesaugt, so dass es zu einem Schwingen zwischen magerem und fettem Betrieb kam. Verbesserungen wurden von der Firma BING durch Verschieben der Leerlaufaustrittsbohrung in die Nähe der Drosselklappe erzielt.

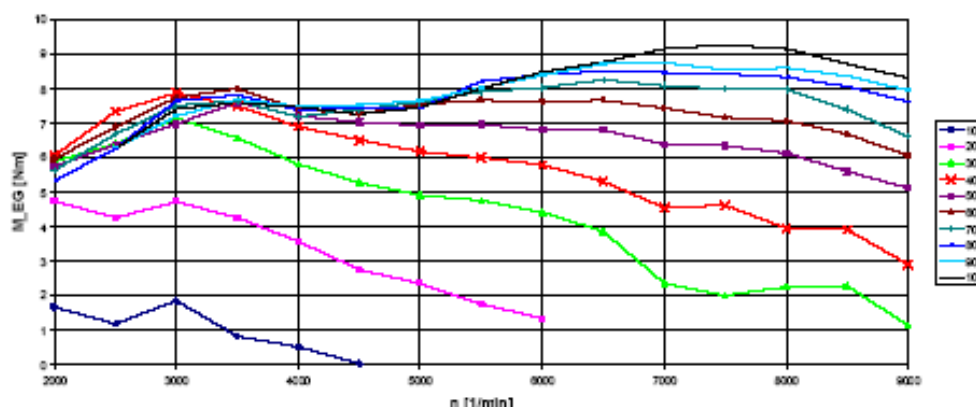


Abbildung 41: Drehmoment aus der Vermessung des Grundmotors

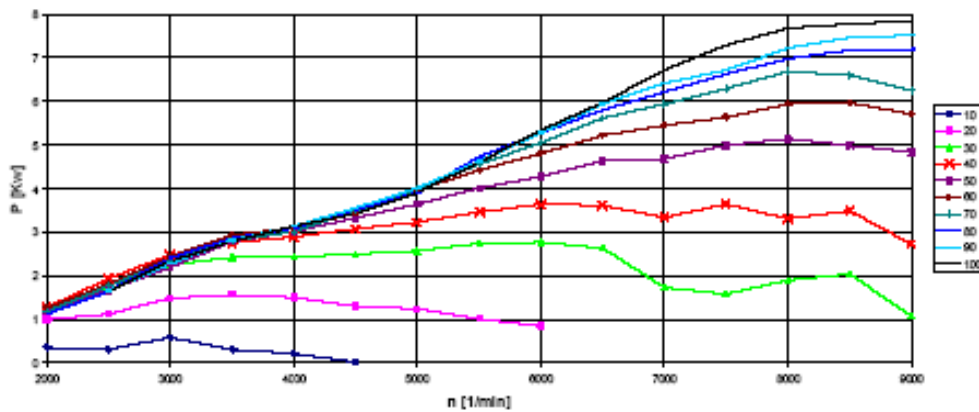


Abbildung 42: Leistung aus der Vermessung des Grundmotors

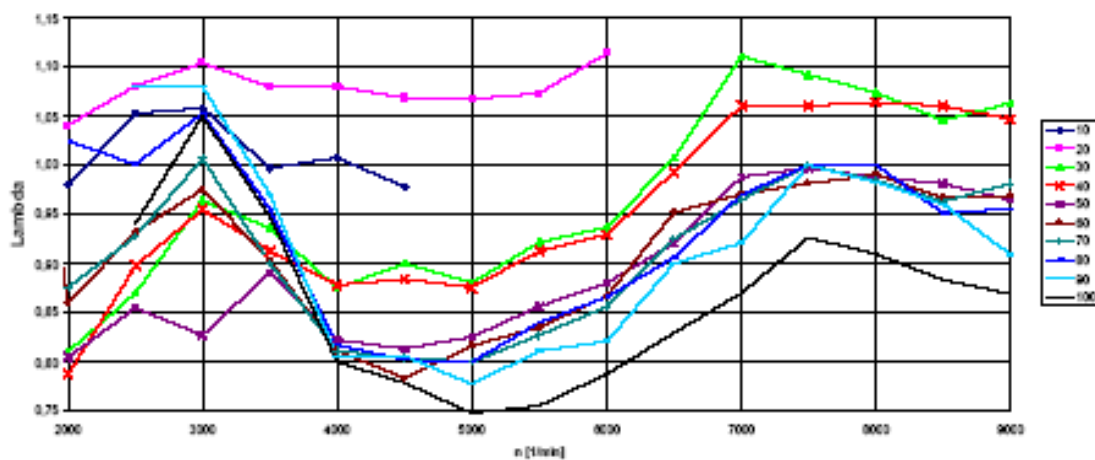


Abbildung 43: Lambda-Wert aus der Vermessung des Grundmotors

Als Ergebnisse der Vermessung des Grundmotors sind in Abbildung 41 der Drehmomentenverlauf bei verschiedenen Lastbereichen (10%-100%) und in Abbildung 42 die Leistung gezeigt. Die Leerlaufdrehzahl betrug 1.400 U/min. Interessant ist der Verlauf des Lambda-Wertes (siehe Abbildung 43), der teilweise Werte bis über 1,1 erreicht. Im mittleren Drehzahlbereich um 5.000 U/min zeigt sich bei voller Klappenöffnung ein sehr fetter Betrieb. Beim Beschleunigen werden die verschiedenen Lastbereiche überstrichen, so dass der Motor ausgehend von einem mageren Betrieb zunehmend angefettet wird. Kritisch erscheint bei Volllast und 7.000-8.000 U/min ein Wert von über $\Lambda=0,9$, der bei längerer Betriebsdauer zu Überhitzung führen könnte.

Ergebnisse aus Messungen von Emissionen des Grundmotors zeigen Abbildung 44 und Abbildung 45. Die CO-Werte nehmen bis $\Lambda = 1$ fast linear ab, während die CO_2 -Werte bis zu diesem Lambda-Wert kontinuierlich steigen. Parallel steigen die CH-Emissionen ab $\Lambda=0,95$ stark an. Auch ein Verbrauchskennfeld des Grundmotors in Abhängigkeit von Drehmoment und Drehzahl wurde ermittelt (siehe Abbildung 46).

