

1 Grundlagen und Einsatzgebiete des Dieselmotors.	1
Sebastian Fischer	
1.1 Arbeitsweise.	2
1.1.1 Viertakt-Verfahren	2
1.1.1.1 1. Takt: Ansaugtakt (Abb. 1.2a)	2
1.1.1.2 2. Takt: Verdichtungstakt (Abb. 1.2b).	3
1.1.1.3 3. Takt: Arbeitstakt (Abb. 1.2c)	3
1.1.1.4 4. Takt: Ausstoßtakt (Abb. 1.2d).	4
1.1.2 Ventilsteuerzeiten.	4
1.1.3 Verdichtung (Kompression).	5
1.2 Drehmoment und Leistung	6
1.2.1 Drehmoment	6
1.2.2 Leistung	6
1.3 Motorwirkungsgrad	7
1.3.1 Thermodynamischer Vergleichsprozess.	7
1.3.1.1 Isentrope Kompression (1–2)	8
1.3.1.2 Isochore Wärmezufuhr (2–3)	8
1.3.1.3 Isobare Wärmezufuhr (3–3')	9
1.3.1.4 Isentrope Expansion (3'–4).	9
1.3.1.5 Isochore Wärmeabfuhr (4–1)	9
1.3.2 Der reale Arbeitsprozess	9
1.3.3 Wirkungsgrad.	9
1.3.3.1 η_{th} : Thermischer Wirkungsgrad	10
1.3.3.2 η_g : Gütegrad	11
1.3.3.3 η_u : Brennstoffumsetzungsgrad	11
1.3.3.4 η_m : Mechanischer Wirkungsgrad	12
1.3.3.5 η_i : Indizierter Wirkungsgrad	12

1.4	Betriebszustände	12
1.4.1	Start	12
1.4.1.1	Kraftstoffaufheizung	13
1.4.1.2	Starthilfesysteme.	13
1.4.1.3	Einspritzanpassung	14
1.4.2	Nulllast	15
1.4.3	Leerlauf	15
1.4.4	Volllast	15
1.4.5	Teillast	15
1.4.5.1	Unterer Teillastbereich	15
1.4.6	Schubbetrieb	16
1.4.7	Stationärer Betrieb	16
1.4.8	Instationärer Betrieb.	16
1.4.9	Übergang zwischen den Betriebszuständen.	16
1.5	Betriebsbedingungen	17
1.5.1	Rauchgrenze.	18
1.5.2	Verbrennungsdruckgrenze	18
1.5.3	Abgastemperaturgrenze	18
1.5.4	Drehzahlgrenzen	19
1.5.5	Höhen- und Ladedruckgrenzen	19
1.6	Einspritzsystem	20
1.7	Brennräume	21
1.7.1	Ungeteilter Brennraum (Direkteinspritzverfahren)	21
1.7.2	Geteilter Brennraum (indirekte Einspritzung)	22
1.7.2.1	Vorkammerverfahren	23
1.7.2.2	Wirbelkammerverfahren.	24
1.8	Einsatzgebiete des Dieselmotors	25
1.8.1	Eigenschaftskriterien	25
1.8.2	Anwendungen	26
1.8.2.1	Stationärmotoren.	26
1.8.2.2	Pkw und leichte Nfz	26
1.8.2.3	Schwere Nfz	26
1.8.2.4	Bau- und Landmaschinen.	26
1.8.2.5	Lokomotiven	27
1.8.2.6	Schiffe	27
1.8.2.7	Mehr- oder Vielstoffmotoren	27
1.8.3	Motorkenndaten	27

