

Wissenschaftliche Reihe
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

Mahir Tim Keskin

Modell zur Vorhersage der Brennrate in der Betriebsart kontrollierte Benzinselbstzündung



 Springer Vieweg

The Springer Vieweg logo features a stylized chess knight (horse) facing left, positioned above the text 'Springer Vieweg' in a serif font.

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

Herausgegeben von

M. Bargende, Stuttgart, Deutschland

H.-C. Reuss, Stuttgart, Deutschland

J. Wiedemann, Stuttgart, Deutschland

Das Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) an der Universität Stuttgart erforscht, entwickelt, appliziert und erprobt, in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, Elemente bzw. Technologien aus dem Bereich moderner Fahrzeugkonzepte. Das Institut gliedert sich in die drei Bereiche Kraftfahrwesen, Fahrzeugantriebe und Kraftfahrzeug-Mechatronik. Aufgabe dieser Bereiche ist die Ausarbeitung des Themengebietes im Prüfstandsbetrieb, in Theorie und Simulation. Schwerpunkte des Kraftfahrwesens sind hierbei die Aerodynamik, Akustik (NVH), Fahrodynamik und Fahrermodellierung, Leichtbau, Sicherheit, Kraftübertragung sowie Energie und Thermomanagement – auch in Verbindung mit hybriden und batterieelektrischen Fahrzeugkonzepten.

Der Bereich Fahrzeugantriebe widmet sich den Themen Brennverfahrensentwicklung einschließlich Regelungs- und Steuerungskonzeptionen bei zugleich minimierten Emissionen, komplexe Abgasnachbehandlung, Aufladesysteme und -strategien, Hybridsysteme und Betriebsstrategien sowie mechanisch-akustischen Fragestellungen.

Themen der Kraftfahrzeug-Mechatronik sind die Antriebsstrangregelung/Hybride, Elektromobilität, Bordnetz und Energiemanagement, Funktions- und Softwareentwicklung sowie Test und Diagnose.

Die Erfüllung dieser Aufgaben wird prüfstandsseitig neben vielem anderen unterstützt durch 19 Motorenprüfstände, zwei Rollenprüfstände, einen 1:1-Fahrsimulator, einen Antriebsstrangprüfstand, einen Thermowindkanal sowie einen 1:1-Aeroakustikwindkanal.

Die wissenschaftliche Reihe „Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart“ präsentiert über die am Institut entstandenen Promotionen die hervorragenden Arbeitsergebnisse der Forschungstätigkeiten am IVK.

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann
Lehrstuhl Kraftfahrwesen,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Mahir Tim Keskin

Modell zur Vorhersage der Brennrate in der Betriebsart kontrollierte Benzinselbstzündung

 Springer Vieweg

Mahir Tim Keskin
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2016

D93

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart
ISBN 978-3-658-15064-8 ISBN 978-3-658-15065-5 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-15065-5

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart (IVK) unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. M. Bargende in den Jahren 2012 bis 2015.

Herrn Professor Bargende gebührt mein besonderer Dank für seine Unterstützung, das entgegengebrachte Vertrauen und den Freiraum bei der Ausgestaltung des Forschungsprojektes. Herrn Professor Beidl (Technische Universität Darmstadt) danke ich für das Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Korreferates.

Ich danke der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV) für die Initiierung der Forschungsaufgabe und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) für die Finanzierung des Projekts über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V. (AiF).

Meinem direkten Vorgesetzten, Herrn Dr.-Ing. M. Grill, gilt mein besonderer Dank für seine großartige Unterstützung in allen Belangen, insbesondere für die fachlichen Diskussionen, die die Arbeit weitergebracht haben.

Bei allen Mitarbeitern des IVK und des benachbarten Forschungsinstituts für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS) möchte ich mich für die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre und die gute Zusammenarbeit herzlich bedanken.

Schließlich gebührt mein größter Dank meiner Familie für sämtliche Unterstützung, die ich geschenkt bekommen habe, vom ersten Wecken des Interesses an der Wissenschaft in jungen Tagen bis hin zur großen Geduld und geopferten Zeit an Wochenenden während der Fertigstellung der Arbeit – in chronologischer Reihenfolge daher mein herzlicher Dank an meine Eltern, meine Brüder, meine Frau Hatice und unsere Tochter Mira Estelle.

