



Technische  
Universität  
Braunschweig



**Michael Wörner**

# Kompressionshubeinspritzung zur Klopfvermeidung beim Ottomotor mit Miller-Zyklus

**Berichte aus dem ivb | Band 43 | Braunschweig 2023**



# Kompressionshubeinspritzung zur Klopfvermeidung beim Ottomotor mit Miller-Zyklus

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Michael Wörner, M.Eng.  
geboren in: Göppingen

eingereicht am: 10.01.2023  
mündliche Prüfung am: 14.06.2023

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts  
Prof. Dr.-Ing. Gregor Rottenkolber



Berichte aus dem ivb

Band 43

**Michael Wörner**

**Kompressionshubeinspritzung zur Klopfvermeidung  
beim Ottomotor mit Miller-Zyklus**

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.: Braunschweig, Techn. 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 978-3-8440-9163-2

ISSN 2364-3862

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand im Rahmen meiner wissenschaftlichen Anstellung im Labor Fahrzeugantrieb der Hochschule Esslingen.

Mein erster Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts für die Betreuung der Promotion und für all die damit verknüpften interessanten sowie konstruktiven Diskussionen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor möchte ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission danken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Gregor Rottenkolber gilt in vielerlei Hinsicht mein besonderer Dank. Für die Übernahme des Koreferats sowie die Anstellung in seinem Labor während meiner Promotionszeit. Noch mehr jedoch für jeglichen inspirierenden Austausch zu den Forschungsthemen während meiner Arbeit im Labor und das kritische Hinterfragen jeglicher Zusammenhänge und Antworten. Vor allem danke ich ihm in all dem für seinen kollegialen Führungsstil und die entstandene besondere Freundschaft.

Für die gute Zusammenarbeit und jegliche Unterstützung im Projekt gilt mein Dank auch Herrn Dr.-Ing. Dirk Haase von der Mercedes-Benz AG.

Weiter möchte ich mich bei meinen Kollegen im Labor Fahrzeugantrieb bedanken. Im speziellen bei Herrn Dipl.-Ing. (FH) Christoph Spang und Herrn Tim Schwellinger. Durch ihre Unterstützung bei Prüfstandsumrüstungen und Messtechnik waren die erzielten Ergebnisse erst möglich. Ein weiterer Dank gilt allen Studierenden, welche in Abschluss- und Projektarbeiten wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Ein außerordentlicher abschließender Dank gilt meiner Familie. Meinen Eltern für jegliche Begleitung und Unterstützung auf meinen bisherigen Wegen. Auch meinen Geschwistern danke ich für die bereichernden Beziehungen, die immer wieder eine wohltuende Abwechslung im Promotionsalltag waren und stets sind.

Meiner Frau Naemi bin ich im Besonderen für all ihre Unterstützung dankbar. Jeglicher ermutigender Zuspruch, das Vertrauen in all meine Vorhaben und ihr Mittragen der Arbeit auf so verschiedene Art und Weise. Ein herzlicher Dank gilt auch meiner Tochter Matilda, die mich vor allem in der Endphase regelmäßig früh morgens ermutigte aufzustehen, um das Schriftstück fertigzustellen.

Friedberg, im Juni 2023

Michael Wörner

Wenn sich jemand etwas auf sein Wissen einbildet,  
weiß er noch gar nicht, was es bedeutet, echtes Wissen zu haben.

*1. Korinther 8,2*



# Kurzfassung

Die nach dem Zündzeitpunkt auftretende Selbstzündung beim Ottomotor, das Klopfen, limitiert die Effizienz fremdgezündeter Brennverfahren in hohen Lastpunkten. Mit einer Hochdruckeinspritzung während des Verdichtungsakts wird in der vorliegenden Dissertationsschrift ein möglicher Ansatz zur Reduktion des Motorklopfens untersucht. Dabei werden Brennverfahren mit gesteigerter geometrischer Verdichtung und Miller-Zyklus fokussiert.

Zur Bewertung der Zylinderinnenströmung des Miller-Zyklus und anderer Einlasskonfigurationen wurde mit der Gasentladungsanemometrie eine Methode zur Messung der lokal an der Zündkerze vorherrschenden Strömung ausgearbeitet. Damit war es möglich sowohl die mittlere Strömung, als auch turbulente Schwankungsgeschwindigkeiten, unter Anwendung geeigneter statistischer Methoden, zu erfassen. Diese wurden zur am Prüfstand gemessenen Brenngeschwindigkeit und mit Ergebnissen einer 3D-CFD-Simulation abgeglichen.

