

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Formelzeichen, Indizes, Schreibweisen, Abkürzungen	XI
1 Einleitung	1
1.1 Historischer Rückblick	2
1.2 Forschung am Verbrennungsmotor	4
1.3 Der Sonderforschungsbereich „Motorische Verbrennung“	5
1.4 Ottomotoren	6
1.5 Dieselmotoren	8
1.6 Ausblick	10
1.7 Literatur	12
2 Strömung und Wärmeübergang im Motor	13
2.1 Strömung	13
2.1.1 Einführung	13
2.1.2 Geometrien der untersuchten Motormodelle	14
2.1.3 Strömung im Ansaugsystem	20
2.1.4 Bildung von Wirbelstrukturen	22
2.1.5 Verdichtung und Zerfall von Wirbelstrukturen	26
2.1.6 Einfluß des Dralls in der Zuströmung	28
2.1.7 Einfluß der Kolbenbodenform	31
2.1.7.1 Konfiguration mit Muldenkolben und zentrischer Ventilanordnung bei drallfreier Zuströmung	31
2.1.7.2 Konfiguration mit Muldenkolben und zentrischer Ventilanordnung bei drallbehafteter Zuströmung	32
2.1.8 Exzentrische Ventilanordnung	34
2.1.8.1 Konfiguration mit flachem Kolbenboden und exzentrischer Ventilanordnung bei drallfreier Zuströmung	34
2.1.8.2 Konfiguration mit flachem Kolbenboden und exzentrischer Ventilanordnung bei drallbehafteter Zuströmung	39
2.1.8.3 Konfiguration mit Muldenkolben und exzentrischer Ventilanordnung bei drallfreier Zuströmung	40
2.1.8.4 Konfiguration mit Muldenkolben und exzentrischer Ventilanordnung bei drallbehafteter Zuströmung	42
2.1.9 Mehrventilanordnung	44
2.1.10 Zyklische Schwankungen	49
2.1.11 Zusammenfassung	53
2.1.12 Literaturverzeichnis	55

2.2	Wärmeübergang	57
2.2.1	Mechanismen der Wärmeübertragung	57
2.2.2	Wärmeübertragung im Ansaugsystem	59
2.2.3	Wärmeübertragung im Brennraum	60
2.2.3.1	Bestimmung der Wandwärmeverluste im geschleppten Motor	62
2.2.3.2	Wandwärmeverluste im gefeuerten Motor	70
2.2.4	Zusammenfassung	75
2.2.5	Abbildungsverzeichnis	76
2.2.6	Literatur	77
3	Ottomotoren	79
3.1	Gemischbildung	79
3.1.1	Grundlagen der Gemischbildung	79
3.1.2	Tropfenverdampfung	82
3.1.3	Tropfen-Wand Kontakt	84
3.1.4	Gemischhomogenität	92
3.1.5	Zusammenfassung	100
3.1.6	Abbildungsverzeichnis	101
3.1.7	Literatur	102
3.2	Zündung	105
3.2.1	Grundlagen der Zündung	105
3.2.2	Zündsysteme (allgemein) - Hochspannungserzeugung	108
3.2.3	Zündkerzen (allgemein)	109
3.2.4	Plasmastrahlzündsystem - Konstruktive Entwicklung	109
3.2.5	Energieübertragung bei Plasmastrahl-Zündsystemen	116
3.2.6	Motorisches Verhalten bei der Plasmastrahlzündung im Vergleich zur Transistorspulenzündung	119
3.2.7	Zusammenfassung	127
3.2.8	Abbildungsverzeichnis	128
3.2.9	Literatur	129
3.3	Ottomotorische Verbrennung	131
3.3.1	Grundlagen der ottomotorischen Verbrennung	131
3.3.2	Reaktionskinetik	133
3.3.2.1	Die Reaktionsgeschwindigkeit	133
3.3.2.2	Stationarität von Zwischenprodukten	134
3.3.2.3	Komplexe Reaktionsschemata	135