Stuttgart

Mahir Tim Keskin

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XXI
Abkürzungsverzeichnis	XXIII
Zusammenfassung	XXXVII
Abstract	XXXIX
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Technik	5
2.1 Grundlagen der ottomotorischen Verbrennung.....	5
2.1.1 Konventionelle ottomotorische Verbrennung.....	5
2.1.2 Kontrollierte Benzinselbstzündung.....	11
2.2 Reale Arbeitsprozessrechnung.....	26
2.2.1 Thermodynamische Grundlagen.....	28
2.2.2 Phänomenologische Modellierung der konventionellen ottomotorischen Verbrennung	30
2.2.3 Klopfmodellierung.....	34
2.2.4 Modellierung der kontrollierten Benzinselbstzündung.....	35
3 Messdatenaufbereitung und -analyse	37
3.1 Versuchsträger	37
3.2 Druckverlaufs- und Ladungswechselanalyse	38
3.3 Ergebnisse der Messdatenauswertung.....	39
3.3.1 Übersicht über untersuchte Variationen.....	39
3.3.2 Typische Brennverlaufsform	42
3.3.3 Hinweise für eine Flammenausbreitung	43
3.3.4 Hinweise auf Gemischinhomogenität	47
3.3.5 Hinweise auf Temperatureinfluss	48
3.3.6 Hinweise auf Radikaleinfluss	51
3.3.7 Probleme und Grenzen der Analyse	52

4	Beschreibung des neuen Modellansatzes	55
4.1	Gesamtaufbau	55
4.2	Berechnung der Volumenreaktion	57
4.2.1	Berechnung der Gemischbildung bei Direkteinspritzung	57
4.2.2	Beschreibung der Temperaturinhomogenitäten	60
4.2.3	Berechnung des Zündverzuges	71
4.3	Anpassungen am Entrainmentmodell	77
4.3.1	Berücksichtigung der veränderten Flammenoberfläche.....	78
4.3.2	Berücksichtigung des Vorreaktionsniveaus im Unverbrannten	95
4.4	Wechselwirkung zwischen den beiden Verbrennungsanteilen	99
4.4.1	Berücksichtigung der Volumenreaktion bei der Flammenausbreitung	99
4.4.2	Berücksichtigung der Flammenausbreitung bei der Volumenreaktion	102
4.5	Modellverhalten bei Parametervariationen	105
4.5.1	Variation von Parametern des Original-Entrainmentmodells	107
4.5.2	Variation der räumlichen Inhomogenität	109
4.5.3	Variation des Dämpfungsfaktors auf die beschleunigte Flammengeschwindigkeit.....	110
4.5.4	Variation des Beimischungsfaktors	111
4.5.5	Variation von Zündverzugsparametern.....	112
4.5.6	Variation der Standardabweichung.....	113
4.5.7	Variation der Parameter des Wandinflussbereichs.....	114
4.6	Unsicherheiten und Potentiale des Modellansatzes	116
5	Validierung des neuen Modellansatzes.....	121
5.1	Abstimmprozess.....	121
5.1.1	Abstimmung der Flammenausbreitung.....	121
5.1.2	Abstimmung des Zündverzugs	122
5.1.3	Abstimmung der Standardabweichung und des Wandinflussbereichs	123
5.1.4	Abstimmung der räumlichen Inhomogenität	123
5.1.5	Abstimmung der GOT-Verbrennung	124
5.2	Simulationsergebnisse für Strategie Restgasrückhaltung.....	124
5.2.1	Variation des Restgasgehalts	124
5.2.2	Variation der Haupteinspritzung	126
5.2.3	Variation von Restgasgehalt und Haupteinspritzung	128
5.2.4	Variation des Zündwinkels	135
5.2.5	Variation der Voreinspritzung	142

5.2.6	Variation der Drosselklappenposition.....	148
5.3	Simulationsergebnisse für Strategie Restgasrücksaugung	152
5.3.1	Variation der Drosselklappenposition.....	152
5.3.2	Variation der Steuerzeiten	154
5.4	Simulationsergebnisse für Betriebsartenwechsel	157
5.5	Abweichungen des simulierten Mitteldrucks	163
5.6	Gesamtbetrachtung der Simulationsergebnisse.....	166
6	Ausblick.....	169
	Literaturverzeichnis	171
	Anhang.....	181
A.1	Diskussion des Drehzahleinflusses	181
A.2	Korrelationen für die laminare Flammgeschwindigkeit	185

