



Oliver Tremmel (Autor)

Potenziale variabler Einspritzsysteme für die Benzin-Direkteinspritzung



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/1806>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1 EINLEITUNG

Die Entwicklung von PKW-Motoren befindet sich im Spannungsfeld zwischen den Abgasvorschriften des Gesetzgebers - mit der Forderungen nach Einhaltung von Grenzwerten für Schadstoff-Emissionen - und der freiwilligen Selbstverpflichtung des Europäischen Verbandes der Automobilhersteller (ACEA) zur Begrenzung der durchschnittlichen CO₂-Emissionen im Flottenverbrauch. Mit Einführung der Euro 4 Norm im Jahr 2005 haben sich die Grenzwerte der Schadstoffkomponenten im Vergleich zur Euro 3 Norm aus dem Jahr 2000 ungefähr halbiert. Der Flottenverbrauch für PKW mit Benzin- und Dieselmotoren soll von 185 g CO₂/km im Jahr 1995 auf 140 g CO₂/km im Jahr 2008/2009 gesenkt werden. Dies entspricht einer Reduktion des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs von 7,9 l/100 km auf 5,8 l/100 km. Neben diesen Rahmenbedingungen motiviert die Automobilhersteller natürlich auch der Kundenwunsch nach geringen Betriebskosten, d.h. nach günstigem Verbrauch sowie Steuerbegünstigung bei Einhaltung der Abgasgesetze, die Entwicklung verbrauchsgünstiger Motoren mit geringen Schadstoff-Emissionen weiterhin voranzutreiben.

Die Technologie mit dem höchsten Potenzial zur Verbrauchsabsenkung stellt im Bereich der Ottomotoren die Benzin-Direkteinspritzung (BDE) und hierbei im Besonderen der geschichtete Betrieb mit strahlgeführtem Brennverfahren dar. Im Vergleich zur Saugrohreinspritzung führt die Benzin-Direkteinspritzung im Wesentlichen zu einer Wirkungsgradsteigerung durch die Nutzung der Verdampfungsenthalpie des Kraftstoffs zur Ladungskühlung, durch Entdrosselung, durch Ladungsschichtung und durch geringere Wandwärmeverluste.

Bei Motoren mit Benzin-Direkteinspritzung wird im Homogenbetrieb während des Saughubes eingespritzt. Die vom Motor angesaugte Luft wird gedrosselt, um die Last des Motors zu regeln (Quantitätsregelung). Im Schichtbetrieb hingegen wird in den Kompressionshub eingespritzt. Der Motor wird hierbei ungedrosselt betrieben und die Last wird nur über die eingespritzte Masse eingestellt (Qualitätsregelung). Bei den Schicht-Brennverfahren der ersten Generation wurde das Spray teilweise durch Wand- und teilweise durch Luftführung zu einem zündfähigen Gemisch aufbereitet und in den Bereich der Zündkerze transportiert. Beim strahlgeführten Brennverfahren hingegen muss aufgrund des geringen Abstandes zwischen Injektor und Zündkerze die Gemischaufbereitung und der Gemischtransport ausschließlich durch die Energie des Sprays umgesetzt werden. Dem Einspritzsystem und insbesondere der Einspritzdüse kommt daher bei diesem Brennverfahren eine besondere Bedeutung zu.

Zur Darstellung des strahlgeführten Brennverfahrens muss das Spray eine kompakte Gemischwolke erzeugen, deren zündfähiger Rand sich im Bereich des Zündkerzenspaltes befindet. Eine wichtige Voraussetzung hierfür ist, dass der Spraykegelwinkel unabhängig vom Einspritzzeitpunkt und den dabei vorherrschenden Druck- und Temperaturverhältnissen im Brennraum konstant gehalten wird. Durch den geringen Abstand zwischen Injektor und Zündkerze muss die Gemischbildung und somit auch die Einspritzung innerhalb eines kurzen Zeitraumes stattfinden. Zur Darstellung einer wirkungsgradoptimalen Lage des Verbrennungsschwerpunktes bei kurzer Einspritzzeit muss zu einem späten Zeitpunkt im

Kompressionshub eingespritzt werden. Um hierbei die Benetzung des Kolbens mit flüssigem Kraftstoff zu vermeiden, muss das Spray eine geringe axiale Penetration aufweisen.

