

1 Grundlagen des Ottomotors	1
David Lejsek, Andreas Kufferath, André Kulzer und Konrad Reif	
1.1 Arbeitsweise	1
1.1.1 Viertakt-Verfahren	1
1.1.2 Arbeitsprozess: Ladungswechsel und Verbrennung	3
1.1.3 Luftverhältnis und Abgasemissionen	4
1.1.4 Gemischbildung	6
1.1.5 Zündung und Entflammung	8
1.2 Zylinderfüllung	8
1.2.1 Bestandteile	8
1.2.2 Ladungswechsel	9
1.2.3 Steuerung der Luftfüllung	10
1.2.4 Füllungserfassung und Gemischregelung	14
1.2.5 Kraftstoffe	15
1.3 Verbrennung	18
1.3.1 Turbulente vorgemischte Verbrennung	18
1.3.2 Turbulente vorgemischte teildiffusive Verbrennung	19
1.3.3 Homogene Selbstzündung	20
1.3.4 Irreguläre Verbrennung	21
1.4 Drehmoment, Leistung und Verbrauch	23
1.4.1 Drehmomente am Antriebsstrang	23
1.4.2 Definition von Kenngrößen	24
1.4.3 Verläufe	27
1.4.4 Spezifischer Kraftstoffverbrauch	27
Literatur	29
2 Abgasnachbehandlung	31
Klaus Winkler, Wilfried Müller und Konrad Reif	
2.1 Abgasemissionen und Schadstoffe	31
2.1.1 Verbrennung des Luft-Kraftstoff-Gemischs	32
2.1.2 Hauptbestandteile des Abgases	32

	2.1.2.1	Wasser	32
	2.1.2.2	Kohlendioxid	33
	2.1.2.3	Stickstoff	33
2.1.3		Schadstoffe	33
	2.1.3.1	Kohlenmonoxid	34
	2.1.3.2	Kohlenwasserstoffe	34
2.1.4		Stickoxide	34
	2.1.4.1	Schwefeldioxid	35
	2.1.4.2	Feststoffe	35
2.2		Einflüsse auf Rohemissionen	35
	2.2.1	Einflussgrößen	36
	2.2.1.1	Luft-Kraftstoff-Verhältnis	36
	2.2.1.2	Luft-Kraftstoff-Gemischaufbereitung	37
	2.2.1.3	Drehzahl	37
	2.2.1.4	Motorlast	37
	2.2.1.5	Zündzeitpunkt	37
	2.2.2	HC-Rohemission	38
	2.2.2.1	Einfluss des Drehmoments	38
	2.2.2.2	Einfluss der Drehzahl	38
	2.2.2.3	Einfluss des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses	38
	2.2.2.4	Einfluss des Zündzeitpunkts	39
	2.2.3	CO-Rohemission	39
	2.2.3.1	Einfluss des Drehmoments	39
	2.2.3.2	Einfluss der Drehzahl	40
	2.2.3.3	Einfluss des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses	40
	2.2.3.4	Einfluss des Zündzeitpunkts	40
	2.2.4	NOx-Rohemission	41
	2.2.4.1	Einfluss des Drehmoments	41
	2.2.4.2	Einfluss der Drehzahl	41
	2.2.4.3	Einfluss des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses	41
	2.2.4.4	Einfluss der Abgasrückführung	41
	2.2.4.5	Einfluss des Zündzeitpunkts	42
	2.2.5	Rußemission	43
2.3		Katalytische Abgasreinigung	43
	2.3.1	Übersicht	43
	2.3.2	Entwicklungsziele	44
	2.3.3	Katalysatorkonzepte	45
	2.3.4	Katalysator-Konfigurationen	45
	2.3.4.1	Randbedingungen	45
	2.3.4.2	Vor- und Hauptkatalysator	46
	2.3.5	Katalysator-Heizkonzepte	48
	2.3.5.1	Rein motorische Maßnahmen	48

