

1 Einleitung

Der Ausstoß an Kohlendioxid (CO₂), wie er bei jeder Verbrennung stattfindet, wird als Hauptgrund der globalen Erwärmung gesehen. Im Rahmen des Kyoto-Abkommens wurde eine Reduktion der CO₂-Emissionen von Industrieländern bis zum Jahre 2008 beschlossen. Da der Verkehr mit einem Anteil von 16% (Europa, Stand 1990) zu den Gesamt-CO₂-Emissionen beiträgt und die Tendenz infolge des wachsenden Verkehrsaufkommens steigend ist, hat sich die Automobilindustrie dazu verpflichtet, die Flotten-CO₂-Emissionen innerhalb der europäischen Union bis zum Jahre 2008 auf 140 g/km zu senken und eine weitere Reduktion bis zum Jahre 2012 auf 120 g/km angedacht [1].

Um dies verwirklichen zu können, ist die Einführung effizienterer Motortechnologien erforderlich.

Auf fahrzeugseitige Maßnahmen zur Senkung der CO₂-Emissionen, wie etwa Gewichtsreduzierung durch Leichtbauweise mit Aluminium und Kohlefaserwerkstoffen und die Minimierung des Luft- und Rollwiderstandes, wird hier nicht eingegangen, da sie nicht Bestandteil dieser Arbeit sein sollen, obwohl diese Maßnahmen ein beachtliches Potential bieten. So konnte zum Beispiel der Automobilhersteller Audi mit der Aluminium-Karosserie die Fahrzeugmasse um 15% reduzieren [2].

Beim konventionellen Ottomotor mit Saugrohreinspritzung ist die Effizienz, der Wirkungsgrad, im Teillastbereich besonders schlecht, da hier starke Drosselverluste durch das Ansaugen des Kraftstoff-Luft-Gemisches bei teilgeöffneter Drosselklappe auftreten.

Als Maßnahmen zur Senkung der Drosselverluste sind der variable Ventiltrieb, Aufladung und die Benzindirekteinspritzung, sowie Kombinationen dieser Techniken bekannt.

Als Einzelmaßnahme bietet die Benzindirekteinspritzung das größte Potential an Verbrauchseinsparung von bis zu 20%, so dass sich viele Automobilhersteller der Entwicklung dieser Technologie zur Serienreife widmen.

Die Ford-Werke GmbH hat bereits im Jahre 2001 einen Pkw mit dieser Technologie bis zur Serienreife entwickelt. Hierbei handelt es sich um einen 3-Zylinder Motor mit 1.125 l Hubraum.

Ziel dieser Arbeit ist es, diese neue Antriebstechnologie inklusive des Abgassystems in Bezug auf Dauerhaltbarkeit, Abgasemissionen, Kraftstoffverbrauch und Verschleiß zu untersuchen.

Es soll geklärt werden, ob hier – gegenüber konventionellen Ottomotoren - zusätzliche Anforderungen an die Systemkomponenten in Hinblick auf zulässige Toleranzen erforderlich sind.

Hierzu wurde die Großserientoleranz von mehreren motorrelevanten Parametern simuliert, basierend auf bestehenden Fertigungstoleranzen, welche bei vergleichbaren Ottomotoren mit Saugrohreinspritzung angewandt werden. Es soll geklärt werden, ob diese hier übernommen werden können, ohne eine erhöhte Störanfälligkeit zu erhalten. Zeigt sich keine erhöhte Störanfälligkeit im Vergleich zu konventionellen Ottomotoren, kann das System als dauerhaftbar und serientauglich bezeichnet werden.

Um möglichst viele relevante Einflussgrößen und deren Wechselwirkungen unter geringem Testaufwand untersuchen zu können, wurde die Methode der statistischen Versuchsplanung angewandt, bei der die Einflussgrößen systematisch in einem Versuchsplan zugeordnet werden. 32 Fahrzeuge, welche die einzelnen Versuche darstellen, wurden für diese Untersuchung aufgebaut und betrieben. Parallel liefen 15 weitere Fahrzeuge ohne Verstellfaktoren als Referenzfahrzeuge.

2 Grundlagen der Benzindirekteinspritzung

Gemäss der Selbstverpflichtung des ACEA hat die Automobilindustrie die Aufgabe, von 1995 bis zum Jahre 2008 den Durchschnittsverbrauch ihrer Gesamtfahrzeugflotte um 25% zu reduzieren. Der Mittelwert aller neuzugelassenen Fahrzeuge soll dann in Westeuropa bei 140 g/km liegen, was beim Ottomotor einem Verbrauch von ca. 5.8 l/100km entspricht [3].

