

# **Berichte zur Thermodynamik und Verfahrenstechnik**

Herausgeber:

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

Schriftenreihe Heft 2019-2

MORITZ SCHUMACHER

## **Einfluss des Brennverfahrens auf die Thermodynamik des Wasserstoffmotors mit Niederdruck-Direkteinblasung**

# **Einfluss des Brennverfahrens auf die Thermodynamik des Wasserstoffmotors mit Niederdruck-Direkteinblasung**

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

zur  
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Moritz Schumacher  
aus Stuttgart

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

Tag der mündlichen Prüfung:	29.07.2019
Vorsitzender des Promotionsorgans:	Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing
Gutachter:	Prof. Dr. Peter Wasserscheid

Berichte zur Thermodynamik und Verfahrenstechnik

Band 2/2019

**Moritz Schumacher**

**Einfluss des Brennverfahrens auf die  
Thermodynamik des Wasserstoffmotors  
mit Niederdruck-Direkteinblasung**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag  
Düren 2019

**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., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6914-3

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

## Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand als Dissertation im Rahmen meiner Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) in der Arbeitsgruppe motorische Verbrennung.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Michael Wensing für die hervorragende Betreuung meiner Dissertation und für die überaus positive Atmosphäre in der Arbeitsgruppe. Zahlreiche fachliche Diskussionen mit ihm haben immer wieder neue Lösungen aufgezeigt und Ideen reifen lassen und so stets zur Motivation beigetragen. Ebenso gilt mein Dank Herrn Professor Dr.-Ing. Stefan Will für die durchwegs angenehme Zusammenarbeit am Lehrstuhl und die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission. Herrn Professor Dr. Peter Wasserscheid danke ich für die spannenden Themen und die Zusammenarbeit im Bavarian Hydrogen Center und die Anfertigung des Zweitgutachtens. Herrn Prof. Dr.-Ing. Johann Jäger danke ich für die Rolle als weiteres Mitglied der Prüfungskommission.

Mein weiterer Dank gilt den technischen Angestellten des Lehrstuhls und den fleißigen Damen im Sekretariat, ohne deren Hilfe die Bürokratie jeglichen Arbeitseifer erstickt hätte. Des Weiteren danke ich all meinen Kollegen, insbesondere Christoph Müller Philipps Sohn für die geniale Bürogemeinschaft, Richard Welß für die schnelle und kompetente Hilfe bei Technik und Prüfstand sowie dem Team am Prüfzentrum in Nürnberg, Dr.-Ing. Sebastian Rieß, Lukas Weiß und Andreas Peter für die Unterstützung bei den optischen Untersuchungen.

Weiter danke ich den fleißigen Studierenden, allen voran Mischa Schött, Marco Bertelshofer, Tobias Müller, Melanie Fauser, Tim Russwurm, Alexander Durst, Anna Lehner, Julian Hebold, Wilhelm Römisch, Andreas Brahner, Philipp Goik und Dr.-Ing. Raphael Distler für die Unterstützung, Ideen und Diskussionen. Es freut mich sehr, dass einige zwischenzeitlich zu Kollegen geworden sind. Herrn Dr.-Ing. Markus Bauer danke ich für die Hilfe bei der Inbetriebnahme des Motors und Herrn Dr.-Ing. Johannes Michl für die Diskussionen zum Wasserstoffmotor.

Zu guter Letzt danke ich von ganzem Herzen meiner Familie, meinen Großeltern, meinen Eltern, meinen Schwestern und ganz besonders meiner Frau für die Unterstützung, das Verständnis und den Zuspruch während der Dissertation und die Hilfe beim Lektorat.

Diese Arbeit wurde durch die Förderung des Bavarian Hydrogen Center, einem Kooperationsprojekt der FAU mit der Technischen Universität München, der Universität Bayreuth, dem Fraunhofer UMSICHT und der Hochschule Amberg, durch die Bayerische Staatsregierung ermöglicht.

Teilergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden in den folgenden Aufsätzen, Tagungsbeiträgen und Vorträgen vorab publiziert:

Moritz Schumacher, Thomas Mederer und Michael Wensing. „Investigations on a New Engine Concept for Small Hydrogen Power Generation Units Using LOHCs, SAE Paper 2013-01-2525“. In: *SAE 2013 International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting*. SAE Technical Paper Series. Warrendale, PA, Vereinigte Staaten: SAE International, 2013. DOI: 10.4271/2013-01-2525.

Moritz Schumacher und Michael Wensing. „Investigations on an Injector for a Low Pressure Hydrogen Direct Injection, SAE Paper 2014-01-2699“. In: *SAE 2014 International Powertrain, Fuels & Lubricants Meeting*. SAE Technical Paper Series. Warrendale, PA, Vereinigte Staaten: SAE International, 2014. DOI: 10.4271/2014-01-2699.

Moritz Schumacher und Michael Wensing. „Experimental Study on an Engine with Low Pressure Hydrogen Direct Injection“. In: 6th World Hydrogen Technologies Convention (WHTC). Sydney, Australien, 11.-14. Oktober 2015.

Moritz Schumacher und Michael Wensing. „Ein Injektor für eine Niederdruck Wasserstoff-Direkteinblasung“. In: *10. Tagung Gasfahrzeuge*. Stuttgart, 20.-21. Oktober 2015.

Moritz Schumacher et al. „Internal Combustion Engines for LOHC Derived Hydrogen“. In: iSEneC 2016. Nürnberg, 11.-12. Juli 2016.

Moritz Schumacher und Michael Wensing. „Combustion Process Development for a SI Engine with Low Pressure Hydrogen Direct Injection“. In: 7th World Hydrogen Technologies Convention (WHTC). Prag, 9.-12. Juli 2017.

Moritz Schumacher und Michael Wensing. „Combustion Process Development for Low Pressure Hydrogen Direct Injection“. In: *12. Tagung Gasfahrzeuge*. Stuttgart, 24.-25. Oktober 2017.

## Kurzfassung

Die Entwicklung von Wasserstoffmotoren hat vor allem seit den 2000er Jahren eine Vielfalt von Brennverfahren hervorgebracht. Bei reinen Forschungsprojekten zeigen dabei Konzepte mit Hochdruck-Direkteinblasung, global magerer Schichtladung und hoher Verdichtung das größte Potential hinsichtlich des Wirkungsgrades und der Abgasemissionen.

Eine Analyse möglicher Wasserstoff-Speichertechnologien und deren Randbedingungen ergibt allerdings, dass unabhängig von der Art der Wasserstoffspeicherung in praktischen Anwendungen ein kontinuierlicher Versorgungsdruck von maximal 20 bar zu erwarten ist. Im Fall von LOHC als Wasserstoffspeicher muss von einem Versorgungsdruck von unter 5 bar ausgegangen werden. Da eine zusätzliche Verdichtung des Wasserstoffs aufgrund dessen geringer Dichte mit großen Wirkungsgradverlusten verbunden ist, kann für reale Anwendungen ausschließlich ein Brennverfahren mit Niederdruck-Direkteinblasung in Frage kommen. Betrachtet man die publizierten Arbeiten in diesem Bereich, so fällt auf, dass deren Anzahl und Umfang deutlich geringer ist, weshalb viele Fragen zu Brennverfahren mit Wasserstoff-Niederdruck-Direkteinblasung weiterhin offen sind.