2.3.5.2	Sekundärlufteinblasung	49
2.3.5.3	Aufgabe	50
2.3.5.4	Arbeitsweise	50
2.3.6	Regelung des NO _x -Speicherkatalysators	54
2.3.6.1	λ -Regelung bei der Benzin-Direkteinspritzung	54
2.3.6.2	Regelung des NO _x -Speicherkatalysators	54
2.3.7	Dreiwegekatalysator	56
2.3.7.1	Arbeitsweise	56
2.3.7.2	Konvertierungsrate	57
2.3.8	Aufbau	59
2.3.8.1	Träger	59
2.3.8.2	Beschichtung	60
2.3.9	Betriebsbedingungen	61
2.3.9.1	Betriebstemperatur	61
2.3.9.2	Thermische Deaktivierung des Katalysators	62
2.3.9.3	Vergiftung des Katalysators	62
2.3.9.4	Entwicklungstendenzen des Katalysators	63
2.3.10	NO _x -Speicherkatalysator	63
2.3.10.1	Aufgabe	63
2.3.10.2	Aufbau und Beschichtung	64
2.3.10.3	Arbeitsweise	65
2.3.10.4	Betriebstemperatur und Einbauort	66
2.3.10.5	Schwefelvergiftung	67
2.3.10.6	Entwicklung motornaher Startkatalysatoren	67
2.3.10.7	Entwicklung von NO _x -Speicherkatalysatoren	68
2.4	Alternative Abgasnachbehandlungssysteme	69
2.4.1	Elektrisch beheizter Katalysator	69
2.4.2	HC-Adsorber	70
2.4.3	Kombination von HC-Adsorber und elektrisch beheiztem Katalysator	71
	Literatur	72
3	Emissionsgesetzgebung und Abgasmesstechnik	73
	Martin Brandt, Alex Grossmann, Markus Deissler, Kurt Kirsten, Michael Bächerle, Martin Rauscher, Jochen Müller, Wolfgang Samenfink und Konrad Reif	
3.1	Einführung	73
3.1.1	Klasseneinteilung	74
3.1.2	Ziele der Schadstoff-Emissionsgesetzgebung	75
3.1.3	Prüfverfahren	75
3.1.4	Typprüfung	75
3.1.5	Klasseneinteilung und Emissionsprüfung	76

3.1.6	Testzyklen	76
3.1.7	Serienprüfung.....	77
3.1.8	Feldüberwachung.....	77
3.2	Gesetzgebung für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge.....	78
3.2.1	CARB-Gesetzgebung (Pkw und leichte Nutzfahrzeuge).....	78
3.2.1.1	Grenzwerte	78
3.2.1.2	Abgaskategorien.....	79
3.2.1.3	Dauerhaltbarkeit	80
3.2.1.4	Flottendurchschnitt (NMOG).....	81
3.2.1.5	Emissionsfreie Fahrzeuge	81
3.2.2	EPA-Gesetzgebung	82
3.2.2.1	Grenzwerte	83
3.2.2.2	Abgaskategorien.....	83
3.2.2.3	Phase-in	84
3.2.2.4	Emissions-Flottendurchschnitt.....	84
3.2.2.5	Feldüberwachung	84
3.2.3	EU-Gesetzgebung	85
3.2.3.1	Grenzwerte	87
3.2.3.2	Real Driving Emissions	90
3.2.3.3	Feldüberwachung und Dauerhaltbarkeit	91
3.2.3.4	Periodische Abgasuntersuchung (AU).....	92
3.2.4	Japan-Gesetzgebung	92
3.2.4.1	Grenzwerte	93
3.2.4.2	Flottenverbrauch.....	94
3.3	Testzyklen	94
3.3.1	Testzyklen für Pkw und leichte Nfz.....	94
3.3.1.1	FTP-75-Testzyklus.....	94
3.3.1.2	SFTP-Zyklen	96
3.3.1.3	Testzyklen zur Ermittlung des Flottenverbrauchs	97
3.3.2	Europäischer Testzyklus für Pkw und leichte Nfz.....	97
3.3.2.1	MNEFZ	97
3.3.2.2	WLTC.....	98
3.3.3	Japan-Testzyklus für Pkw und leichte Nfz.....	99
3.3.4	Testzyklen für schwere Nutzfahrzeuge	99
3.3.4.1	Europa	99
3.3.4.2	Japan.....	101
3.3.4.3	USA	102
3.4	Kraftstoffverbrauchs- und Treibhausgasgesetzgebung	104
3.4.1	USA	104
3.4.2	Europa	104
3.4.3	Japan	105