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der Verhältnisse während der Flammenkernbildung, nach [72].....	6
Abbildung 2.2: Minimaler Zündenergiebedarf in Abhängigkeit von Strömungsgeschwindigkeit (a) und Turbulenzintensität (b) für ein Propan-Luft-Gemisch bei $p = 0,17$ bar, aus [6]	7
Abbildung 2.3: Flammenausbreitung durch Deflagration, nach [50]	8
Abbildung 2.4: Turbulente Flammenstruktur (a) und Modellvorstellung zur Faltung der laminaren Flammenoberfläche durch Wirbel (b), aus [27]	8
Abbildung 2.5: Selbstzündung im Endgasbereich und Ausbildung einer sekundären Reaktionsfront, aus [50]	10
Abbildung 2.6: Druckverlauf und zugehöriges hochpassgefiltertes Signal einer klopfenden Verbrennung, aus [42]	10
Abbildung 2.7: Verbrennungsfortschritt durch Detonation, aus [50]	11
Abbildung 2.8: Reaktionsfortschritt in einem beheizten Rohr mit der spontanen Ausbreitungsgeschwindigkeit, aus [50].....	12
Abbildung 2.9: Einfluss des Temperaturgradienten auf den Reaktionsfortschritt und die resultierende Druckamplitude, aus [50] basierend auf [102] [103].....	12
Abbildung 2.10: Visualisierung des Verbrennungsfortschritts mit Lichtleiterendoskopen und Photomultipliekameras bei kontrollierter Benzinselbstzündung in einem Betriebspunkt mit Zündfunkenunterstützung; Kurbelwinkelangaben in °KW v. ZOT, Zündwinkel 45° KW v. ZOT, aus [77].....	14
Abbildung 2.11: Verbrennungsablauf bei Mehrfachzündung, aus [27].....	15
Abbildung 2.12: Möglicher Zusammenhang zwischen laminar-turbulenter Flammengeschwindigkeit und spontaner Ausbreitungsgeschwindigkeit.....	16
Abbildung 2.13: Verbrennungsvisualisierungen: (a) konventionelle fremdgezündeter Betrieb, aus [43], (b) kontrollierter Benzinselbstzündung, aus [43], (c) kontrollierte Benzinselbstzündung, aus [77]	17
Abbildung 2.14: Elementarreaktionen bei der Knallgasreaktion, nach [32].....	18

Abbildung 2.15: Schematischer Reaktionsablauf für die Verbrennung von Kohlenwasserstoffen, nach [62]	19
Abbildung 2.16: Schematische Darstellung des Zündverhaltens von Kohlenwasserstoffen in Abhängigkeit von Druck und Temperatur, aus [39]	20
Abbildung 2.17: Typische Brennverläufe bei der homogenen Dieselverbrennung (aus [38])	20
Abbildung 2.18: Zündverzugszeiten für n-Heptan (links, aus [70]), Isooktan und Cyclohexan (rechts, aus [78])	21
Abbildung 2.19: Überhöhte Darstellung der Temperaturverteilung während der Kompressionsphase, aus [65].....	22
Abbildung 2.20: Ergebnisse einer Temperaturmessung im Brennraum während der Kompression, aus [11]	22
Abbildung 2.21: Parameter zur Kontrolle der Verbrennungslage, aus [89].....	23
Abbildung 2.22: Unterschiedliche Restgasstrategien und deren Auswirkungen auf Temperatur und Gemischschichtung, aus [56]	24
Abbildung 2.23: Mögliche Betriebsbereiche der kontrollierten Selbstzündung in Abhängigkeit der Betriebsstrategie, aus [14].....	25
Abbildung 2.24: Beschreibung des Brennraums als thermodynamisches System, nach [35]	28
Abbildung 2.25: Schematische Darstellung des Entrainmentmodells, nach [93]	31
Abbildung 3.1: Variationen der Steuergrößen bei der Strategie Restgasrückhaltung (Ventilsteuerzeiten bezogen auf einen Ventilhub von 0,1 mm)	40
Abbildung 3.2: Variationen der Steuergrößen bei der Strategie Restgasrücksaugung (Ventilsteuerzeiten bezogen auf einen Ventilhub von 0,1 mm)	41
Abbildung 3.3: Exemplarische Brennverlaufsform der Hauptverbrennung	42
Abbildung 3.4: Einfluss einer Zündwinkelvariation auf den Brennverlauf bei Randbedingungen, die eine laminar-turbulente Flammenausbreitung erlauben (Haupteinspritzung 295°KW v. ZOT, Drehzahl: 2000 min ⁻¹ , p _{mi} : 3 bar, λ = 1,21, x _{AGR,st} (ES) = 40 %).....	44