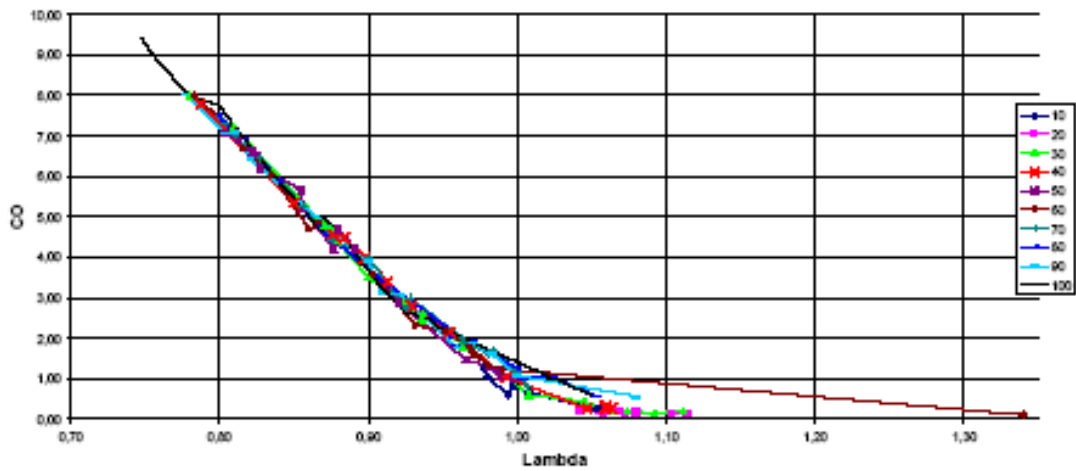


Abbildung 44: CO-Werte aus der Vermessung des Grundmotors

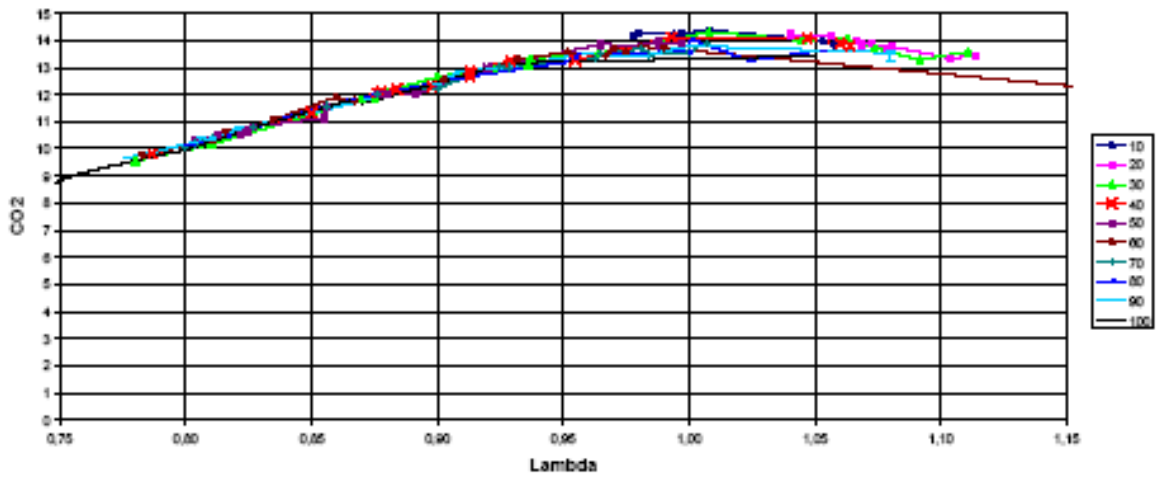


Abbildung 45: CO₂-Werte aus der Vermessung des Grundmotors

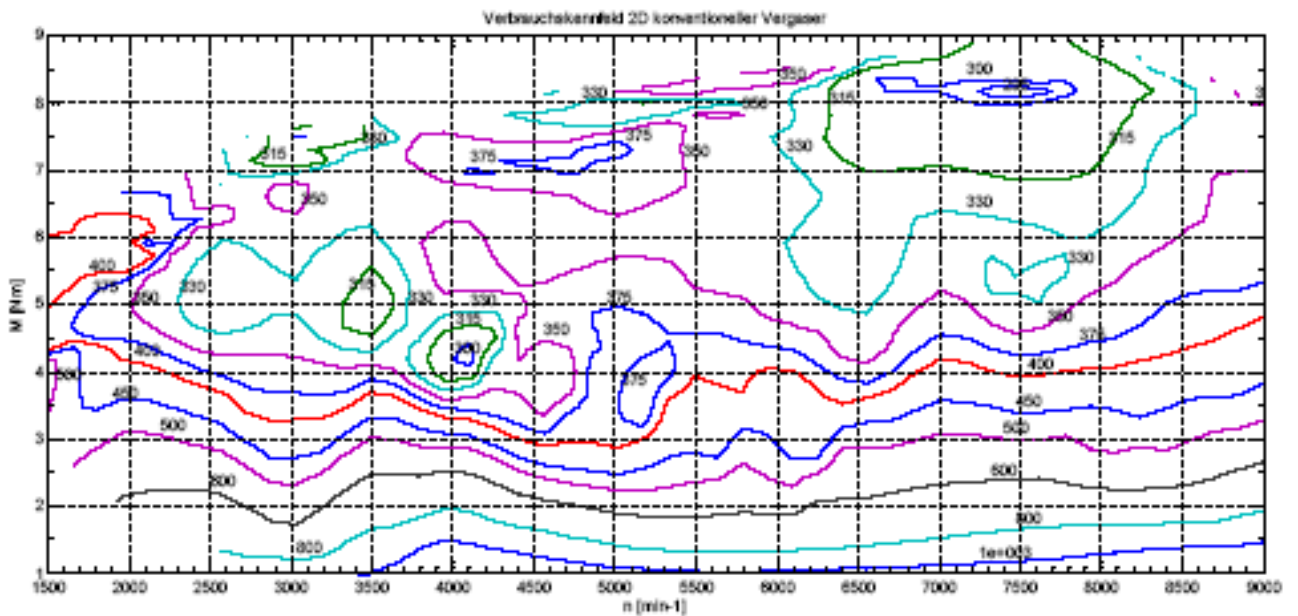


Abbildung 46: Verbrauchskennfeld des Grundmotors in Abhängigkeit von Drehmoment und Drehzahl

Um Prüfstand und Motor für Messungen mit dem elektronisch gesteuerten Vergaser vorzubereiten, wurden die folgenden Anpassungen vorgenommen:

- Anbringen eines Gaszuges am Vergaser
- Anbringen einer Halterung am Motor
- Kalibrierung des Fahrhebelstellers



Das Kraftstoffmesssystem musste an den elektronisch gesteuerten Vergaser angepasst werden, da ein niedriger Kraftstoffdruck erforderlich war, der Messungen mit einem konventionellen Durchflussmessgerät nicht erlaubte. Ein neues Kraftstoffmesssystem wurde konzipiert und aufgebaut, um die Anforderung eines maximalen Kraftstoffdruckes $< 0,1$ bar zu erfüllen. Der Systemaufbau des Kraftstoffmesssystems ist in Abbildung 47 gezeigt.

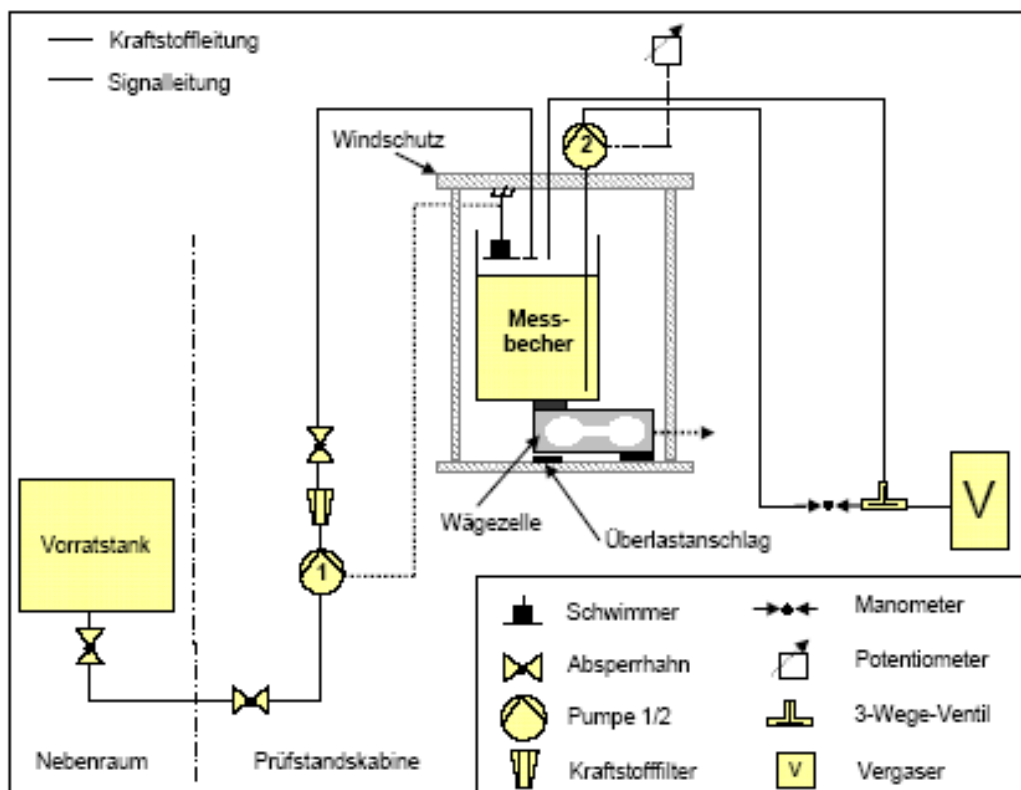


Abbildung 47: Systemaufbau des Kraftstoffmesssystems

Schließlich wurden zur Grundabstimmung des rechts gezeigten elektronisch gesteuerten Vergasers noch folgende, teilweise sehr aufwendige Arbeiten in Zusammenarbeit zwischen der Firma BING und dem IFZN durchgeführt:

- Anpassen des EFC-Vergasers (rechts im Bild) an den Motor
- Test verschiedener Düsen und Einstellungen
- Leerlaufverhalten
- Abgaskomponenten und Lambda
- Stabilität des Systems und des Motorlaufs
- Reproduzierbarkeit der Einstellwerte.



3.2 Darstellung der erzielten Ergebnisse

Das wichtigste Ergebnis des Kooperationsprojektes ist ein Vergaser für Kleinmotoren, der zur Minimierung von Verbrauch und Emissionen gesteuert werden kann.

Abbildung 48 zeigt das CAD-Modell des neuen, als Seitenschwimmer-Vergaser ausgeführten Electronic Fuel Control (EFC) Systems. Dieser gesteuerte Vergaser hat mehrere Entwicklungsschleifen mit strömungstechnischen Verbesserungen durchlaufen, die auch auf die Arbeiten der sachs engineering GmbH zurückzuführen sind, und enthält einen Hall-Sensor zur Bestimmung des Drosselklappenwinkels sowie einen Druck- und Temperatursensor zur späteren Höhenkompensation. Ein Prototyp für einen 500 ccm Stationärmotor ist in Abbildung 49 gezeigt.