Für die Hochdruckeinspritzung im Kompressionshub konnten verschiedene physikalische Phänomene aufgezeigt und erklärt werden. Um in den Messungen auftretende Zylinderdruckschwingungen zu differenzieren, wurde ein Klopfkriterium zur bestmöglichen Bewertung der Potentiale an der Klopfgrenze ausgearbeitet. Einlassseitig kamen ein Vollhub, zwei Miller-Nocken und eine Tumblekanaleinlage für höhere Tumblezahlen zur Anwendung. Es zeigte sich für die Hochdruckeinspritzung im Kompressionshub eine Unabhängigkeit der Brenngeschwindigkeit von der Einlassströmung. Für die Emissionen ergab sich in weiten Bereichen ebenfalls kaum ein Einfluss der Einlassströmung. Die Gemischbildung und die Turbulenz während der Verbrennung wurden weitestgehend von der Einspritzung bestimmt. Einzig der Zeitpunkt der Einspritzung während der Kompression hatte Einfluss auf Verbrennungs- und Emissionsgrößen.

Dabei konnten einzelne Einspritzzeitpunkte aufgrund der ungünstigen Sprayinteraktion mit dem Kolben als nachteilig ausgemacht werden. Für definierte Einspritzbereiche in der mittleren Phase des Verdichtungsakts war hingegen ein vorgemischtes, homogenes Brennverfahren möglich. Positiven Einfluss hatten dabei die gute Homogenisierung, eine erhöhte TKE und die verbesserte Gemischkühlung. Bei ganz späten Einspritzzeitpunkten kurz vor dem oberen Totpunkt wurde die stärkste Klopfreduktion nachgewiesen, welche auf eine reduzierte Verweilzeit des Kraftstoffs im Brennraum und eine zunehmende Ladungsschichtung zurückzuführen ist. Letzteres führte allerdings zu stark steigenden CO- und Partikelemissionen, wodurch auch keine Verbesserung des indizierten Kraftstoffverbrauchs möglich war.

Für eine gesteigerte geometrische Verdichtung von 14:1 und einen Miller-Zyklus wurden zwei verschiedene Brennverfahrensansätze aus den gewonnenen Erkenntnissen vorgestellt. Ein stöchiometrisches, homogenes Brennverfahren mit einer Einspritzung in der mittleren Phase der Kompression. Dabei waren deutliche Wirkungsvorteile in der Teillast gegenüber einer Standardkonfiguration möglich. Die maximale Motorlast konnte trotz einer Verdichtungssteigerung um drei Einheiten mit nahezu demselben Verbrennungsschwerpunkt eingestellt werden. In einem weiteren Schritt wurde ein heterogenes Magerbrennverfahren für einen begrenzten Kennfeldbereich ausgearbeitet. Dieses ermöglicht eine weitere Verbesserung des Wirkungsgrads. Mit zusätzlicher externer gekühlter Abgasrückführung konnten zudem die  $\text{NO}_x$ -Emissionen für diesen überstöchiometrischen Betrieb reduziert werden.



# Abstract

For internal combustion engines, the self-ignition after regular ignition timing, so-called engine knock, limits the efficiency of premixed gasoline combustion processes at high load. In this work, prevention of engine knock was investigated using a late injection during compression stroke with high fuel pressures. Therefore, Miller cycle and increased geometric compression ratios were focussed.

To evaluate the in-cylinder flow of the Miller cycle and further intake configurations, the voltage rise anemometry was developed to measure the local flow field at the spark plug. This technique enabled the measurement of mean flow values as well as turbulent fluctuation velocities. Therefore, appropriate statistical methods were used. For calibration purpose, a comparison was done with measured combustion parameters and a 3D-CFD simulation.

The injection with high fuel pressure during compression stroke obtained different physical phenomena. Due to noise and wave effects on the cylinder pressure signal during the investigations, a knocking criterion was developed for comparable measurements at the knock limit. For analysis of effects, three valve lift profiles were used. Additionally, a tumble flap was considered for increased tumble ratios. At all injection timings during compression stroke, no effect of the intake flow on combustion speed was determined. Furthermore, emission characteristic did not show great sensitivity on the intake flow as well. The injection dominated the mixture formation and the turbulence level during the combustion process. However, the timing of the injection during compression stroke affected combustion and emission characteristic.

Individual injection timings led to unfavourable interaction of the spray with the piston and therefore were determined as adverse strategies. However, some timings during the middle phase of the compression stroke enabled a homogenous premixed combustion process. Positive effects were attributed to a good homogenisation, an increased TKE and an improved cooling of the charge. Nevertheless, very late injection timings near top dead centre showed the greatest prevention of engine knock. The reduced retention time of the fuel in the combustion chamber and the strongly stratified mixture formation are key parameters for this benefit. However, the great stratification led to strong increased CO and particulate emissions. This again inhibited an improvement of the indicated fuel consumption.

