

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Modellierung Gesamtriebwerk	5
2.1 Drehmoment pro Zylinder	5
2.2 Reibmoment	8
2.2.1 Theoretische Grundlagen	8
2.2.2 Reibung im Motor	10
2.2.3 Einfluss des Motoröls	11
2.3 Moment durch Nebenaggregate	12
2.4 Getriebemoment	13
2.5 Startermoment	15
3 Thermodynamische Prozessmodellierung	17
3.1 Energiebilanz	17
3.2 Massenbilanz	20
3.2.1 Ladungswchsel	23
3.2.2 Blow-By	25
3.2.3 Kraftstoffpfad	30
3.3 Kalorische Eigenschaften des Arbeitsgases	31
3.3.1 Luft	32
3.3.2 Kraftstoff	32
3.3.3 Rauchgas	37
3.4 Wärmeabfuhr über Zylinderwände	39
3.5 Wärmezufuhr durch Verbrennung	41
3.5.1 Vibe-Brennverlauf	41
3.5.2 Superposition von Vibe-Brennverläufen	42
3.5.3 3- und 4-Phasen-Brennverlaufsmodelle	43
3.5.4 Weitere Brennverlaufsansätze	45
3.5.5 Brennverlaufsfunktion für den Kaltstart	45
3.6 Übersicht verwendeter Modellansätze	46
4 Analyseverfahren Kaltstart-Verbrennung	47
4.1 Versuchsaufbau Kaltstart	47
4.2 Aufbereitung Zylinderdruckdaten	47
4.2.1 Signalaufbereitung und Nullpunktbestimmung	48
4.2.2 Bestimmung von „Einlass Schliesst“	49
4.2.3 Thermoschock	50
4.3 Thermodynamische Druckverlaufsanalyse	51
4.4 Bestimmung des Verbrennungsluftverhältnisses	53
4.4.1 Modellstruktur zur Bestimmung des Verbrennungsluftverhältnisses	54
4.4.2 Indizierte Hochdruckarbeit aus relativer Füllung	54
4.4.3 Indizierte Hochdruckarbeit aus Füllungsäquivalent	55
4.4.4 Einfluss Kühlmitteltemperatur	57

Inhaltsverzeichnis

4.4.5 Einfluss Schwerpunktlage	58
4.4.6 Einfluss Verbrennungsluftverhältnis	59
4.5 Übersicht Analysekette	60
5 Verbrennung im Start	61
5.1 Theorie der motorischen Verbrennung	61
5.1.1 Chemische Grundlagen der ottomotorischen Verbrennung	61
5.1.2 Physikalische Grundlagen der ottomotorischen Verbrennung	63
5.1.3 Verbrennung im Kaltstart	65
5.2 Analyse Verbrennung im Kaltstart	66
5.2.1 Heiz- und Brennverläufe im Kaltstart	67
5.2.2 Randbedingungen	69
5.2.3 Stellgrößen	72
5.3 Verbrennungsansatz für den Kaltstart	76
5.3.1 Umgesetzte Kraftstoffmenge	77
5.3.2 Entflammung und Stabilisierung	79
5.3.3 Hauptumsetzung	81
5.3.4 Validierung des Verbrennungsmodells	82
6 Reibung im Start	87
6.1 Übersicht Modellierungsansätze	87
6.1.1 Empirische Ansätze nach Fischer	87
6.1.2 Empirischer Ansatz nach Wilhelm	88
6.1.3 Ansatz nach Schwarzmeier und Reulein	89
6.1.4 Physikalisch basierter Ansatz nach Fischer	91
6.1.5 Ansatz nach Sandoval und Heywood	92
6.1.6 Ansatz nach Shayler	92
6.2 Experimentelle Untersuchungen	93
6.2.1 Versuchsanordnung Reibleistungsprüfstand	93
6.2.2 Versuchsanordnung Kältekammer-Motorprüfstand	94
6.2.3 Versuchsprogramm Tieftemperaturmessungen	96
6.2.4 Validierung Tieftemperaturmessungen	99
6.2.5 Losbrechmoment	99
6.3 Reibungsansatz	100
6.3.1 Abgleich bestehender Ansätze mit Messdaten	100
6.3.2 Modellansatz kalte Reibung	102
6.3.3 Validierung des Reibmodells	104
6.3.4 Modellansatz Losbrechmoment	105
6.3.5 Übertragung auf weitere Motoren	105
7 Sensitivitätsanalyse und Modellvalidierung	111
7.1 Sensitivität Einzelzyklus	111
7.2 Sensitivität Startvorgang	115
7.3 Validierung Gesamtmodell	121
8 Zusammenfassung	129
A Versuchsträger	131
B Mathematische Beschreibung des Gesamtmodells	132
B.1 Beschreibung des Zylinderdruckes	132

B.2 Beschreibung der Verbrennungsmodells	135
B.3 Beschreibung des Reibungsmodells	137
C Ergänzungen zum Blow-By	139
C.1 Berechnungsvorschrift Ringkräfte	139
C.2 Parametervariation Ringflattern	140
D Ergänzungen zu kalorischen Eigenschaften des Arbeitsgases	143
D.1 Berechnung der spezifischen Enthalpie	143
D.2 Koeffizienten Gleichgewichtskonstanten	144
D.3 Ersatzkraftstoff für Kaltstart	144
D.3.1 Zusammensetzung des untersuchten Kraftstoffes	144
D.3.2 Näherungsformeln Dampfdruck	145
D.3.3 Kritische Daten nach Joback	146
D.3.4 Stoffdaten betrachteter Spezies	146
D.3.5 Siedeverläufe betrachteter Spezies	148
E Ergänzungen Sensitivität und Validierung	150
E.1 Sensitivität im Einzelzyklus	150
E.2 Sensitivität Startvorgang	152
E.3 Modellvalidierung	153
Literaturverzeichnis	154