

Berichte zur Thermodynamik und Verfahrenstechnik

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing, Prof. Dr.-Ing. Stefan Will

Schriftenreihe Heft 2023-2

TIM RUSSWURM

Aktive Vorkammerzündung für Personenkraftwagen

Aktive Vorkammerzündung für Personenkraftwagen

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Tim Russwurm, M.Sc.
aus Kronach

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 05. Mai 2023

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing
Prof. Dr.-Ing. Lars Zigan

Berichte zur Thermodynamik und Verfahrenstechnik

Band 2/2023

Tim Russwurm

Aktive Vorkammerzündung für Personenkraftwagen

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Düren 2023

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9184-7

ISSN 2365-3957

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Motorische Verbrennung des Lehrstuhls für Technische Thermodynamik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, die sich zur eigenständigen Professur für Fluidsystemtechnik weiterentwickelt hat.

Mein erster Dank gilt dir, lieber Michael. Du hast mit deiner Arbeitsgruppe eine ganz besondere Atmosphäre der Zusammenarbeit geschaffen. Gleichzeitig bist du für jede Diskussion, auch über Arbeitsinhalte und Thermodynamik hinaus, zu haben. Danach gilt mein Dank dir, Moritz, da du mit deiner Erfindung zur aktiven Vorkammer die inhaltliche Basis dieser Arbeit gelegt hast. Vielen Dank an Alex, dass du mich davon überzeugt hast, nochmal zurück an die Universität zu kommen.

Allen Kollegen, ob neu dazugekommen oder Ehemalige, ob am PZN, in der Cauerstraße oder am LTT, möchte ich ebenso meinen großen Dank aussprechen. Mit euch ist es eine Freude, die Arbeitstage gemeinsam zu verbringen. Das gilt gleichermaßen für Techniker, Teamassistenten und Wissenschaftler. Ebenso danken möchte ich allen Studierenden, die an der Entstehung dieser Arbeit mitgewirkt haben. Auch wenn nicht alle Inhalte letztlich einen Platz gefunden haben, wäre diese Arbeit ohne eure Unterstützung undenkbar.

Weiterhin möchte ich mich bei allen Projektpartnern in der Industrie bedanken. Besonders das Forschungsprojekt LEANition in Zusammenarbeit mit BMW und Tenneco, gefördert von der Bayerischen Forschungsförderung, hat trotz aller Schwierigkeiten zu sehr guten Ergebnissen geführt.

Schließlich bedanke ich mich bei allen Freunden und meiner Familie, die mich in der Zeit der Promotion begleitet haben und diese durch tatkräftiges Korrekturlesen unterstützt haben.

Kurzfassung

Die Vorkammerzündung stellt eine Möglichkeit dar, Brennverfahren mit stark verdünnter Zylinderladung in PKW-Ottomotoren zu realisieren. Diese zeichnen sich durch einen höheren Wirkungsgrad aus, der durch einen günstigeren Isentropenexponent und geringere Temperaturen und damit geringere Wandwärmeverluste ermöglicht wird. Um diese Zylinderladung sicher zu entflammen, ist eine höhere Zündenergie nötig. Eine aktive Vorkammerzündung verwendet eine Vorkammer als separates Bauteil, die über Übertrittsbohrungen mit dem Hauptbrennraum verbunden ist. Innerhalb dieser Vorkammer entzündet eine Zündkerze ein gut zündfähiges Gemisch. Durch die Zündung treten heiße, reaktive Gase durch die Übertrittsbohrungen in den Hauptbrennraum ein und initiieren dort die Zündung der verdünnten Ladung. Die Herstellung des gut zündfähigen Gemischs in der Vorkammer erfolgt bei der aktiven Vorkammerzündung durch eine separate Vorkammerspülung. Dabei eignet sich auf Grund der vereinfachten Gemischbildung und der besseren Dosiergenauigkeit ein gasförmiger Kraftstoff besonders zur Anreicherung des Gemischs in der Vorkammer.