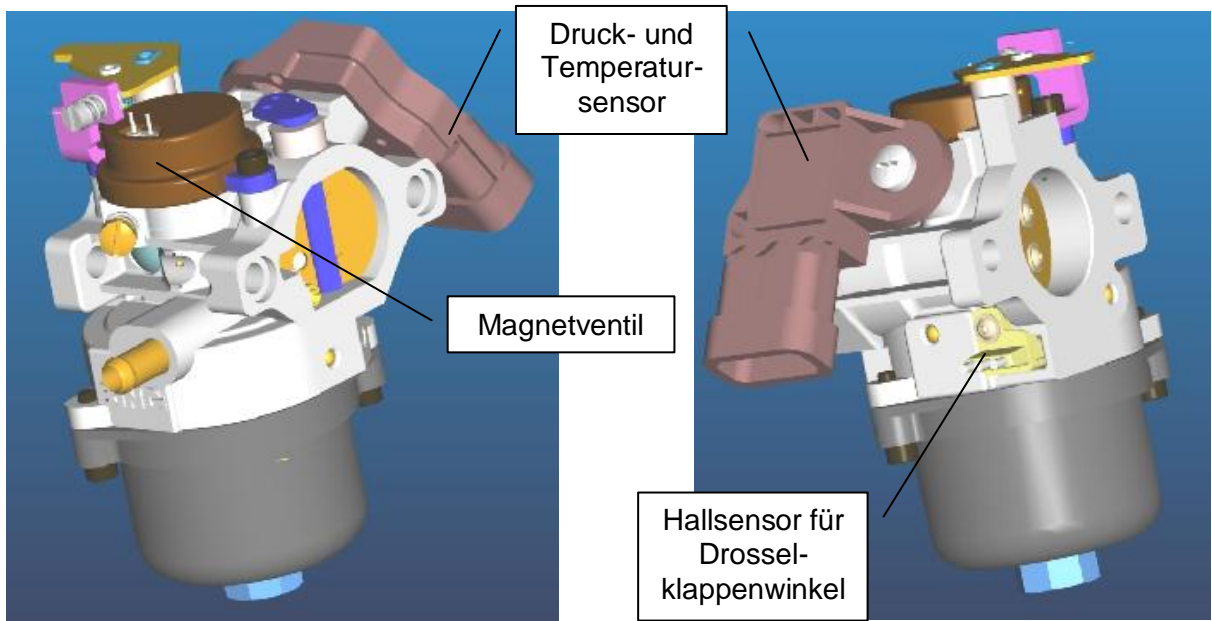


Abbildung 48: Optimierter Seitenschwimmervergaser

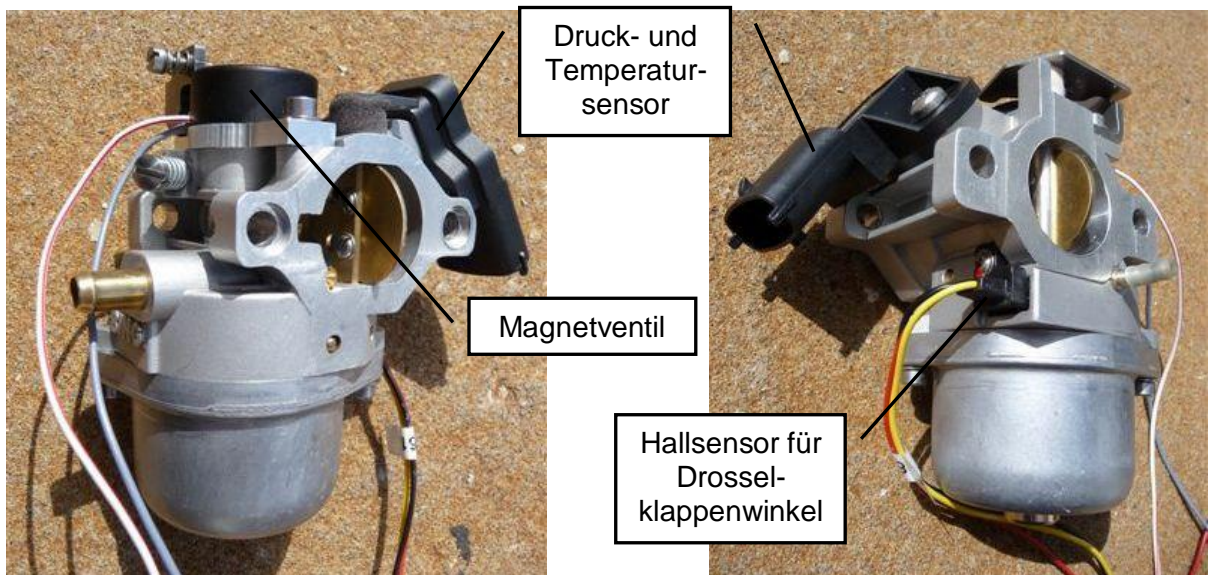


Abbildung 49: Prototyp des neuen EFC-Systems

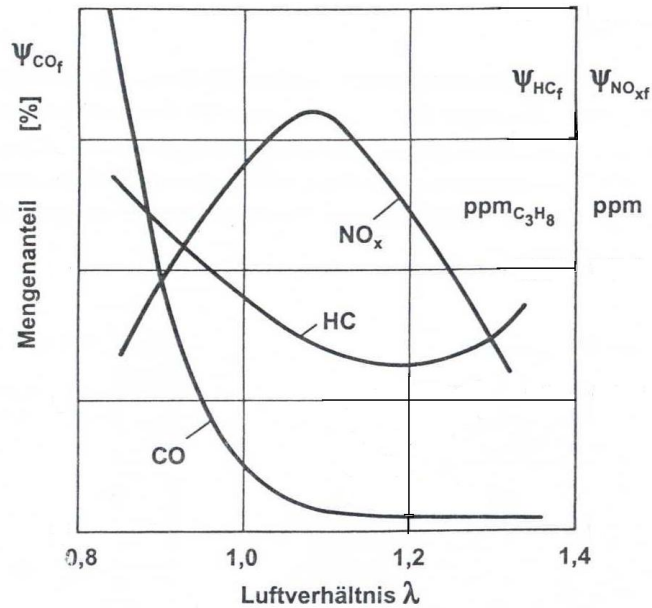


Abbildung 50: Schadstoffkomponenten beim Ottomotor in Bezug auf λ [Bosch]

Die elektronische Steuerung des Vergasers erfolgt in der Weise, dass das Luft-Kraftstoff-Gemisch durch eine als spezielle Nadel/Nadelsitz-Kombination ausgeführte Düse dem Motor zeitlich getaktet zugeführt wird. Die Taktung wird in Abhängigkeit von Motordrehzahl und Motorlast (gemessen anhand des Drosselklappenwinkels) über einen Aktuator vorgegeben. Die Zeit, in der die Düse in Abhängigkeit zur Kurbelwellenstellung des Motors geschlossen ist, das sog. Schließfenster, kann variiert werden. Somit gelangt mehr oder weniger Kraftstoff in den Brennraum des Motors, und das Luft-Kraftstoff-Verhältnis wird entsprechend beeinflusst. Zwischen der Taktung auf der einen Seite und dem Kraftstoffverbrauch und der Abgaszusammensetzung auf der anderen Seite bestehen wichtige Zusammenhänge.

Ottomotoren werden in der Regel im Bereich des stöchiometrischen Mischungsverhältnisses ($\lambda \approx 1$) betrieben. Das Verbrennungsluftverhältnis λ des dem Motor zugeführten Gemisches hat einen dominierenden Einfluss auf die Abgaszusammensetzung. Der Motor gibt sein maximales Drehmoment bei ungefähr $\lambda = 0,9$ ab. Deshalb wird bei Vollastbetrieb üblicherweise dieses Gemisch eingestellt. Für einen günstigsten Kraftstoffverbrauch ist ungefähr $\lambda = 1,1$ optimal. Bei dieser Einstellung sind auch die Emissionen für HC und CO günstig. Die Stickoxidemission hat jedoch hier ihr Maximum. Bei zu geringem Luftanteil ($\lambda < 1$) steigen die Ruß-, CO- und HC-Emissionen. Bei zu magerer Gemischeinstellung ($\lambda > 1$) wird die Laufgrenze des Motors erreicht bzw. überschritten. Im weiteren Verlauf steigen die HC Emissionen durch Verbrennungsaussetzer stark an. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 50 verdeutlicht.

Während es mit einem herkömmlichen Vergaser schwer ist, über den gesamten Last- und Drehzahlbereich eine optimale Einstellung des Gemisches zu erzielen, bietet das mittels Drehzahl und Last steuerbare System mehr Freiheitsgrade und erlaubt eine Optimierung des Gemisches über einen großen Drehzahl- und Lastbereich.

Im Folgenden werden Messergebnisse des neuen EFC-Systems dargestellt, die in Zusammenarbeit der Firma BING mit dem IFZN der Fachhochschule Nürnberg auf dem Prüfstand des IFZN erzielt wurden. Die Ergebnisse wurden anhand eines 125 ccm Zweiradmotors der fernöstlichen Marke LIFAN gewonnen, wobei Messungen mit dem EFC-System in Vergleich zum Serienvergaser gesetzt wurden. Zunächst wurde der Originalmotor mit dem ungesteuerten Serienvergaser einer Eingangsmessung unterzogen. Hierbei wurden das Drehmoment, der Kraftstoffverbrauch, der Lambda-Wert sowie der CO-, HC- und NO_x Gehalt des Abgases gemessen. Danach wurde der serienmäßig vorhandene Schiebervergaser durch den modifizierten BING Klappenvergaser am Serienmotor ersetzt. Dieser wurde sowohl in der Grundregulierung (ohne elektronische Steuerung), als auch elektronisch gesteuert in der gleichen Art und Weise wie der Originalvergaser vermessen. Die geschilderten Ergebnisse beziehen sich nur auf diese Vergleichsmessung.

Hinsichtlich der Taktung wurde bei den durchgeführten Versuchsreihen der Schließzeitpunkt des Magnetventils und damit des Nadelsitzes auf den oberen Zünd-Totpunkt festgelegt und nicht variiert. Die Schließdauer, während der die Kraftstoffzufuhr zum Kraftstoffaustritt des Vergasers unterbrochen war, wurde exemplarisch bei 5000 U/min und verschiedenen Lastbereichen (Öffnung der Drosselklappe) so gewählt, dass sich ein optimales Luft-Kraftstoffgemisch von $\lambda \approx 1$ einstellte. Die Schließdauer des Magnetventils ist in Tabelle 2 in Grad Kurbelwinkel dargestellt.

Klappenöffnung [%]	10	12,5	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90	100
Kurbelwinkel [°]	140	160	190	400	507	495	480	470	468	500	620	620	620	620

Tabelle 2: Schließdauer des Magnetventils bei 5000 U/min in Grad Kurbelwinkel bei unterschiedlichen Lastpunkten. (Beim Viertakter besteht ein kompletter Zyklus aus 720°.)

Mit diesen Einstellungen wurde die Veränderung des Lambda-Wertes über der Last (Drosselklappenwinkel) beim gesteuerten BING-Vergaser ermittelt (Motordrehzahl von 5000 U/min) und mit dem Originalvergaser sowie dem ungesteuerten BING-Vergaser verglichen (siehe Abbildung 51). Es zeigte sich, dass sich der gesteuerte BING-Vergaser in einem Bereich von $\lambda \approx 1$ bewegt, in dem z.B. ein Drei-Wege-Katalysator zur Abgasnachbehandlung zum Einsatz kommen könnte. Demgegenüber würde eine Abgasnachbehandlung sowohl für den Originalvergaser als auch für den ungesteuerten BING-Vergaser keinen Sinn machen, da man sich hier größtenteils außerhalb des Wirkungsbereichs des Katalysators befindet.

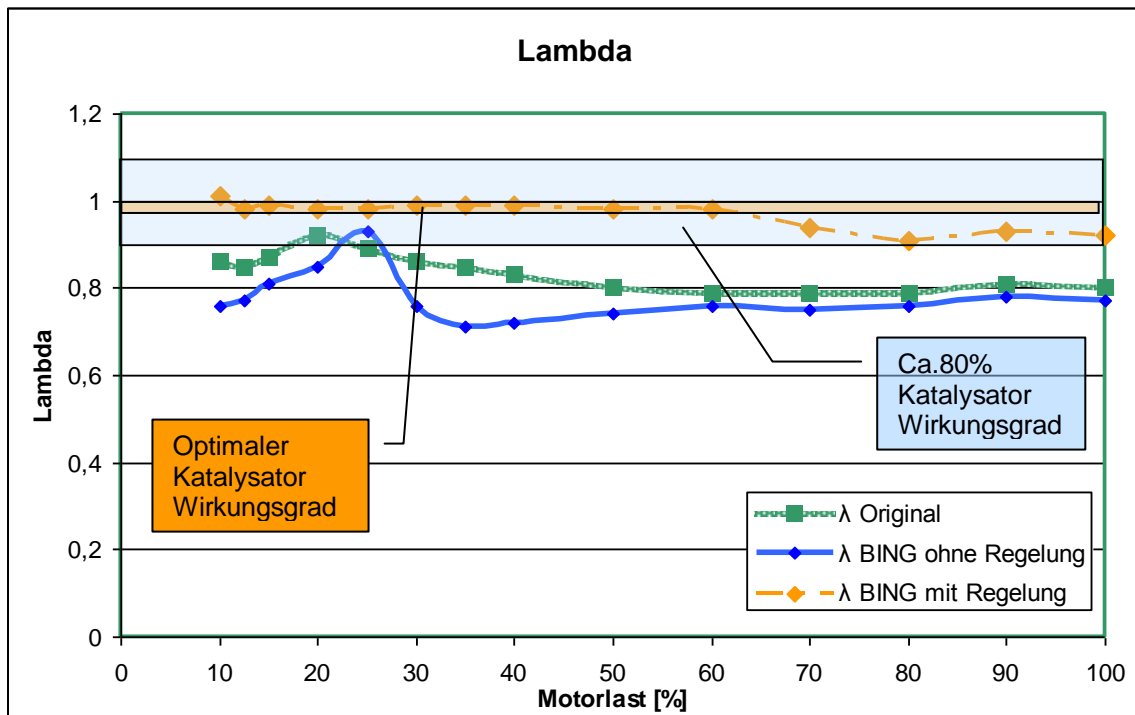


Abbildung 51: Vergleich des Verbrennungsluftverhältnisses λ eines ungesteuerten Marken-Schiebervergasers mit dem elektronisch steuerbaren BING-Vergaser (Messungen im gesteuerten und ungesteuerten Betrieb) in Abhängigkeit der Motorlast bei 5000 U/min an einem 125 ccm Zweiradmotor. Der hellblau markierte Balken zeigt einen Bereich, in dem ein Drei-Wege-Katalysator noch mit ca. 80% Wirkungsgrad zur Abgasnachbehandlung zum Einsatz kommen könnte. Hierin bewegt sich der gesteuerte BING-Vergaser.