2 Abgasnachbehandlung	31
Sebastian Fischer, Michael Krüger, Hartmut Lüders, Florian Ditttrich und Ulrich Projahn	
2.1 Entstehung von Schadstoffen bei der dieselmotorischen Verbrennung und innermotorische Reduktionsmaßnahmen.	31
2.1.1 Schadstoffbildung	31
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
2.1.2.4 Schadstoffe	33
2.1.2.5 Kohlenmonoxid	33
2.1.2.6 Stickoxide	33
2.1.2.7 Partikel	34
2.1.2.8 Kohlenwasserstoffe	35
2.1.2.9 Schwefeldioxid	36
2.1.3 Einfluss von Drehzahl und Drehmoment auf die Rohemission	36
2.1.3.1 Drehzahl	36
2.1.3.2 NO _x -Rohemission	36
2.1.3.3 HC- und CO-Rohemission	36
2.1.3.4 Rußemission	36
2.1.3.5 Drehmoment	37
2.1.4 Innermotorische Maßnahmen zur Minderung der Rohemission	37
2.1.4.1 Einspritzbeginn	38
2.1.4.2 Einspritzdruck	38
2.1.4.3 Abgasrückführung	40
2.1.4.4 Piloteinspritzung	42
2.1.4.5 Angelagerte Nacheinspritzung	43
2.1.4.6 Aufladung, Ladeluft- und Abgaskühlung	45
2.1.5 Kurbelgehäuse-Entlüftungsgase	45
2.2 Abgasnachbehandlungssysteme.	47
2.2.1 Pkw und leichte Nutzfahrzeuge	47
2.2.2 Schwere Nutzfahrzeuge	48
2.2.3 Mobile Arbeitsmaschinen	49
2.3 Komponenten der Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren	51
2.3.1 Dosiersysteme für wässrige Harnstofflösung	51
2.3.1.1 Anforderungen	51
2.3.1.2 Komponenten und Basisfunktionen	52
2.3.1.3 Dosiersysteme für Nutzfahrzeuge	52
2.3.1.4 Dosiersysteme ohne Luftunterstützung	53
2.3.1.5 Druckgeregeltes Dosiersystem	55

2.3.2	Dosiersysteme für leichte Nutzfahrzeuge und Personenkraftwagen	56
2.3.2.1	Volumetrisch förderndes Dosiersystem	56
2.3.2.2	Fördermodul.	57
2.3.2.3	Pumpe	57
2.3.2.4	Filter.	59
2.3.2.5	Heizung	59
2.3.2.6	Dosiermodul.	61
2.3.2.7	Tank für das Reduktionsmittel.	66
2.3.2.8	Steuergerät	66
2.3.3	Grundlegende Regelalgorithmen	66
2.3.3.1	Dosierstrategie	66
2.3.3.2	Heizstrategie	67
2.3.3.3	Eisdruckfestigkeit	67
2.3.3.4	Kühlung	67
2.3.3.5	Wiederbetankung	67
2.3.3.6	Druckregelfunktion	67
2.3.4	Mischelemente in SCR-Systemen	67
2.3.5	Nachmotorisches Kraftstoff-Dosiersystem zur Erhöhung der Ab- gastemperatur.	69
2.3.5.1	Grundlagen.	69
2.3.5.2	Anforderungen.	70
2.3.5.3	Systemaufbau.	70
2.3.6	Katalysatoren und Partikelfilter	73
2.3.6.1	Diesel-Oxidationskatalysator (DOC).	73
2.3.6.2	NO ₂ -Bildung durch den DOC	75
2.3.6.3	Temperaturerhöhung durch den DOC	76
2.3.6.4	Katalysatoralterung	76
2.3.6.5	Aufbau und Funktionsgrößen eines DOC	76
2.3.6.6	Dieselpartikelfilter	77
2.3.6.7	Anforderungen an Dieselpartikelfilter	78
2.3.6.8	Filtertypen	78
2.3.6.9	Regeneration des Partikelfilters	80
2.3.6.10	Nichtkatalysierte (thermische) Oxidation	80
2.3.6.11	Additiv-unterstützte Regeneration	82
2.3.6.12	Regeneration mit NO ₂	82
2.3.6.13	Katalytisch beschichtete Dieselpartikelfilter (cDPF: coated DPF/catalyzed DPF).	83
2.3.6.14	Aufbau eines DPF-Systems	83
2.3.6.15	Steuergerätefunktionen	84
2.3.6.16	NO _x -Reduktionskatalysatoren.	85
2.3.6.17	Selektive katalytische Reduktion (SCR)	86