Diese Arbeit zeigt Möglichkeiten und Grenzen einer solchen aktiven Vorkammerzündung für PKW-Ottomotoren auf. Dazu wird eine Vorkammer entwickelt, die zur Vereinfachung der Erprobung ohne Änderung am Zylinderkopf in moderne PKW-Motoren mit M14 oder M12 Zündkerzengewinde eingebaut werden kann. Um eine aktive Anreicherung des Gemischs für die Vorkammerspülung ohne einen separat mitgeführten, gasförmigen Kraftstoff zu erreichen, werden verdunstete leichtsiedende Komponenten von Ottokraftstoff verwendet. Für die Untersuchung am Motorprüfstand werden zwei unterschiedliche Kraftstoffsysteme aufgebaut. Je nach Betriebsstrategie (Magerbetrieb oder Ladungsverdünnung mit Restgas) ist eine Anpassung der Zusammensetzung des Spülgases und des Druckbereichs notwendig.

Für den Magerbetrieb kann eine geringe Menge Kraftstoffdampf-Luft-Gemisch mit hoher Konzentration bei relativ niedrigem Druck früh im Motorzyklus in die Vorkammer eingebracht werden. Durch den Luftüberschuss im Hauptbrennraum wird die Gemischzusammensetzung in der Vorkammer im Laufe des Verdichtungstaktes durch das Eindringen von Luft über die Übertrittsbohrungen verdünnt, bis zum Zündzeitpunkt ein gut zündbares Gemisch mit leichtem Kraftstoffüberschuss vorliegt. Am untersuchten Betriebspunkt (1500 min^{-1} , 4,5 bar indizierter Mitteldruck) ist ein stabiler Motorlauf bis $\lambda = 1,95$ möglich. Dabei wird eine Steigerung des indizierten Wirkungsgrads um 5,5 Prozentpunkte gegenüber dem stöchiometrischen Gemisch beobachtet. Gleichzeitig sinken die Stickoxid-Rohemissionen auf unter 20 ppm. Dies ist notwendig, da im Magerbetrieb kein 3-Wege-Katalysator eingesetzt werden kann.

Im Restgasbetrieb ist ein Ausspülen der Verbrennungsprodukte aus der Vorkammer die wichtigste Aufgabe der aktiven Spülung. Gleichzeitig dringt im Verdichtungstakt durch den hohen Restgasanteil im Hauptbrennraum bereits verbranntes Gas in die Vorkammer ein. Die Spülung der Vorkammer muss daher mit einem stöchiometrischen Gemisch möglichst kurz vor dem Zündzeitpunkt erfolgen. Die Spülmenge muss dabei ausreichen, um den Restgasanteil in der Vorkammer soweit zu senken, dass eine sichere Funkenzündung gewährleistet wird. Um diese Menge des stöchiometrischen Kraftstoffdampf-Luft-Gemischs in die Vorkammer einbringen zu können, ist auf Grund des späten Einblasezeitpunkts ein hoher Druck notwendig. Am untersuchten Betriebspunkt (1500 min^{-1} , $4,5 \text{ bar } p_{m,i}$) ist ein Druck von 8 bar absolut in der Spülleitung nötig.

Anhand optischer Messmethoden kann das Ausbreitungsverhalten von Vorkammer-Fackelstrahlen näher beschrieben werden. Die Aufnahme des Eigenleuchtens des Hydroxyl-Radikals im optisch zugänglichen Motor zeigt die unterschiedliche Ausbreitung der Zündung im Hauptbrennraum. Während im Magerbetrieb die Zündung in den Fackelstrahlen startet, durchdringen die Freistrahlen den Brennraum bei stöchiometrischem Betrieb sehr schnell. Eine homogene Flammenausbreitung von außen nach innen ist deutlich zu erkennen. Die höchste Intensität des OH^* -Radikals ist bei der größten Wärmefreisetzung erkennbar. Dagegen ist im Magerbetrieb ein initialer Peak auf Grund der Fackelstrahlen sichtbar. Hier wird die höchste Intensität einzelner Pixel früh im Zyklus aufgezeichnet. Der größte Umsatz findet dennoch homogen-mager statt.

Eine eingehende Analyse der Fackelstrahlen unter kontrollierten Umgebungsbedingungen kann in einer Einspritzkammer unter konstantem Druck und geringer Ladungsbewegung vorgenommen werden. Mit einem reaktiven Gemisch im Hintergrund kann die Flammenausbreitung eines einzelnen Fackelstrahls bestimmt werden. Dabei wird festgestellt, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Fackelstrahls selbst senkrecht zur Achse der Übertrittsbohrung die Flammenausbreitung der Funkenzündung übertrifft. Hier kann die Abmagerung des Gemischs im Hauptbrennraum bis etwa $\lambda = 1,6$ von der Vorkammerzündung kompensiert werden. In dem gezeigten Versuch wird eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von etwa 3 m/s erreicht, die mit der konventionellen Funkenzündung mit stöchiometrischem Hintergrundgemisch ermittelt wurde.