Betrachtet man die Wirkungsweise eines Drei-Wege-Katalysators zur Abgasnachbehandlung, die in Abbildung 52 anhand von gemessenen CO, HC und NO_x -Umsetzungen dargestellt ist, zeigt sich, dass nahe $\lambda = 1$ (λ -Fenster) die größtmögliche Umsetzung aller drei Schadstoffe erreicht wird. Der Drei-Wege-Katalysator ist im Wesentlichen für die folgenden Umwandlungen zuständig:

- Kohlenmonoxidumsetzung in Kohlendioxid
- Kohlenwasserstoffumsetzung in Kohlendioxid und Wasserdampf
- Stickoxidzerlegung in Stickstoff, Wasserdampf und Kohlendioxid

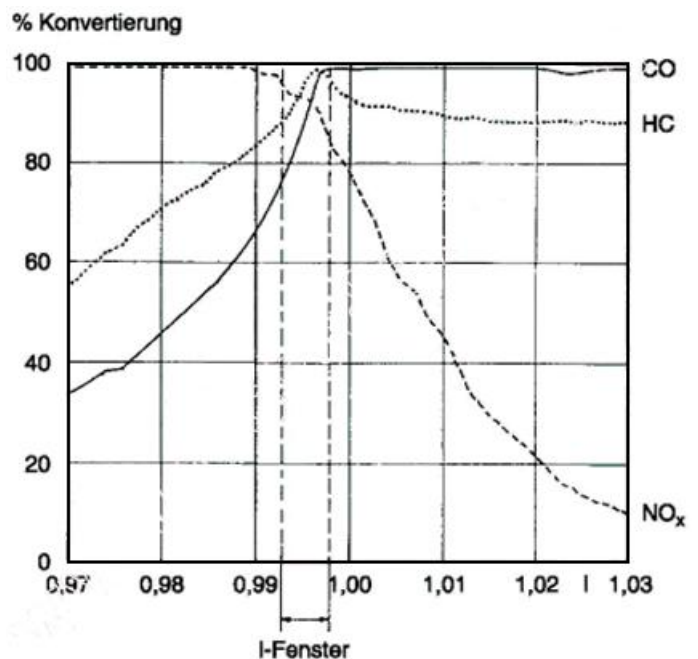


Abbildung 52: Konvertierung eines Drei-Wege-Katalysators [MLexikon]

Beim geregelten Drei-Wege-Katalysator wird durch eine Lambda-Sonde das Luft-Kraftstoff-Verhältnis im Bereich um $\lambda = 1$ gehalten (Lambda-Fenster). Die Konvertierungsraten liegen dabei für alle drei Umwandlungsprozesse über 90 % [MLexikon]. Der Einsatz einer Lambda Sonde kann für den Betrieb eines elektronisch geregelten Vergasers vorgesehen werden.

Es ist anzumerken, dass bei der Schadstoffmessung dieser vergleichenden Untersuchungen kein Katalysator im Abgasstrang zum Einsatz kam. Die gemessene Veränderung des Schadstoffausstoßes durch Verwendung des gesteuerten BING Vergasers kam lediglich durch die Anpassung des Luft-Kraftstoffverhältnisses mit Hilfe der elektronischen Steuerung zustande.

In Abbildung 53 bis Abbildung 55 wird der Unterschied des Schadstoffausstoßes dargestellt, der sich ebenfalls exemplarisch bei 5000 U/min für alle drei Gemischaufbereitungsvarianten ergibt. Messkurven für weitere Drehzahlen sind im Anhang beigefügt. Gemessen wurde der Ausstoß der Abgasbestandteile CO, HC, NO_x . Dieser verhält sich in Bezug auf das Luftverhältnis λ so, wie in Abbildung 50 schematisch dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass durch den über den gesamten Lastbereich höheren Lambda Wert beim gesteuerten BING-Vergaser deutlich niedrigere CO und HC Werte gemessen wurden, als beim Originalvergaser. Jedoch steigt durch die erhöhte Verbrennungstemperatur der NO_x Wert erheblich an (vgl. auch Abbildung 50). Durch den Einsatz eines Lambda-Sensors und eines Drei-Wege-Katalysators könnten diese Schadstoffe nochmals erheblich reduziert werden (siehe Abbildung 52). Dies ist jedoch nur sinnvoll, wenn der Motor im entsprechenden Lambda-Bereich betrieben wird.

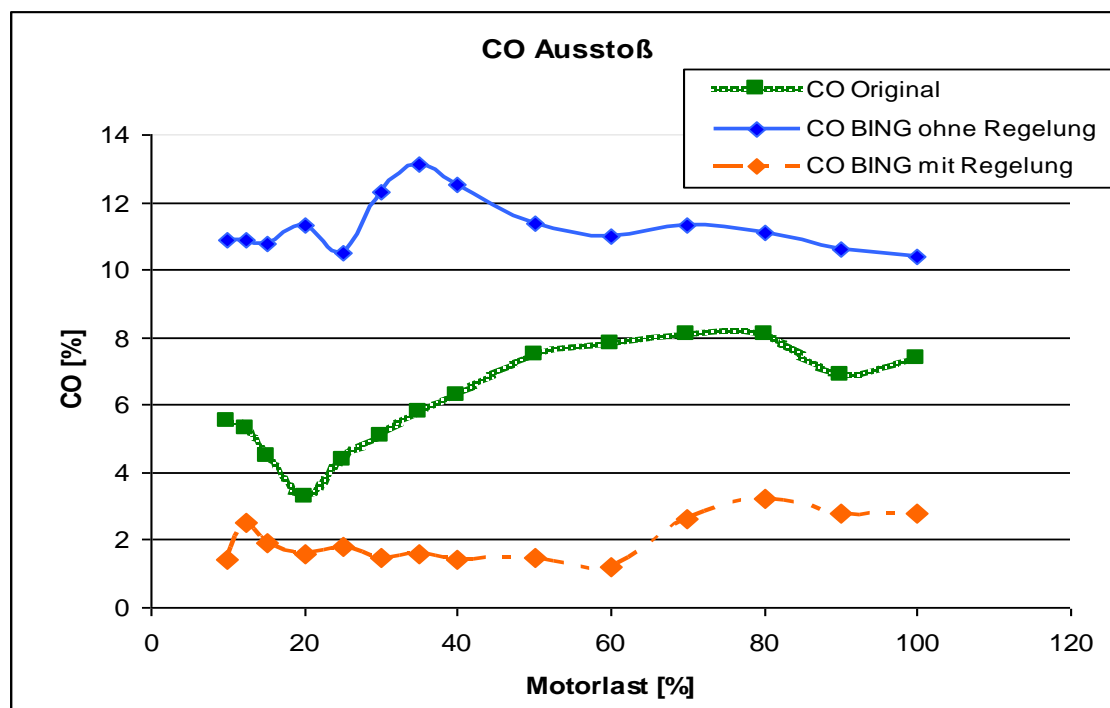


Abbildung 53: CO Ausstoß in Abhängigkeit der Motorlast bei 5000 U/min

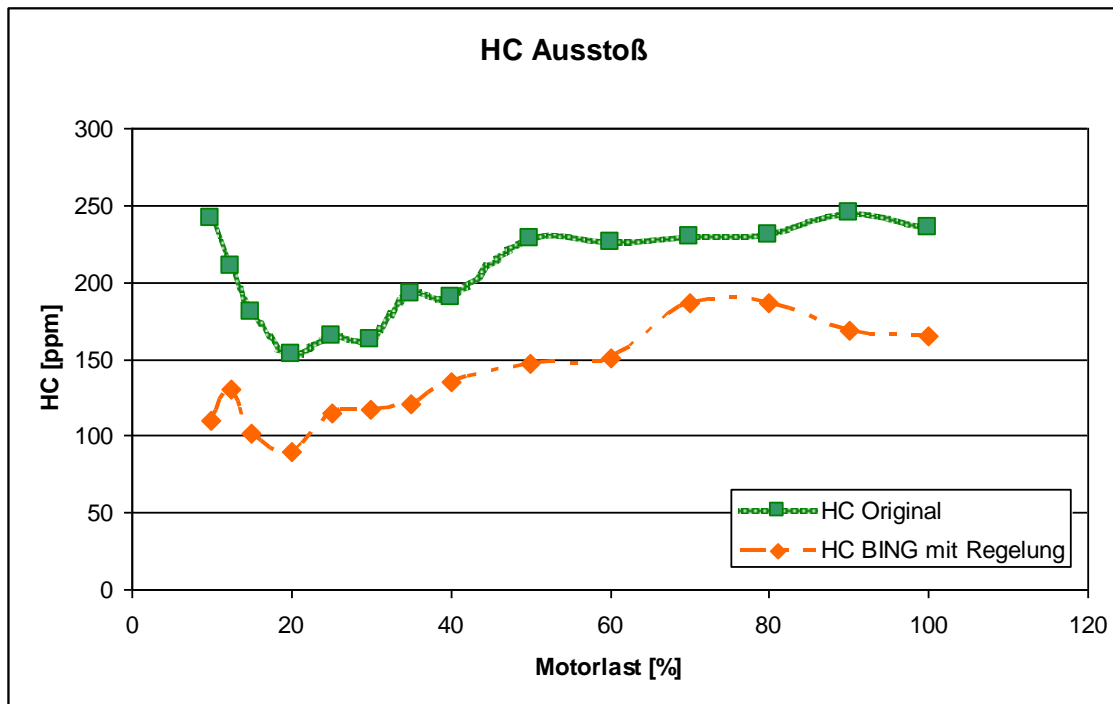


Abbildung 54: HC Ausstoß in Abhängigkeit der Motorlast bei 5000 U/min (Der BING-Vergaser ohne Steuerung konnte hier von den Messgeräten nicht erfasst werden, deshalb keine Aufzeichnung.)

