

# Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit mit dem Titel „Ottomotorisches Magerverbrennungskonzept in Kombination mit einem elektrifizierten Antriebsstrang“ leistet einen Beitrag zur Brennvorgangsentwicklung hubraumkleiner Ottomotoren mit Benzindirekteinspritzung und Aufladung.

Durch das Downsizing und Fahrzyklen wie den WLTC, sowie durch die mögliche Lastpunktverschiebung aufgrund der Elektrifizierung des Antriebsstrangs, verschieben sich die Motorbetriebspunkte in höhere Lastbereiche. In den vorliegenden Untersuchungen werden entsprechende Maßnahmen aufgezeigt, den Kraftstoffverbrauch und damit die CO<sub>2</sub>-Emissionen in hohen Lastbereichen des Motorbetriebskennfeldes von Ottomotoren mit geringem Hubraum zu verbessern. Ergänzend dazu werden auch Maßnahmen zur Verbrauchs- und Emissionsreduzierung in niedrigen Lastbereichen untersucht.

Hierfür wird die überstöchiometrische Verbrennung, welche zu einem hohen verbrennungsmotorischen Wirkungsgrad beiträgt, vor allem am Einzylindermotorprüfstand experimentell untersucht. Ergänzt werden die Ergebnisse durch Simulationen und Berechnungen. Dabei gliedert sich die Auswertung der Versuche der Arbeit in drei Teile, in welchen schrittweise die Magerverbrennung analysiert wird.

Zu Beginn wird die heterogene, qualitätsgeregelte Magerverbrennung an einem Einzylindermotor, basierend auf einem 2.0L-4-Zylinder-Ottomotor, in Kombination mit einer verstellbaren Ladungsbewegungsklappe und einem vollvariablen Ventiltrieb bewertet und dadurch optimiert. Dabei liegt der Fokus vor allem auf den Stickoxidrohmissionen und der Laufruhe. Es kann festgestellt werden, dass die Ladungsbewegungserhöhung durch das Tumbleblech zu einer signifikanten Stabilisierung der Strömung im Brennraum führt, insbesondere bei Steuerzeiten mit großer Ventilüberschneidung, welche durch eine höhere Restgasrate zu geringeren NO<sub>x</sub>-Rohmissionen beitragen. Die stabilen Strömungsverhältnisse reduzieren die Zyklus-zu-Zyklus-Schwankungen des Kraftstoffsprays der Schichtladungseinspritzung durch den Piezo-Injektor und verbessern dadurch die Laufruhe und lassen einen Betrieb bei geringen NO<sub>x</sub>-Emissionen zu.

Im zweiten Teil wird erneut ein Einzylindermotor, diesmal jedoch auf einem 1.5L-4-Zylinder-Ottomotor basierend eingesetzt, um verschiedene Einflüsse auf die homogene Magerverbrennung in verschiedenen Betriebspunkten zu untersuchen. Dabei wird ein elektro-magnetisch gesteuertes Mehrlochventil genutzt. Es werden Möglichkeiten und Strategien aufgezeigt, um die Abmagerungsgrenze unter anderem auch in hohen Lastbereichen auszuweiten, mit dem Ziel den Kraftstoffverbrauch und die NO<sub>x</sub>-Rohmissionen zu reduzieren. Zielführend zeigen sich vor allem die Ladungsbewegungserhöhung, die

Steuerzeitenstrategie und die Reduzierung der Klopf tendenz in hohen Lastbereichen, durch das Ausspülen der internen Restgasmasse mit einem positiven Spülgefälle bei Ventilüberschneidung. Ferner wird die Wirkung einer Hochenergiezündung auf die homogene Magerverbrennung bewertet, mit dem Ergebnis, dass diese im Zusammenspiel mit hoher Ladungsbewegung zu einer Ausweitung der Abmagerungsgrenze führt.

Der dritte Teil nutzt die Ergebnisse aus den ersten beiden Abschnitten sowie Vollmotordaten, um über die Bestimmung des Zyklusverbrauchs mittels Engine-in-the-Loop Prüfstand und Berechnungen/Zyklussimulationen eine Bewertung der Brennverfahren vorzunehmen.

