

# **TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN**

Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen

## **NO-Berechnungsmethodik in der druckbasierten Motorregelung für stationär betriebene Industriegasmotoren**

Matthias Birner

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs**

(Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Florian Holzapfel

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Sattelmayer

Die Dissertation wurde am 20.10.2011 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 12.03.2012 angenommen.

Meinen Eltern

## Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität München.

Insbesondere möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister bedanken für die Unterstützung in den Projekten und die enormen Freiräume während der Tätigkeit am Lehrstuhl.

Ebenso danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Sattelmayer für die Übernahme des Koreferates und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Florian Holzapfel für die Leitung des Promotionsverfahrens.

Weiterhin gilt besonderer Dank Herrn Dr.-Ing. Maximilian Prager für sein immer offenes Ohr bei Problemen, Herrn Stefan Blodig für seine wertvollen Ratschläge in programmiertechnischen Fragen, Dr.-Ing. Matthias Auer für die Unterstützung in Prüfstandsfragen und allen Kollegen des Lehrstuhls für Verbrennungskraftmaschinen, die mich in der Arbeit unterstützt haben.

Ein Teil der Arbeit wurde in Kooperation mit der AVAT Automation GmbH in Tübingen erarbeitet. Hier gilt mein besonderer Dank Herrn Ganssloser, welcher über die Kombination verschiedener Fachbereiche das Projekt überhaupt erst ermöglicht hat und Herrn Dr.-Ing. Eggers für die stets angenehme und effiziente Zusammenarbeit.

Weiterhin gebührt der Firma Kistler für die zur Verfügung gestellte umfangreiche Messtechnik ein besonderer Dank. Die große Hürde einer kompletten Messtechnik für vergleichende Messungen wurde hierdurch fast vollständig genommen.

Bei manchen Teilgebieten in dieser Dissertation war die Mitarbeit von Studenten hilfreich, welchen an dieser Stelle auch herzlich gedankt sei.

München, 31. Mai 2012

Matthias Birner



## Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	1
Inhaltsverzeichnis .....	3
1 Einleitung .....	7
2 Stationäre Industriegasmotoren – Stand der Technik .....	9
2.1 Einsatzorte und Leistungsklassen.....	9
2.2 Gesetzgebung und Rahmenbedingungen.....	11
2.3 Regelungskonzepte .....	12
2.4 Aufgabenstellung .....	13
3 Berechnungsmodelle zu Emissionen .....	15
3.1 Berechnungsmodelle – Stand der Technik .....	15
3.1.1 Einteilung und Auswahlkategorien.....	15
3.1.2 Vollständiger thermodynamischer Ansatz.....	17
3.1.3 Echtzeitfähiger Ansatz.....	20
3.2 Güte aktueller Modelle .....	21
4 Versuchsanordnung.....	23
4.1 Prüfstand und Peripherie .....	23
4.1.1 Gesamtschema .....	23
4.1.2 Einzylinder-Forschungsmotor.....	24
4.1.3 Gasmischanlage .....	25
4.2 Sensortechnik.....	27
4.2.1 Gesamtübersicht.....	27
4.2.2 Spezifikationen der Messapparatur .....	28
4.2.2.1 Temperatur und Druck außerhalb des Brennraums .....	28
4.2.2.2 Abgas .....	28
4.2.2.3 Luftverhältnis .....	28
4.2.3 Fehlerbetrachtung des genutzten Messsystems.....	29
4.2.3.1 Drucksensoren .....	29
4.2.3.2 Temperatursensoren .....	29
4.2.3.3 Abgasanalyse .....	30
4.2.3.4 Luftverhältnisbestimmung .....	31
4.3 Messdatenerfassung .....	34
4.4 Anbindung des druckbasierten Regelmoduls.....	35