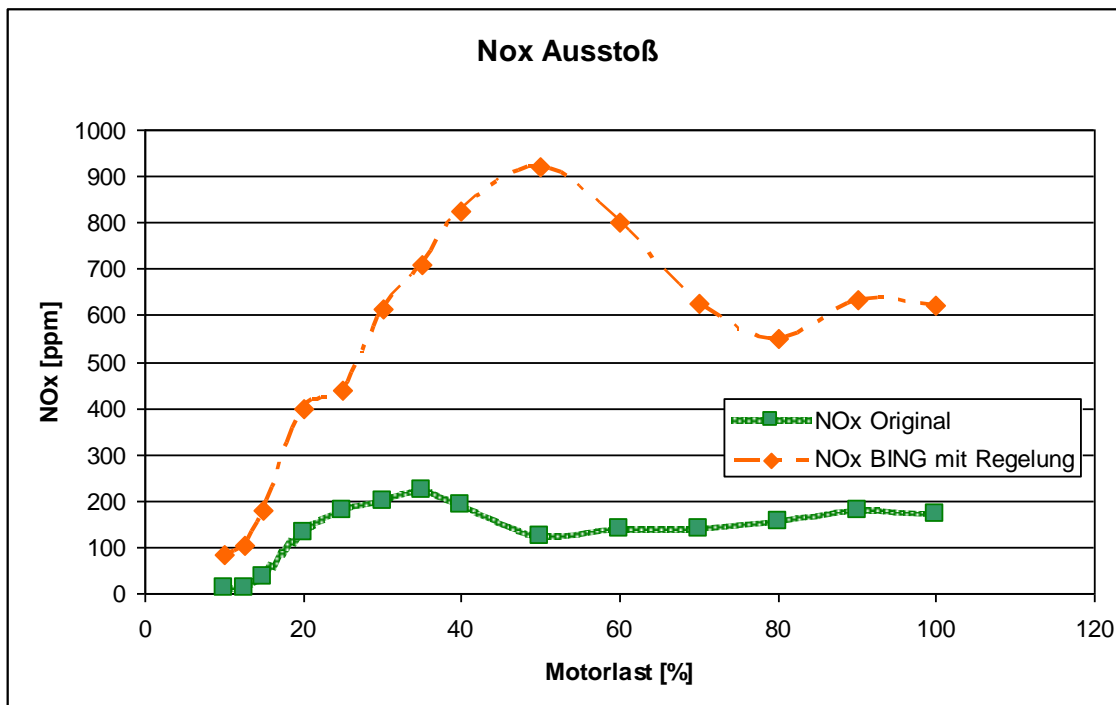


Abbildung 55: NO_x Ausstoß in Abhängigkeit der Motorlast bei 5000 U/min (Der BING-Vergaser ohne Steuerung konnte hier von den Messgeräten nicht erfasst werden, deshalb keine Aufzeichnung.)

Wie die vorhergehenden Diagrammen zeigen, ergibt sich durch die Steuerung des Luft-Kraftstoff Gemisches eine deutliche Reduzierung von CO und HC. Aufgrund der besseren Gemischzusammensetzung ist auch eine Reduzierung des spezifischen Verbrauchs b_e in [kg/kWh] zu erwarten. Dieser errechnet sich aus dem gemessenen Kraftstoffverbrauch B in [kg/h] sowie der Motorleistung P_e in [kW] [Bosch]. Aus dem gemessenen Drehmoment M in [Nm = Ws] und dem gemessenen Verbrauch B sowie der Motordrehzahl n in [1/min] wurde der spezifische Verbrauch wie folgt errechnet:

$$b_e = \frac{B}{P_e}$$

$$\text{mit } P_e = M \times \omega = M \times 2 \times \pi \times n$$

Die folgenden Diagramme von Abbildung 56 bis Abbildung 58 zeigen die Messungen des Kraftstoffverbrauchs, der Leistung und schließlich des errechneten spezifischen Kraftstoffverbrauchs, jeweils bei 5000 U/min. Aus Abbildung 58 ist ersichtlich, dass der gesteuerte BING-Vergaser den geringsten spezifischen Kraftstoffverbrauch aufweist.

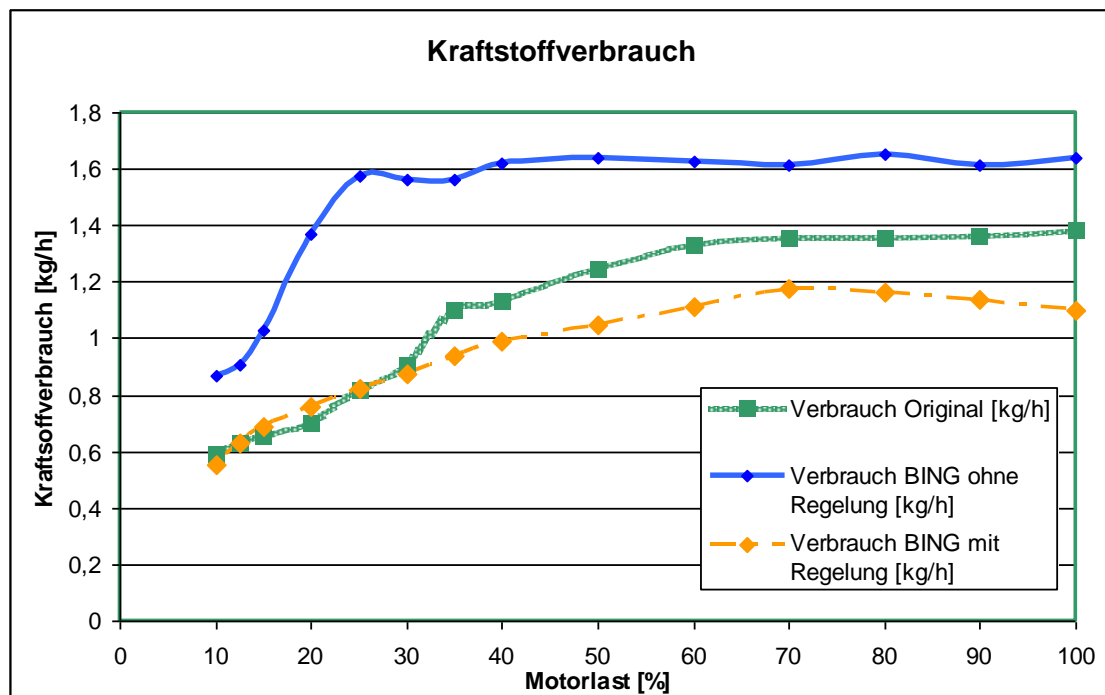


Abbildung 56: Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit der Motorlast bei 5000 U/min

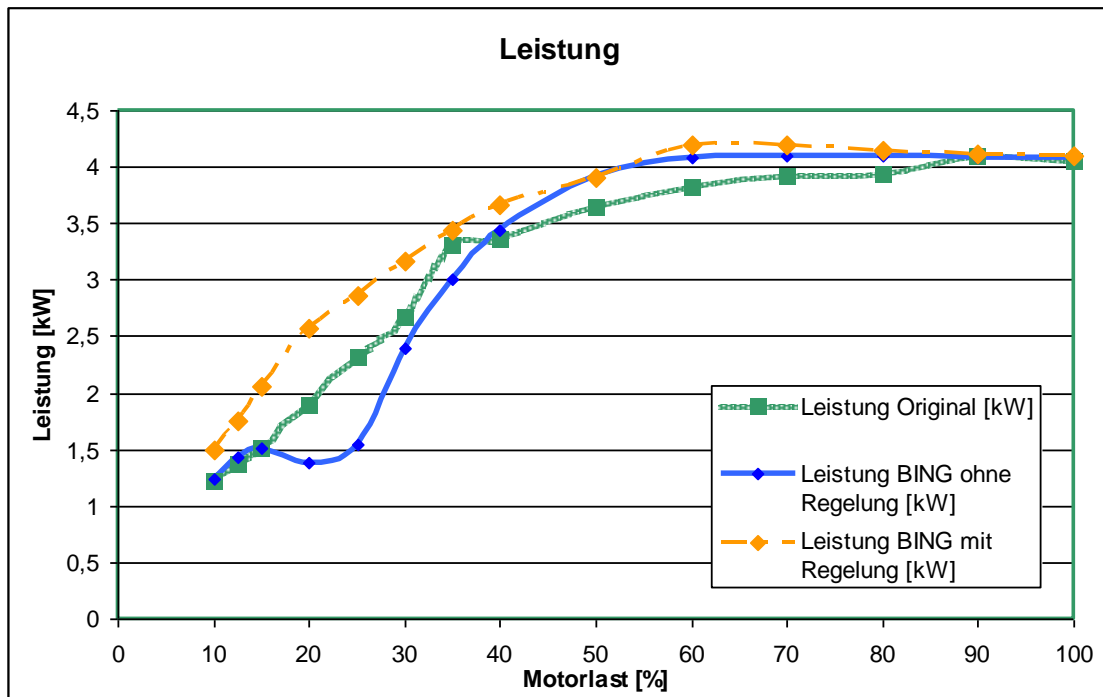


Abbildung 57: Motorleistung in Abhängigkeit der Motorlast bei 5000 U/min

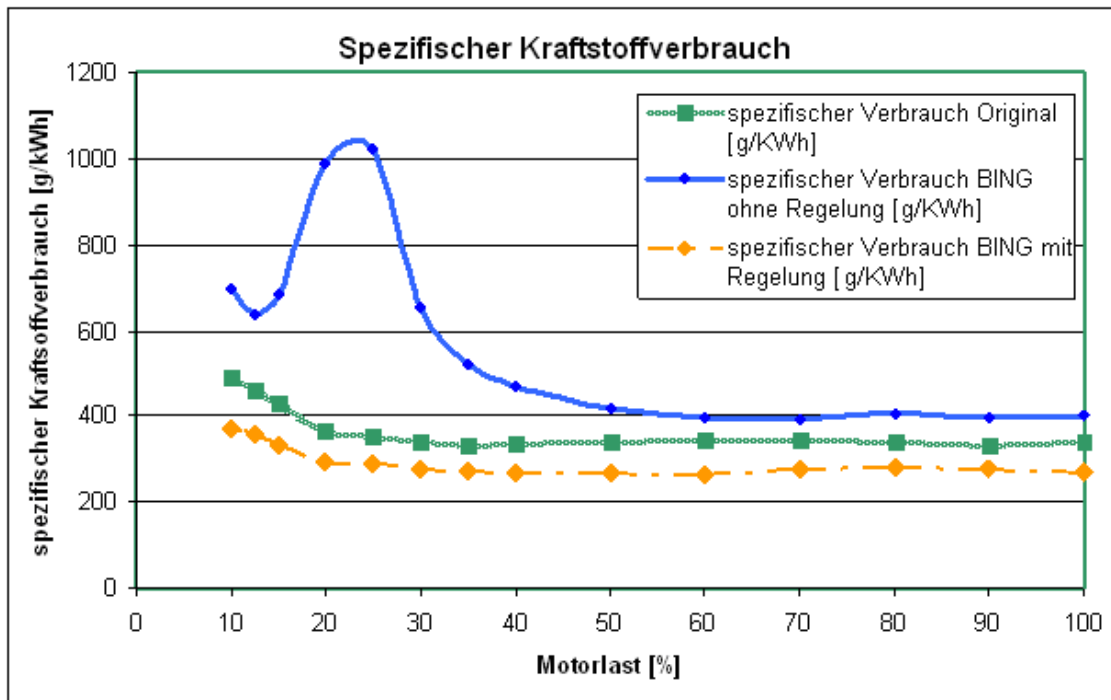


Abbildung 58: Spezifischer Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit der Motorlast bei 5000 U/min