2.3.6.18	Betriebsstrategie eines SCR-Katalysators	88
2.3.6.19	Aufbau eines SCR-Systems	89
2.3.6.20	NO _x -Speicherkatalysator (NSC)	90
2.3.6.21	NO _x -Einspeicherung	92
2.3.6.22	Regeneration des NSC	93
2.3.6.23	Desulfatisierung von NO _x -Speicherkatalysatoren	93
2.3.6.24	Aufbau eines NSC-Systems	94
2.3.6.25	Auslegung von NO _x -Speicherkatalysatoren	95
2.3.6.26	Vergleich der NO _x -Minderungssysteme	95
2.3.7	Systemintegration	95
	Literatur	96
3	Emissionsgesetzgebung und Abgasmesstechnik	97
	Melanie Flämig, Bernd Hinner, Michael Bender und Markus Willimowski	
3.1	Emissionsgesetzgebung	97
3.1.1	Prüfverfahren	97
3.1.2	Typprüfung	97
3.1.3	Klasseneinteilung und Emissionsprüfung	98
3.1.4	Testzyklen	99
3.1.5	Serienprüfung	99
3.1.6	Feldüberwachung	100
3.2	Gesetzgebung für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge	100
3.2.1	CARB-Gesetzgebung (Pkw und leichte Nutzfahrzeuge)	100
3.2.1.1	Grenzwerte	101
3.2.1.2	Abgaskategorien	101
3.2.1.3	Dauerhaltbarkeit	102
3.2.1.4	Flottendurchschnitt (NMOG)	103
3.2.1.5	Emissionsfreie Fahrzeuge	104
3.2.2	EPA-Gesetzgebung	104
3.2.2.1	Grenzwerte	105
3.2.2.2	Abgaskategorien	106
3.2.2.3	Phase-in	106
3.2.2.4	Emissions-Flottendurchschnitt	106
3.2.2.5	Feldüberwachung	106
3.2.3	EU-Gesetzgebung	108
3.2.3.1	Grenzwerte	110
3.2.3.2	Real Driving Emissions	112
3.2.3.3	Feldüberwachung und Dauerhaltbarkeit	114
3.2.3.4	Periodische Abgasuntersuchung (AU)	115
3.2.4	Japan-Gesetzgebung	115
3.2.4.1	Grenzwerte	116
3.2.4.2	Flottenverbrauch	116

3.3	Gesetzgebung für schwere Nutzfahrzeuge	117
3.3.1	USA-Gesetzgebung für schwere Nfz	117
3.3.1.1	Grenzwerte	118
3.3.1.2	Consent Decree	118
3.3.1.3	Dauerhaltbarkeit	119
3.3.2	EU-Gesetzgebung für schwere Nfz.	119
3.3.2.1	Grenzwerte	120
3.3.2.2	Feldüberwachung und Dauerhaltbarkeit	121
3.3.3	Japan-Gesetzgebung für schwere Nfz.	122
3.3.3.1	Dauerhaltbarkeit	124
3.3.3.2	Regionale Programme	124
3.4	Testzyklen	125
3.4.1	Testzyklen für Pkw und leichte Nfz	125
3.4.1.1	FTP-75-Testzyklus	125
3.4.1.2	SFTP-Zyklen	126
3.4.1.3	Testzyklen zur Ermittlung des Flottenverbrauchs	127
3.4.2	Europäischer Testzyklus für Pkw und leichte Nfz	128
3.4.2.1	MNEFZ	128
3.4.2.2	WLTC	128
3.4.3	Japan-Testzyklus für Pkw und leichte Nfz	130
3.4.4	Testzyklen für schwere Nutzfahrzeuge	131
3.4.4.1	Europa	131
3.4.4.2	Japan	133
3.4.4.3	USA	133
3.5	Kraftstoffverbrauchs- und Treibhausgasgesetzgebung	134
3.5.1	Pkw und leichte Nutzfahrzeuge	134
3.5.1.1	USA	134
3.5.1.2	Europa	135
3.5.1.3	Japan	136
3.5.2	Schwere Nutzfahrzeuge	137
3.5.2.1	USA	137
3.5.2.2	EU	137
3.5.2.3	Japan	137
3.6	Abgasmesstechnik	138
3.6.1	Abgasprüfung für die Typzulassung	138
3.6.1.1	Abgasmessungen auf dem Fahrzeugprüfstand	139
3.6.1.2	RDE – Abgasmessung auf der Straße	142
3.6.2	Abgasmessgeräte	143
3.6.2.1	NDIR-Analysator	144
3.6.2.2	NDUV-Analysator	145
3.6.2.3	Chemilumineszenz-Detektor (CLD)	145
3.6.2.4	Flammenionisations-Detektor (FID)	145
3.6.2.5	Messung der Partikelemissionen	147