3.3.2.4	Reduzierte Mechanismen	139
3.3.2.5	Die Struktur laminarer Flammen	142
3.3.3	Turbulente Flammenausbreitung	143
3.3.3.1	Längenskalen des turbulenten Strömungsfeldes	143
3.3.3.2	Messung der Spektralen Energiedichte im Einhubtriebwerk	147
3.3.3.3	Messung der Turbulenzintensitäten und der turbulenten Längenmaße im geschleppten Motor	148
3.3.3.4	Längenskalen der Interaktion von Turbulenz und Flammenausbreitung	151
3.3.3.5	Messung der Interaktionslängen bei der turbulenten Flammenausbreitung	155
3.3.3.6	Regimes der turbulenten vorgemischten Verbrennung	160
3.3.3.7	Modelle zur Beschreibung der turbulenten Flammen- ausbreitung in vorgemischten Systemen.	162
3.3.3.8	Die Flammenflächendichte	165
3.3.3.9	Messung der Flammenflächendichte	165
3.3.3.10	Berechnung der Flammenflächendichte	168
3.3.3.11	Das „Coherent Flame Model“	168
3.3.3.12	Die Erweiterung des „Coherent Flame Model“	172
3.3.3.13	Simulation des gesamten Verbrennungsprozesses	175
3.3.3.14	Flammenkonturen	176
3.3.3.15	Flammendicke	177
3.3.3.16	Turbulente Flammengeschwindigkeit	177
3.3.3.17	Einfluß der Turbulenzintensität	179
3.3.3.18	Einfluß des Kompressionsverhältnisses	180
3.3.4	Zusammenfassung	180
3.3.5	Abbildungsverzeichnis	182
3.3.6	Literatur	185
3.4	Klopfen	189
3.4.1	Phänomenologische Betrachtung	189
3.4.2	Historischer Rückblick, Klopftheorien	199
3.4.2.1	Die Verdichtungs- oder Selbstzündungstheorie	200
3.4.2.2	Die Detonationstheorie	200
3.4.3	Ablauf der klopfenden Verbrennung	204
3.4.3.1	Selbstzündung	204
3.4.3.2	Klopfende Verbrennung im Motor	209

3.4.4	Simulationsrechnungen	228
3.4.4.1	Kinetik der Selbstzündung	228
3.4.4.2	Numerische Simulation des Übergangs von Deflagration zu Detonation (DDC)	233
3.4.5	Zusammenfassung	242
3.4.6	Abbildungsverzeichnis	243
3.4.7	Tabellenverzeichnis	245
3.4.8	Literatur	245
4	Dieselmotoren	249
4.1	Einspritzsysteme und Modellbrennkammer	249
4.1.1	Einspritzsysteme	249
4.1.2	Grundlagen zur Modellierung von Diesel-Einspritzsystemen	253
4.1.3	Druckkammer	258
4.1.4	Prüfstands Aufbau	262
4.1.5	Einspritztechnologie (Hochdruckmeßkammer)	263
4.1.6	Zusammenfassung	265
4.1.7	Anhang	266
4.1.8	Abbildungsverzeichnis	267
4.1.9	Tabellenverzeichnis	267
4.1.10	Literaturverzeichnis	267
4.2	Strahlausbreitung, Zerstäubung und Verdampfung	269
4.2.1	Einführung	269
4.2.2	Strahlausbreitung	270
4.2.2.1	Grundlagen der Strahlausbreitung	270
4.2.2.2	Randbedingungen	274
4.2.2.3	Strahlstruktur	276
4.2.2.4	Eindringtiefe	278
4.2.2.5	Einfluß des Gaszustandes	282
4.2.2.6	Einfluß des Einspritzsystems	284
4.2.2.7	Wand einfluß	290
4.2.3	Zerstäubung	296
4.2.3.1	Grundlagen des Strahlzerfalls	296
4.2.3.2	Zerstäubungsmodelle	298
4.2.3.3	Tropfenzerfall	301
4.2.3.4	Kollision und Koagulation	304
4.2.3.5	Strahlentstehung	304