Abbildung 3.5: Einfluss einer Zündwinkelvariation auf den Brennverlauf bei hohem Restgasgehalt (Haupteinspritzung 260°KW v. ZOT, Drehzahl: 2000 min ⁻¹ , p _{mi} : 3 bar, λ = 1,21, x _{AGR,st} (ES) = 51 %).....	45
Abbildung 3.6: Einfluss einer Restgasvariation bei konstantem Luftverhältnis bei Betriebspunkten mit Zündfunkenunterstützung (Zündwinkel 30°KW v. ZOT, Drehzahl: 3000 min ⁻¹ , p _{mi} : 3 bar).....	46
Abbildung 3.7: Brennverläufe dreier aufeinanderfolgender Arbeitsspiele während eines Betriebsartenwechsels; Details siehe Kapitel 5.4	46
Abbildung 3.8: Brennverläufe für eine Einspritzzeitpunkt-Variation der GOT-Verbrennung (kein Zündfunken, Drehzahl: 2000 min ⁻¹ , p _{mi} : 2 bar, λ = 1,58, x _{AGR} (AS) = 60 %).....	48
Abbildung 3.9: Korrelation von Temperatur und Restgasgehalt mit der Verbrennungslage bei einer Restgasvariation.....	49
Abbildung 3.10: Einfluss der Temperatur bei Einspritzbeginn auf die maximale Brennrate.....	50
Abbildung 3.11: Zum Erzielen einer wirkungsgradoptimalen Schwerpunktlage benötigte Kombinationen von Restgasgehalt und Voreinspritzzeitpunkt (Haupteinspritzung jeweils 80°KW n. GOT).....	50
Abbildung 3.12: Box-Whisker-Plot für die Temperaturen (im Unverbrannten) bei Brennbeginn (5%- beziehungsweise 10%-Umsatz) für verschiedene Restgasstrategien.....	52
Abbildung 4.1: Gegenüberstellung der beiden grundsätzlichen Mechanismen, die in der Betriebsart kontrollierte Benzinselbstzündung zum Verbrennungsfortschritt beitragen (Verbrennungsvisualisierungen aus [43])	56
Abbildung 4.2: Anstieg der aufbereiteten Masse bei einer Einspritzzeitpunkt-Variation während der negativen Ventilüberschneidung.....	59
Abbildung 4.3: Simulierter Brennverlauf der GOT-Verbrennung für eine Variation des Einspritzzeitpunkts	59
Abbildung 4.4: Veranschaulichung der sequentiellen Selbstzündung unter Annahme eines verteilten Zündintegrals für 20 verschiedene Temperaturgruppen.....	61

Abbildung 4.5: Dichte- und Verteilungsfunktion der Normalverteilung für verschiedene Werte von Erwartungswert und Standardabweichung.....	63
Abbildung 4.6: Beispiele für die Dichtefunktionen verschiedener kontaminierter Normalverteilungen.....	66
Abbildung 4.7: Einteilung des Brennraumes in einen Normal- und einen Wandeinflussbereich	67
Abbildung 4.8: Abschätzungen zur Festlegung der Mitteltemperatur des Wandeinflussbereichs.....	69
Abbildung 4.9: Verbrennungsfortschritt anhand des "verteilten Zündintegrals" unter Vernachlässigung der Flammenausbreitung	77
Abbildung 4.10: Beispiel für verschiedene räumliche Temperaturverteilungen mit identischer Häufigkeitsverteilung	80
Abbildung 4.11: Auswirkungen unterschiedlicher Abschätzungen für den Wandeinfluss an einem Betriebspunkt mit hohem Anteil laminarer Flammenausbreitung (Zündwinkel 30° KW v. ZOT, Drehzahl: 3000 min^{-1} , p_{mi} : 3 bar, $\lambda = 1,06$, $x_{AGR,st} = 25 \%$)	81
Abbildung 4.12: Faktor der Oberflächenvergrößerung bei Aufteilung eines Kugelvolumens auf zwei Kugeln in Abhängigkeit von deren Volumenverhältnis.....	84
Abbildung 4.13: Faktor der Oberflächenvergrößerung f_n bei Aufteilung eines Kugelvolumens V_{ges} auf drei Kugeln mit den Volumina V_1 , V_2 und V_3 in Abhängigkeit von deren Volumenverhältnis	84
Abbildung 4.14: Maximal möglicher Faktor der Oberflächenvergrößerung bei Aufteilung eines Kugelvolumens auf mehrere Kugeln in Abhängigkeit von deren Anzahl.....	86
Abbildung 4.15: Urnenexperiment als Analogie zur Fragestellung, wie stark die Überlappung zweier Kugeln ist.....	87
Abbildung 4.16: Hypergeometrische Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Parameter $N = 1000$, $M = 100$, $n = 20$	88
Abbildung 4.17: Überlappung zweier Kugeln mit dem gleichen Radius r im Abstand Δ	89