Dabei wird untersucht, welchen Einfluss die heterogene Magerverbrennung hat, da diese einen deutlichen Verbrauchsvorteil gegenüber der homogenen Magerverbrennung in niedrigen Lastbereichen aufweist. Es kann festgestellt werden, dass ein Entfall der Schichtladungsverbrennung für einen konventionellen 2.0L-Motor zu einem Nachteil im Zyklusverbrauch führt. Bei Nutzung eines elektrifizierten Antriebsstrangs und der damit verbundenen Möglichkeit der Lastpunktverschiebung oder durch die Verschiebung der Lastpunkte durch ein schwereres Fahrzeug reduziert sich der Vorteil der heterogenen gegenüber der homogenen Magerverbrennung im Zyklusverbrauch auf ein Minimum. Gleichzeitig reduzieren sich mit der Lastpunktverschiebung durch die Elektrifizierung die  $\text{NO}_x$ -Emissionen. Wird jetzt noch die Möglichkeit des rein elektrischen Fahrens mit in Betracht gezogen, kann durch die Schichtladungsverbrennung kein Vorteil mehr erzielt werden.

Da sich für den 1.5L-Motor die Lastpunkte noch weiter verschieben, wird die Schichtladungsverbrennung nicht weiter betrachtet und vielmehr die Ausweitung der homogenen Magerverbrennung in hohe Lastbereiche bewertet. Durch diese Maßnahme kann ein weiterer Vorteil für den Zyklusverbrauch für alle Konfigurationen erreicht werden. Festzuhalten ist auch, dass die Elektrifizierung des Antriebsstrangs und das elektrische Fahren nicht in Konkurrenz zur Magerverbrennung stehen, sondern diese ergänzt und den Zyklusverbrauch weiter verbessert.

# Abstract

The present work entitled "Gasoline engine lean-burn concepts in combination with an electrified powertrain" contributes to the combustion process development of small displacement gasoline engines with direct gasoline injection and turbocharging.

Due to downsizing and driving cycles such as the WLTC, as well as the possible load-point shift due to the electrification of the powertrain, the engine operating points move to higher load ranges. In the present studies, corresponding measures are shown to improve the fuel consumption and thus the CO<sub>2</sub>-emissions in high load areas of the engine operating map of gasoline engines with low displacement. In addition, measures to reduce consumption and emissions in low load ranges will also be investigated.

For this purpose, the lean combustion, which contributes to a high combustion engine efficiency, experimental examined especially on the single-cylinder engine test bench. The results are supplemented by simulations and calculations. The evaluation of the experiments in this work is divided into three parts, in which the lean combustion is analyzed step by step.

At the beginning, the heterogeneous, quality-controlled lean combustion is evaluated and optimized on a single-cylinder engine of a 2.0L-4-cylinder gasoline engine in combination with an adjustable flap to control the charge motion and a fully variable valve train. The focus is mainly on the nitrogen oxide emissions and standard deviation of the indicated mean pressure. It can be stated, that the increase of the charge motion through the tumble flap leads to a significant stabilization of the flow in the combustion chamber, in particular in the case of valve overlap valve timing, which contribute to lower NO<sub>x</sub> raw emissions due to a higher residual gas rate. The more stable flow conditions reduce the cycle-to-cycle variations of the fuel spray of the stratified charge injection through the piezo injector, thereby improving the standard deviation of the indicated mean pressure and allowing operation with low NO<sub>x</sub>-emissions.

In the second part, once again a single-cylinder engine, but this time based on a 1.5L-4-cylinder gasoline engine, is used to investigate various influences on the homogeneous lean-combustion at different operating points. In this case, an electro-magnetically controlled multi-hole valve is used. Possibilities and strategies are shown to extend the lean combustion limit, including in high load ranges, with the aim of reducing the fuel consumption and of NO<sub>x</sub> raw emissions. Expedient are the increase of the charge motion, the strategy of the valve control times and the reduction of the knock tendency in high load ranges, by use of scavenging of the internal residual gas mass with a positive pressure

gradient at valve overlap. Furthermore, the effect of high-energy ignition on the homogeneous lean combustion is evaluated, with the result that it leads to an expansion of the lean combustion in combination with high charge motion.

The third part uses the results from the first two sections, as well as full engine data, to assess the combustion processes by determining the cycle consumption using the engine-in-the-loop test bench and calculations / cycle simulations.

It investigates the influence of heterogeneous lean combustion, because it has a clear advantage over homogeneous lean-burn combustion in low load ranges. It can be noted, that the elimination of stratified combustion for a conventional 2.0L engine results in a penalty in cycle consumption. When using an electrified powertrain and the associated possibility of load point shift or by shifting the load points by a heavier vehicle, the advantage of heterogeneous compared to the homogeneous lean combustion in cycle consumption is reduced to a minimum. Simultaneously the  $\text{NO}_x$ -emissions reduce with the load point shift by the electrification. Now, if the possibility of purely electric driving is taken into consideration, no advantage can be achieved by the stratified combustion.