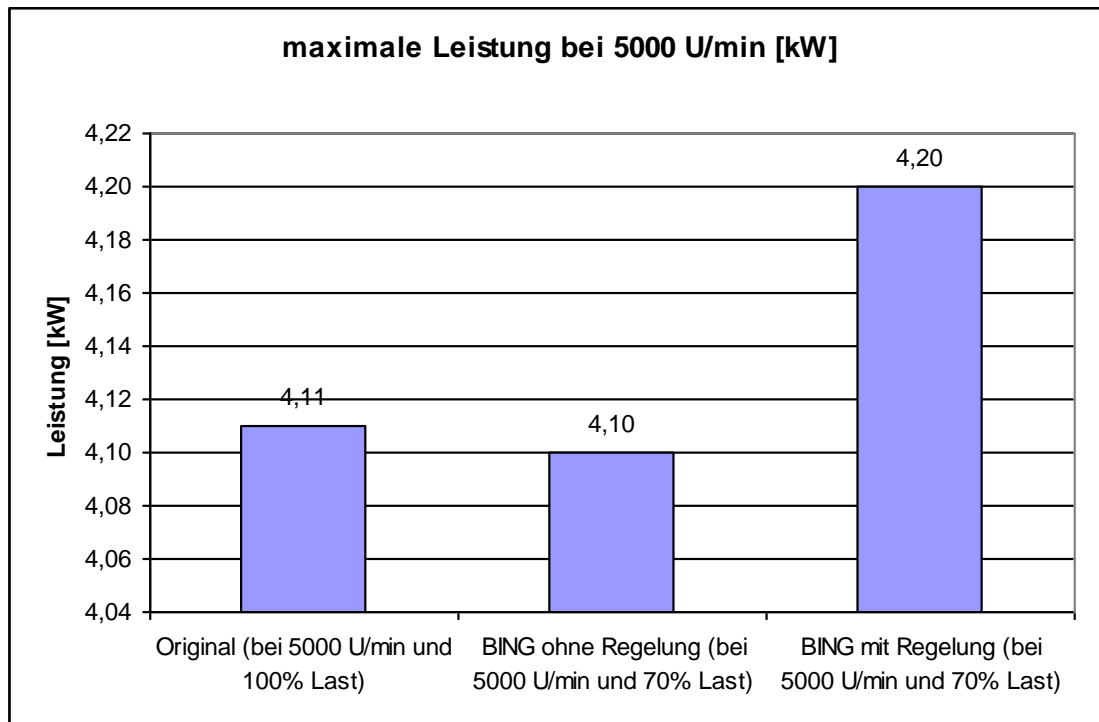


Abbildung 59: Punkte maximaler Leistung bei 5000 U/min

Um die Kraftstoffeinsparung durch den Einsatz des elektronisch gesteuerten BING-Vergasers zu verdeutlichen, werden in Abbildung 59 noch die Punkte maximaler Leistung der drei getesteten Varianten gegenübergestellt. Zu den Punkten maximaler Leistung werden in Abbildung 60 die jeweiligen spezifischen Verbräuche errechnet.

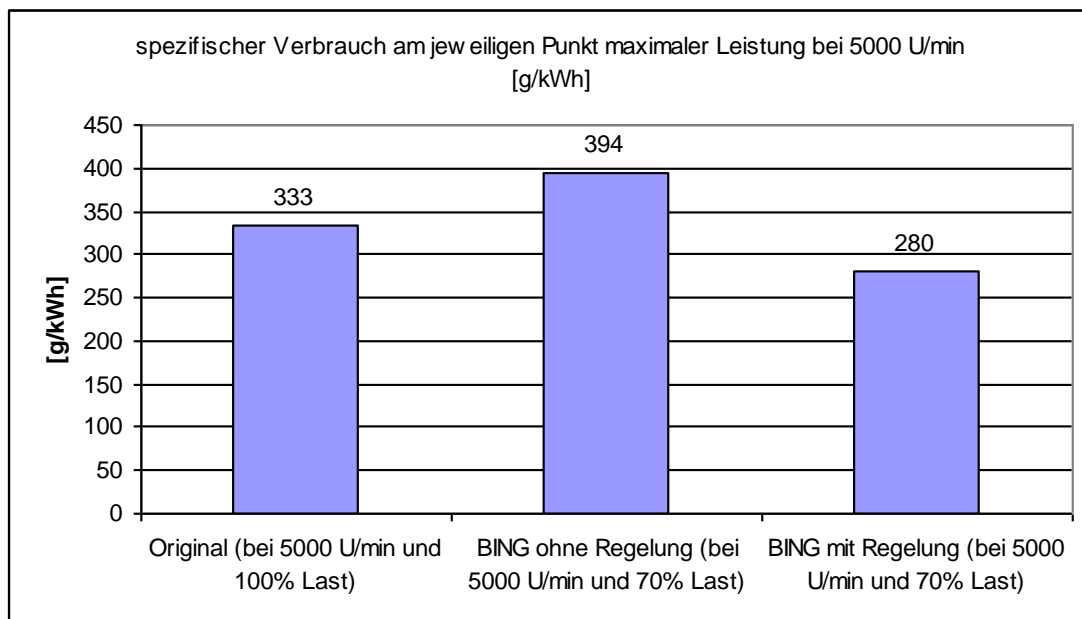


Abbildung 60: Spezifischer Kraftstoffverbrauch an den Punkten maximaler Leistung bei 5000 U/min

Vergleicht man den Originalvergaser mit dem elektronisch gesteuerten BING-Vergaser an diesen beispielhaften Punkten maximaler Leistung bei einer Motordrehzahl von 5000 U/min, so ergibt sich eine Verringerung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs um 15,9 %.

3.3 Diskussion der Ergebnisse

Veränderungen der Vorhabensdurchführung ergaben sich dadurch, dass zwar relativ bald deutlich wurde, dass mit dem elektronisch gesteuerten Vergaser die hinsichtlich Verbrauchs- und Emissionsreduktion gesteckten Ziele zu erreichen waren, dass auf dem Weg dorthin jedoch einige Probleme bewältigt werden mussten.

Zunächst ergab sich in Tests mit ersten Prototypen des gesteuerten Vergasers, dass der Motor im Leerlauf nach einigen Minuten unkontrolliert seine Drehzahl steigerte und wieder abfallen ließ. Es war kein konstanter Lauf im Leerlauf und im unteren Teillastbereich möglich. Je weiter die Drosselklappe dagegen geöffnet wurde, desto weniger trat dieses Problem auf. Ursache war, dass der Motor im Leerlauf und unteren Teillastbereich über das Leerlauf-System Kraftstoff und durch die Mündungsöffnung der Venturidüse unkontrolliert Luft ansaugen konnte. Es musste ein Seitenschwimmervergaser als komplett neuer Lösungsansatz entwickelt werden, bei dem das Nadelsystem, bestehend aus Magnetventil (Aktuator), Verbindungsstange, Nadel und Nadelsitz, komplett aus dem Bereich der Venturidüse und des Hauptdüsenaustritts herausgenommen und seitlich versetzt wurde.

Im Hauptdüsenaustritt wurde ein Rückschlagventil angebracht, um das Einsaugen von Luft im Leerlauf zu vermeiden. In weiteren Versuchen zeigte sich allerdings, dass sich in manchen Lastbereichen und bei aktiviertem Magnetventil eine gewisse Instabilität des Kraftstoffverbrauchs einstellte. Der Motor magerte ab, obwohl an der Einstellung des Magnetventils keine Veränderung stattfand. Der interne Druckverlauf im Vergaser zeigte bei wechselndem Ein- und Ausschalten des Magnetventils im eingeschalteten Zustand sehr deutliche Druckschwankungen. Der Hauptdüsenaustritt musste so umgestaltet werden, dass insbesondere bei extrem magerer Einstellung keine Instabilitäten mehr auftreten konnten. Das Rückschlagventil für den Hauptdüsenaustritt wurde mit geringerer Schwingungsneigung ausgeführt.

Aus Gründen der längeren Haltbarkeit und der besseren Herstellbarkeit wurde der elektronische Vergaser mehrfach umkonstruiert. Dazu wurden die jeweils in Versuchen erhaltenen Erkenntnisse umgesetzt. Zusätzlich wurde die Sensorik verbessert, z.B. durch einen Drucksensor aus dem Automotive-Bereich zur besseren Höhenkompensation. Bei den konstruktiven Verbesserungen darf nicht übersehen werden, dass ein Vergaser durch die Vielzahl an Stellmöglichkeiten in Form von geometrischen und strömungsdynamischen Einflussparametern (Position und Größe von Bohrungen, Zusammenspiel von Leerlauf- und Hauptdüsenystem, Ausführung von Düsen usw.) ein äußerst komplexes Gebilde ist. Die Änderung eines Parameters hat Einfluss auf andere Größen, so dass es sehr schwierig ist, aus der Vielzahl von Variationen den besten Parametersatz herauszufinden.

Ursprünglich war geplant, dass sich die Firma sachs engineering durch konstruktive Arbeiten am Aufbau von Prüfständen beteiligt. Im Projektverlauf wurden die gesamten Arbeiten zu den Prüfständen jedoch von den beiden anderen Kooperationspartnern übernommen, abgesehen von den Versuchsmotoren, die von der sachs engineering GmbH beschafft wurden. Dies führte dazu, dass bei der Firma BING auch Prüfstandsarbeiten anfielen, was ihren Gesamtarbeitsaufwand steigerte.