3.5	Abgasmesstechnik	105
3.5.1	Abgasprüfung für die Typzulassung	105
3.5.1.1	Abgasmessungen auf dem Fahrzeugprüfstand	106
3.5.1.2	RDE – Abgasmessung auf der Straße	109
3.5.2	Abgasmessgeräte	111
3.5.2.1	NDIR-Analysator	111
3.5.2.2	NDUV-Analysator	112
3.5.2.3	Chemilumineszenz-Detektor (CLD)	112
3.5.2.4	Flammenionisations-Detektor (FID)	113
3.5.2.5	Messung der Partikelemissionen	113
3.5.3	Abgasmessung in der Motorenentwicklung	117
3.5.3.1	GC-FID und Cutter-FID	117
3.5.3.2	Paramagnetischer Detektor (PMD)	117
3.5.3.3	Trübungsmessgerät (Absorptionsmethode)	118
3.5.3.4	Messung der Papierschwärzung (Reflexionsmethode)	118
3.5.3.5	Fotoakustisches Verfahren	119
3.5.4	Abgasuntersuchung	120
	Literatur	121
4	Diagnose	123
	Andreas Posselt, Markus Gesk, Anja Melsheimer, Ferdinand Reiter, Klaus Joos, Peter Schenk, Andreas Kufferath, Wolfgang Samenfink, Andreas Glaser, Tilo Landenfeld, Uwe Müller und Konrad Reif	
4.1	Überwachung im Fahrbetrieb – On-Board-Diagnose	123
4.1.1	Übersicht	123
4.1.2	Überwachung der Eingangssignale	123
4.1.3	Überwachung der Ausgangssignale	124
4.1.4	Überwachung der internen Steuergerätefunktionen	125
4.1.5	Überwachung der Steuergerätekommunikation	125
4.1.6	Fehlerbehandlung	125
4.1.6.1	Fehlererkennung	125
4.1.6.2	Fehlerspeicherung	126
4.1.6.3	Notlauffunktionen	126
4.2	OBD-System für Pkw und leichte Nfz.	126
4.2.1	Gesetzgebung	126
4.2.1.1	OBD I (CARB)	126
4.2.1.2	OBD II (CARB)	126
4.2.1.3	Erweiterungen der OBD II	127
4.2.1.4	EPA-OBD	127
4.2.1.5	EOBD	128
4.2.1.6	Andere Länder	129

4.2.2	Anforderungen an das OBD-System	129
4.2.2.1	Grenzwerte	129
4.2.2.2	Anforderungen an die Funktionalität	129
4.2.2.3	Motorkontrollleuchte	129
4.2.2.4	Kommunikation mit dem Scan-Tool	130
4.2.2.5	Fahrzeugreparatur	130
4.2.2.6	Einschaltbedingungen	130
4.2.2.7	Sperrbedingungen	131
4.2.2.8	Temporäres Abschalten von Diagnosefunktionen	131
4.2.2.9	Readiness-Code	131
4.2.2.10	Diagnose-System-Manager	131
4.2.2.11	Rückruf	131
4.3	OBD-Funktionen	132
4.3.1	Übersicht	132
4.3.2	Katalysatordiagnose	132
4.3.2.1	Diagnose von Katalysatoren mit geringer Sauerstoff-Speicherfähigkeit	133
4.3.2.2	Diagnose von Katalysatoren mit hoher Sauerstoff-Speicherfähigkeit	134
4.3.2.3	Diagnose von NOx-Speicherkatalysatoren	135
4.3.3	Verbrennungsaussetzererkennung	135
4.3.4	Tankleckdiagnose	137
4.3.4.1	Diagnoseverfahren mit Unterdruckabbau	138
4.3.4.2	Überdruckverfahren	138
4.3.5	Diagnose des Sekundärluftsystems	140
4.3.6	Diagnose des Kraftstoffsystems	141
4.3.7	Diagnose der λ -Sonden	141
4.3.7.1	Primäre λ -Sonde	142
4.3.7.2	Sekundäre λ -Sonde	143
4.3.8	Diagnose des Abgasrückführungssystems	143
4.3.9	Diagnose der Kurbelgehäuseentlüftung	144
4.3.10	Diagnose des Motorkühlsystems	144
4.3.11	Diagnose zur Überwachung der Aufheizmaßnahmen	144
4.3.12	Diagnose des variablen Ventiltriebs	145
4.3.13	Comprehensive Components: Diagnose von Sensoren	145
4.3.13.1	Elektrische Fehler	146
4.3.13.2	Überprüfung auf Bereichsfehler	146
4.3.13.3	Plausibilitätsfehler	146
4.3.14	Comprehensive Components: Diagnose von Aktoren	147
4.3.14.1	Diagnose der elektrisch angesteuerten Drosselklappe	148

Verständnisfragen	149
------------------------------------	------------