As the load points for the 1.5L-engine shift even further, the stratified combustion is no longer considered, and rather the extension of the homogeneous lean combustion to high load ranges is evaluated. By this measure, a further advantage for the cycle consumption for all configurations can be achieved. It should also be noted, that the electrification of the powertrain and electric driving is not in competition with lean-burn combustion, but complements it and further improves cycle fuel consumption.

# 1 Einleitung

Zu Lande, zu Wasser und in der Luft – dieses Streben nach individueller Fortbewegung trieb die Erfinder des Automobils bereits vor über 130 Jahren zu Spitzenleistungen an. Auch heute noch zählt die Mobilität zu den Grundpfeilern der modernen Gesellschaft und trägt unter anderem zu unserem Wohlstand sowie zur wirtschaftlichen Stabilität unseres Landes bei.

Durch die wachsende Zahl der Herausforderungen an die Mobilität von morgen wie beispielsweise das steigende Umweltbewusstsein der Menschen und die verstärkten Klimaveränderungen gewinnt die Entwicklung des Antriebes der Zukunft immer mehr an Bedeutung. Hierzu stehen die verschiedensten Systeme auf dem Prüfstand, um die ambitionierten Ziele wie beispielsweise die Vorgaben der EU einhalten zu können. Die Klimaschutzziele der EU für Personenkraftwagen sehen eine Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes um 37,5 % auf Basis des Wertes für 2021 (95 g/km) vor [69, 119]. Hinzu kommt, dass die fossilen Energieträger der Welt begrenzt sind.

Als Lösung wird hierzu das batterieelektrisch betriebene Fahrzeug stark beworben, welches durch lokal emissionsfreies Fahren punkten kann. Werden jedoch die Nachteile bei Reichweite, Kosten, Ladezeit und Verfügbarkeit der Rohstoffe betrachtet sowie berücksichtigt, dass die Art der Energiebereitstellung des Ladestroms (Kohle, Atom, Erneuerbare Energien,...) im Zusammenhang mit der Gesamt-CO<sub>2</sub>-Bilanz [1, 96] weiterhin weltweit großen Unterschieden ausgesetzt ist [108], wird klar, dass der Verbrennungsmotor auch in der Zukunft eine Schlüsselposition einnehmen wird [51, 58, 105].

Neben den bestehenden Herausforderungen, den Zyklusverbrauch und Emissionen immer weiter senken zu wollen, wird in Zukunft zunehmend auch das kundenindividuelle Betriebsverhalten des Fahrzeugs betrachtet, um dem Wunsch nach einer nachhaltigen individuellen Mobilität nachzukommen.

Seit geraumer Zeit steht deshalb auch das Thema „Downsizing der Verbrennungsmotoren“ im Fokus der Automobilindustrie [31, 46, 65]. Dieser Trend scheint kein Ende zu nehmen, da zum einen in einem kombinierten Verbrenner-Elektro-Antrieb nur geringer Bauraum für beide Antriebe zur Verfügung steht und zum anderen der spezifische Kraftstoffverbrauch für zukünftige Anwendungen noch weiter gesenkt werden muss. Dies ermöglicht die Lastpunktverschiebung durch das Downsizing. Darüber hinaus trägt eine Elektrifizierung des Antriebsstrangs, welche immer weiter voranschreitet [2, 33], dazu bei, den Kraftstoffverbrauch weiter zu senken.

Eine signifikante Senkung des Kraftstoffverbrauchs lässt sich aber nur im Gesamtsystem des Antriebsstrangs realisieren. Dazu muss neben dem Downsizing und der Elektrifizierung, auch das Brennverfahren weiter verbessert werden. Neben den für die stöchiometrische Verbrennung üblichen Verfahren, wie Atkinson- oder Millerzyklus, sowie externe/interne Restgasrückführung, bietet sich mit einem Magerbrennverfahren ein enormer Wirkungsgrad- und damit Verbrauchsvorteil.

Als wichtiger Technologiebaustein auf dem Weg zum hocheffizienten Ottomotor werden deshalb in dieser Arbeit Ansätze zum überstöchiometrischen Betrieb diskutiert und auf hubraumkleine Ottomotoren übertragen, wodurch insbesondere in Kombination mit einem elektrifizierten Antriebsstrang geringere  $\text{CO}_2$ -Werte für den WLTC erzielt werden können. Das Hauptaugenmerk richtet sich dabei auf die Maßnahmen zur Verbesserung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs für große Teile des Motorbetriebsbereichs durch die homogene Magerverbrennung, da durch das Downsizing und die Elektrifizierung der Schichtladungsverbrennung eine geringere Bedeutung zugeschrieben werden kann. Ferner steht die Absenkung der  $\text{NO}_x$ -Rohemissionen im Fokus der Betrachtung, welche für Magerbrennverfahren nicht wie in gewohnter Weise mit einem 3-Wege-Katalysator konvertiert werden können.

