



Hrsg. Prof. Dr.-Ing. M. Böhle

SAM - Fortschrittsberichte

Band 16

Paul Lyttek

**Experimentelle Untersuchung
von Abgasturboladerturbinen
unter stationärer und
pulsierender Zuströmung**

Experimentelle Untersuchung von Abgasturboladerturbinen unter stationärer und pulsierender Zuströmung

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor - Ingenieur (Dr. - Ing.)
genehmigte
Dissertation

von
Herrn
Dipl.-Ing. Paul Mathias Lyttek
geb. in Nikolai

2019

Tag der mündlichen Prüfung:	12.06.2019
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle Prof. Dr.-Ing. Friedrich-Karl Benra

SAM-Fortschrittsberichte

Band 16

Paul Lyttek

**Experimentelle Untersuchung von
Abgasturboladerturbinen unter stationärer
und pulsierender Zuströmung**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Düren 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6957-0

ISSN 2191-8031

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen (SAM) der Technischen Universität Kaiserslautern.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Böhle, dem Leiter des Lehrstuhls SAM, für die Möglichkeit diese Arbeit anzufertigen und seine langjährige Unterstützung und Betreuung während meiner Zeit am Lehrstuhl.

Ebenfalls danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Benra für seine Tätigkeit als Berichterstatter und Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Seewig für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Mein Dank gilt auch Herrn Dr.-Ing. H. Roclawski, der mich durch sein Engagement in allen Projektphasen tatkräftig unterstützt und mir in zahllosen fachlichen Diskussionen stets neue Denkanstöße geliefert hat, die maßgeblich zur Anfertigung dieser Arbeit beigetragen haben.

Gleichfalls danke ich Herrn Dr.-Ing. M. Gugau, BorgWarner Turbo Systems Engineering GmbH, für seine langjährige fachliche Begleitung und die technische Unterstützung, ohne die diese Forschungsarbeit nicht möglich gewesen wäre.

Meinen Kollegen am Lehrstuhl SAM danke ich für die gelebte Kollegialität und den hervorragenden Teamgeist. Auch dies trägt entschieden dazu bei, dass ich die Zeit am Lehrstuhl SAM in sehr guter Erinnerung behalten werde.

Weiterhin danke ich allen studentischen Hilfskräften sowie Diplom- und Studienarbeitern, die durch ihren Einsatz einen wertvollen Beitrag zum Gelingen der Arbeit geleistet haben.

Ganz besonders danke ich auch meinen Eltern für ihre Unterstützung auf meinem Weg und ihr immerwährendes Vertrauen.

Nicht zuletzt gilt mein besonderer Dank meiner Frau Elena, die immer vollstes Verständnis gezeigt hat und mir bis zuletzt den Rücken freihält. Ohne ihre Unterstützung wäre die Fertigstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Kaiserslautern, im Juni 2019

für Marilena

Inhaltsverzeichnis

	Abbildungsverzeichnis	v
	Tabellenverzeichnis	xiii
	Abstract	xv
	Kurzfassung.....	xvii
1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung.....	2
1.2	Stand der Technik und Forschung	7
1.2.1	Experimentelle Untersuchungen.....	7
1.2.2	Numerische Untersuchungen	12
1.2.3	Zusammenfassung	14
1.3	Allgemeine Zielsetzung und Methodik	15
2	Grundlagen der Abgasturboaufladung	19
2.1	Thermodynamik der einstufigen Abgasturboaufladung.....	22
2.1.1	Radialverdichter	22
2.1.2	Radialturbine	24
2.2	Charakteristische Kennfelder und Kenngrößen	28
2.2.1	Verdichterkennfeld	29
2.2.2	Turbinenkennfeld	31
2.3	Besonderheiten der instationären Turbinenbeaufschlagung	35
2.3.1	Theoretische Betrachtung des instationären Turbinenbetriebs..	35
2.3.2	Berechnung der instationären Turbinenkenngrößen.....	40
3	Experimentelle Versuchseinrichtung.....	45
3.1	Modularer Prüfstands Aufbau.....	46
3.1.1	Kennfeldmessung unter Standardbedingungen	
	SKM - Modul A	48
3.1.2	Kennfeldmessung unter erweiterten Bedingungen	
	EKM - Modul B	49
3.1.3	Kennfeldmessung unter pulsierender Zuströmung	
	PKM - Modul C	51
3.2	Implementierung eines E-Motors als Turbinenbremse	52
3.3	Erzeugung motorähnlicher Pulsationen.....	55

