

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Stand der Technik	1
1.3	Zielsetzung	3
2	Verfahren im Prüfstandsumfeld	5
2.1	Steuerung von Verbrennungsmotoren	5
2.2	Vorgehensweise bei der Motorapplikation	6
2.2.1	Applikationsverfahren	7
2.2.2	Prüfverfahren	9
2.2.3	Entwicklung von Prüf- und Applikationsverfahren	9
2.3	Werkzeug Motorprüfstand	10
2.3.1	Prüfstandstopologie	10
2.3.2	Beeinflussung des Messergebnisses	11
2.4	Kriterien zur Beurteilung von Messdatengüte und Applikationsprozesses am Motorprüfstand	13
2.4.1	Bestimmung der Messunsicherheit	14
2.4.2	Bewertung des Datenstandes	15
2.4.3	Anwendung der Gütekriterien	16
3	Virtuelle Prüfumgebung	19
3.1	Anwendungszwecke einer virtuellen Prüfumgebung	19
3.1.1	Virtuelle Verfahrensentwicklung	19
3.1.2	Virtuelle Sensitivitätsanalyse	20
3.2	Anforderungen	22
3.2.1	Modellstruktur	22
3.2.2	Modellumfang	22
3.2.3	Modellerstellung	23
3.2.4	Modellgenauigkeit	23
3.2.5	Ausführungsgeschwindigkeit	24
3.3	Topologie	25
4	Modellierung	27
4.1	Prüfling	28
4.1.1	Grundmodell	30
4.1.1.1	Empirisches Dieselmotormodell	31
4.1.1.2	Phänomenologisches Ottomotormodell	36
4.1.1.3	Steuergerät	39

4.1.2	Thermisches Modell	40
4.1.2.1	Verlustleistung	42
4.1.2.2	Reibmodell	43
4.1.2.3	Kalibrierung des thermischen Netzwerkes	43
4.1.3	Medieneinfluss	48
4.1.3.1	Ladelufttemperatur	48
4.1.3.2	Luftfeuchte	48
4.1.3.3	Wassertemperatur	50
4.1.4	Betriebsgrenzen	52
4.1.4.1	Aussetzergrenze Dieselmotor	54
4.1.4.2	Verbrennungsgrenzen Ottomotor	59
4.1.5	Vergleich empirischer und phänomenologischer Modellansatz	62
4.1.6	Abgasnachbehandlung	64
4.1.7	Elektrotraktion	65
4.2	Umweltsimulation	67
4.2.1	Kühlmittelkonditionierung	67
4.2.2	Ölkonditionierung	69
4.2.3	Ansaugluftkonditionierung	70
4.2.4	Ladeluftkonditionierung	70
4.3	Messtechnik	73
4.3.1	Topologie empirisches Messtechnik-Modul	73
4.3.1.1	Drehzahl	76
4.3.1.2	Drehmoment	76
4.3.1.3	Druck	77
4.3.1.4	Temperatur	77
4.3.1.5	Massenstrom	77
4.3.1.6	Volumenstrom	78
4.3.2	Abgasmessanlage	78
4.3.3	Kraftstoffverbrauchsmessung	80
4.3.3.1	Kraftstoffkonditionierung	81
4.3.3.2	Scheinverbrauch	83
4.3.4	Zylinderdruckindizierung	85
4.4	Prüfstands Aufbau	88
4.4.1	Belastungsmaschine	88
4.4.2	Wellenstrang	88
4.5	Prüfstandssteuerung	91
5	Sensitivitätsanalyse der Einflussgrößen am Prüfstand	93
5.1	Bewertung einer stationären Einzelmessung	94
5.1.1	Einzelne Einflussgrößen	94
5.1.2	Mehrere Einflussgrößen	95
5.1.3	Instationäre Einflussgrößen und Prozessparameter	98
5.2	Bewertung einer dynamischen Einzelmessung	99
5.2.1	Abgleich Gesamtprüfstand	100
5.2.2	Wasserkonditionierung	102

5.2.2.1	Unsicherheit Wassertemperatur	102
5.2.2.2	Aufheizphase Wasserkonditionierung	104
5.2.3	Ladeluftkonditionierung	106
5.2.3.1	Unsicherheit Ladelufttemperatur	106
5.2.4	Kraftstoffmesstechnik	108
5.2.4.1	Unsicherheit Kraftstoffmesstechnik	108
5.2.5	Abgasmesstechnik	110
5.2.5.1	Zeitkonstante Abgasmesstechnik	110
5.2.5.2	Unsicherheit Abgasmesstechnik	111
5.2.6	Drehzahlregelung	115
5.2.6.1	Zeitkonstante Drehzahlregelung	115
5.2.6.2	Unsicherheit Drehzahlregelung	115
5.2.7	Drehmomentregelung	118
5.2.7.1	Zeitkonstante Drehmomentregelung	118
5.2.7.2	Unsicherheit Drehmomentregelung	120
5.2.8	Auslegungskriterien Gesamtprüfstand	122
5.3	Bewertung einer Applikation	124
5.3.1	Bewertung von Datenständen	124
5.3.2	Bewertung von Prüfständen	126
6	Zusammenfassung	129
	Literaturverzeichnis	131
A	Anhang	141
A.1	Optimierungsverfahren	141
A.1.1	Gewichtungsfaktoren Kalibrierung thermisches Modell	141
A.2	Verwendete Motoren und Prüftechnik	142
A.2.1	D1	142
A.2.2	D2	142
A.2.3	D3	142
A.2.4	D4	143
A.2.5	D5	143
A.2.6	O1	143
A.3	Stoffdaten	143
A.3.1	Kraftstoff	143
A.3.1.1	Heizwert	143
A.3.1.2	Dichte, Wärmekapazität	144
A.3.2	Wärmekapazität Gaspfad	144
A.3.3	Kühlmittel	144
A.4	Korrekturmodelle Medieneinfluss	145
A.4.1	Ladelufttemperatur	145
A.4.2	Wassertemperatur	146
A.5	Berechnung Massenstrom Abgas	148