Die vorliegende Arbeit untersucht daher die Einflussparameter des Brennverfahrens auf die Thermodynamik von Wasserstoffmotoren mit Niederdruck-Direkteinblasung und gibt Empfehlungen für die optimale Gestaltung eines solchen Brennverfahrens. Hierfür wird ein moderner PKW-Ottomotor auf den Betrieb mit Wasserstoff umgerüstet und experimentell untersucht. Dies umfasst die Entwicklung eines geeigneten Injektors und dessen umfangreiche Qualifizierung für den Einsatz im Motor. Der Versuchsmotor für die Untersuchungen ist mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet, neben einer vollständigen Indizierung werden alle Energie- und Enthalpieströme über die Systemgrenzen gemessen. An sechs repräsentativen Betriebspunkten von 3,3 bar bis 10,5 bar indiziertem Mitteldruck und  $1500 \text{ min}^{-1}$  bis  $2500 \text{ min}^{-1}$  wird ein Versuchsplan aus 34 Versuchsreihen durchgeführt. Dabei werden die Parameter Ladungsverdünnung durch Luft und rückgeführtes Abgas, Ladungsbewegung durch Tumble und Einblasung sowie die Ladungsschichtung durch Einblasezeitpunkt und durch die Strahlgeometrie variiert.

Die Messungen werden, unterstützt durch eine simultan durchgeführte 1D-Motorsimulation, hinsichtlich des Wirkungsgrades, der Emissionen und des Brennverlaufs analysiert. Die Prozessverluste werden mittels Energiebilanzen und Verlustteilung bewertet. An einzelnen Messpunkten wird eine differentielle Druckverlaufsanalyse durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass auch die Niederdruck-Direkteinblasung viele der Vorteile erzielen kann, die sich in veröffentlichten Untersuchungen mit Hochdruck-Direkteinblasung gezeigt haben und macht diese Vorteile damit in realen Anwendungen nutzbar. Mit einer geeigneten Aufladung sind damit effektive Wirkungsgrade von deutlich über 40 % und Stickoxidemissionen unter 10 ppm für Motoren im PKW-Maßstab zu erwarten.

## Abstract

The development of hydrogen engines has led to a variety of combustion processes, especially since the 2000s. In pure research projects, concepts with high-pressure direct injection, globally lean stratified charge and high compression ratio show the greatest potential in terms of efficiency and exhaust emissions.

An analysis of possible hydrogen storage technologies and their boundary conditions shows, however, that regardless of the type of hydrogen storage in practical applications, a continuous supply pressure of a maximum of 20 bar can be expected. In the case of LOHC as hydrogen storage, a supply pressure of less than 5 bar must be assumed. Due to its low density, an additional compression of the hydrogen is associated with large efficiency losses so only a combustion process with low-pressure direct injection can be considered for real applications. Looking at the published work in this area, it is noticeable that their number and scope is significantly smaller, which is why many questions on combustion processes with hydrogen low-pressure direct injection remain unanswered.

The present work examines the influencing parameters of the combustion process on the thermodynamics of hydrogen engines with low-pressure direct injection and gives recommendations for the optimum design of such a combustion process. For this purpose, a modern passenger car gasoline engine is converted to hydrogen operation and experimentally investigated. This includes the development of a suitable injector and its extensive qualification for use in the engine. The test engine for the investigations is equipped with extensive measurement technology. In addition to complete pressure indication, all energy and enthalpy flows are measured across system boundaries. At six representative operating points from 3.3 bar to 10.5 bar indicated mean pressure and  $1500 \text{ min}^{-1}$  to  $2500 \text{ min}^{-1}$  a test plan from 34 test series is carried out. The parameters charge dilution by air and recirculated exhaust gas, charge motion by tumble and gas injection as well as charge stratification by injection time and by jet geometry are varied.

The measurements are analysed regarding efficiency, emissions and combustion process, supported by a simultaneous 1D engine simulation. The process losses are evaluated by means of energy balances and loss sharing. A differential pressure curve analysis is carried out at individual measuring points.