Neben fahrzeugseitigen Optimierungen bezüglich Luft-, Rollwiderstand und Gewicht liegt das Hauptpotential in der Steigerung des effektiven Wirkungsgrades des Ottomotors.

Dieser setzt sich aus dem Produkt des indizierten (η_{ind}) und des mechanischen Wirkungsgrades (η_m) zusammen [4]:

$$\eta_e = \eta_{ind} \cdot \eta_m \quad (\text{Gleichung 1})$$

Der mechanische Wirkungsgrad wird maßgeblich durch die Reibungskräfte an Kolben und in den Lagern bestimmt, welche möglichst gering gehalten werden sollten.

Im weiteren Verlauf wird nur noch auf den indizierten Wirkungsgrad eingegangen, der den innermotorischen Verbrennungsprozess beschreibt.

Dieser lässt sich wie folgt darstellen:

$$\eta_{ind} = \eta_{Vollk} - \Delta\eta_u - \Delta\eta_{Verbr} - \Delta\eta_W - \Delta\eta_{LW} \quad (\text{Gleichung 2}) \quad [5, 6]$$

η_{ind} : indizierter Wirkungsgrad, η_{Vollk} : Wirkungsgrad des vollkommenen Motors (DIN 1940), $\Delta\eta_u$: Verlust durch unvollkommene Verbrennung, $\Delta\eta_{Verbr}$: Verbrennungsverlust (Gleichraumverbrennung), $\Delta\eta_W$: Wandwärmeverlust, $\Delta\eta_{LW}$: Ladungswechselverlust, Vernachlässigung der Leckage- und Strömungsverluste beim realen Motor

Der vollkommene Motor ist nach DIN 1940, Kapitel 3.1.3 wie folgt definiert [7]:

- reine Ladung ohne Restgas
- gleiches Luftverhältnis wie der wirkliche Motor
- vollständige Verbrennung
- Verbrennungsablauf nach vorgegebenem Gesetz (Gleichraum-, Gleichdruckverbrennung)

- wärmedichte Wandungen
- keine Strömungs- und Leckageverluste
- arbeitet ohne Ladungswechsel
- Die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazitäten der idealen Gase wird berücksichtigt

Abbildung 1 zeigt das p-V-Diagramm des vollkommenen Ottomotors im Teillastbetrieb (abweichend von der Definition mit Restgas) im Vergleich zum realen Prozess.