Es werden momentan drei verschiedene Düsentypen in der Serienanwendung für PKW-Benzinmotoren mit Direkteinspritzung eingesetzt:

- Dralldüsen
- Mehrlochdüsen
- nach außen öffnende Ringspaltdüsen (A-Düsen)

Im Bereich der Benzin-Direkteinspritzung wurden A-Düsen speziell auf die Anforderungen des strahlgeführten Brennverfahrens hin entwickelt. Die besonderen Eigenschaften dieser Düsenart sind die hohe Einspritzrate und das gegendruckunabhängige, stabile Spraybild bei geringer axialer Penetration. Aus der hohen Einspritzrate resultiert eine hohe Verdampfungsrate und damit eine kurze, für das strahlgeführte Brennverfahren notwendige, Gemischbildungszeit. Durch die erforderliche piezo-aktuierte Steuerung des Nadelhubes, der, anders als bei Drall- und Mehrlochdüsen, direkt die Einspritzrate bestimmt, sind diese Düsen jedoch technisch sehr aufwendig und kostenintensiv.

Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei alternative Konzepte mit variablen Einspritzsystemen vorgestellt und hinsichtlich ihres Potenzials zum Einsatz im strahlgeführten Brennverfahren bewertet.

- Das Spray einer A-Düse muss mit Hilfe von Mehrfacheinspritzung an steigende Motorlast angepasst werden. Ein Ansatzpunkt zur Optimierung der Gemischbildung ist an dieser Stelle die Sprayformung. Es wurde daher eine variable Düse auf Drallbasis entwickelt, mit der - sogar während der Einspritzung - Einfluss auf den Durchfluss, den Spraykegelwinkel und die Penetration genommen werden kann. Das Spray und die Gemischwolke können somit an die jeweilige Motorsituation individuell angepasst werden. Die Funktionalität und das Potenzial dieser Düse für das strahlgeführte Brennverfahren werden anhand von Komponenten- und Motorversuchen dargestellt.
- Mit dem Einsatz einer Mehrlochdüse mit direktbetätigter, piezo-aktuierter Düsennadel wird der Ansatz verfolgt, die Gemischbildung durch die Steigerung der Verdampfungsrate zu beeinflussen. Die Potenziale von Einspritzdrucksteigerung und Nadelsitzdrosselung zur Beeinflussung des Strahlaufbruchs werden gegenübergestellt und bewertet. Die Variabilität dieses Einspritzsystems basiert auf der freien Parametrierbarkeit des Düsennadelhubes.

Zur Potenzialbewertung der einzelnen Düsenkonzepte für die Gemischbildung werden die Ergebnisse von hydraulischen Untersuchungen am Komponentenprüfstand sowie von Spray-Untersuchungen in einer Druckkammer herangezogen. Es wird hierbei ein Messgerät zur Bestimmung der Einspritzrate und der Einspritzmasse eingesetzt. Die Sprayaufnahmen werden in einer mit beheiztem Stickstoff durchströmten Druckkammer durchgeführt. Im Rahmen der Untersuchungen zur variablen Düse auf Drallbasis werden zusätzlich Abgas- und Verbrauchsergebnisse eines Einzylinder-Forschungsmotors vorgestellt, die mit Hilfe von ergänzenden Untersuchungen am Komponentenprüfstand und an der Druckkammer interpretiert werden.

2 STAND DER TECHNIK

Im Jahr 1995 waren in Europa 85 % aller PKW-Neuwagen mit Benzin-Motoren mit einer Saugrohreinspritzanlage ausgestattet. Der verbliebene Anteil wurde mit Vergasern betrieben [Pio1]. Ein Motorkonzept mit Saugrohreinspritzung ist somit sinnvolle Basis zur Bewertung des potenziellen Kraftstoffverbrauchsvorteils einzelner Technologien. In Bild 2.1 wird das Einsparpotenzial verschiedener technologischer Konzepte verglichen.