Die aktive Vorkammer ermöglicht eine Erhöhung des Wirkungsgrads des Brennverfahrens, bringt aber eine Vielzahl an Parametern mit, die aufeinander abgestimmt werden müssen. Eine breite Werkzeugkette von optischen und motorischen Messtechniken kann die Zusammenhänge im Brennverfahren aufzeigen.

Abstract

Pre-chamber ignition is a possibility to realise combustion processes with a highly diluted cylinder charge in passenger car gasoline engines. These are recognised for their higher efficiency due to a higher isentropic exponent and lower temperatures and thus lower wall heat losses. However, a higher ignition energy is required to ignite this charge reliably. Active pre-chamber ignition uses a pre-chamber as a separate component, which is connected to the main combustion chamber via transfer holes. Inside this pre-chamber, a spark plug ignites a mixture that is easy to ignite. The ignition causes hot, reactive gases to enter the main combustion chamber through the transfer holes and initiates the ignition of the diluted charge. The creation of a good ignitable mixture in the pre-chamber is a challenge that is met in active pre-chamber ignition by a separate pre-chamber scavenging. Due to the simplified mixture formation and the better metering accuracy, a gaseous fuel is particularly suitable for enriching the mixture in the pre-chamber.

This thesis shows possibilities and limits of such an active pre-chamber ignition for passenger car gasoline engines. For this purpose, a pre-chamber is developed which can be tested in modern passenger car engines with M14 or M12 spark plug threads without modification to the cylinder head in order to simplify testing. In order to achieve an active enrichment of the mixture for the pre-chamber scavenging without a separately carried gaseous fuel, low-boiling components of petrol are used. Two different fuel systems are set up for testing on the engine test bench. Depending on the operating strategy (lean operation or charge dilution with residual gas), the composition of the purge gas and the pressure range of the injection must be adjusted.

For lean-burn operation, a small amount of fuel vapour-air mixture with high concentration at relatively low pressure can be injected into the pre-chamber early in the engine cycle. Due to the excess air in the main combustion chamber, the mixture composition in the pre-chamber is diluted in the course of the compression stroke by the ingress of air via the transfer ports until a readily ignitable mixture with a slight excess of fuel is present at the ignition point. At the investigated operating point (1500 min^{-1} , 4.5 bar indicated mean pressure), stable engine combustion up to $\lambda = 1.95$ is possible. An increase in the indicated efficiency of 5.5 percentage points compared to the stoichiometric mixture is observed. At the same time, the NO_x raw emissions drop to below 20 ppm. However, this is necessary because no 3-way catalytic converter can be used in lean-burn operation.

In lean-burn operation, the most important task of the active scavenging is to flush the combustion products out of the pre-chamber. At the same time, during the compression stroke, the high proportion of residual gas in the main combustion chamber causes burnt gas to enter the pre-chamber. The pre-chamber must therefore be purged with a stoichiometric mixture as shortly as possible before the ignition point. The purging quantity must be sufficient to reduce the residual gas content in the pre-chamber to such an extent that safe spark ignition is guaranteed. In order to be able to introduce this quantity of the stoichiometric fuel/air mixture into the pre-chamber, a high pressure is necessary due to the late injection time. At the operating point investigated (1500 min^{-1} , $4.5 \text{ bar } p_{m,i}$), a pressure of 8 bar abs. is required as scavenging pressure.

Optical measurement methods can be used to describe the propagation behaviour of pre-chamber flame jets in more detail. The recording of OH^* -chemiluminescence in the optically accessible engine shows different ways of ignition propagation in the main combustion chamber. While ignition starts in the flame jets in lean-burn operation, the free jets penetrate the combustion chamber very quickly in stoichiometric operation. A homogeneous flame propagation from the outside to the inside is clearly visible. The highest intensity of the OH^* -radical can be seen at the highest heat release. In contrast, an initial peak due to the flame jets is recognisable in lean operation. The highest intensity of individual pixels is recorded early in the cycle. Nevertheless, the greatest conversion takes place homogeneously in lean mode.

