



Technische
Universität
Braunschweig



Dipl.-Ing. Jörn Schech

Auslegung eines kleinvolumigen direkteinspritzenden Ottomotors und Charakterisierung seines Betriebs- und Emissionsverhaltens

Berichte aus dem ivb | Band 30 | Braunschweig 2020

Auslegung eines kleinvolumigen direkteinspritzenden Ottomotors und Charakterisierung seines Betriebs- und Emissionsverhaltens

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. Jörn Schech
aus (Geburtsort): Alfeld (Leine)

eingereicht am: 20. Juni 2019
mündliche Prüfung am: 22. Oktober 2020

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts
Prof. Dr.-Ing. Hermann Rottengruber

Berichte aus dem ivb

Band 30

Jörn Schech

**Auslegung eines kleinvolumigen direkt-
einspritzenden Ottomotors und Charakterisierung
seines Betriebs- und Emissionsverhaltens**

Shaker Verlag
Düren 2020

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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7759-9

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 • E-Mail: info@shaker.de

„Beim Ottomotor hat Downsizing noch mehr Potenzial als beim Diesel“¹

¹ Neußer, Jakob 2012: Interview: „Die Kundenpreise in akzeptablen Größen halten“; In: Motortechnische Zeitschrift (73), 05/2012, S. 365

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität Braunschweig. Die Untersuchungen erfolgten im Rahmen des Forschungsvorhabens „GDI-Grenzdurchmesser“ der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) e.V.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts gilt mein Dank für die Förderung dieser Arbeit und sein stetes Interesse am Fortgang der Untersuchungen, das entgegengebrachte Vertrauen und die Übernahme der Berichterstattung. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Hermann Rottengruber bedanke ich mich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ich danke den Mitgliedern des Arbeitskreises des FVV-Forschungsvorhabens unter der Leitung von Herrn Marc Sens für das große Interesse, die angenehme Zusammenarbeit und die fruchtbaren Diskussionen, die maßgeblich zum erfolgreichen Abschluss des Projektes und dieser Arbeit beigetragen haben.

Allen meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am Institut danke ich für die Unterstützung und die Hilfsbereitschaft. Vielen Dank für die schöne Zeit und den Spaß, den wir gemeinsam hatten.

Besonders möchte ich Herrn Alexander Wiebe[†] erwähnen, dem ich meinen besonders herzlichen Dank leider nicht mehr persönlich ausdrücken kann. Auch Herrn Arne Todt gebührt besonders herzlicher Dank. Ohne Euer Engagement und Eure Begeisterung wäre das Projekt, aber auch diese Arbeit, nicht erfolgreich abgeschlossen worden.

Herzlich danke ich meinen Eltern und meiner Familie dafür, dass sie mir jederzeit zur Seite gestanden und unterstützt haben.

Meiner Frau Ann-Katrin danke ich herzlich für die richtigen Impulse zur rechten Zeit.

Endeholz, November 2020

Jörn Schech

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
1 Einleitung und Motivation	1
2 Stand der Technik	5
3 Ottomotorische Gemischbildung mit Direkteinspritzung	8
3.1 Einspritzventile für die Benzindirekteinspritzung	9
3.2 Ottomotorische Gemischbildung	15
3.3 Ladungsbewegung und Transport des Gemisches	17
4 Emissionen bei der ottomotorischen Verbrennung	21
4.1 Kohlenmonoxid-Emissionen	21
4.2 Stickoxid-Emissionen	22
4.3 Kohlenwasserstoff-Emissionen	23
4.4 Partikel-Emissionen	24
5 Voruntersuchungen zur Ermittlung geeigneter Konzepte	28
5.1 CAD-Studien zur Ermittlung geeigneter Ventilkonzepte	28
5.1.1 Variationsparameter bei zentraler Injektorposition	30
5.1.2 Variationsparameter bei seitlicher Injektorposition	31
5.1.3 Ergebnisse der CAD-Studie	32
5.2 Berechnung effektiver Betriebsgrößen	34
5.2.1 Verbrennungsmodell	35
5.2.2 Reibmodell	38
5.2.3 Aufladung	41
5.2.4 Ergebnisse der 1D-Simulationen	42
5.3 Zusammenfassung der CAD-Studie und der 1D-Simulationen	48
6 Konstruktion des untersuchten Zylinderkopfes	49
6.1 Auslegung der Einlasskanäle	49
6.2 Auslegung des Kühlwassermantels	51
6.3 Konstruktionsdetails des Zylinderkopfes	53
7 Versuchsträger und Messtechnik	56

Inhaltsverzeichnis

7.1	Verwendete Messtechnik	56
7.2	Versuchsträger.....	57
8	Experimentelle Untersuchungen.....	60
8.1	Bewertungskriterien der Untersuchungen.....	60
8.2	Untersuchte Betriebspunkte und Versuchsdurchführung.....	62
8.3	Voruntersuchungen	63
8.3.1	Bestimmung der verbrauchsoptimalen Schwerpunktlage.....	63
8.3.2	Untersuchungen mit Saugrohreinspritzung	65
8.4	Untersuchungen im niedrigen Teillastbetrieb bei Variation der Drehzahl.....	68
8.4.1	Betriebspunkt 1 bei $n = 1200$ 1/min und $p_{mi} = 3,9$ bar.....	68
8.4.2	Betriebspunkt 2 bei $n = 1800$ 1/min und $p_{mi} = 4$ bar.....	80
8.4.3	Vergleich der partikeloptimalen Parameter im niedrigen Teillastbetrieb bei Variation der Drehzahl.....	91
8.5	Untersuchungen bei konstanter Motordrehzahl und Variation der Last.....	93
8.5.1	Betriebspunkt 3 bei $n = 1800$ 1/min und $p_{mi} = 7$ bar.....	93
8.5.2	Betriebspunkt 4 bei $n = 1800$ 1/min und $p_{mi} = 11,1$ bar.....	102
8.5.3	Vergleich der partikeloptimalen Parameter bei konstanter Motordrehzahl und Variation der Last.....	113
8.6	Untersuchungen an der Saugvolllast bei Variation der Drehzahl.....	116
8.6.1	Betriebspunkt 5 bei $n = 2400$ 1/min und $p_{mi} = 11,2$ bar.....	116
8.6.2	Vergleich der partikeloptimalen Parameter an der Saugvolllast bei Variation der Drehzahl.....	125
8.7	Untersuchungen im Volllastbetrieb	127
8.7.1	Betriebspunkt 6 bei $n = 1500$ 1/min und $p_{mi} = 23,3$ bar.....	127
8.7.2	Betriebspunkt 7 bei $n = 5500$ 1/min und $p_{mi} = 21,6$ bar.....	137
8.8	Vergleich der Untersuchungen von 3V- und 4V-Konzept bei partikeloptimalen Werten der Variationsparameter	140
9	Zusammenfassung und Ausblick	144
	Formelzeichen, Abkürzungen und Indizes	146
	Literaturverzeichnis	150
	Anhang	162