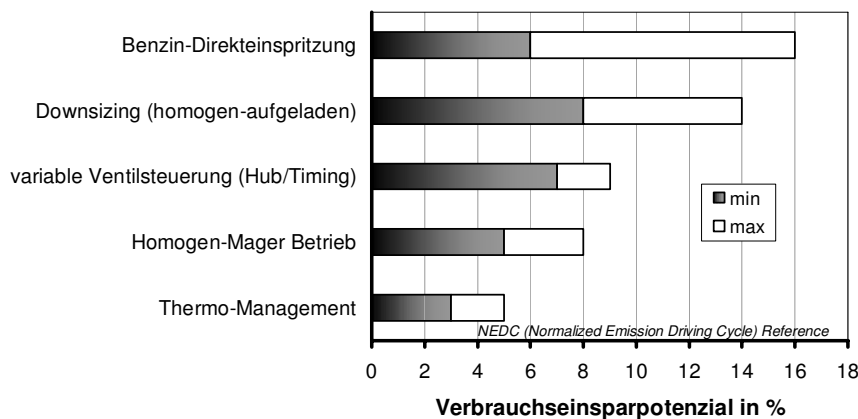


Bild 2.1: Kraftstoffeinsparpotenzial verschiedener Technologien für den Benzinmotor [auszugsweise: Ach1]

Um die von der ACEA geforderte Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs von ca. 25 % umzusetzen, werden Benzin-Direkteinspritzung mit 16 % bis 20 % erwarteter Verbrauchseinsparung und Downsizing mit 14 % bis 19 % als die erfolgversprechendsten Konzepte bewertet [Ach1, Kre].

Als **Downsizing** bezeichnet man die Reduzierung des Motorhubraums bei gleich bleibender Leistungs- und Drehmomentcharakteristik. Der Einsatz von Aufladung in Form von mechanischen Ladern oder Abgasturbo-Aufladung kompensiert die geringere Leistung bei kleinerem Hubraum. Die Vorteile im Kraftstoffverbrauch entstehen dadurch, dass sich der Motor bei gleicher abgegebener Leistung in einem höheren Lastpunkt befindet und somit bei geringerer Drosselung und deshalb mit geringeren Ladungswechselverlusten betrieben werden kann. Nachteilig bei diesem Konzept ist der erhöhte Leistungsbedarf durch den Betrieb des Laders. Der Antrieb eines mechanischen Laders benötigt zusätzliche Energie, die letztendlich über einen höheren Kraftstoffverbrauch bereit gestellt wird. Bei einem Abgasturbolader wird der Abgasgegendruck und damit die Ausschleubarbeit im Ladungswechsel erhöht. Außerdem muss die Verdichtung zur Verringerung der Klopfneigung bei Vollast reduziert werden, was den thermischen Wirkungsgrad des Motors senkt und damit wiederum den Verbrauch erhöht. Ursache für die Erhöhung der Klopfneigung ist der durch die Aufladung erhöhte Druck im Ansaugkanal zu Beginn des Verdichtungstaktes. Somit steigen Kompressionsenddruck und -temperatur ebenfalls an und erhöhen in weiterer Folge die Gefahr klopfender Verbrennung. Ein Downsizing-Konzept mit Aufladung und Benzindirekteinspritzung wird im 1,4 l – 125 kW TSI Motor von Volkswagen vorgestellt [Kre1, Kre2].

Der Hauptvorteil der **variablen Ventilsteuerung** liegt in der Vermeidung von Drosselverlusten im Ladungswechsel. Ein Androsseln des Motors zur Darstellung des Teillastbetriebes kann durch entsprechend frühes oder spätes Schließen der Einlassventile vermieden werden, so dass die Ladungswechselverluste im Teillastbetrieb reduziert werden können. Der Gesamtwirkungsgrad des Motors wird dadurch erhöht und der Verbrauch sinkt. Variable Ventilsteuerungen werden z.B. bei BMW unter dem Namen VALVETRONIC verbaut [Lan].

Der Verbrauchsvorteil des **Homogen-Mager-Betriebes** liegt wie bei der variablen Ventilsteuerung in der Verringerung der Drosselverluste. Für überstöchiometrische Gemischzusammensetzung ist bei gleicher Last (Einspritzmasse) mehr Luftmasse erforderlich, so dass weniger stark angedrosselt werden muss. Ebenso nimmt der thermische Wirkungsgrad mit steigendem Luftverhältnis zu. Grenzen sind diesem Verfahren durch die Zündfähigkeit des mageren Gemisches gesetzt. Außerdem muss die verschleppte Verbrennung bei Luftüberschuss durch Maßnahmen zur Erhöhung der Zylinderinnenströmung kompensiert werden.