4	Messtechnik und Datenverarbeitung	63
4.1	Messebenen und Sensorik	63
4.1.1	Messung zeitunabhängiger Prozessgrößen	64
4.1.2	Messung zeitabhängiger Prozessgrößen	68
4.1.3	Unsicherheitsbetrachtung und Kalibrierung	74
4.2	Messsystem und Datenprocessing	76
4.3	Auswerteroutine	78
4.3.1	Modellierung der Systemverluste	78
4.3.1.1	Verluste der Kennfeldmessung unter Standardbedingungen SKM	78
4.3.1.2	Verluste der Kennfeldmessung unter erweiterten Bedingungen EKM	79
4.3.1.3	Verluste der Kennfeldmessung unter pulsierender Zuströmung PKM	87
4.3.2	Berücksichtigung des Messebenenversatzes	89
4.3.2.1	Allgemeine Korrekturmöglichkeiten des Phasenverzugs	90
4.3.2.2	Beispiele der Druck- und Massenstromphasenkorrektur	92
4.3.2.3	Einschränkungen messtechnischer Untersuchungen	96
4.3.2.4	Sensitivitätsanalyse zur Synchronisation der Leistungsdaten	97
4.3.2.5	Gewählter Korrektur- und Datensynchronisierungsansatz	100
4.3.3	Auswertung am Beispiel der Kennfeldmessung unter pulsierender Zuströmung PKM	101
4.3.3.1	Druck, Turbinendruckverhältnis und Temperatur	101
4.3.3.2	Strömungsgeschwindigkeit	104
4.3.3.3	Massenstrom	106
4.3.3.4	Turbinenleistung und Turbinendrehmoment	108
4.3.3.5	Durchsatzkennwert	110
4.3.3.6	Enthalpie und Turbinenwirkungsgrad	111
4.3.4	Berechnung energetischer Mittelwerte	114
5	Experimentelle Untersuchungen	117
5.1	Definition der Messreihen	117
5.1.1	Vergleich SKM / EKM – Teil A	117
5.1.2	Vergleich SKM / EKM / PKM – Teil B	118
5.2	Ergebnisse der Kennfeldmessung unter erweiterten Bedingungen EKM	122
5.2.1	Auswertung und Vergleich SKM / EKM	123

5.2.2	Zusammenfassung der Kennfeldmessung unter erweiterten Bedingungen EKM.....	133
5.3	Ergebnisse der Kennfeldmessung unter pulsierender Zuströmung PKM	134
5.3.1	Teil 1 – Messung B0 bei 11, 22 und 33 Hz.....	135
5.3.2	Teil 2 – Messung B0, B1, B2 und B3 bei 22 Hz	146
5.3.3	Zusammenfassung der Kennfeldmessung unter pulsierender Zuströmung PKM	151
6	Ergebnisdiskussion.....	153
6.1	Definition der Mittelwertabweichungen	154
6.2	Auswertung der Mittelwertabweichungen.....	156
6.2.1	Vorbetrachtung - Vergleich der arithmetischen und energetischen Mittelwertabweichungen	156
6.2.2	Pulsationskennziffern der untersuchten Betriebspunkte	159
6.2.3	Vergleich der Mittelwertabweichungen unter energieäquivalenter Zuströmung	160
6.2.3.1	Abweichungen im Turbinendruckverhältnis.....	160
6.2.3.2	Abweichungen im Durchsatzkennwert	162
6.2.3.3	Abweichungen im Turbinenwirkungsgrad.....	164
6.2.3.4	Abweichungen in der Schnellaufzahl.....	165
6.3	Zusammenfassung der Mittelwertabweichungen	167
7	Zusammenfassung und Ausblick	169
	Anhang A1 – Direktvergleich SKM / EKM.....	175
	Anhang A2 – Verdichterseitige Kennfelder	181
	Anhang B1 – Direktvergleich EKM / PKM	182
	Anhang B2 – Direktvergleich SKM / EKM.....	195
	Anhang B3 – Verdichterseitige Kennfelder	197
	Anhang C1 – Direktvergleich EKM / PKM	198
	Anhang C2 – Direktvergleich SKM / EKM.....	217
	Anhang C3 – Verdichterseitige Kennfelder	220
	Literaturverzeichnis.....	221
	Formelzeichen und Abkürzungen	229
	Betreute Arbeiten.....	233
	Lebenslauf	235