The results show that low-pressure direct injection can achieve many of the advantages shown in published investigations with high-pressure direct injection, and makes these advantages usable in real applications. With a suitable turbocharging, effective efficiencies of well over 40 % and nitrogen oxide emissions below 10 ppm can be expected for passenger car engines.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>7</b>
2.1 Wasserstoff als Speicher regenerativer Energien . . . . .	7
2.2 Speicherung von Wasserstoff . . . . .	8
2.3 Wasserstoff als Motorkraftstoff . . . . .	10
2.3.1 Stoffeigenschaften . . . . .	10
2.3.2 Verbrennung und Emissionen . . . . .	12
2.3.3 Kraftstoffsyste.me . . . . .	14
2.3.4 Einblaseventile . . . . .	16
2.3.5 Randbedingungen für den Verbrennungsmotor . . . . .	19
2.4 Brennverfahren und Wirkungsgrad . . . . .	22
2.4.1 Einflussfaktoren auf den Wirkungsgrad . . . . .	23
2.4.2 Brennverfahren mit Hochdruck-Direkteinblasung . . . . .	25
2.4.3 Energetische Betrachtung der Hochdruck-Direkteinblasung . . . . .	27
2.4.4 Brennverfahren mit Niederdruck-Direkteinblasung . . . . .	29
2.5 Aufgabenstellung . . . . .	31
<b>3 Methodik der Brennverfahrensentwicklung</b>	<b>33</b>
3.1 Kreisprozessrechnung . . . . .	34
3.2 Injektorentwicklung . . . . .	34
3.2.1 Anforderungsprofil . . . . .	34
3.2.2 Dynamik, Tribologie und Leckage . . . . .	36
3.2.3 Auslegung der Strahlgeometrie . . . . .	36
3.3 Motorprüfstand . . . . .	39
3.4 Motorsimulation . . . . .	39
3.4.1 Ansaug- und Abgastrakt . . . . .	40
3.4.2 Modellierung des Brennraums . . . . .	44
3.4.3 Zwei-Zonen-Brennraummodell . . . . .	46
3.4.4 Wandwärmeverluste . . . . .	49
3.4.5 Aufbau und Kalibrierung des Simulationsmodells . . . . .	55
3.5 Thermodynamische Analyse . . . . .	59
3.5.1 Energiebilanz . . . . .	59
3.5.2 Verlustteilung . . . . .	63
3.5.3 Differentielle Druckverlaufsanalyse . . . . .	67

<b>4</b>	<b>Experimenteller Aufbau und Vorgehensweise</b>	<b>71</b>
4.1	Injektorentwicklung . . . . .	71
4.1.1	Modifikation des Injektors . . . . .	71
4.1.2	Injektorprüfstand und Dauerlauf . . . . .	74
4.1.3	Charakterisierung der Strahlausbreitung . . . . .	76
4.1.4	Montage, Ansteuerung und Betrieb im Motor . . . . .	77
4.2	Motorprüfstand und Steuerung . . . . .	79
4.3	Versuchsmotor . . . . .	81
4.4	Messtechnik . . . . .	84
4.4.1	Druckindizierung . . . . .	84
4.4.2	Abgasmesstechnik . . . . .	84
4.4.3	Weitere Messtechnik . . . . .	85
4.5	H <sub>2</sub> -Regelstrecke und Sicherheitskonzept . . . . .	85
4.6	Untersuchte Betriebspunkte . . . . .	87
4.7	Ablauf der Messungen . . . . .	89
4.8	Parametervariationen . . . . .	90
<b>5</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion der Injektorentwicklung</b>	<b>93</b>
5.1	Dauerlauf und Leckage . . . . .	93
5.2	Tribologisches Verhalten der Kontaktflächen . . . . .	94
5.3	Charakterisierung der Strahlausbreitung . . . . .	96
5.4	Betrieb im Motor . . . . .	100
<b>6</b>	<b>Einflussparameter des Brennverfahrens</b>	<b>105</b>
6.1	Ladungsverdünnung . . . . .	105
6.1.1	Kraftstoff-Luft-Verhältnis . . . . .	105
6.1.2	Interne Abgasrückführung . . . . .	112
6.1.3	Vergleich der Ladungsverdünnung durch Luft und Abgas . . . . .	117
6.2	Ladungsbewegung . . . . .	122
6.2.1	Tumble . . . . .	122
6.2.2	Einblasedruck . . . . .	126
6.3	Ladungsschichtung . . . . .	129
6.3.1	Einblasezeitpunkt . . . . .	129
6.3.2	Strahlgeometrie . . . . .	137
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>147</b>
	<b>Literatur</b>	<b>155</b>