Das Konzept des **Thermo-Managements** beruht darauf, dass bei Teillast die Motortemperatur zur Verringerung der Wandwärmeverluste erhöht wird. Durch die Abnahme der Viskosität des Schmieröls bei höheren Temperaturen wird zusätzlich die Reibarbeit des Motors verringert. Im Volllastbetrieb wird die Motortemperatur bewusst gesenkt, um den Liefergrad des Motors zu steigern.

Der Benzin-Direkteinspritzung wird im Vergleich zu den dargestellten Technologien jedoch das größte Potenzial zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs zugesprochen, wie im Folgenden erläutert werden soll.

2.1 Brennverfahren für Benzindirekteinspritzung

Die Vorteile der Benzindirekteinspritzung sollen aufbauend auf den Zusammenhängen bei der **Saugrohreinspritzung** erläutert werden. Bei der Saugrohreinspritzung verdampft der Kraftstoff während des Einspritzvorganges im Saugrohr bzw. an den Saugrohrwänden, so dass beim Öffnen des Einlassventils ein nahezu homogenes Kraftstoff-Luft-Gemisch in den Brennraum gelangt. Die Zeit für die Gemischbildung ist daher im Vergleich zur Direkteinspritzung verhältnismäßig lang. Die Motorlast wird bei diesem homogenen Brennverfahren über eine Quantitätsregelung eingestellt, da die angesaugte Gemischmenge über die Stellung der Drosselklappe eingestellt wird. Die Drosselung des Ansaugquerschnittes, besonders im unteren Teillast- und Leerlaufbereich, erhöht somit die Ladungswechselverluste und daraus resultierend den Kraftstoffverbrauch des Motors. Zur Reduzierung der Schadstoffe im Abgas werden Motoren mit Saugrohreinspritzung fast ausschließlich mit stöchiometrischem Luftverhältnis und Dreiwegekatalysator betrieben.

Zur Optimierung des Wirkungsgrades eines homogenen Brennverfahrens wird die **Direkteinspritzung** eingesetzt. Hierbei wird der Kraftstoff nicht mehr in das Saugrohr, sondern während des Saughubes direkt in den Zylinderraum eingespritzt. Nach der

Zerstäubung verdampft der Kraftstoff. Die dazu benötigte Verdampfungsenthalpie wird aus der Umgebung zugeführt, so dass sich das Gemisch bei geöffnetem Einlassventil abkühlt. Folglich steigt die Zylinderfüllung bei Direkteinspritzung, da die Dichte der abgekühlten Luft zunimmt und außerdem reine Luft und nicht ein Luft-Kraftstoffgemisch angesaugt wird [Sti]. Weiterhin sinkt die Verdichtungsendtemperatur aufgrund der geringeren Ladungstemperatur, so dass die Klopfneigung abnimmt. Der Motor kann mit einem höheren Verdichtungsverhältnis betrieben werden, woraufhin der Wirkungsgrad steigt und der Verbrauch sinkt [Pis].

Das homogene Brennverfahren mit Direkteinspritzung kann, genau wie die Saugrohrein-spritzung, im gesamten Betriebskennfeld des Verbrennungsmotors eingesetzt werden (Bild 2.2), wobei die Problematik der lastabhängigen Drosselung der Ansaugluft auch bei Direkteinspritzung bestehen bleibt. Eine Maßnahme zur Reduzierung der Drosselverluste in der Teillast ist der **homogen-mager Betrieb**. Hierbei wird bei gleicher Kraftstoffmasse (und somit gleicher Motorlast) mehr Luft benötigt, so dass die Drosselung während der Ansaugphase verringert werden kann. Durch die Verringerung der Ladungswechselarbeit und den Anstieg des Luftverhältnisses wird der effektive Wirkungsgrad erhöht und damit der Kraftstoffverbrauch gesenkt. Grenzen sind dieser Maßnahme jedoch durch die sichere Entflammung und vollständige Verbrennung des Gemischs gesetzt. Außerdem steigen bei Abmagerung die Stickoxid-Emissionen, da der Dreiwegekatalysator bei überstöchiometrischem Luftverhältnis (λ) diese Emissionen nicht reduzieren kann. Der homogen-mager Betrieb kann somit nur in einem begrenzten Teilbereich des Betriebskennfeldes bei oberer bis mittlerer Teillast (Bild 2.2) eingestellt werden.