Abbildung 4.18: Faktor der Oberflächenvergrößerung im Sonderfall zweier Kugeln mit dem gleichen Radius in Abhängigkeit von dem jeweiligen Überlappungsgrad	92
Abbildung 4.19: Überlappungsgrad zweier Kugeln mit dem gleichen Radius in Abhängigkeit ihres dimensionslosen Abstands voneinander	93
Abbildung 4.20: Faktor der Oberflächenvergrößerung in Abhängigkeit von dem jeweiligen Überlappungsgrad für unterschiedliche Anzahlen an Zündzentren	94
Abbildung 4.21: Zusammenfassendes Vorgehen zur Bestimmung der Flammenoberfläche beim Vorhandensein mehrerer Zündorte	95
Abbildung 4.22: Änderung der relativen laminaren Flammgeschwindigkeit in Abhängigkeit der relativen Starttemperatur für das im Text beschriebene Gedankenexperiment	98
Abbildung 4.23: Anteile von Flammenausbreitung und Volumenreaktion am Brennverlauf für einen typischen Betriebspunkt (Drehzahl: 2000 min^{-1} , p_{mi} : 3 bar, $\lambda = 1,16$, $x_{\text{AGR,st}} = 36 \%$, Haupteinspritzung 330°KW v. ZOT)	102
Abbildung 4.24: Zusammenwirken von Volumenreaktion und Flammenausbreitung während des Verbrennungsfortschritts	103
Abbildung 4.25: Aufteilung der Brennrate in Anteile für Flammenausbreitung und Volumenreaktion in Abhängigkeit der Randbedingungen (dünn: $\lambda = 1,03$, $x_{\text{AGR,st}} = 40 \%$; dick: $\lambda = 1,06$, $x_{\text{AGR,st}} = 25 \%$; in beiden Fällen Drehzahl: 3000 min^{-1} , p_{mi} : 3 bar, Zündwinkel 30°KW v. ZOT).....	105
Abbildung 4.26: Auswirkung einer Variation des Parameters C_k auf den Brennverlauf (Drehzahl: 3000 min^{-1} , p_{mi} : 3 bar, $\lambda = 1,04$, $x_{\text{AGR,st}} = 39 \%$, Haupteinspritzung 250°KW v. ZOT, Zündwinkel 30°KW v. ZOT).....	108
Abbildung 4.27: Auswirkung einer Variation des Parameters a_{ZP} auf den Brennverlauf (Drehzahl: 3000 min^{-1} , p_{mi} : 3 bar, $\lambda = 1,04$, $x_{\text{AGR,st}} = 39 \%$, Haupteinspritzung 250°KW v. ZOT, Zündwinkel 30°KW v. ZOT).....	109

Abbildung 4.28: Auswirkung einer Variation des Faktors für die räumliche Inhomogenität auf den Brennverlauf (Drehzahl: 3000 min^{-1} , p_{mi} : 3 bar, $\lambda = 1,04$, $x_{\text{AGR,st}} = 39 \%$, Haupteinspritzung 250°KW v. ZOT, Zündwinkel 30°KW v. ZOT).....	110
Abbildung 4.29: Auswirkung einer Variation des Dämpfungsfaktors für die beschleunigte Flammengeschwindigkeit auf den Brennverlauf (Drehzahl: 3000 min^{-1} , p_{mi} : 3 bar, $\lambda = 1,04$, $x_{\text{AGR,st}} = 39 \%$, Haupteinspritzung 250°KW v. ZOT, Zündwinkel 30°KW v. ZOT).....	111
Abbildung 4.30: Auswirkung einer Variation des Beimischungsfaktors(Drehzahl: 2000 min^{-1} , p_{mi} : 2 bar, $\lambda = 1,57$, $x_{\text{AGR,st}}(\text{ES}) = 37 \%$, Haupteinspritzung 20°KW v. GOT)	112
Abbildung 4.31: Auswirkung einer Variation des durch 1000 dividierten Kehrwerts des präexponentiellen Faktors im Zündintegral auf den Brennverlauf (Drehzahl: 3000 min^{-1} , p_{mi} : 3 bar, $\lambda = 1,04$, $x_{\text{AGR,st}} = 39 \%$, Haupteinspritzung 250°KW v. ZOT, Zündwinkel 30°KW v. ZOT).....	113
Abbildung 4.32: Auswirkung einer Variation der Standardabweichung der Temperaturverteilung auf den Brennverlauf (Drehzahl: 3000 min^{-1} , p_{mi} : 3 bar, $\lambda = 1,04$, $x_{\text{AGR,st}} = 39 \%$, Haupteinspritzung 250°KW v. ZOT, Zündwinkel 30°KW v. ZOT).....	114
Abbildung 4.33: Auswirkung einer Variation des Verhältnisfaktors der Standardabweichung für den Wandinflussbereich (Drehzahl: 3000 min^{-1} , p_{mi} : 3 bar, $\lambda = 1,04$, $x_{\text{AGR,st}} = 39 \%$, Haupteinspritzung 250°KW v. ZOT, Zündwinkel 30°KW v. ZOT).....	115
Abbildung 4.34: Auswirkung einer Variation des Massenanteils des Wandinflussbereichs (Drehzahl: 3000 min^{-1} , p_{mi} : 3 bar, $\lambda = 1,04$, $x_{\text{AGR,st}} = 39 \%$, Haupteinspritzung 250°KW v. ZOT, Zündwinkel 30°KW v. ZOT).....	116
Abbildung 4.35: Für Isooktan gemessener und mit der gefundenen Abstimmung berechneter Zündverzug bei stöchiometrischem Gemisch und 10 bar Druck in Abhängigkeit der Restgasrate, Messwerte (gestrichelt) aus [78].....	118