## 2 Relevante Grundlagen

### 2.1 Ottomotorische Magerbrennverfahren

Aus der Literatur und auch der Industrie sind zahlreiche motorische Anwendungen der Magerverbrennung in verschiedenen Ausführungen bekannt [9, 11, 17, 38, 62, 71, 72, 93, 95, 109, 110, 118, 121, 122]. Dazu zählen die homogene Magerverbrennung, die heterogene Magerverbrennung oder auch Schichtladungsverbrennung genannt und die homogene Magerverbrennung durch Selbstzündung. Allen gemeinsam ist der hohe Verbrennungswirkungsgrad der dabei erreicht werden kann. Dadurch ist ein Betrieb mit geringen Kraftstoffverbrauchswerten und somit geringen CO<sub>2</sub>-Emissionen möglich. Dieser ergibt sich vor allem aufgrund der geänderten Stoffwerte durch die Ladungsverdünnung mit Luft.

Durch den gesteigerten Isentropenexponent wird, in einer vereinfachten theoretischen Betrachtung, über die Beziehung [67, 80]

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{(\varepsilon^{\kappa-1})} \quad (2.1)$$

$\eta_{th}$ : thermodynamischer Wirkungsgrad;  $\varepsilon$ : Verdichtungsverhältnis;  $\kappa$ : Isentropenexponent der thermodynamische Wirkungsgrad erhöht.

Der Isentropenexponent ist eine Funktion der Temperatur. Er wird berechnet aus [102]:

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \quad (2.2)$$

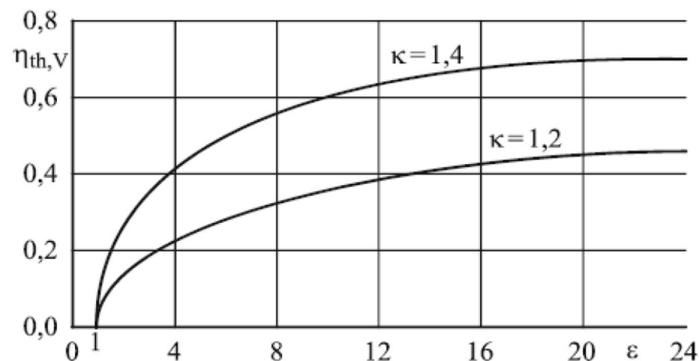
Wobei ferner gilt:

$$c_v = c_p - R_s \quad (2.3)$$

Mit:  $\kappa$ : Isentropenexponent,  $c_v$ : spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen,  $c_p$ : spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck,  $R_s$ : spezifische Gaskonstante

Der Isentropenexponent hängt also von der spezifischen Wärmekapazität ab. Diese ist während der motorischen Verbrennung, aufgrund der Temperaturabhängigkeit, nicht konstant und hängt zudem von den Faktoren Restgasgehalt, Luftverhältnis und Dissoziation ab.

In Abbildung 2.1 ist dazu der thermodynamische Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Isentropenexponenten und vom Verdichtungsverhältnis dargestellt.



**Abbildung 2.1:** Wirkungsgrad in Abhängigkeit des Isentropenexponenten [67]

Ersichtlich ist, dass mit höherem Isentropenexponenten der Wirkungsgrad bei gleichem Verdichtungsverhältnis höher ist. Für trockene Luft liegt  $\kappa=1.4$  bei  $0^\circ\text{C}$  und fällt mit steigenden Temperaturen [97]. Bei einer realen Verbrennung mit Luft-Kraftstoff-Gemischen ist  $\kappa$  jedoch niedriger [80]. Mit sinkender Temperatur wird die spezifische Wärmekapazität eines Luft-Kraftstoff-Gemischs verringert, wodurch der Isentropenexponent nach Gleichung 2.2 & 2.3 erhöht wird.

Durch die Magerverbrennung werden die Verbrennungstemperaturen durch die höhere Ladungsmasse gesenkt. Zudem sinkt mit der Magerverbrennung die spezifische Wärmekapazität aufgrund der sich ändernden Stoffzusammensetzung des Gemischs. Beide Mechanismen führen zu einem höheren Isentropenexponenten durch die Magerverbrennung. Über die Erhöhung der Restgasmasse kann die Verbrennungstemperatur ebenfalls abgesenkt werden, wodurch der Isentropenexponent erhöht wird.