Im mittleren Teillastbereich bis hin zum Leerlauf kann der Verbrennungsmotor mit **Ladungsschichtung** betrieben werden. Die Luft wird bei diesem Verfahren ungedrosselt

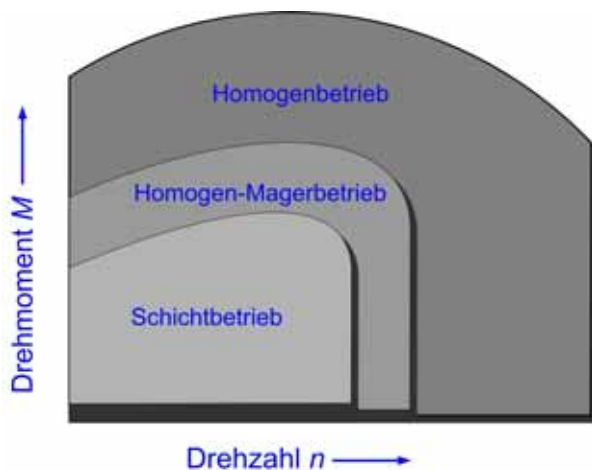


Bild 2.2: Betriebsartenkennfeld [Bos2]

angesaugt und das vom Motor abgegebene Drehmoment wird über die eingespritzte Kraftstoffmasse eingestellt (Qualitätsregelung). Der Kraftstoff nicht wird hierbei nicht homogen im Brennraum verteilt, sondern befindet sich idealerweise in einer kompakten, homogenen Gemischwolke (Optimum $\lambda = 1$) [Gei] im Bereich der Zündkerze. Es ist also trotz eines global mageren Gemisches im Brennraum möglich, die Zündung sicher einzuleiten. Aufgrund des höheren globalen Luftverhältnisses steigt auch der thermische Wirkungsgrad. Zusätzlich vermindert die isolierende Luftschicht um die Ladungswolke herum die Wandwärmeverluste, was den Gesamtwirkungsgrad und somit den Kraftstoffverbrauch ebenfalls verbessert.

Für den Schichtbetrieb ergeben sich unter motorischen Randbedingungen folgende Grenzen:

- Drehzahl: mit steigender Drehzahl wird aufgrund stark ansteigender Turbulenz im Brennraum die Ladungsschichtung zerstört. Außerdem steht dem Kraftstoff bei

steigender Drehzahl weniger Zeit zur Verfügung für die zeitlich begrenzten Zerstäubungs- und Verdampfungsprozesse zur Darstellung eines geschichteten Gemischs. Es lässt sich unter diesen Randbedingungen kein stabiler Motorbetrieb mehr realisieren.

- Last: mit steigender Last und somit auch steigender Einspritzmenge sinkt das globale Luftverhältnis, wodurch dieser Wirkungsgradvorteil kompensiert wird. Die Kraftstoffwolke nimmt einen immer größeren Teil des Brennraumes bis hin zu den Wänden ein, so dass keine Isolationswirkung durch umgebende Luft mehr möglich ist und auch die Wandwärmeverluste denen eines homogen betriebenen Motors entsprechen. Die Drosselverluste im Homogenbetrieb nehmen mit steigender Last ab, so dass der Schichtbetrieb ab einem bestimmten Lastniveau keine Vorteile gegenüber dem homogen-mager Betrieb aufweist. Im Schichtbetrieb erhöht sich mit steigender Kraftstoffmasse die Gefahr der Bildung von Ruß durch lokal fette Bereiche aufgrund von unvollständig verdampftem Kraftstoff. Auch dieser Effekt begrenzt die Betriebsmöglichkeiten des Motors mit Ladungsschichtung bei steigender Last.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Direkteinspritzung mit Schichtbetrieb im Vergleich zur Saugrohreinspritzung in einem begrenzten Kennfeldbereich die größten Verbrauchsvorteile aufweist.