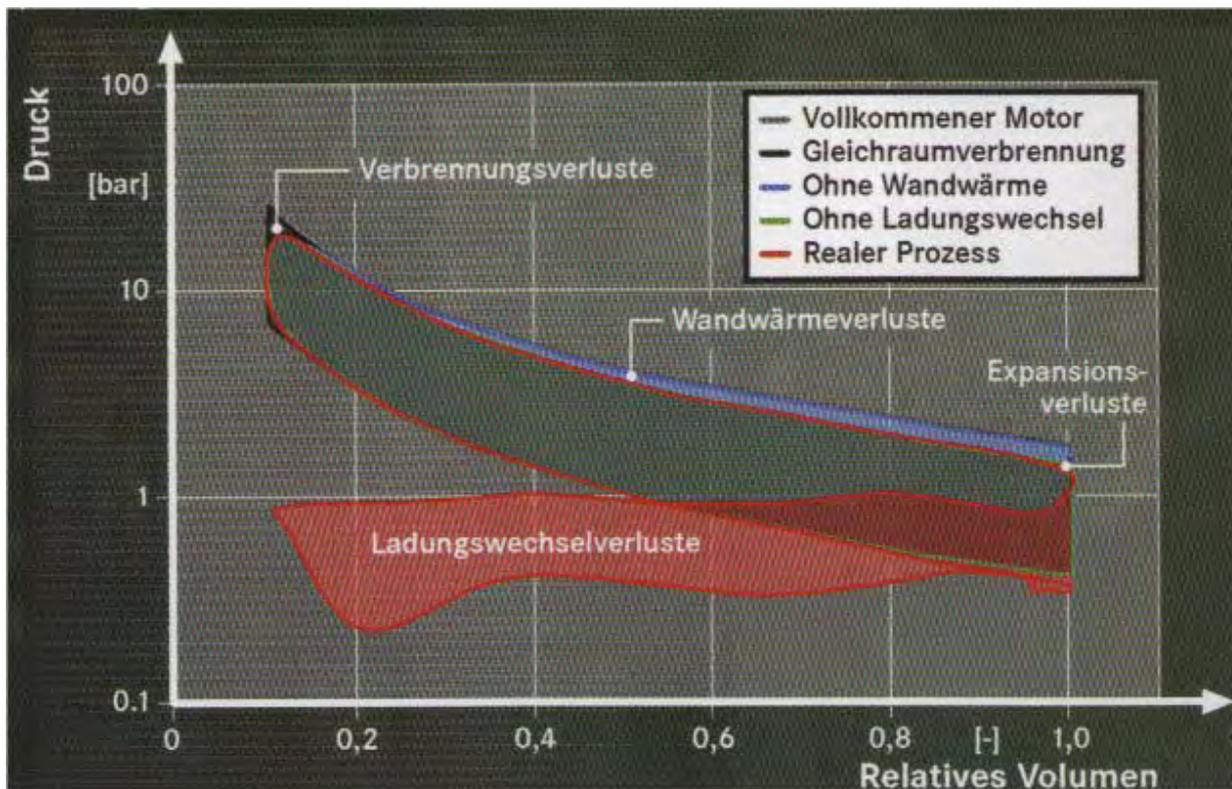


Abbildung 1: p-V-Diagramm, Vergleich vollkommener Motor zu Realprozess [6]

Das größte Optimierungspotential liegt in der Minimierung der Ladungswechsel- und der Wandwärmeverluste.

Möglichkeiten zur direkten Optimierung des indizierten Wirkungsgrades bieten folgende Technologien:

- Variable Ventilsteuerung
- Benzindirekteinspritzung (unterschiedliche Verfahren) mit Schichtladung
- Homogene Selbstzündung
- Homogener Magerbetrieb mit Abgasrückführung

Variable Ventilsteuerung, homogene Selbstzündung und homogener Magerbetrieb ($\lambda < 1.3$) liefern nur einen Beitrag zur Reduzierung der Ladungswechselverluste. Ihr Vorteil gegenüber der Benzindirekteinspritzung mit sehr magerem Schichtbetrieb liegt aber darin, dass sie zur Abgasnachbehandlung nur einen konventionellen 3-Wege-Katalysator benötigen.

Zu erwähnen sind auch noch andere Maßnahmen zur Verbesserung des Wirkungsgrades, wie das Downsizing oder die Zylinderabschaltung. Diese erreichen die Verbesserung allerdings über die Verschiebung des Betriebspunktes in einen effektiveren Bereich.

Abbildung 2 zeigt eine Gegenüberstellung der p-V-Diagramme eines konventionellen Ottomotors mit Saugrohreinspritzung und der Benzindirekteinspritzung im Teillastbetrieb. Deutlich zu erkennen sind die Reduzierung der Ladungswechselverluste und die geringeren Wandwärmeverluste, welche sich durch die zentrale Verbrennung des Kraftstoff-Luftgemisches in der Brennraummitte ergeben.