Zusammen genommen haben die Entwicklungsarbeiten der Firma BING einen deutlich höheren Aufwand verursacht, als zum Zeitpunkt der Antragstellung angenommen. Es kam zu Verzögerungen im zeitlichen Fortschritt, weshalb eine Verlängerung um drei Monate und eine 20%ige Aufstockung beantragt wurden.

Auch beim IFZN der FH Nürnberg kam es zu nicht vorhersehbaren Verzögerungen. In der Entwicklungskooperation war vorgesehen, dass das IFZN Prüfstandsversuche durchführt und die Firmen BING und sachs bei der Optimierung des Kennfeldes zur Abstimmung des gesteuerten Vergasers in verschiedenen Betriebszuständen wissenschaftlich berät. Zu Beginn des Vorhabens wurde dem IFZN von der sachs engineering GmbH ein kleiner Viertakt-Motor zur Verfügung gestellt. Das IFZN hat einen Prüfstand für den Motor aufgebaut. Da an dem fernöstlichen Motorfabrikat jedoch einige Anbauteile fehlten, hat sich die Grundmotorvermessung verzögert. Zur Lösung des Problems hat die Firma sachs ein komplettes Motorrad mit 125 ccm Motor beschafft und an das IFZN geliefert. Der Kleinmotorprüfstand wurde vom IFZN für diesen Motor angepasst. Es wurden erhebliche Aufwände für die Prüfstandssteuerung und die Sensorik am Prüfstand erbracht. Unglücklicherweise kam es an dem Motor zu einem Ausfall, da die Verbindungsstange zum Ein-/Auslassventil abbrach. Der komplette Motor musste ausgetauscht werden, was zu weiteren Verzögerungen führte. Am Prüfstandaufbau mussten weitere Änderungen vorgenommen werden.

Da die genehmigten Fördermittel der FH Nürnberg Ende Februar 2008 aufgebraucht waren, wichtige Messungen zum Vergleich des gesteuerten mit einem ungesteuerten Vergaser und zur Optimierung des Kennfeldes aber noch gar nicht angegangen worden waren, wurden ebenfalls eine Verlängerung und eine Aufstockung beantragt.

Dem Verlängerungs- und Aufstockungsantrag wurde durch die DBU stattgegeben. Im Rahmen der Aufstockung wurden die folgenden Entwicklungsarbeiten durchgeführt:

Firma BING (AP = Arbeitspaket):

- Im Rahmen von AP 9: „Aufbau und Montage von Prototypen“ wurde ein weiteres neues Vergasergehäuse entwickelt. Für Prototypen wurden extern neue Gussteile beauftragt, die bei BING fertig bearbeitet und montiert wurden.
- Für AP 10: „Implementierung Magnetventilsteuerung“ musste die Steuerung auf den neuen Vergaser, der gemäß den Versuchsergebnissen weiterentwickelt worden, angepasst werden. Das Magnetventil wurde in seiner Leistungsfähigkeit optimiert und verkleinert.
- Für AP 11: „Messung Durchflussverhalten Vergaser“ fielen zusätzliche Aufwände für gemeinsame Messungen mit dem IFZN auf dem Prüfstand an.

- Zur Messung des Winkels der Drosselklappe wurde ein Potentiometer eingebaut, dessen Reibung im Regler zu Problemen führte. Im Rahmen von AP 13: „Konstruktive Optimierung“ wurde es durch einen berührungslos messenden Hall-Sensor ersetzt, der unter der Drosselklappe fixiert wurde.

IFZN:

- Vermessung des Testmotors mit elektronisch gesteuertem Vergaser (Motorkennfeld, Lambda-Steuerung, Abgaskomponenten, Kraftstoffverbrauch)
- Vermessung des elektronisch gesteuerten Vergasers und Erstellung eines Kennfeldes (Lambda-Steuerung, Abgaskomponenten, Kraftstoffverbrauch)
- Vergleich der Systeme

Im ursprünglichen Antrag war noch die Ermittlung und Optimierung eines 3D-Kennfeldes vorgesehen, das für die Vergasersteuerung die Abhängigkeit der Kraftstoffzufuhr als Funktion von Drehzahl und Drosselklappenstellung angibt. Durch die deutlich umfangreicher ausgefallenen Aufwände für die anderen Arbeitspakete konnte dieses 3D-Kennfeld nicht mehr realisiert werden. Allerdings wurde eine Steuerung der Schließdauer des Magnetventils in Abhängigkeit der Last gemäß Tabelle 2 für eine Drehzahl von 5000 U/min vorgenommen, mit der ein optimales Luft-Kraftstoffgemisch von $\lambda \approx 1$ eingestellt wurde.

3.4 Ausführliche ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse

3.4.1 Ökologische Bewertung

Im Vorhaben wurde der Betrieb eines Kleinmotorrad-Motors der Firma LIFAN mit seinem Originalschiebervergaser (Fabrikat KEIHIN) mit dem Vorhabensergebnis in Form des gesteuerten Vergasers (EFC-Modul als Klappenvergaser) verglichen. Die Ergebnisse der Messungen, die auf dem Prüfstand des IFZN durchgeführt wurden, zeigen eine Kraftstoffersparnis (spezifischer Verbrauch pro kWh) von 15,9% bei der gewählten Motordrehzahl von 5000 U/min sowie eine deutliche Reduzierung der HC- und CO-Emissionen.

Die BING GmbH geht davon aus, nach dem erfolgreichen Abschluss des Vorhabens und der Serienumsetzung des EFC-Moduls in drei bis vier Jahren nach der Markteinführung mindestens eine Million gesteuerte Vergaser verkaufen zu können. Dies betrifft zum einen kleinere Motorräder und Motorroller mit 125 bis 200 ccm Hubraum (EFC-Modul als Schiebervergaser) und zum anderen eher stationär betriebene Motoren, wie Rasenmäher, Motorsägen, Laubblasegeräte, Häcksler oder Rasentrimmer (EFC-Modul als Klappenvergaser). Legt man eine Stückzahl von etwa einer Million gesteuerter Vergaser zugrunde, kann die in Tabelle 3 gezeigte quantitative Umweltentlastung als mittelfristiges Ergebnis des Vorhabens abgeschätzt werden:

	Benzinmotoren mit konventionellen Vergasern	Benzinmotoren mit gesteuerten Vergasern
1) Stückzahlen von Vergasern für Motorräder/-roller innerhalb von 3-4 Jahren nach der Markteinführung	750.000 Stück	750.000 Stück
Motorgröße	125 – 200 ccm	125 – 200 ccm
Verbrauch pro 100 km	Ca. 3,5 l	Ca. 3,0 l
Jährliche Kilometerleistung	Ca. 8.000 km	Ca. 8.000 km
Verbrauch pro Motor innerhalb von 3-4 a	980 l	840 l
Gesamtverbrauch aller betrachteten Motoren innerhalb von 3-4 Jahren	735.000.000 l	630.000.000 l
Energieinhalt des Gesamtverbrauchs (Heizwert Benzin: 42 MJ/kg, Dichte 0,78 kg/l)	6.689 GWh	5.733 GWh
Ausstoß des Treibhausgases CO ₂ (Pro kWh thermisch erzeugter Energie aus Erdöl werden 0,270 kg CO ₂ erzeugt.)	1.806.030 Tonnen CO ₂	1.547.910 Tonnen CO ₂
2) Stückzahlen von Vergasern für stationäre Motoren innerhalb von 3-4 Jahren nach der Markteinführung	250.000 Stück	250.000 Stück
Motorleistung	2 – 6 PS	2 – 6 PS
Verbrauch pro Stunde	Ca. 1,2 l	Ca. 1,0 l
Jährliche Betriebsdauer	Ca. 25 h	Ca. 25 h
Verbrauch pro Motor innerhalb von 3-4 a	105 l	88 l
Gesamtverbrauch aller betrachteten Motoren innerhalb von 3-4 Jahren	26.250.000 l	21.875.000 l
Energieinhalt des Gesamtverbrauchs (Heizwert Benzin: 42 MJ/kg, Dichte 0,78 kg/l)	239 GWh	199 GWh
Ausstoß des Treibhausgases CO ₂ (Pro kWh thermisch erzeugter Energie aus Erdöl werden 0,270 kg CO ₂ erzeugt.)	64.530 Tonnen CO ₂	53.730 Tonnen CO ₂
Gesamte Benzineinsparung durch gesteuerten Vergaser		109.375.000 l innerhalb von 3-4 Jahren
Gesamte Verminderung CO ₂ -Ausstoß		268.920 Tonnen CO ₂ innerhalb von 3-4 Jahren

Tabelle 3: Geschätzte Energieeinsparung bei erfolgreicher Serienumsetzung durch von der BING GmbH verkaufte gesteuerte Vergaser innerhalb von 3-4 Jahren nach Markteinführung

Aus Tabelle 3 geht hervor, dass durch den Einsatz gesteuerter Vergaser ca. 109 Mio. Liter Benzin innerhalb eines überschaubaren Zeitraumes von drei bis vier Jahren nach der Markteinführung eingespart werden könnten, entsprechend einer Verminderung des CO₂-Ausstoßes um ca. 270.000 Tonnen.

3.4.2 Technologische Bewertung

Im Vergleich zu einem konventionellen Vergaser, der über ein Leerlauf- und ein davon getrenntes Hauptdüsensystem verfügt, werden im vorliegenden Fall diese beiden Systeme aus Gründen der Steuerbarkeit kombiniert. Erst ab der Stelle, an der die über das Magnetventil gesteuerte Nadel den Kraftstoffzufluss beeinflusst, trennen sich die beiden Systeme. Zur Realisierung des voll gesteuerten Vergasers sind daher die folgenden neuen Steuerungskomponenten erforderlich:

- 1) Das Magnetventil zur Ansteuerung der Nadel in Kombination mit dem Nadel/Nadelsitz-System.
- 2) Ein Rückschlagventil für das Leerlaufsystem, das bei Vollast oder höherer Teillast ein Ansaugen von Luft aus dem Leerlaufsystem unterbindet.
- 3) Ein Rückschlagventil für den Hauptdüsenaustritt, damit aufgrund von Druckunterschieden vor und hinter der Drosselklappe im Leerlauf und unteren Teillastbereich ebenfalls keine Falschlucht in den Motor gelangt.