Im Jahr 1995 stellte die Firma Mitsubishi mit dem GDI - Konzept (gasoline direct injection) erstmalig einen Serien PKW-Benzinmotor vor, der mit Direkteinspritzung im Schichtbetrieb arbeitet [Kum]. Es gab bis dahin verschiedene Prototypen- und Konzeptstudien, die sich mit Benzin-Direkteinspritzung befassten [Bec, Spi1]. Diverse Automobilhersteller [Bec] produzieren seit 1995 nicht zuletzt unter dem Druck der Abgasgesetzgebung und der ACEA-Forderung nach Verbrauchsreduzierung ebenfalls Ottomotoren mit Direkteinspritzung in Serie. Die momentan am Markt befindlichen Serienmotoren arbeiten im Schichtbetrieb vorwiegend mit **wand- bzw. luftgeführten Brennverfahren**.



Bild 2.3: Wandgeführte
Brennverfahren [Mer]

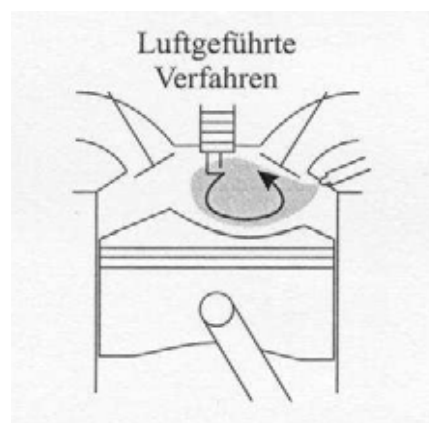


Bild 2.4: Luftgeführte
Brennverfahren [Mer]

Bei diesen Brennverfahren befindet sich der Injektor seitlich zwischen den Einlassventilen. Der Kraftstoff wird in eine speziell ausgeformte Pleuellarmmulde eingespritzt und trifft auf die Pleellochfläche. Von dort prallt der Kraftstoff teilweise wieder ab oder bildet einen Flüssigkeitsfilm und dampft anschließend vom Pleuellarmboden ab. Die Kraftstoffwolke wird

durch die Kolbenform und durch unterstützende Ladungsbewegung in Richtung der zentral gelegenen Zündkerze transportiert (Bild 2.3). Dieses Brennverfahren, das vorwiegend auf der Interaktion des Kraftstoffs mit dem Kolbenboden basiert, wird als wandgeführt bezeichnet. Da der Ladungstransport jedoch durch gezielte Drall- und Tumbleströmung unterstützt wird, kann wie im Falle des VW FSI-Verfahrens auch von einem wand-/luftgeführten Verfahren gesprochen werden [Sti]. Drallströmung entsteht, wenn die durch das geöffnete Einlassventil angesaugte Luft eine Rotationsströmung entlang der Zylinderwand erzeugt. Unter Tumbleströmung versteht man eine walzenförmige Luftbewegung, die von oben kommend durch eine ausgeprägte Kolbenmulde umgelenkt wird und sich wieder nach oben in Richtung Zündkerze bewegt.

Aufgrund des großen Abstandes zwischen Einspritzdüse und Zündkerze muss früh im Verdichtungsstakt, im Bereich von 80°KW bis 65°KW vor ZOT [Pio], eingespritzt werden. Es steht eine relativ lange Zeit für das Abdampfen des Kraftstoffs und die Gemischbildung zur Verfügung. Das Hauptproblem bei diesem Brennverfahren besteht darin, dass aufgrund der Kraftstoff-Wandanlagerung am Kolbenboden die Emissionen von unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC) stark ansteigen. Dieser Anstieg der Emissionen wird dadurch verursacht, dass der Kraftstoff nach dem Abdampfen bei niedrigen Temperaturen in Wandnähe nur unvollständig verbrennt [Mer]. Da die Gemischbildung über einen langen Zeitraum und über einen langen Weg hinweg stattfindet, ist dieses Brennverfahren empfindlich gegenüber zyklischen Schwankungen. Außerdem muss die unterstützende Ladungsbewegung für die jeweiligen Betriebspunkte aus Last, Drehzahl und Einspritzzeitpunkt speziell abgestimmt werden [Bec].