5	Grundlagen brennraumbasierter Regelung und Analyse .....	39
5.1	Messkette .....	39
5.2	Signalverarbeitung .....	41
5.2.1	Preprocessing .....	41
5.2.1.1	Druckniveaurektur .....	41
5.2.1.2	Winkleinpassung .....	42
5.2.1.3	Mittelung .....	43
5.2.2	Processing .....	44
5.2.2.1	Indizierter Mitteldruck .....	45
5.2.2.2	Energieumsetzung .....	45
5.2.3	Postprocessing – Regelgrößen .....	47
5.3	Potentiale des Regelkonzeptes .....	51
5.3.1	Verbrennungsstabilität und Klopfkennung .....	51
5.3.2	Gemischabhängige Bestpunktregelung .....	52
5.3.3	Emissionsoptimierter Betrieb .....	53
5.3.4	Konzeptvergleich .....	54
6	Experimentelle Untersuchungen am Einzylinder-Forschungsmotor .....	57
6.1	Vergleich verschiedener Drucksensoren .....	57
6.1.1	Druckmessung .....	58
6.1.2	Einfluss auf den Heizverlauf .....	62
6.2	Demonstratorbetrieb für die druckbasierte Motorregelung .....	64
6.2.1	Grundlegende Regelfunktion .....	64
6.2.2	Einfluss Mischgas .....	66
6.2.3	Einfluss Brennverfahren .....	67
7	Erweiterter Berechnungsansatz .....	69
7.1	Gesamtübersicht .....	69
7.2	Vorausberechnungen .....	71
7.2.1	Fixe Kennwerte .....	71
7.2.2	Berechnung des Volumenverlaufs und Volumengradienten .....	71
7.2.3	Training der neuronalen Netze .....	72
7.2.4	Berechnung der Flammenfrontfläche .....	75
7.3	Zylinderdruck und Druckkorrektur .....	77
7.4	Energieumsatz .....	78
7.5	Mitteldruck .....	80
7.6	Füllung .....	80
7.7	Zonenaufteilung von Volumen und Massen .....	81
7.8	Bestimmung der Temperaturdifferenz und des Temperaturverlaufs .....	83
7.8.1	Massenmitteltemperatur .....	84
7.8.2	Temperaturdifferenz (ehemals A-Wert) .....	85
7.8.3	Übergangsfunktion .....	87
7.8.4	Temperaturverläufe .....	88
7.9	Gleichgewichtsrechnung .....	89
7.10	NO-Berechnung .....	92
7.11	Bewertung der Rechenzeit – Echtzeitfähigkeit .....	93

8	Bewertung des Modells .....	96
8.1	Vergleich zu einem vollständigen thermodynamischen Ansatz .....	96
8.1.1	Gesamtübersicht der Messdatenbasis mit vollständigem Ansatz .....	96
8.1.2	Vergleich von thermodynamischen Kenngrößen beider Ansätze.....	97
8.1.2.1	Eckdaten der Energieumsetzung .....	97
8.1.2.2	Eckdaten der thermodynamischen Größen.....	98
8.2	Validierung anhand der eingefahrenen Messdatenbasis.....	99
8.2.1	Gesamtübersicht der Messdatenbasis mit neuem Ansatz .....	99
8.2.2	Variation des Zündzeitpunktes .....	101
8.2.3	Variation des Verbrennungsluftverhältnisses.....	102
8.2.4	Variation der Last .....	103
8.2.5	Variation der Brenngaszusammensetzung .....	104
8.3	Validierung innerhalb des Demonstrator-Betriebs .....	105
9	Zusammenfassung und Ausblick .....	107
10	Literaturverzeichnis.....	111
	Formelzeichen und Abkürzungen.....	117
	Anhang .....	123
	Anhang - Abbildungsverzeichnis .....	123
	Anhang - Tabellenverzeichnis .....	127
	Anhang - Messtechnik.....	128
	Anhang - Gleichgewicht .....	132
	Anhang - chemische Reaktionskonstanten I.....	134
	Anhang – chemische Reaktionskonstanten II .....	135