A detailed analysis of the flame jets under controlled ambient conditions can be carried out in an injection chamber under constant pressure and low charge movement. Especially with a reactive mixture in the background, the flame spread of a single flame jet can be determined. It is found that the propagation velocity of the flame jet itself perpendicular to the axis of the transfer hole exceeds the flame propagation of the spark ignition. The leaning of the mixture in the main combustion chamber up to about $\lambda = 1.6$ can be compensated by the pre-chamber ignition. In the experiment shown, the propagation speed of about 3 m/s can be achieved here, which was determined using conventional spark ignition with a stoichiometric background mixture.

The active pre-chamber enables an increase in the efficiency of the combustion process, but also involves a large number of parameters that need to be adjusted to one another. A broad tool chain of optical and engine measurement techniques can reveal the correlations in the combustion process.

Inhaltsangabe

I	Abkürzungsverzeichnis	IX
II	Formelzeichen.....	X
1	Vorkammerzündung in Personenkraftwagen	1
2	Basis der Vorkammerzündung	2
2.1	Grundlagen des Brennverfahrens mit Vorkammerzündung.....	2
2.2	Meilensteine und aktueller Stand der Technik.....	6
3	Konzeption eines Vorkammerzündsystems mit aktiver Spülung	10
3.1	Entwicklungsbereich Kraftstoffsystem	10
3.1.1	Kraftstoffsystem für Magerbrennverfahren	14
3.1.2	Kraftstoffsystem für hohe Restgasanteile	20
3.2	Entwicklungsbereich Vorkammergeometrie	21
3.2.1	Konstruktion der Vorkammer	22
3.2.2	Konstruktion eines Rückschlagventils	26
4	Untersuchung der aktiven Vorkammerzündung mit optischer Messtechnik.....	29
4.1	Grundlagen der verwendeten Messtechniken	29
4.1.1	OH*-Eigenleuchten	29
4.1.2	Schlieren-Messtechnik	29
4.2	Stand der optischen Messtechnik für Vorkammerzündung	30
4.3	Untersuchung des OH*-Eigenleuchtens im optisch zugänglichen Motor.....	32
4.3.1	Versuchsaufbau	32
4.3.2	Ergebnisse	35
4.4	Untersuchung der aktiven Vorkammer in der Einspritzkammer	41
4.4.1	Optischer Prüfstand OptiVeP	41
4.4.2	Versuchsaufbau für Schlierenaufnahmen in der Draufsicht	42
4.4.3	Bildverarbeitung Draufsicht-Schlierenaufbau.....	44
4.4.4	Ergebnisse der Schlierenaufnahmen in der Draufsicht	46
4.5	Weiterentwicklung der Messumgebung für reaktive Gemische	49
4.5.1	Versuchsaufbau	49
4.5.2	Bildverarbeitung	52
4.5.3	Ergebnisse	55

5	Brennverfahren mit aktiver Vorkammerspülung	66
5.1	Grundlagen der Analyse des Brennverfahrens durch Zylinderdruckindizierung	66
5.2	Motorversuch mit aktiver Vorkammerzündung	67
5.2.1	Versuchsaufbau am Motorprüfstand	67
5.2.2	Vorkammerspülung im Magerbetrieb	71
5.2.3	Vorkammerbetrieb mit erhöhtem Restgasanteil	76
5.3	Modellbildung der Vorkammerzündung mittels 1D-Simulation	81
5.3.1	Aufbau und Kalibrierung des Simulationsmodells	83
5.3.2	Analyse des Brennverfahrens anhand der Motorprozessrechnung	86
6	Zusammenführung der Ergebnisse	97
6.1	Bewertung der Messmethoden für aktive Vorkammerzündsysteme	97
6.2	Auslegung von Vorkammer-Zündsystemen für PKW-Ottomotoren	99
III	Literaturverzeichnis	102
IV	Abbildungsverzeichnis	111
V	Tabellenverzeichnis	115
VI	Anhang	116
A	Abbildungen der Vorkammer-Kraftstoffsysteme:	116
B	Schaltbild des Vorkammer-Kraftstoffsystems für hohe AGR	117
C	GT-Power Modellaufbau	118
D	Publikationsliste	119
E	Betreute Abschlussarbeiten	121