

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen XII

1	Historie und Rahmenbedingungen	1
1.1	Historie	1
1.2	Rahmenbedingungen	3
1.2.1	Testzyklen	3
1.2.2	Abgasgesetzgebung USA und Kalifornien	6
1.2.3	Abgasgesetzgebung Europa	6
1.2.4	Abgasgesetzgebung Japan	7
1.2.5	Regelungen zur Verbrauchsreduzierung	7
1.3	Technologien	8
2	Motorischer Arbeitsprozess	10
2.1	Merkmale und Einteilung	10
2.2	Kenngrößen	12
2.2.1	Leistung und Mitteldruck	12
2.2.2	Verdichtungsverhältnis	13
2.2.3	Wirkungsgrad	13
2.2.4	Energiebilanz und Verlustteilung	14
2.3	Sonderverfahren	19
2.3.1	Lastregelung mit vollvariablen Ventiltrieben	19
2.3.2	Miller-Cycle	19
2.3.3	Atkinson-Cycle	20
3	Kraftstoffe	21
3.1	Zusammensetzung und Aufbau	21
3.1.1	Reine Kohlenwasserstoffe	21
3.1.2	Sauerstoffhaltige Kohlenwasserstoffe	23
3.1.3	Kraftstoffzusätze	24
3.1.4	Gasförmige Kraftstoffe	24
3.2	Eigenschaften	25
3.2.1	Flüssige Kraftstoffe	25
3.2.2	Heizwert und Gemischheizwert	27
3.2.3	Zündwilligkeit und Klopfestigkeit	29
3.2.4	Gesetzliche Anforderungen an Otto-Kraftstoffe	30

3.3	Herstellung von Otto-Kraftstoffen	32
3.3.1	Herstellung aus Mineralöl	32
3.3.2	Alternative Herstellmethoden für flüssige Kraftstoffe	33
3.3.3	Bereitstellung von Wasserstoff	35
3.3.4	Energie- und Emissionsbilanzen – „Well to Tank“	35
4	Gemischbildung	37
4.1	Grundlagen der Gemischbildung	37
4.1.1	Zerstäubung	37
4.1.2	Charakterisierung von Tropfenspektren	42
4.1.3	Verdampfung	44
4.1.4	Numerische Methoden zur Berechnung der Gemischbildung	46
4.2	Äußere Gemischbildung	50
4.2.1	Zentrale Gemischbildung	50
4.2.2	Dezentrale Gemischbildung	58
4.3	Innere Gemischbildung	62
4.3.1	Zylinderströmung und Einspritzung	62
4.3.2	Mischungsprozess	63
4.3.3	Interaktion des Einspritzstrahls mit einer Wand	65
4.4	Charakterisierung der Gemischbildung	67
4.4.1	Einspritzstrahl	67
4.4.2	Gemischbildung und Motorgeometrie	70
5	Gemischbildner	74
5.1	Vergaser	75
5.1.1	Einfacher Kraftfahrzeug-Vergaser	75
5.1.2	Elektronischer Vergaser	77
5.1.3	Gleichdruckvergaser	78
5.1.4	Schiebervergaser	78
5.2	Zentraleinspritzung	79
5.3	Saugrohr-Einzeleinspritzung	79
5.3.1	Aufbau eines Saugrohr-Einspritzventils	80
5.3.2	Zumessung und Aufbereitung	80
5.3.3	Einblaseventil für gasförmige Kraftstoffe	84
5.3.4	Elektrische Ansteuerung und Durchflussverhalten	84
5.4	Benzin-Direkteinspritzung	85
5.4.1	Drallinjektor	87
5.4.2	Injektor mit Mehrlochdüse	89
5.4.3	Injektor mit Schlitzdüse	90
5.4.4	Nach außen öffnende Düse	90
5.4.5	Direkte Gemischeinblasung	93
5.5	Hydraulische Anforderungen an das Kraftstoffversorgungssystem	95
5.5.1	Niederdruck-Kraftstoffsystem	95
5.5.2	Hochdruck-Kraftstoffsystem	95
6	Ladungswechsel und Strömung	97
6.1	Kenngrößen des Ladungswechsels	97

- 6.1.1 Spülung 100
- 6.1.2 Abgasrückführung 103
- 6.2 Auslegung 105
- 6.3 Wellendynamische Aufladeeffekte 106
 - 6.3.1 Schwingrohraufladung 106
 - 6.3.2 Resonanzaufladung 107
 - 6.3.3 Auslegungsbeispiele 107
- 6.4 Aufladung 108
 - 6.4.1 Mechanische Aufladung 113
 - 6.4.2 Abgasturboaufladung 114
 - 6.4.3 Erweiterte Turboaufladung 117
 - 6.4.4 Impulsaufladung 118
- 6.5 Strömung im Motor 118

