

2805 - 813 A

Günter P. Merker, Christian Schwarz

Technische Verbrennung Simulation verbrennungs- motorischer Prozesse

Von Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Günter P. Merker und
Priv.-Doz. Dr.-Ing. Christian Schwarz

Mit 122 Abbildungen



B. G. Teubner Stuttgart · Leipzig · Wiesbaden

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	XI
1 Einleitung	1
1.1 Vorbemerkungen	1
1.2 Modellbildung	1
1.3 Simulation	3
2 Reale Arbeitsprozeßrechnung	5
2.1 Füll- und Entleermethode	5
2.1.1 Grundlagen	6
2.1.2 Ein-Zonen-Zylinder-Modell	8
2.1.2.1 Grundlagen	8
2.1.2.2 Mechanische Arbeit	11
2.1.2.3 Durchflußgleichung/Ausflußfunktion/Ventilhubkurven	13
2.1.2.4 Wärmeübergang im Zylinder	19
2.1.2.5 Wärmeübergang im Auslaßkrümmer	30
2.1.2.6 Wandtemperaturmodelle	31
2.1.2.7 Brennverlauf	35
2.1.2.8 Innere Energie	54
2.1.3 Zwei-Zonen-Zylinder-Modell	65
2.1.3.1 Modellierung des Hochdruckteiles nach Hohlbaum	65
2.1.3.2 Modellierung des Hochdruckteiles nach Heider	69
2.1.3.3 NO _x -Bildung	73
2.1.3.4 Modellierung des Ladungswechsels beim Zweitaktmotor	79
2.1.4 Weitere Komponenten des Gaspfades im Verbrennungsmotor	82
2.2 Gasdynamik	84
2.2.1 Grundgleichungen der eindimensionalen Gasdynamik	84
2.2.1.1 Massenbilanz	85
2.2.1.2 Impulserhaltungssatz	86
2.2.1.3 Energieerhaltungssatz	86
2.2.2 Numerische Lösungsverfahren	87
2.2.2.1 Einstufiges Lax-Wendroff-Verfahren	88
2.2.2.2 Zweistufiges Lax-Wendroff-Verfahren	89
2.2.3 Randbedingungen	91
2.3 Aufladung	95
2.3.1 Aufladeverfahren	95
2.3.2 Grundlagen	96
2.3.2.1 Verdichter	96
2.3.2.2 Turbinen	97
2.3.2.3 Abgasturbolader	100

2.3.3	Strömungsverdichter	102
2.3.3.1	Bezogene Größen	103
2.3.3.2	Kennfelddarstellung	104
2.3.3.3	Extrapolation	106
2.3.3.4	Verhalten an der Pumpgrenze	112
2.3.4	Verdrängerlader	113
2.3.5	Strömungsturbine	114
2.3.5.1	Bezogene Größen	115
2.3.5.2	Extrapolation	115
2.3.5.3	Kennfelddarstellung	118
2.3.5.4	Variable Turbinengeometrie	119
2.3.6	Ladeluftkühlung	120
2.3.6.1	Grundlagen	120
2.3.6.2	Numerische Behandlung	123
2.3.6.3	Vor- und Nachteile der Ladeluftkühlung	124
3	Gesamtprozeßanalyse	126
3.1	Allgemeines	126
3.2	Thermisches Motorverhalten	127
3.2.1	Grundlagen	127
3.2.2	Modellierung des Rohrsystems	128
3.2.3	Kühlkreislauf	130
3.2.4	Ölkreislauf	133
3.2.5	Physikalische Eigenschaften von Öl und Kühlwasser	139
3.2.5.1	Kühlmittel	139
3.2.5.2	Motoröl	140
3.1	Motorreibung	141
3.3.1	Reibungsansatz für den betriebswarmen Motor	141
3.3.2	Reibungsansatz für Warmlauf	142
3.3.2.1	Reibungsansatz für niedrige Temperaturen	143
3.3.2.2	Bestimmung des reibrelevanten Ölwärmestroms	144
3.4	Motorsteuerung/Regelung	145
3.4.1	PID-Regler	146
3.4.2	Lastregelung	146
3.4.3	Verbrennungsregelung	147
3.4.4	Regelung der Abgasrückführung	148
3.4.4.1	Interne Abgasrückführung	148
3.4.4.2	Externe Abgasrückführung	149
3.4.5	Regelung am Aufladeaggregat	150
3.4.5.1	Ladedruckregelung	150
3.4.5.2	Rückblaseregelung (Pumpschutz)	151