Ein weiterer Vorteil der Magerverbrennung liegt in den reduzierten Wandwärmeverlusten im Vergleich zu stöchiometrischen Brennverfahren [42, 116]. Dies ist auf die geringeren Verbrennungstemperaturen und die geringere Gemischdichte im Wandbereich zurückzuführen. Insbesondere für das strahlgeführte Schichtbrennverfahren können die Wandwärmeverluste gesenkt werden, da eine isolierende Schicht zwischen Brennraumwand und verbranntem Gemisch vorhanden ist.

Im für stöchiometrische Brennverfahren angedrosselten Teillastbereich ist es beim Magerbrennverfahren darüber hinaus möglich, die Drosselverluste zu verringern oder gar ganz zu vermeiden. Für homogen-magere Brennverfahren gelingt dies nur, wenn die Grenzen der Abmagerung weit genug ausgedehnt werden können. Für das qualitativ geregelte Schichtbrennverfahren liegt prinzipbedingt eine vollständige Entdrosselung vor.

Im oberen Teillastbereich kann der Verbrauch im Vergleich zu stöchiometrischen Brennverfahren ferner nicht nur über die besseren Stoffwerte der Magerverbrennung gesenkt werden, sondern auch über die Wahl eines früheren Verbrennungsschwerpunktes, weil die Anzahl klopfender Arbeitsspiele durch die Ladungsverdünnung (Temperaturreduzierung des Endgases) verringert werden können.

Die Schichtladungsverbrennung zeichnet sich durch die heterogene Kraftstoffverteilung im Brennraum aus, welche zum Ziel hat, im Bereich der Zündkerze zum Zündzeitpunkt ein stöchiometrisches Gemisch bereitzustellen, während aufgrund des global sehr mageren Gemisches im Bereich der Brennraumwand das Luft-Kraftstoff-Verhältnis gegen unendlich steigt. Diese Ladungsschichtung kann über die in Abbildung 2.2 dargestellten Verfahren erreicht werden.



**Abbildung 2.2:** Brennverfahren bei der Benzin-Direkteinspritzung [68]

Beim wandgeführten Verfahren wird das Luft-Kraftstoff-Gemisch über die Pleuellensmulde zur Zündkerze geführt. Beim luftgeführten Verfahren soll das Gemisch auf einem Luftpolster zur Zündkerze geführt werden. Das Luftpolster wird dabei durch die speziell geformte Pleuellensmulde in Interaktion mit der Strömung erzeugt.

Das strahlgeführte Brennverfahren, welches auch im Rahmen dieser Arbeit herangezogen wird, wird durch eine oder mehrere kurz hintereinander abgesetzte Kompressionshub einspritzungen kurz vor dem oberen Totpunkt des Pleuels charakterisiert. Ziel ist es, durch die Einspritzungen ein Luft-Kraftstoff-Gemisch nahe  $\lambda = 1$  an der Zündkerze bereitzustellen, um entflammbarke Bedingungen zu garantieren. Der Brennraum zeichnet sich durch eine nahe beim Injektor positionierte Zündkerze aus. Da der Kraftstoff nicht erst durch den Pleuel umgelenkt werden muss, können mit diesem Verfahren sehr hohe Lambdawerte erreicht werden. Nachteilig ist, dass bei diesem Verfahren nur eine kurze Zeit für die Einspritzungen zur Verfügung steht. Dies bedingt ein Einspritzsystem, welches eine gute Gemischaufbereitung in kurzer Zeit zulässt. Vergangene Untersuchungen haben gezeigt, dass hierfür die nach außen öffnende Ringspaltdüse (piezoelektrische A-Düse) zu nutzen ist [13, 48, 84]. Diese erzeugt einen hohlen kegelförmigen Einspritzstrahl, welcher am unteren Ende durch Interaktion mit der Luft Randwirbel ausbildet, wodurch an der Zündkerze ein zündfähiges Gemisch bereitgestellt wird. Darüber hinaus ermöglicht der Piezo-Aktor sehr kleine Einspritzmengen und sehr kurze Einspritzzeiten, welche reproduzierbar dargestellt werden können. Im Vergleich zu anderen Einspritzsystemen ist der Kosteneinsatz für diesen Injektor deutlich höher, nicht zuletzt aufgrund der geringeren Verbreitung in der Automobilindustrie. Für homogene Brennverfahren kann dagegen eine magnetgesteuerte Mehrlochdüse genutzt werden.

Für das strahlgeführte Schichtbrennverfahren kommt darüber hinaus eine Mehrfach-funkenzündung (MSI, multi spark ignition) zum Einsatz. Diese ermöglicht, mehrere Zündfunken zu initiieren. Dies ist notwendig, da das zeitliche Zündfenster für eine sichere