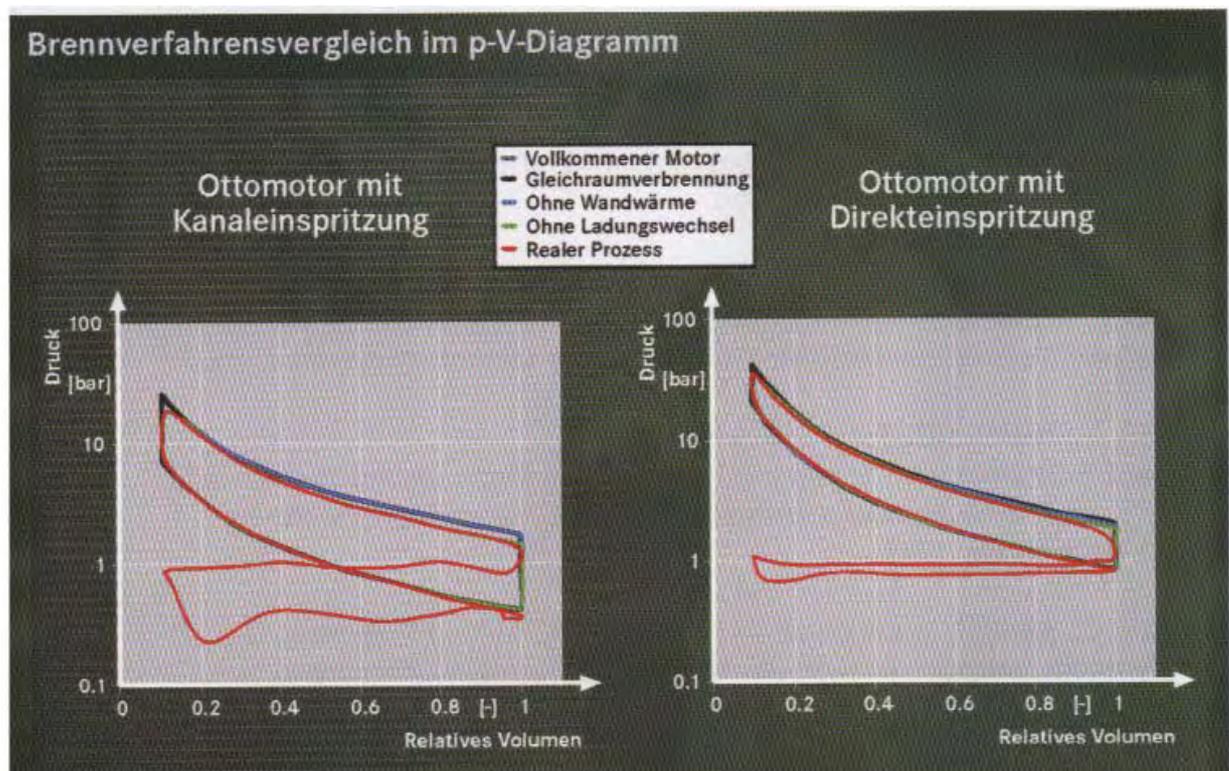


Abbildung 2: Brennverfahrenvergleich im p-V-Diagramm [6]

Die Hauptmerkmale der Benzindirekteinspritzung lassen sich wie folgt beschreiben:

- Hochdruck-Einspritzventil liegt direkt im Brennraum
- Hochdruckeinspritzsystem mit bis zu 200 bar

- Zündenergie im Schichtbetrieb bis zu 100 mJ (bei konventioneller Saugrohreinspritzung < 30 mJ)
- Ansaugung von reiner Luft
- Bildung des Kraftstoff-Luft-Gemisches erst im Brennraum
- Schichtladung im Teillastbetrieb $\lambda \gg 1$, im Leerlauf bis zu $\lambda = 7$
- Lastregelung im Teillastbetrieb über Kraftstoffmenge bei konstanter Ansaugluftmenge => Qualitätsregelung (wie beim Dieselmotor)

Das System der Benzindirekteinspritzung erfordert bei der Optimierung einen erheblich höheren Aufwand als die konventionelle Kanaleinspritzung [8-11].

Auf die unterschiedlichen Betriebsarten bei der Benzindirekteinspritzung wird im späteren Verlauf dieses Kapitels ausführlich eingegangen. Unterscheidet man bei der Kanaleinspritzung zwischen den beiden Betriebsarten Kaltstart, zum Katalysator-Aufheizen, und Homogenbetrieb, so gibt es bei der Benzindirekteinspritzung folgende Betriebsarten, die bei der Bedatung der Motorsteuerung berücksichtigt werden müssen [8, 11]:

- Homogenbetrieb
- Kaltstartphase zur Katalysatoraufheizung
- Schichtbetrieb
- Umschaltvorgang zwischen Homogen- und Schichtbetrieb ohne spürbare Drehmomentdifferenz, bei hoher Umschaltgeschwindigkeit und geringen Wirkungsgradverlusten während der Umschaltung
- Regeneration des Speicherkatalysators (Reduzierung der Stickoxide durch Betrieb mit $\lambda < 1$)
- Entschwefelung des Speicherkatalysators (hohe Temperatur im NO_x -Katalysator)

Auch die Anzahl der Stellparameter ist bei der Benzindirekteinspritzung deutlich höher. Beschränken sich beim konventionellen kanaleingespritzten Saugmotor die Verstellmöglichkeiten zur Optimierung des Verbrauches und der Emissionen lediglich auf Einspritz- und Zündzeitpunkt, so kommen bei der Benzindirekteinspritzung noch folgende Verstellparameter hinzu [12]:

- Abgasrückführrate
- Kraftstoffdruck
- Saugrohrdruck

- Mehrfacheinspritzung mit den Parametern Anzahl, Mengenverteilung und Zeitabstände
- Stellung der Ladungsbewegungsklappe

Im Weiteren werden die beiden Hauptbetriebspunkte, Schicht- und Homogenbetrieb, beschrieben, da die anderen Betriebsarten nur Übergangs- oder Kurzzeitzustände sind.

