

Untersuchungen zum Einsatz von Alkoholen in modernen Ottomotoren

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

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. Jan Dyckmans
aus (Geburtsort): Neuss

eingereicht am: 28.04.2015
mündliche Prüfung: 06.11.2015

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts
Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker

Berichte aus dem ivb

Band 12

Jan Dyckmans

**Untersuchungen zum Einsatz von Alkoholen
in modernen Ottomotoren**

Shaker Verlag
Aachen 2016

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., 2015

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4301-3

ISSN 2364-3862

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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



Sometimes Alcohol is the Answer

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand im Zentralbereich Forschung & Vorausentwicklung der Robert Bosch GmbH in Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit, seine wohlwollende Unterstützung und Geduld sowie die hilfreichen Ideen und seinen Pragmatismus, welcher oft im Weg liegende Steine umgehen ließ. Herrn Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker danke ich für das entgegengebrachte Interesse an dieser Arbeit und die bereitwillige Übernahme des Koreferats. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Radespiel für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Herrn Dr.-Ing. Thorsten Raatz bin ich zu Dank verpflichtet für die Initiierung der Arbeit und die fortwährende Unterstützung, so dass selbst in wirtschaftlich schwierigen Zeiten und ohne Projektzugehörigkeit der Alkohol nie ausging. Mein ganz besonderer Dank gebührt Herrn Dr.-Ing. Stefan Arndt, der durch sein großes Interesse an dieser Arbeit sowie der unermüdlichen Bereitschaft zu Diskussion und Gedankenaustausch einen maßgeblichen Anteil daran hat, dass diese Arbeit erfolgreich abgeschlossen wurde. Stellvertretend für alle Mitarbeiter und Kollegen der Robert Bosch GmbH sei an dieser Stelle den Herren Martin Noack und Thorsten Heidinger für die entgegengebrachte Unterstützung gedankt. Durch die Kollegen fand ich Rahmenbedingungen vor, die ein konzentriertes und zielstrebiges Arbeiten ermöglichten.

Meinen Mitstreitern Daniel Hertler, Sebastian Müller, Matthias Zink, Henning Heikes und Martin Buschbeck danke ich für die allzeit gute Arbeitsatmosphäre, die gegenseitige Unterstützung und Motivation.

Ein Dankeschön an meine Freunde, die auch in schwierigen Zeiten zu mir gehalten, Verständnis aufgebracht und mich unermüdlich moralisch unterstützt haben.

Abschließend sei an dieser Stelle ein ganz besonderer Dank meinen Eltern ausgesprochen, die mir auf meinem bisherigen Weg immer alles ermöglicht und mich stets mit Verständnis und Motivation begleitet haben. Danke!

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	VII
Kurzfassung	XIII
Abstract	XV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Ziel	1
1.2 Inhalt und Aufbau der Arbeit	3
2 Stand der Technik	5
2.1 Trends der Motorenentwicklung	5
2.1.1 Die Benzindirekteinspritzung	5
2.1.2 Downsizing und damit verbundene Herausforderungen	11
2.2 Heutige und zukünftige Kraftstoffszenarien	14
2.2.1 Aktuelle Situation	14
2.2.2 Treiber für alternative Kraftstoffe	16
2.2.3 Anforderungen an einen Alternativkraftstoff	20
2.3 Alkohole als alternativer Kraftstoff	22
2.3.1 Eigenschaften der Alkohole	22
2.3.2 Alkoholherstellung	34
2.3.3 Einsatz von Alkoholen als Kraftstoff	39
3 Versuchsträger und Messtechnik	47
3.1 Kraftstoffe	47
3.2 Versuchsträger und Messtechnik	50
3.2.1 Hydraulischer Druckanstiegsanalysator	50
3.2.2 Druckkammer	52
3.2.3 Transparentmotor	54
3.2.4 Einzylindermotor	56
3.2.5 Vergleich zwischen konventionellem und optisch zugänglichem Einzylinderraggregat	58

3.2.6	Optische Messtechnik	60
3.2.7	Thermodynamische Analyse	70
3.2.8	Sonstige Messtechnik	72
4	Untersuchungen zur Gemischbildung	75
4.1	Ventilvermessung	76
4.1.1	Gegendruckabhängigkeit	77
4.1.2	Einspritzdruckabhängigkeit	80
4.1.3	Streuung	81
4.1.4	Öffnungs- und Schließverhalten	82
4.2	Gemischbildung unter stationären Bedingungen	85
4.2.1	Bewertung der axialen Penetration	88
4.2.2	Bewertung des Strahlwinkels	92
4.2.3	Bewertung der Zerstäubungsgüte	94
4.2.4	Bewertung der Dampfphase	98
4.3	Gemischbildung unter instationären Bedingungen	101
4.3.1	Sprayausbreitung	103
4.3.2	Bewertung der Reproduzierbarkeit	105
4.4	Zusammenfassung der Gemischbildungsuntersuchungen	110
5	Untersuchungen zu Verbrennung und Emissionen	113
5.1	Grundlegende Untersuchung der Verbrennung	113
5.1.1	Die Verbrennung bei unterer Teillast und hoher Last	114
5.1.2	Verbrennung und Emissionen innerhalb eines Lastschnitts	118
5.1.3	Einfluss von AGR, Luft-Kraftstoff-Verhältnis und Ansteuerbeginn	121
5.2	Flammenausbreitung	126
5.2.1	Entwicklung der Flammenfläche	128
5.2.2	Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Flamme	132
5.3	Anhebung des Verdichtungsverhältnisses	135
5.3.1	Unterschiede in der Verbrennung bei angehobenem Verdichtungs- verhältnis	137
5.3.2	Verbrennung und Emissionen innerhalb eines Lastschnitts bei angehobenem Verdichtungsverhältnis	138
5.3.3	Einfluss von AGR, Luft-Kraftstoff-Verhältnis und Ansteuerbeginn auf die Verbrennung bei angehobenem Verdichtungsverhältnis	141
5.4	Wirkungsgradvorteil durch Alternativkraftstoff und Anhebung der Kom- pression	144

5.5	2-Tank-System	147
5.6	Zusammenfassung der Verbrennungs- und Emissionsuntersuchungen	153
6	Zusammenfassung	159
	Literaturverzeichnis	163
	Anhang	177
A	Stoffwerte	177
B	Motordaten	178
C	Datenfilterung am HDA	178
D	Weitere Ergebnisse der Gemischbildungsuntersuchungen	179
	D.1 Stationäre Bedingungen	179
	D.2 Instationäre Bedingungen	181
E	Datenaufbereitung Flammenuntersuchungen	183
F	Weitere Ergebnisse der Verbrennungs- und Emissionsuntersuchungen	184
	F.1 Referenz-Verdichtungsverhältnis	184
	F.2 Angehobenes Verdichtungsverhältnis	185