3.6.3	Abgasmessung in der Motorenentwicklung	149
3.6.3.1	GC-FID und Cutter-FID	150
3.6.3.2	Paramagnetischer Detektor (PMD)	150
3.6.3.3	Trübungsmessgerät (Absorptionsmethode)	150
3.6.3.4	Messung der Papierschwärzung (Reflexionsmethode) ..	151
3.6.3.5	Fotoakustisches Verfahren	152
3.6.4	Abgasuntersuchung.	152
	Literatur.	153
4	Diagnose	155
	Theodor Breiter, Walter Lehle, Hauke Wendt, Martin Pasta und Ella Diener	
4.1	Überwachung im Fahrbetrieb – On-Board-Diagnose	156
4.1.1	Übersicht.	156
4.1.2	Überwachung der Eingangssignale	156
4.1.3	Überwachung der Ausgangssignale	157
4.1.4	Überwachung der internen Steuergerätefunktionen	158
4.1.5	Überwachung der Steuergerätekommunikation	158
4.1.6	Fehlerbehandlung	158
4.1.6.1	Fehlererkennung	158
4.1.6.2	Fehlerspeicherung	159
4.1.6.3	Notlauffunktionen	159
4.2	OBD-Anforderungen für Pkw und leichte Nfz.	159
4.2.1	USA	159
4.2.1.1	CARB: OBD-I-Anforderungen	159
4.2.1.2	CARB: OBD-II-Anforderungen	159
4.2.1.3	OBD-II-Erweiterungen	160
4.2.1.4	Geltungsbereich	161
4.2.1.5	EPA: OBD-Anforderungen	161
4.2.2	Europa.	161
4.2.2.1	EOBD-Anforderungen Euro 5 und Euro 5+	162
4.2.2.2	EOBD-Anforderungen Euro 6.	162
4.2.3	China.	163
4.2.4	Andere Länder	164
4.3	OBD-Anforderungen für schwere Nfz.	164
4.3.1	Europa.	164
4.3.1.1	EOBD-Anforderungen Euro IV (Überwachungsstufe 1). ...	164
4.3.1.2	EOBD-Anforderungen Euro V (Überwachungsstufe 2) ...	164
4.3.1.3	Zusätzliche EOBD-Anforderungen Euro IV–V.	164
4.3.1.4	SCR-System.	165
4.3.1.5	Abgasrückführsystem	165
4.3.1.6	NO _x -Speicherkatalysatoren	165
4.3.1.7	Überwachung NO _x -Kontrollsysteme	165
4.3.1.8	EOBD-Anforderungen Euro VI.	165

4.3.1.9	Geforderte Diagnosen aus WWH-OBD.	167
4.3.1.10	Geforderte Diagnosen außerhalb des WWH-OBD-Umfangs.	167
4.3.1.11	Gasmotoren	167
4.3.1.12	Anforderungen an NO _x -Kontrollsysteme.	167
4.3.2	USA	167
4.3.2.1	CARB: OBD-II-Anforderungen	167
4.3.2.2	Einführungsablauf der OBD-Anforderungen	168
4.3.3	Japan	168
4.3.4	China.	169
4.3.5	Andere Länder	169
4.4	Anforderungen an das OBD-System	169
4.4.1	OBD-Schwellenwerte	169
4.4.2	Anforderungen an die Funktionalität	170
4.4.2.1	Motorkontrollleuchte	170
4.4.2.2	Kommunikation mit dem Scan-Tool	170
4.4.2.3	Fahrzeugreparatur	171
4.4.2.4	Einschaltbedingungen	172
4.4.2.5	Sperrbedingungen	172
4.4.2.6	Temporäres Abschalten von Diagnosefunktionen	172
4.4.2.7	Readiness-Code	172
4.4.2.8	Diagnose-System-Management.	173
4.4.2.9	Rückruf	173
4.5	OBD-Funktionen	174
4.5.1	Übersicht.	174
4.5.2	Beispiele für OBD-Funktionen.	175
4.5.2.1	Katalysatordiagnose.	175
4.5.2.2	Diagnose Partikelfilter	175
4.5.2.3	Diagnose Abgasrückführsystem.	175
4.5.2.4	Comprehensive Components	176
4.6	Werkstattdiagnose.	177
4.6.1	Werkstattgeschäft	177
4.6.1.1	Trends.	177
4.6.2	Anforderungen an die Werkstätten	178
4.6.3	Werkstattprozesse	179
4.6.3.1	Auftragsannahme.	179
4.6.3.2	Service- und Reparaturdurchführung.	179
4.6.4	Werkstatt-Software	180
4.6.4.1	Anwendung	181
4.6.4.2	Anwendernutzen	182
4.6.5	Fahrzeug-System-Analyse	182
4.6.5.1	Messmittel	182
4.6.5.2	Beispiel für den Ablauf in der Werkstatt	183

4.6.6	Diagnose in der Werkstatt	183
4.6.6.1	Geführte Fehlersuche	183
4.6.6.2	Auslesen der Fehlerspeichereinträge	185
4.6.7	Werkstatt-Diagnosefunktionen	186
4.6.7.1	Beispiel „Leckage im Hochdrucksystem“	186
4.6.7.2	Beispiel „Drehmomentverlust eines Zylinders“	187
4.6.7.3	Stellglied-Diagnose	188
4.6.7.4	Offboard-Prüfgerät	190
4.6.8	Prüf- und Testgeräte	190
4.6.8.1	Diagnosetester	190
	Literatur	193
	Verständnisfragen	195