Wird bewusst auf eine Benetzung des Kolbens verzichtet und das Gemisch ausschließlich durch gezielte Ladungsbewegung zur Zündkerze transportiert, so spricht man von einem luftgeführten Brennverfahren (Bild 2.4). Eine Benetzung des Kolbens lässt sich jedoch bei höheren Lastpunkten nicht komplett ausschließen [Bos2]. Die Einspritzung erfolgt später im Kompressionshub, im Bereich von ca. 55°KW bis 40°KW vor ZOT [Pio], bei höheren Temperaturen und Drücken im Zylinder. Bei diesem Verfahren besteht die Schwierigkeit, dass eine ausreichend starke Ladungsbewegung bis zum Ende des Kompressionshubes aufrechterhalten werden muss, um die Gemischbildung und somit die Funktion des Brennverfahrens sicherzustellen. Dies bedeutet wiederum erhöhte Ladungswchselverluste, da eine starke Drall- und Tumbleströmung während des Ladungswchsels erzeugt werden muss. Im Vergleich zu einem vorwiegend wandgeführten Verfahren ist hierbei die Abstimmung der Ladungsbewegung im Zusammenspiel mit der Einspritzung für verschiedene Betriebszustände erheblich aufwendiger. Ein luftgeführtes Verfahren wird von Audi im 2,0 l – 110 kW FSI Motor vorgestellt [Spi].

Bei den momentan in Serie befindlichen PKW-Benzinmotoren mit Direkteinspritzung und Ladungsschichtung mit wand- und luftgeführten Brennverfahren (Brennverfahren der ersten Generation) lassen sich zusammenfassend folgende Probleme feststellen [Spi1]:

- Der Schichtbetrieb ist nur in relativ kleinen Kennfeldbereichen möglich, da die komplexe Gemischbildung in Form von Luftführung und Einspritzung bei diesen Brennverfahren aufwendig aufeinander abgestimmt werden muss.

- Aufgrund unvollkommener Verbrennung sinkt der Wirkungsgrad und die Schadstoff-Emissionen von unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC) und Kohlenmonoxid (CO) im Abgas nehmen zu.
- Der stabile Betrieb dieser Brennverfahren stellt sich aufgrund der langsamen Kraftstoffumsetzung gegen Ende der Verbrennung [Spi] bei einer relativ frühen Schwerpunktslage der Verbrennung ein, woraus eine Verminderung des Wirkungsgrades resultiert.
- Die Umsetzung der benötigten Ladungsbewegung führt zu erhöhten Ladungswechselerlusten und damit auch zu einer Reduzierung des Wirkungsgrades.
- Der zerklüftete Brennraum führt aufgrund des erhöhten Oberflächen/Volumen-Verhältnisses zu erhöhten Wandwärmeverlusten [Pri].
- Erhöhte Kohlenwasserstoff-Emissionen werden durch die Kraftstoffwand-anlagerung an Kolbenboden und Zylinderwand verursacht.
- Durch erhöhte Spitzentemperaturen bei Verbrennung mit Luftüberschuss nimmt die Stickoxid-Bildung (NO_x) zu, so dass eine katalytische Nachbehandlung nicht mehr vom Drei-Wege-Katalysator übernommen werden kann, der nur bei stöchiometrischem Luftverhältnis optimal arbeitet. Der erhöhte Stickoxid-Anteil im Abgas muss über einen NO_x-Speicher-katalysator reduziert werden. Zur Regeneration dieses Speichermediums muss der Motor kurzzeitig mit sehr fettem Gemisch betrieben werden, so dass hierbei der Verbrauchsvorteil des Schichtbetriebes reduziert wird. Eine weitere Maßnahme zur Reduzierung der NO_x-Emissionen ist der Betrieb mit Abgasrückführung. Hierbei wird der Frischluftanteil der Ladung vermindert, so dass die Verbrennungstemperatur gesenkt und die NO_x-Bildung verringert wird.
Die Problematik der erhöhten NO_x-Bildung im Schichtbetrieb ist jedoch nicht auf die Brennverfahren der ersten Generation beschränkt.
- Im Leerlauf muss der Motor angedrosselt werden, um stabile Betriebsbedingungen einzustellen, was zwangsläufig zu einer Wirkungsgradverschlechterung führt [Sti].

Aufgrund der dargestellten Problematik konnte bei den Serienkonzepten mit Schichtladungsbetrieb nicht der theoretisch mögliche Wirkungsgradvorteil bzw. Verbrauchsvorteil erzielt werden.

Ein weiteres Brennverfahren mit Ladungsschichtung ist das **strahlgeführte Brennverfahren**. Mit diesem Verfahren sollen die Nachteile bestehender Seriensysteme kompensiert werden, so dass der volle Wirkungsgradvorteil des geschichteten Betriebes ausgenutzt werden kann.