Abbildung 5.1: Simulation eines konventionellen fremdgezündeten Betriebspunkts mit dem neuen Brennverlaufsmodell (Drehzahl: 3000 min^{-1} , p_{mi} : 3 bar, $\lambda = 1,00$, $x_{AGR,st} = 18$ %, Zündwinkel $30^\circ \text{KW v. ZOT}$)	122
Abbildung 5.2: Brennverläufe aus der Druckverlaufsanalyse für die Restgasvariation.....	125
Abbildung 5.3: Simulierte Brennverläufe für die Restgasvariation.....	126
Abbildung 5.4: Brennverläufe aus der Druckverlaufsanalyse für die Variation der Haupteinspritzung.....	127
Abbildung 5.5: Simulierte Brennverläufe für die Variation der Haupteinspritzung.....	128
Abbildung 5.6: Brennverläufe aus der Druckverlaufsanalyse für eine kombinierte Variation von Restgasgehalt und Haupteinspritzung (ohne Zündfunkenunterstützung)	129
Abbildung 5.7: Simulierte Brennverläufe für eine kombinierte Variation von Restgasgehalt und Haupteinspritzung (ohne Zündfunkenunterstützung).....	130
Abbildung 5.8: Brennverläufe aus der Druckverlaufsanalyse für eine kombinierte Variation von Restgasgehalt und Haupteinspritzung (mit Zündfunkenunterstützung).....	131
Abbildung 5.9: Simulierte Brennverläufe für eine kombinierte Variation von Restgasgehalt und Haupteinspritzung (mit Zündfunkenunterstützung).....	132
Abbildung 5.10: Brennverläufe aus der Druckverlaufsanalyse für eine kombinierte Variation von Restgasgehalt, Haupteinspritzung und Drosselklappenposition (mit Zündfunkenunterstützung).....	133
Abbildung 5.11: Simulierte Brennverläufe für eine kombinierte Variation von Restgasgehalt, Haupteinspritzung und Drosselklappenposition (mit Zündfunkenunterstützung).....	134
Abbildung 5.12: Anteil der Volumenreaktion bei der Simulation der kombinierten Variation von Restgasgehalt, Haupteinspritzung und Drosselklappenposition	134
Abbildung 5.13: Anteile der Flammenausbreitung bei der Simulation der kombinierten Variation von Restgasgehalt, Haupteinspritzung und Drosselklappenposition	135
Abbildung 5.14: Brennverläufe aus der Druckverlaufsanalyse für eine Zündwinkelvariation bei hohen Restgasgehalten	136

Abbildung 5.15: Simulierte Brennverläufe für eine Zündwinkelvariation bei hohen Restgasgehalten.....	137
Abbildung 5.16: Brennverläufe aus der Druckverlaufsanalyse für eine Zündwinkelvariation bei niedrigeren Restgasgehalten.....	138
Abbildung 5.17: Simulierte Brennverläufe für eine Zündwinkelvariation bei niedrigeren Restgasgehalten	139
Abbildung 5.18: Brennverläufe aus der Druckverlaufsanalyse für eine Zündwinkelvariation bei niedrigeren Restgasgehalten und hohem Luftverhältnis.....	140
Abbildung 5.19: Simulierte Brennverläufe für eine Zündwinkelvariation bei niedrigeren Restgasgehalten und hohem Luftverhältnis	141
Abbildung 5.20: Über eine Flammenausbreitung verbrennender Anteil für die Zündwinkelvariation bei niedrigeren Restgasgehalten und hohem Luftverhältnis.....	141
Abbildung 5.21: Simulation der Zündwinkelvariation aus Abbildung 5.17 mit einer Abstimmung für einen längeren Zündverzug.....	142
Abbildung 5.22: Brennverläufe um GOT aus der Druckverlaufsanalyse für eine Variation der Voreinspritzung.....	143
Abbildung 5.23: Brennverläufe um GOT aus der Simulation für eine Variation der Voreinspritzung.....	144
Abbildung 5.24: Sensitivitätsanalyse für die Variation der Voreinspritzung	145
Abbildung 5.25: Brennverläufe aus der Druckverlaufsanalyse für eine Variation der Voreinspritzung bei später Haupteinspritzung.....	146
Abbildung 5.26: Simulierte Brennverläufe für eine Variation der Voreinspritzung bei später Haupteinspritzung	146
Abbildung 5.27: Brennverläufe aus der Druckverlaufsanalyse für eine Variation der Voreinspritzung bei früher Haupteinspritzung.....	147
Abbildung 5.28: Simulierte Brennverläufe für eine Variation der Voreinspritzung bei früher Haupteinspritzung	148
Abbildung 5.29: Brennverläufe um GOT aus der Druckverlaufsanalyse für eine Variation der Drosselklappenposition	149
Abbildung 5.30: Brennverläufe um GOT aus der Simulation für eine Variation der Drosselklappenposition	150
Abbildung 5.31: Brennverläufe aus der Druckverlaufsanalyse für eine Variation der Drosselklappenposition	151