Aus dieser Anordnung resultierten zunächst Schwingungen, da das Rückschlagventil für den Hauptdüsenaustritt ursprünglich nur ein loses Plättchen war. Es wurde durch das Takten der Nadel zu Schwingungen angeregt, was zu Druckschwankungen im Vergaser führte. Das Plättchen wurde mittlerweile durch eine einseitig eingespannte Klappe aus einem dünneren Material ersetzt, die weniger zu Schwingungen neigt. Zur Erzielung der Serienreife des gesteuerten Vergasers müssen wirksame Maßnahmen zur Unterdrückung von Schwingungsneigungen getroffen werden.

Zur technologischen Bewertung des neuen EFC-Verfahrens ist festzuhalten, dass das Prinzip mit der Nadeltaktung der Kraftstoffzufuhr funktioniert. Durch verschieden lange Schließzeiten des Magnetventils für unterschiedliche Lastbereiche gelingt es, den Kraftstoffzufluss zum Motor so zu beeinflussen, dass ein Mischungsverhältnis von $\lambda \approx 1$ erreicht wird. Dort liegen günstige Umsetzungsverhältnisse für HC und CO vor und der Motor erreicht ein hohes Drehmoment. Dies führt zu einer Verminderung von HC- bzw. CO-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs. In der Praxis wird man im Vollastbereich den Lambda-Wert auf $\lambda = 0,9$ etwas abfallen lassen, um im fetteren Betrieb eine höhere Leistung und eine bessere Innenkühlung des Motors zu erreichen.

In den Versuchen kam ein Klappenvergaser für die elektronische Steuerung zum Einsatz. Ursprünglich war der Klappenvergaser für den Stationärbetrieb geplant, z.B. von Rasenmähern. Im Vorhaben wurde er aber aus Gründen des einfacheren Aufbaus auch mit dem originalen Schiebervergaser des Kleinmotorrads verglichen. Für den praktischen Einsatz in Motorrädern ist jedoch geplant, mit der Steuerung auf Schiebervergaser überzugehen, die beim Beschleunigen bessere Ergebnisse erzielen. Der gesteuerte Vergaser ist dafür noch umzubauen.

3.4.3 Ökonomische Bewertung

Der neue Vergaser besitzt gegenüber konventionellen Saugrohr-Vergasern von Viertakt-Kleinmotoren deutlich bessere Verbrauchs- und Emissionswerte, wenngleich er die Werte von Einspritzern nicht ganz erreichen dürfte. Allerdings besitzt der gesteuerte Vergaser gegenüber einem Einspritzer wesentliche Kostenvorteile, wie in Tabelle 4 gezeigt.

Kosten der Komponenten in EUR	Einspritzer	Gesteuerter Vergaser (einfachste Ausführung)
Einspritzdüse	10,00 EUR	
Saugrohr-Drucksensor	8,00 EUR	
Drosselklappe	15,00 EUR	
Sensor Drosselklappenstellung	6,00 EUR	
Benzinpumpe (5 bar) incl. Drucksensor und Regelung	35,00 EUR	Ansaugen des Kraftstoffs durch Unterdruck
Steuergerät	30,00 EUR	
Aktuator für Vergasersteuerung		8,00 EUR
Zusätzliche Steuerelektronik		10,00 EUR
Sensor Drosselklappenstellung		6,00 EUR
Nadel, Nadelsitz		5,00 EUR
Vergaser		20,00 EUR
Summe der Kosten:	104,00 EUR	49,00 EUR

Tabelle 4: Kostenvorteile des neuen gesteuerten Vergasers gegenüber Einspritzern

3.5 Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabens-ergebnisse

Die Firma BING plant die Vorhabensergebnisse in Form des gesteuerten Vergasers (EFC-System) für Viertakt-Kleinmotoren sowohl für mobile Anwendungen wie Mopeds, Motorroller und Kleinmotorräder, als auch für mehr oder weniger stationär betriebene Motoren wie Rasenmäher, Laubblasegeräte, Häcksler oder Motorsägen, bei denen Ottomotoren eingesetzt werden, zu vermarkten. Der gesteuerte Vergaser ist für wichtige Kunden der BING GmbH von Interesse, wie z.B. Piaggio, Ducati und Peugeot als Zweiradhersteller, Solo als Hersteller von Rasenmähern, die amerikanischen Firmen Kohler und Briggs&Stratton als Motorenhersteller für Gartengeräte und Stihl als Hersteller von Kettensägen. Aus Kostengründen wollen

gerade auch italienische Hersteller von Motorrollern an Vergaseranlagen festhalten, so dass Einspritzerlösungen wie im Automotive-Bereich entfallen.

Zu den genannten Firmen bestehen gute Kontakte, so dass die Firma BING nach dem kompletten Abschluss der Entwicklungsarbeiten aufgrund des Einsparpotenzials von Kraftstoff und Emissionen sofort ins Geschäft kommen kann. Einige der Kunden wurden bereits von den Ergebnissen unterrichtet und zeigten großes Interesse. Weitere Interessenten sollen durch Fachveröffentlichungen in der Motortechnischen Zeitschrift MTZ oder auf der SAE-Konferenz (Society of Automotive Engineers) angesprochen werden. Der gesteuerte Vergaser soll als EFC-Modul in etwa einem Jahr auf den Markt gebracht werden.

Zunächst sollen jedoch noch wichtige Versuche bei einer Partnerfirma zum Test der Serientauglichkeit des EFC-Systems abgewartet werden. Mit diesem Partner aus dem Bereich der Zündtechnik ist geplant, zusammen ein kombiniertes Modul für Zündungs- und Vergasersteuerung für Stationärmotoren herauszubringen. Für Zweirad-Anwendungen soll der derzeitige gesteuerte Klappenvergaser noch auf einen Schiebervergaser umgebaut werden, um ein besseres dynamisches Verhalten zu erreichen. Während der Markt für motorisierte Zweiräder in Europa eher stagniert, sieht die Firma BING erhebliche Wachstumschancen in Osteuropa und Asien für eine verbrauchsarme Gemischaufbereitung für Kleinmotoren.

Die Vorhabensergebnisse in Form des gesteuerten Vergaserprinzips sind durch eine Patentanmeldung der BING Power Systems GmbH vom Dezember 2005 mit der Bezeichnung „Vergaser für einen Verbrennungsmotor sowie Verfahren zur gesteuerten Kraftstoffzufuhr“ geschützt. Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine konstruktiv einfache und zuverlässige Steuerung der Kraftstoffzufuhr in den Mischraum eines Vergasers zu ermöglichen.

Unlängst hat die Firma Sachs unter Mitwirkung eines iranischen Mitarbeiters im Iran eine Niederlassung in Teheran aufgebaut. Diese Niederlassung ist eine wichtige Basis, um gesteuerte Vergaser in einem großen Markt für Kleinmotorräder anbieten zu können. Denn der Firma Sachs liegt eine Anfrage der Regierung des Irans über eine Umrüstung von Motorrädern auf eine kraftstoffsparendere Betriebsweise vor. Bisher werden Motorräder im Iran und anderen vorderasiatischen Ländern hauptsächlich aus China bezogen. Die Anfrage zielt darauf ab, die Motoren von gleichermaßen neuen und gebrauchten Motorrädern mit einer effizienteren Gemischaufbereitung umzurüsten. Im Iran wie in vielen anderen asiatischen Ländern gilt das Motorrad aufgrund seines günstigen Anschaffungspreises als Hauptfortbewegungsmittel. Sobald die Entwicklungsarbeiten komplett abgesichert sind, werden die Firmen BING und Sachs die Anfrage des Irans bedienen, die ein Volumen zwischen 100.000 und 300.000 Vergasern umfassen würde.

Die Vorhabensergebnisse werden am Institut für Fahrzeugtechnik der Fachhochschule Nürnberg für Forschung und Lehre benützt. Beispielsweise bietet es sich an, mit dem Prüfstands Aufbau Studien- und Diplomarbeiten durchzuführen.

4 Fazit

Mit dem Vorhaben wurde das Prinzip der Steuerbarkeit der Gemischzufuhr für Viertakt-Kleinmotoren mit einer getakteten Düse auf Basis von Signalen aus der Zündelektronik nachgewiesen, so dass auch ohne Verwendung einer Lambda-Sonde ein Motorbetrieb mit $\lambda \approx 1$ für annähernd alle Lastfälle eingestellt werden kann. Es ist ein effizienter Kompromiss zwischen Saugrohr-Vergaser und Einspritzer entstanden, der in puncto Kraftstoffverbrauch und Emissionen bessere Werte erzielt als der Saugrohr-Vergaser, aber kostengünstiger angeboten werden kann als der technisch aufwendigere Einspritzer. Mit dem neuen System werden für kleine Viertakt-Motoren auch in Zukunft verschärfte Abgasnormen eingehalten werden können.

Im Hinblick auf motorisierte Zweiräder ist der bisher betrachtete Klappenvergaser aus Gründen der Motordynamik nicht optimal geeignet. Der zum Vergleich herangezogene Originalvergaser des Kleinmotorrades ist ein Schiebervergaser. Aus Gründen des Aufwandes und letztlich im Sinne einer kürzeren Entwicklungsdauer wurde im Projekt die einfacher realisierbare Lösung eines Klappenvergasers verfolgt. Aufgrund der positiven Ergebnisse soll die Vergasersteuerung jetzt von Klappen- auf Schiebervergaser angepasst werden, bevor das neue Verfahren an den Markt gebracht wird. Zur Erzielung der Serienreife des gesteuerten Vergasers müssen noch wirksame Maßnahmen zur Unterdrückung von Schwingungsneigungen an den steuerungstechnischen Komponenten getroffen werden.

Als Perspektive lässt sich angeben, dass das Prinzip des gesteuerten Vergasers grundsätzlich auch für Zweitakt-Motoren angewendet werden kann. Allerdings müsste das Magnetventil auf die doppelte Hubwechselfrequenz ausgelegt werden, denn während beim Viertakter z.B. bei 6000 U/min 3000 Ventilhübe pro Minute vorkommen, wären es beim Zweitakter doppelt so viele Ventilbewegungen.

Literaturverzeichnis

- [UBA] <http://www.umweltbundesamt.de/verkehr/emissionen/schadstoffe/smmug/emiklmotor.htm>
(01.09.2006)
- [Bosch] Bosch Kraftfahrttechnisches Taschenbuch
- [MLexikon] Motorlexikon.de (Drei-Wege-Katalysator)

Anhang

Messergebnisse des IFZN der Fachhochschule Nürnberg zu den untersuchten Vergasern:

1. Originalvergaser: Anhang_Keihin-Vergaser.pdf
2. Ungeregelter BING Vergaser: Anhang_Bing-Vergaser_Grundeinstellung.pdf
3. Geregelter BING Vergaser: Anhang_Bing-Vergaser.pdf