4.2.4	Verdampfung	312
4.2.4.1	Grundlagen der Tropfenverdampfung	312
4.2.4.2	Modelle	314
4.2.4.3	Wandfilmverdampfung	320
4.2.4.4	Tropfenphase	321
4.2.4.5	Gasphase	345
4.2.5	Zusammenfassung	355
4.2.6	Abbildungsverzeichnis	356
4.2.7	Tabellenverzeichnis	359
4.2.8	Literatur	360
4.3	Selbstzündung	365
4.3.1	Grundlagen der dieselmotorischen Selbstzündung	365
4.3.2	Zündverzug	368
4.3.3	Selbstzündung im Dieseleinspritzstrahl	387
4.3.3.1	Grundlagen der Selbstzündung im Dieseleinspritzstrahl	387
4.3.3.2	Einfluß motorrelevanter Parameter auf die Selbstzündung im Freistrah	389
4.3.3.3	Einfluß von Wänden auf die Selbstzündung im Dieseleinspritzstrahl.	405
4.3.3.4	Empirische Gleichungen zur Bestimmung von Zündverzug und Zündort.....	410
4.3.4	Zusammenfassung	416
4.3.5	Abbildungsverzeichnis	419
4.3.6	Literatur	422
4.4	Verbrennung, Schadstoffbildung und Akustik	425
4.4.1	Verbrennung	425
4.4.1.1	Grundlagen der dieselmotorischen Verbrennung	425
4.4.1.2	Das Flamelet-Konzept	427
4.4.1.3	Reaktionskinetik und Zündung	431
4.4.1.4	Flammenausbreitung im Dieselmotor	435
4.4.2	Schadstoffbildung	443
4.4.2.1	Grundlagen der Schadstoffbildung	443
4.4.2.2	Ruß- und Stickoxidbildung im direkteinspritzenden Dieselmotor	450
4.4.2.3	Partikel-Stickoxid-Tradeoff	453
4.4.2.4	Örtlich und zeitlich aufgelöste Rußbildung und Rußoxidation im Dieseleinspritzstrahl.	455

4.4.3	Akustik	499
4.4.3.1	Grundlagen der Motorakustik	499
4.4.3.2	Mechanisches Geräusch	501
4.4.3.3	Verbrennungsgeräusch	502
4.4.3.4	Schwankungen im Verbrennungsgeräusch	507
4.4.3.5	Druckwellen im Brennraum	512
4.4.4	Zusammenfassung	516
4.4.5	Abbildungsverzeichnis	517
4.4.6	Tabellenverzeichnis	520
4.4.7	Literatur	521
5	Geometrische Einflüsse	527
5.1	Allgemeine Betrachtungen	527
5.2	Betriebs- und Schadstoffverhalten Ottomotoren	529
5.2.1	Einfluß des Hub-Bohrungs-Verhältnisses	531
5.2.2	Variation von Brennraumform und Verdichtungsverhältnis	531
5.2.3	Einfluß des Hub-Bohrungs-Verhältnisses beim 2- und 4-Ventilmotor.	532
5.2.3.1	Grunddaten der untersuchten Varianten	533
5.2.3.2	Teillastuntersuchungen	536
5.2.3.3	Vollastuntersuchungen	540
5.2.3.4	Wertung	543
5.2.4	Einfluß des Zylinderhubvolumens beim Vierventilmotor	543
5.2.4.1	Teillastuntersuchungen	545
5.2.4.2	Vollastverhalten	551
5.2.4.3	Wertung	553
5.3	Betriebs- und Schadstoffverhalten Dieselmotoren	553
5.3.1	Einfluß des Hub-Bohrungs-Verhältnisses	553
5.3.1.1	Wertung	565
5.3.2	Einfluß des Zylinderhubvolumens	565
5.4	Vergleichende Betrachtung Otto- und Dieselmotoren	566
5.5	Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen	568
5.6	Abbildungsverzeichnis	569
5.7	Tabellenverzeichnis	570
5.8	Literatur	571

6 Meßtechnische Verfahren	573
6.1 Sondenmeßtechniken	574
6.1.1 Getaktete Gasentnahme	574
6.1.2 Wärmestromsonden-Meßtechnik	577
6.1.2.1 Aufbau einer eindimensionalen Wärmestromsonde	577
6.1.2.2 Zweidimensionale Wärmestromsonden	577
6.1.2.3 Kalibration einer Wärmestromsonde	579
6.2 Streulichtmethoden	581
6.2.1 Mie-Streuung zur Bestimmung der Tropfenverteilung	582
6.2.1.1 Prinzip des Meßverfahrens	582
6.2.1.2 Besonderheiten bei der Messung am heißen Einspritzstrahl	584
6.2.2 Planare Laser-Velocimetry	586
6.2.2.1 Meßprinzip	587
6.2.2.2 Bildauswertung	587
6.2.2.3 Auswerteverfahren der Particle Tracking Velocimetry	588
6.2.2.4 Auswerteverfahren der Particle Image Velocimetry	589
6.2.2.5 Bildaufnahme	592
6.2.2.6 Folgeverhalten der Partikel	592
6.2.2.7 Streulichtverhalten der Partikel	595
6.2.2.8 Lichtschnittbildung	596
6.2.2.9 Anwendungshinweise	596
6.2.2.10 Wahl der Versuchs- und Auswerteparameter	597
6.2.2.11 Ergebnisvalidierung und -verarbeitung	597
6.2.3 Laser-Doppler-Anemometrie (LDA)	599
6.2.3.1 Funktionsprinzip	599
6.2.3.2 Signalauswertung	601
6.2.3.3 Praktische Ausführung	602
6.2.3.4 Zwei-Punkt-LDA-Messung	603
6.2.4 Phasen-Doppler-Anemometrie	605
6.2.4.1 Funktionsprinzip	605
6.2.4.2 Praktische Realisierung	605
6.2.4.3 Signalauswertung	607
6.2.5 Tomographische Holographie	608
6.2.5.1 Der konventionelle Off-axis Aufbau	608
6.2.5.2 Die Dunkelfeldholographie	611
6.2.5.3 Bildtrennung bei der konventionellen Off-axis Holographie	614