Abbildung 3 zeigt sehr anschaulich über die Fahrpedalstellung den Schicht- und Homogenbetrieb mit den Unterschieden in der Strategie.

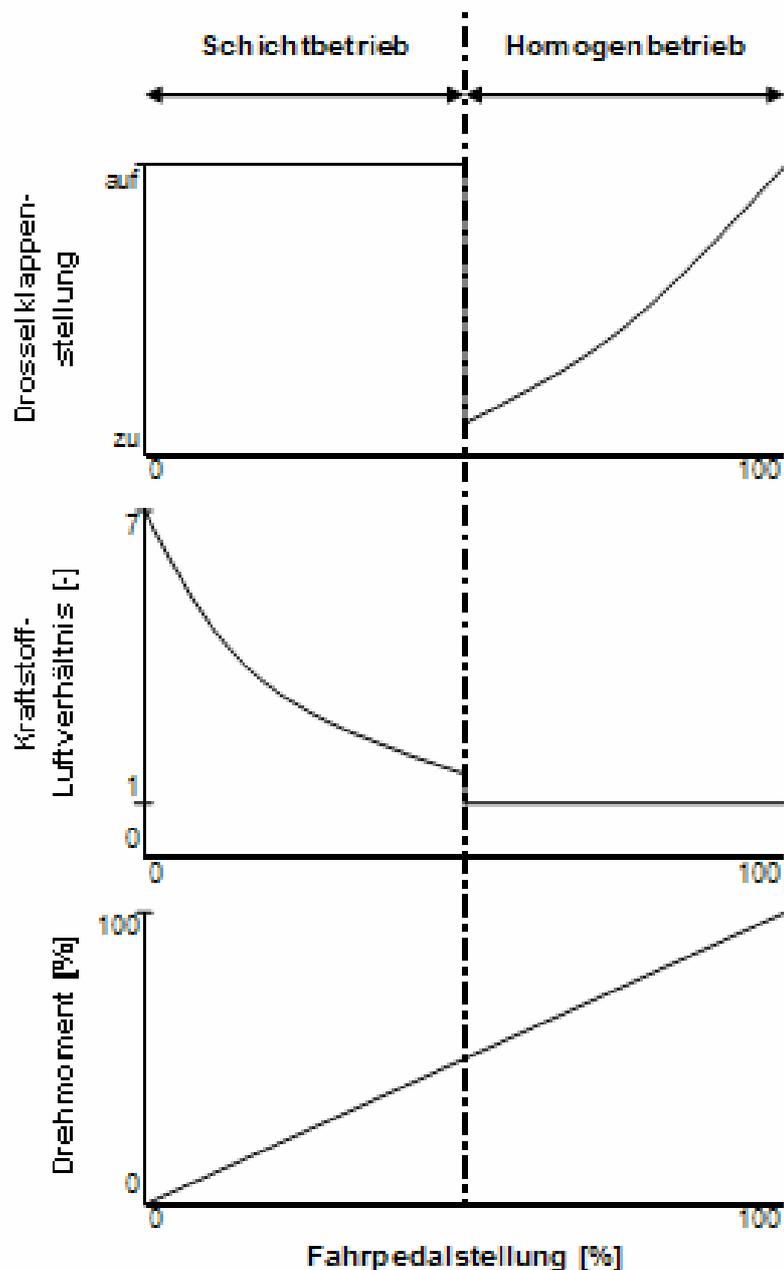
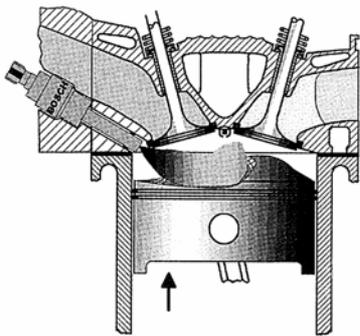


Abbildung 3: Drehmoment, Luftverhältnis und Drosselklappenstellung in Abhängigkeit der Fahrpedalstellung [13]

1. Schichtbetrieb

Bei der Benzindirekteinspritzung ergibt sich der größte Anteil des Verbrauchsvorteils bei häufigem Teillastbetrieb, weil dort die Luft ungedrosselt angesaugt und die Last über die Kraftstoffmasse reguliert wird. Es ist wichtig, dass zum Zündzeitpunkt immer ein zündfähiges Gemisch an der Zündkerze vorliegt. Zu den Brennraumwänden hin nimmt das Kraftstoff-Luftverhältnis bis zu Werten $\lambda \gg 1$ zu, so dass es sich um ein inhomogenes Gesamtgemisch handelt. Diese Bereiche werden durch die hohe Energie der Flammenfront entzündet. Die isolierende Wirkung der Luft reduziert die Wandwärmeverluste. Das absolute Kraftstoff-Luftverhältnis beträgt im Teillastbetrieb bis zu $\lambda=7$.