3.4.5.3 Abgastemperaturregelung	152
3.4.6 Fahrerregler	152
3.5 Darstellung des Motors als Kennfeld	153
3.5.1 Vorgehensweise und Randbedingungen	154
3.5.2 Rekonstruktion des Drehmomentenverlaufs	156
3.6 Simulationsergebnisse	159
3.6.1 Stationäre Untersuchungen (Parametervariationen)	160
3.6.1.1 Lastvariation gedrosselter Ottomotor	160
3.6.1.2 Einfluß von Zündung und Brenndauer	162
3.6.1.3 Variation von Verdichtungsverhältnis, Last und Spitzendruck am Großdieselmotor	164
3.6.1.4 Untersuchungen zu vollvariablen Ventiltrieben	165
3.6.1.5 Variation der Saugrohrlänge und der Ventilsteuerzeiten (Ottomotor, Vollast)	167
3.6.1.6 Untersuchungen zum Restgas bei einem abgasturboaufgeladenen Pkw-Dieselmotor	167
3.6.1.7 Umblasen Großdieselmotor	171
3.6.2 Transiente Untersuchungen	174
3.6.2.1 Lastaufschaltung Generator	174
3.6.2.2 Hochlauf eines Dieselmotors mit Registeraufladung	176
3.6.2.3 Beschleunigung eines NFZ im direkten Gang	177
3.6.2.4 Beschleunigung eines NFZ von 0 auf 80 km/h	178
3.6.2.5 Eingriffsmöglichkeiten am Abgasturbolader (Wastegate, VTG, elektrisch unterstützter Lader, elektrischer Zusatzverdichter)	180
3.6.2.6 Teil des ECE-Zyklus	182
3.6.2.7 Warmlauf im ECE-Zyklus	184
3.6.2.8 Beschleunigung und Lastabwurf beim turboaufgeladenem Ottomotor	186
4 Dreidimensionale, instationäre Strömungsfelder	189
4.1 Navier-Stokes-Gleichungen	189
4.1.1 Strömungsfeld	189
4.1.2 Erhaltungssätze	190
4.1.3 Allgemeine Grundgleichungen	192
4.1.4 Numerische Integrationsverfahren	195
4.2 Reynoldsgemittelte Navier-Stokes-Gleichungen	197
4.3 Turbulenzmodelle	198
4.3.1 Wirbelviskositätshypothese	198

4.3.2	Das k, ε -Modell	199
4.3.3	Reynoldsspannungs-Modelle	201
4.4	Wandgesetze	201
4.4.1	Universelles Geschwindigkeitsgesetz	202
4.4.2	Universelles Temperaturgesetz	204
4.4.3	Eindimensionale Wandbindungsgleichung	206
4.5	Anwendungen	209
5.	Verbrennungsmodelle	213
5.1	Klassifizierung	213
5.2	Phänomenologische Mehr-Zonen-Modelle	216
5.2.1	Dieselmotorische Verbrennung	216
5.2.2	Ottomotorische Verbrennung	225
5.2.3	Schadstoffbildung	229
5.3	Dreidimensionale Modelle	232
5.3.1	Dieselmotorische Verbrennung	232
5.3.2	Ottomotorische Verbrennung	236
5.3.3	Zusammenfassung und Ausblick	240
Anhang A:	Thermodynamische Grundlagen	242
Literatur		247
Stichwortverzeichnis		253