6.2.6	Ramanspektroskopie	616
6.2.6.1	Prinzip der Meßtechnik	616
6.2.6.2	Experimenteller Aufbau	618
6.2.6.3	Berechnung des stöchiometrischen Luftfaktors	620
6.2.6.4	Darstellung der Ergebnisse in einem „Film“	622
6.2.7	CARS Spektroskopie	623
6.2.7.1	Grundlagen	623
6.2.7.2	Experimentelle Umsetzung	627
6.2.7.3	Durchführung der Messungen	631
6.2.7.4	Auswertung	632
6.2.7.5	Konzentrationsmessungen	634
6.3	Verfahren die auf Lichtbrechung beruhen	637
6.3.1	Schlierenoptische Meßverfahren	637
6.3.1.1	Aufbau der im SFB 224 eingesetzten Schlierenoptik	637
6.3.2	Interferometrie	639
6.3.2.1	Prinzip	639
6.3.2.2	Interferogrammauswertung	639
6.3.2.3	Mach-Zehnder-Interferometrie	640
6.3.2.4	Optische Tomographie	642
6.4	Emissionsmeßtechniken	646
6.4.1	Vielfach-Lichtleiter-Meßtechnik	646
6.4.1.1	Meßprinzip	646
6.4.1.2	Adaption am Versuchsträger	650
6.4.1.3	Datenerfassung und Auswertung	652
6.4.1.4	Bewertung	653
6.4.2	Emissionsspektroskopie	654
6.4.2.1	Theoretische Grundlagen	654
6.4.2.2	Meßtechnische Realisierung	656
6.5	Lichtextinktionsmeßtechniken	660
6.5.1	Ein-dimensionale Lichtextinktionsmeßtechnik	663
6.5.2	Zwei-dimensionale Lichtextinktionsmeßtechnik	666

6.6	Laserinduzierte Fluoreszenz (LIF)	668
6.6.1	Einleitung	668
6.6.2	Prinzip der laserinduzierten Fluoreszenz	668
6.6.3	Optischer Aufbau	669
6.6.4	Beispielhafte Ergebnisse	670
6.6.5	Grenzen der Meßtechnik	672
6.7	Abbildungsverzeichnis	672
6.8	Literatur	676
7	Numerische Verfahren	681
7.1	Einleitung	681
7.2	Erhaltungsgleichungen	682
7.2.1	Konservative und nichtkonservative Form	682
7.2.2	Transformation auf krummlinige, zeitabhängige Koordinaten	684
7.2.3	Anfangs- und Randbedingungen	686
7.3	Diskrete Formulierung	686
7.3.1	Gitter	686
7.3.2	Finite-Volumen-Verfahren	687
7.3.3	Zeitliche Integration und Operator-Splitting	688
7.3.4	Stoßauflösende Verfahren	690
7.4	Zwei neue Algorithmen zur Simulation der Ausbreitung von Vormischflammen.	697
7.4.1	Numerisches Verfahren zur Berechnung der Flammen- ausbreitung mit der Volume-Of-Fluid-Methode	699
7.4.2	Erweitertes Godunov-Typ-Verfahren zur Berechnung schneller Vor- mischflammen und des Deflagrations-Detonations-Übergangs.....	705
7.5	Zusammenfassung	724
7.6	Abbildungsverzeichnis	725
7.7	Literatur	726