The gained knowledge was used to develop two different combustion processes with an increased geometrical compression ratio of 14:1 in combination with a Miller cycle. For a stoichiometric homogenous combustion process, fuel was injected during the middle phase of the compression stroke. Thereby, part load measurements obtained considerable efficiency improvements compared to a standard configuration of the engine. Despite the by three units increased geometrical compression ratio, maximum engine load was possible with almost equal phasing of the combustion centre. In a second step, a heterogeneous lean combustion process was developed for a certain area of the engine map. This enabled further improvements of the indicated efficiency. Additionally, external cooled exhaust gas recirculation was used to lower NO<sub>x</sub> emissions at this lean combustion process.



# Inhalt

<b>Verzeichnisse</b>	<b>XI</b>
Abbildungen . . . . .	XI
Tabellen . . . . .	XIII
Abkürzungen . . . . .	XIV
Symbole . . . . .	XV
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>3</b>
2.1 Gasentladungsanemometrie . . . . .	3
2.1.1 Grundlagen der Gasentladung . . . . .	3
2.1.2 Umgebungseinflüsse auf die Gasentladung . . . . .	6
2.1.3 Messprinzip . . . . .	11
2.1.4 Optische Funkenvermessung . . . . .	14
2.1.5 Statistische Messung im Motor . . . . .	15
2.2 Miller-Zyklus . . . . .	17
2.2.1 Thermodynamischer Prozess . . . . .	18
2.2.2 Zylinderinnenströmung . . . . .	23
2.3 Kompressionshubeinspritzung . . . . .	24
2.3.1 Gemischbildung . . . . .	25
2.3.2 Turbulenzsteigerung . . . . .	32
2.3.3 Erhöhte Klopfestigkeit . . . . .	33
<b>3 Zielsetzung der Arbeit</b>	<b>39</b>
<b>4 Experimentelle Grundlagen</b>	<b>41</b>
4.1 Windkanal zur Zündfunkenuntersuchung . . . . .	41
4.2 Thermodynamischer Einzylinder . . . . .	42
4.2.1 Motorprüfstand . . . . .	42
4.2.2 Versuchsmotor . . . . .	43
<b>5 Methodik</b>	<b>47</b>
5.1 Klopfbewertung . . . . .	47
5.1.1 Kriterium zur Differenzierung von Zylinderdruckschwingungen . . . . .	47
5.1.2 Applikation am Prüfstand . . . . .	51
5.2 Numerische Simulation . . . . .	52
5.2.1 Simulationsmodell . . . . .	52
5.2.2 Modellierung Kraftstoffspray . . . . .	54
<b>6 Gasentladungsanemometrie als Strömungsmesstechnik</b>	<b>57</b>
6.1 Optische Strömungsmessung am Windkanal . . . . .	57
6.1.1 Funken- und Signalcharakteristik . . . . .	57

6.1.2	Optische Funkengeschwindigkeiten . . . . .	60
6.2	Methodik . . . . .	63
6.2.1	Berechnung der Spannungsgradienten . . . . .	63
6.2.2	Kalibrierung . . . . .	64
6.3	Messung turbulenter Zylinderinnenströmung . . . . .	66
6.3.1	Statistische Messung . . . . .	67
6.3.2	Verifizierung gemessener Strömung . . . . .	69
6.3.3	Turbulente kinetische Energie . . . . .	71
<b>7</b>	<b>Stöchiometrisches Brennverfahren</b>	<b>75</b>
7.1	Ladungsbewegung und Brenngeschwindigkeit . . . . .	75
7.2	Reduktion der Klopfneigung . . . . .	78
7.2.1	Homogene Verbrennung . . . . .	78
7.2.2	Geschichtete Verbrennung . . . . .	80
7.2.3	Verbrennungsschwerpunktlage . . . . .	83
7.3	Limitierung sehr später Einspritzzeitpunkte . . . . .	84
7.3.1	Rohemissionen . . . . .	84
7.3.2	Wirkungsgrad . . . . .	86
7.4	Homogene Betriebsart im Kennfeld . . . . .	87
7.4.1	Variation von Drehzahl und Drehmoment . . . . .	88
7.4.2	Kraftstoffdruckvariation . . . . .	90
<b>8</b>	<b>Heterogenes Magerbrennverfahren</b>	<b>93</b>
8.1	Parameter der zweiten Einspritzung . . . . .	94
8.1.1	Mengenaufteilung . . . . .	94
8.1.2	Differenzwinkel zwischen Einspritzung und Zündung . . . . .	96
8.2	Kraftstoffdruckvariation . . . . .	102
8.3	Steuerzeitenvariation . . . . .	104
8.4	Gemischverdünnung . . . . .	106
8.4.1	Variation des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses . . . . .	106
8.4.2	Abgasrückführung . . . . .	107
8.5	Potentiale und Grenzen . . . . .	109
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>111</b>
	<b>Literatur</b>	<b>XXXI</b>