Abbildung 5.32: Simulierte Brennverläufe für eine Variation der Drosselklappenposition.....	151
Abbildung 5.33: Brennverläufe aus der Druckverlaufsanalyse für eine Variation der Drosselklappenposition (Strategie Restgasrücksaugung).....	153
Abbildung 5.34: Simulierte Brennverläufe für eine Variation der Drosselklappenposition (Strategie Restgasrücksaugung).....	153
Abbildung 5.35: Brennverläufe aus der Druckverlaufsanalyse für eine AS-Steuerzeitenvariation (Strategie Restgasrücksaugung).....	155
Abbildung 5.36: Simulierte Brennverläufe für eine AS-Steuerzeitenvariation (Strategie Restgasrücksaugung).....	155
Abbildung 5.37: Brennverläufe aus der Druckverlaufsanalyse für eine ES-Steuerzeitenvariation (Strategie Restgasrücksaugung).....	156
Abbildung 5.38: Simulierte Brennverläufe für eine ES-Steuerzeitenvariation (Strategie Restgasrücksaugung).....	156
Abbildung 5.39: Analyse wichtiger Betriebsparameter während des Betriebsartenwechsels, aus [5]; die Arbeitsspiele 60 bis 80 entsprechen den hier gezeigten Arbeitsspielen 1 bis 21.....	157
Abbildung 5.40: Brennverläufe aus der Druckverlaufsanalyse für den Betriebsartenwechsel, Arbeitsspiele 4, 7, 10 und 13 bis 16.....	158
Abbildung 5.41: Simulierte Brennverläufe für den Betriebsartenwechsel, Arbeitsspiele 4, 7, 10 und 13 bis 16.....	158
Abbildung 5.42: Brennverläufe aus der Druckverlaufsanalyse und der Simulation für den Betriebsartenwechsel, Arbeitsspiel 1 bis 7.....	159
Abbildung 5.43: Brennverläufe aus der Druckverlaufsanalyse und der Simulation für den Betriebsartenwechsel, Arbeitsspiel 1 bis 7.....	160
Abbildung 5.44: Brennverläufe aus der Druckverlaufsanalyse für den Betriebsartenwechsel, Arbeitsspiel 8 bis 14.....	161
Abbildung 5.45: Simulierte Brennverläufe für den Betriebsartenwechsel, Arbeitsspiel 8 bis 14.....	161
Abbildung 5.46: Brennverläufe aus der Druckverlaufsanalyse für den Betriebsartenwechsel, Arbeitsspiel 15 bis 21.....	162

Abbildung 5.47: Simulierte Brennverläufe für den Betriebsartenwechsel, Arbeitsspiel 15 bis 21	163
Abbildung 5.48: Relative bzw. absoluter Betrag der Mitteldruckabweichung ($p_{mi,HD}$ nach Shelby) für etwa 150 simulierte Betriebspunkte	164
Abbildung 5.49: Relative bzw. absolute Mitteldruckabweichung ohne Berechnung des Betrags ($p_{mi,HD}$ nach Shelby) für etwa 150 simulierte Betriebspunkte	165
Abbildung 5.50: Sensitivität des Modells auf Temperaturänderungen anhand der Simulation eines exemplarischen Betriebspunkts	167
Abbildung A.1: Vergleich der Brennverläufe aus der Druckverlaufsanalyse für die Betriebspunkte aus Tabelle A.1	182
Abbildung A.2: Vergleich der Brennverläufe aus Druckverlaufsanalyse und Simulation für Betriebspunkt G aus Tabelle A.1 mit einer Integration über dem Kurbelwinkel beziehungsweise über der Zeit.....	183
Abbildung A.3: Vergleich der laminaren Flammengeschwindigkeiten von Benzin nach Heywood beziehungsweise Isooktan nach Gülder bei Referenzbedingungen.....	186
Abbildung A.4: Vergleich der laminaren Flammengeschwindigkeiten von Methan nach Gülder und einem angepassten Heywood-Ansatz bei Referenzbedingungen	187
Abbildung A.5: Vergleich der laminaren Flammengeschwindigkeiten von Benzin nach Heywood beziehungsweise Isooktan nach Gülder in Abhängigkeit von der Temperatur bei stöchiometrischem Gemisch und einem Druck von 1 bar	188