- 7 Zündung und Entflammung 122
 - 7.1 Grundlagen der Funkenzündung 122
 - 7.1.1 Zündvorgang 122
 - 7.1.2 Entflammungsphase und Flammenkernbildung 124
 - 7.2 Zyklische Schwankungen und Entflammung 127
 - 7.3 Zündsysteme für Funkenzündung 129
 - 7.3.1 Spulenzündung 129
 - 7.3.2 Hochspannungs-Kondensatorzündung 130
 - 7.3.3 Mehrfunkenzündung und Wechselstromzündung 130
 - 7.3.4 Magnetzündung 130
 - 7.4 Zündkerze 131
 - 7.4.1 Funktion und Anforderungen 131
 - 7.4.2 Aufbau 131
 - 7.4.3 Betriebstemperatur und Wärmewert 132
 - 7.4.4 Elektrodengeometrie und Funkenstrecke 133
 - 7.4.5 Funkenlage 134
 - 7.4.6 Ionenstrommessung 135
 - 7.5 Alternative Zündsysteme 136
 - 7.5.1 Oberflächenzündung 136
 - 7.5.2 Plasmastrahlzündung 137
 - 7.5.3 Laserzündung 137
 - 7.5.4 Sonderzündverfahren 138

- 8 Verbrennung 139
 - 8.1 Grundlagen und Ziele 139
 - 8.2 Thermodynamik der Verbrennung 140
 - 8.2.1 Luftbedarf und Luftverhältnis 140
 - 8.2.2 Energiebilanz und Heizwert 141
 - 8.2.3 Zusammensetzung und Stoffwerte des Verbrennungsgases 142
 - 8.2.4 Reaktionskinetik 143
 - 8.2.5 Zündprozesse 145
 - 8.2.6 Strahlung der Flamme 145
 - 8.2.7 Ionisation der Flamme 145

- 8.3 Flammenausbreitung 146
 - 8.3.1 Laminare Flammenausbreitung 146
 - 8.3.2 Turbulente Flammenausbreitung 147
- 8.4 Limitierte und nichtlimitierte Schadstoffe, Schadstoffbildung 149
 - 8.4.1 Nichtlimitierte Schadstoffe 150
 - 8.4.2 Limitierte Schadstoffe 150
 - 8.4.3 Schadstoffentstehung 150
- 8.5 Homogene Selbstzündung 152
- 8.6 Verbrennungsanomalien 154
 - 8.6.1 Glühzündungen 154
 - 8.6.2 Klopfende Verbrennung 155

- 9 Abgasnachbehandlung 158
 - 9.1 Abgasnachbehandlung bei $\lambda = 1$ -geregelten Motoren 158
 - 9.1.1 Emissionen im Testzyklus 158
 - 9.1.2 Reaktionsmechanismen 160
 - 9.1.3 Funktion des $\lambda = 1$ -geregelten Dreiwege-Katalysators 161
 - 9.1.4 Systemoptimierung 164
 - 9.1.5 Systemerweiterungen 166
 - 9.2 Abgasnachbehandlung mit $\lambda > 1$ -geregelten Motoren 168
 - 9.2.1 Funktion des DeNO_x-Katalysators 168
 - 9.2.2 Systemoptimierung der „mageren“ Abgasnachbehandlung 170
 - 9.2.3 Alternative Nachbehandlungskonzepte 171

- 10 Ottomotorische Technologien 173
 - 10.1 Zielfelder 173
 - 10.2 Konventioneller Ottomotor mit Saugrohreinspritzung 175
 - 10.2.1 Ventiltriebskonzepte 175
 - 10.2.2 Variabilitäten der Sauganlagen 177
 - 10.2.3 Variabilitäten der Ventiltriebe (teilvariable Ventiltriebe) 178
 - 10.2.4 Restgassteuerung 179
 - 10.3 Variable Ladungsbewegung 181
 - 10.4 Vollvariabler Ventiltrieb 185
 - 10.4.1 Drosselfreie Laststeuerung mit vollvariablen Ventiltrieben 185
 - 10.4.2 Der mechanisch vollvariable Ventiltrieb 186
 - 10.4.3 Der elektromechanische Ventiltrieb 189
 - 10.4.4 Der elektrohydraulische Ventiltrieb 191
 - 10.5 Variables Verdichtungsverhältnis 194
 - 10.6 Zylinderabschaltung 196
 - 10.7 Benzin-Direkteinspritzung 199
 - 10.7.1 Homogene Brennverfahren mit Direkteinspritzung 200
 - 10.7.2 Schichtkonzepte der ersten Generation – wand- und luftgeführte Brennverfahren 203
 - 10.7.3 Schichtkonzepte der zweiten Generation – strahlgeführte Brennverfahren 206
 - 10.8 Downsizing 208
 - 10.9 Kontrollierte homogene Selbstzündung 211

10.10	Zweitakt-Kleinmotoren	214
10.11	Großgasmotoren	217
10.12	Rotationskolben-Motoren	220
10.13	Brennverfahren für alternative Kraftstoffe	222
10.13.1	Flüssiggas	223
10.13.2	Erdgas	223
10.13.3	Methanol und Ethanol	226
10.13.4	Wasserstoff	227
11	Motorsteuerungen	239
11.1	Systembeschreibung	239
11.1.1	Modellbasierte Funktionsstruktur	239
11.1.2	Drehmomentbasierte Funktionsstruktur	240
11.1.3	Vernetzte Funktionsstruktur	240
11.2	Funktionen	241
11.2.1	Allgemeine Funktionen	242
11.2.2	Diagnose- und Sicherheitskonzepte	243
	Anhang	245
	Literatur	248
	Namen- und Sachverzeichnis	260