Dieser als Schichtbetrieb bezeichnete Verbrennungszustand wird dadurch erreicht, dass die Kraftstoffeinspritzung erst in den Kompressionstakt erfolgt. So wird durch die sehr kurze Zeitspanne zwischen Einspritzbeginn und Zündung eine Gemischhomogenisierung unterbunden [14].



Schichtbetrieb:
Kraftstoffeinspritzung in
den Kompressionstakt

Abbildung 4: Schichtbetrieb [14]

Bedingt durch den Luftüberschuss und die hohen Temperaturgradienten bei der Verbrennung sind im Schichtbetrieb die NO_x -Rohemissionen sehr hoch, können aber durch einen 3-Wege-Katalysator, welcher beim stöchiometrischen Gemisch eine Konvertierungsrate von 95% besitzt, nicht hinreichend reduziert werden, da dieser nur im stöchiometrischen Bereich optimal arbeitet. Um diese zu reduzieren, ist es nötig, Abgas in den Brennraum zurückzuführen, wobei sich hier die gute Abgasverträglichkeit der Benzindirekteinspritzung positiv auswirkt [8]. Hierdurch werden die Verbrennungstemperatur und der Spitzendruck gesenkt und die Druckkurve verbreitert sich. Die Verbrennung wird verschleppt. Durch die geringere Verbrennungstemperatur und den reduzierten Sauerstoffgehalt im Brennraum sinken die NO_x -

Rohemissionen um 80% und liegen damit unter den Rohemissionswerten konventioneller Ottomotoren mit Saugrohreinspritzung, ohne eine bedeutende Verschlechterung der CO- und HC-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs [15]. Da dies alleine aber nicht zur Erfüllung bestehender Grenzwerte der Schadstoffstufe Euro 4 ausreicht (0.08g/km), ist zusätzlich ein NO_x-Speicherkatalysator notwendig.

Das Abgas kann intern oder extern zurückgeführt werden.

Interne Abgasrückführung:

Bei der internen Abgasrückführung (AGR) wird das Abgas durch ein Verstellen der Auslassnockenwelle im Brennraum gehalten. Dies erfordert eine variable Auslassnockenwellensteuerung. Die Vorteile der internen Abgasrückführung liegen in ihrer sehr schnellen Steuerbarkeit, und dass sie bei Motoren mit verstellbarer Auslassnockenwelle ohne Mehrkosten über die Motorkalibrierung eingesetzt werden kann. Allerdings ist das Abgas bei der internen Rückführung sehr heiß und besitzt somit nur eine geringe Dichte. Aus diesem Grund wird die maximale Verbrennungstemperatur nicht so stark gesenkt, wie bei der externen Abgasrückführung und als Folge daraus werden auch die Stickoxidemissionen schlechter reduziert. Das gegenüber der Saugrohreinspritzung erhöhte Verdichtungsverhältnis, die spezielle Kolbenbodengeometrie mit Mulde und Ventiltaschen begrenzen die Rückführrate an internem Abgas durch die eingeschränkte Möglichkeit der Ventilüberschneidung [16].

Die zur Einhaltung der Abgasnormen nötige Abgasrückführrate ist mit der alleinigen internen Rückführung nicht möglich.

Externe Abgasrückführung:

Bei der externen Abgasrückführung wird das Abgas zwischen Abgaskrümmern und 3-Wege-Katalysator entnommen, da hier der höchste Druck im Abgassystem herrscht, und in den Einlasskrümmer zurückgeführt. Dies hat den Vorteil, dass das Abgas relativ kühl ist und bei gleichem Volumen mehr Masse als bei der internen Abgasrückführung zurückgeführt werden kann. Zur weiteren Optimierung könnte man das zurückgeführte Abgas noch vor der Einführung in den Einlasskrümmer durch einen Kühlwasser-Abgasstrom-Wärmetauscher leiten, was aber aus Kosten-Nutzen-Gründen nicht getan wird.

Der Nachteil der externen Abgasrückführung liegt in der Trägheit des Systems. Bei einem spontanen Lastanstieg verzögert das im Ansaugsystem befindliche Abgas die