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1:	Gegenüberstellung verschiedener Brennverfahren, nach [65]	2
Tabelle 2.1:	Übersicht über Klassen von Brennverlaufsmodellen im Rahmen der Arbeitsprozessrechnung	26
Tabelle 3.1:	Technische Daten des zur Modellentwicklung verwendeten Einzylinderaggregats [5]	37
Tabelle 3.2:	Übersicht über die zur Modellentwicklung genutzten Stellgrößenvariationen (RH: Restgasrückhaltung, RS: Restgasrücksaugung, var.: variiert, const.: konstant gehalten, -: nicht durchgeführt)	41
Tabelle 4.1:	Übersicht über alle Abstimmparameter	106
Tabelle 5.1:	Kenngrößen der Restgasvariation	125
Tabelle 5.2:	Kenngrößen der Variation der Haupteinspritzung	126
Tabelle 5.3:	Kenngrößen der kombinierten Variation von Restgasgehalt und Haupteinspritzung (ohne Zündfunkenunterstützung)	128
Tabelle 5.4:	Kenngrößen der kombinierten Variation von Restgasgehalt und Haupteinspritzung (mit Zündfunkenunterstützung)	130
Tabelle 5.5:	Kenngrößen der kombinierten Variation von Restgasgehalt, Haupteinspritzung und Drosselklappenposition	132
Tabelle 5.6:	Kenngrößen der Zündwinkelvariation bei hohem Restgasgehalt	135
Tabelle 5.7:	Kenngrößen der Zündwinkelvariation bei niedrigerem Restgasgehalt	137
Tabelle 5.8:	Kenngrößen der Zündwinkelvariation bei niedrigerem Restgasgehalt und hohem Luftverhältnis	139
Tabelle 5.9:	Kenngrößen der Variation der Voreinspritzung	143
Tabelle 5.10:	Kenngrößen der Variation der Drosselklappenposition	148
Tabelle 5.11:	Kenngrößen der Variation der Drosselklappenposition (Restgasrücksaugung)	152

Tabelle 5.12:	Kenngrößen der AS-Steuerzeitenvariation (Restgasrücksaugung).....	154
Tabelle 5.13:	Kenngrößen der ES-Steuerzeitenvariation (Restgasrücksaugung).....	154
Tabelle A.1:	Auswahl von Betriebspunkten, die sich nur hinsichtlich der Drehzahl deutlich unterscheiden	181

Abkürzungsverzeichnis

Lateinische Symbole

A	$[(\text{m}^3/\text{mol})^{\text{Reaktionsordnung}}/\text{s}]$	präexponentieller Faktor
A	[-]	Summenformel des Edukts A
a	[-]	Parameter zur Abstimmung des Druckeinflusses
a	[m]	Grundkreisradius des Kugelsegments
A_F	$[\text{m}^3]$	Flammenoberfläche
A_{KK}	$[\text{m}^2]$	Oberfläche der Kugelkalotte
a_{ZZP}	[-]	Parameter zur Beschreibung der erniedrigten Flammengeschwindigkeit in der frühen Ausbreitungsphase
A^*	$[\text{s}/(\text{m}^3/\text{mol})^{\text{Reaktionsordnung}}]$	durch 1000 dividierter Kehrwert des präexponentiellen Faktors
B	[-]	Summenformel des Edukts B
b	[K]	Aktivierungstemperatur
C	[-]	Summenformel des Produkts C
c	$[1/\text{Pa}^a]$	Parameter zur Abstimmung des präexponentiellen Faktors
c_A	$[\text{mol}/\text{m}^3]$	Konzentration des Stoffs A
c_B	$[\text{mol}/\text{m}^3]$	Konzentration des Stoffs B
c_{Beimisch}	[-]	Parameter zur Abstimmung der Beimischung
c_{Kr}	$[\text{mol}/\text{m}^3]$	Kraftstoffkonzentration
c_{O_2}	$[\text{mol}/\text{m}^3]$	Sauerstoffkonzentration
c_{Rad}	$[\text{mol}/\text{m}^3]$	Radikalkonzentration

$c_{\sigma,WEB-NB}$	[-]	Verhältnis der Standardabweichungen von Wandeinfluss- und Normalbereich (Abstimmparameter)
D	[m]	Bohrungsdurchmesser
D	[-]	Summenformel des Produkts D
D_{Vrkt}	[-]	Dämpfungsfaktor (Abstimmparameter) ≥ 1
$\frac{dm_A}{d\varphi}$	[kg/°KW]	Auslassmassenstrom
$\frac{dm_B}{dt}$	[kg/s]	Massenstrom ins Verbrannte
$\frac{dm_B}{d\varphi}$	[kg/°KW]	Einspritzmassenstrom
$\frac{dm_{Beimisch}}{dt}$	[kg/s]	Massenstrom in den aufbereiteten Bereich
$\frac{dm_E}{dt}$	[kg/s]	Eindringmassenstrom in die Flammenzone
$\frac{dm_{E,orig}}{dt}$	[kg/s]	Eindringmassenstrom im originalen Ent-rainmentmodell nach Gleichung (2.5)
$\frac{dm_E}{d\varphi}$	[kg/°KW]	Einlassmassenstrom
$\frac{dm_F}{dt}$	[kg/s]	Änderung der Masse in der Flammenzone
$\frac{dm_L}{d\varphi}$	[kg/°KW]	Leckagemassenstrom
$\frac{dm_{uv}}{dt}$	[kg/s]	Massenstrom ins Unverbrannte
$\frac{dm_v}{dt}$	[kg/s]	Massenstrom ins Verbrannte
$\frac{dm_{v,dir}}{dt}$	[kg/s]	über die Volumenreaktion (direkt) ver-brennender Massenstrom