

Physikalische Modelle und Skalierungsmethoden zur effizienteren Applikation von Turboladern

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

genehmigte

D I S S E R T A T I O N

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Mehdi Nakhjiri

aus Langrud

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Heinz-Peter Schiffer
Tag der Einreichung:	06.05.2014
Tag der mündlichen Prüfung:	24.06.2014

Darmstadt 2014

D 17

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Band 8

Mehdi Nakhjiri

**Physikalische Modelle und Skalierungsmethoden
zur effizienteren Applikation von Turboladern**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2015

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3754-8

ISSN 2194-9565

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

Vorwort des Herausgebers

Kontext

Die Kohlendioxidemissionen von Personenkraftfahrzeugen sollen im Mittel bis 2020 auf 95 g/km gesenkt werden. Da der Wirkungsgrad der motorischen Verbrennung monoton mit der volumenspezifischen Leistung steigt, gelingt dies am wirkungsvollsten durch Hubraumverkleinerung bei gleichzeitiger Erhöhung des Luftdruckes, d.h. durch Aufladung. Es ist zu erwarten, dass in den nächsten Jahren praktisch jeder Motor aufgeladen und die Zylinderanzahl reduziert sein wird. Dabei konkurriert die Aufladung durch Turbolader mit anderen Aufladekonzepten. Diese sind elektromotorisch angetriebene Verdichter (Turbo- oder Verdrängermaschine). Einfache, rein passive Resonanzaufladungen werden heute weniger verfolgt. Der Nachteil von elektromotorisch angetriebenen Verdichtern ist u.a. die heute noch vorhandene Limitierung durch das Bordnetz. Neben der Regelung der Einspritzmenge wird das Betriebsverhalten des turboaufgeladenen Motors durch das Stellen von Luft- und Abgasventilen geregelt. Die hierfür notwendigen Linearaktuatoren sind zumeist robuste, pneumatische Steller.

Der heutige Verbrennungsmotor ist ein herausragend positives Beispiel für die Optimierung und „mechatronische Veredelung“ eines Systems, das um das Jahr 1985 als ausgereift galt. Die vergangenen 30 Jahre haben demgegenüber eine rasante Systemverbesserung, insbesondere durch den konsequenten Nutzen der Mechatronik, gesehen. Es ist aus meiner Sicht abzusehen, dass in den kommenden Jahren die im Verbrennungsmotor bereits gemachte Entwicklung auch auf andere Bereiche wie Energie- und Wasserversorgung sowie Klimatisierung übertragen werden.

Fahrzeuge sind heute derart entwickelt, dass bis in der Größenordnung 10^5 Parameter pro Fahrzeug im Applikationsprozess bedatet werden müssen. Traditionell geschieht dies durch Versuche am Motorprüfstand. Verständlicherweise ist dieses Vorgehen zeit- und kostenintensiv, so dass der Wunsch entsteht, den Applikationsprozess mittels „Hardware in the Loop“-Verfahren zu beschleunigen. Dabei ist das Steuergerät als Hard- und Software vorhanden, der Verbrennungsmotor inkl. Aufladung ist jedoch virtuell in einer Berechnungsumgebung abgebildet.

Dabei ist das Gesamtsystem nur so gut wie die Beschreibung der Komponenten. Beim Turbolader liegen vom Turboladerhersteller gemessene Kennfelder für den Applikationsprozess zur Verfügung.

Forschungsfrage

Aus dem Kontext leiten sich die Forschungsfragen für die wissenschaftliche Arbeit von Herrn Nakhjiri ab:

Lässt sich ein physikalisches Modell eines Turboladers angeben, welches mit möglichst wenigen geometrischen Parametern das Betriebsverhalten mit ausreichender Genauigkeit beschreibt?

Um das Ergebnis vorwegzunehmen: Herrn Nakhjiri gelingt es, ein physikalisches Modell aufzustellen, dass die obige Frage hinsichtlich Druckänderung auf der Verdichter- und Turbinenseite sehr gut beschreibt. Im Vergleich mit den vom Turboladerhersteller angegebenen Wirkungsgraden und von Herrn Nakhjiri simulierten Wirkungsgraden, zeigt sich jedoch eine große Abweichung. Nun ist die Frage: Ist das Modell oder die Messung fehlerbehaftet? Hier ist letzteres richtig. Traditionell gibt der Turboladerhersteller einen Wirkungsgrad an, der unter nicht-adiabaten Bedingungen gemessen wird. Damit ist dieser Wirkungsgrad als scheinbarer Wirkungsgrad zu bezeichnen. Daraus folgt unmittelbar die zweite Forschungsfrage für Herrn Nakhjiri:

Wie lässt sich auf einfachem Wege der scheinbare Wirkungsgrad zum adiabaten Wirkungsgrad korrigieren?

Methoden und Ergebnisse

Herrn Nakhjiri gelingt es überzeugend, ein physikalisches Modell sowohl für die Turbine als auch den Verdichter aufzustellen. Beide Teilmodelle werden durch jeweils ca. 20 geometrische Parameter beschrieben, die durch eine geometrische Vermessung des Turboladers gewonnen werden.

Das strömungsmechanische Modell beinhaltet den ersten Hauptsatz, Drallsatz sowie eine Vielzahl von bekannten Verlustmodellen. Auf der Verdichter- und Turbinenseite werden die Druckverhältnisse von drei unterschiedlichen Turboladern erstaunlich gut wiedergegeben. Im zweiten Teil der Arbeit gelingt Herrn Nakhjiri ein wichtiger Beitrag zur Begriffsbildung bei Turboladern. Wie bereits oben beschrieben, ist der vom Turboladerhersteller angegebene Wirkungsgrad als scheinbarer Wirkungsgrad zu bezeichnen, da er nicht unter adiabaten Bedingungen gemessen wird und damit eher zur Verwirrung als zur Arbeitserleichterung im Applikationsprozess beiträgt.

Herr Nakhjiri misst in seiner Arbeit den Wärmestrom zwischen Turbine und Verdichter. Bei Kenntnis des Wärmestroms gelingt es, den scheinbaren Wirkungsgrad zum adiabaten Wirkungsgrad zu korrigieren. Dieses Vorgehen ist experimentell aufwändig und im Applikationsprozess nicht durchführbar. Daher entwickelt Herr Nakhjiri zwei alternative Methoden zur Korrektur des

scheinbaren Wirkungsgrades. Von besonderer Eleganz ist die Verschiebung der gesamten Wirkungsgradkurve. Herr Nakhjiri argumentiert, dass alle Wirkungsgradoptima auf einer Geraden in der Wirkungsgrad-Durchflusszahl-Ebene zu finden sein müssen. Scharparameter ist die Maschinendrehzahl oder dimensionslos die Mach-Zahl. Das Verschieben in der Wirkungsgrad-Durchflusszahl-Ebene nennt Herr Nakhjiri sinnigerweise Skalierung, da dadurch der Mach-Zahl-Einfluss richtig wiedergegeben wird. Die Verluste in einer Maschine skalieren mit dem Quadrat der Mach-Zahl, wie eine bisher unveröffentlichte Arbeit des Instituts zu Verlusten an geraden Schaufelgittern zeigt, so dass der Skalierungsansatz von Herrn Nakhjiri auch axiomatisch begründet ist.

Neben diesen beiden Hauptsträngen der Arbeit adressiert Herr Nakhjiri noch den Einfluss der Krümmenströmung bei zweistufiger Aufladung. Darüber hinaus spricht er sehr kurz einen erarbeiteten neuen Ansatz an, der die periodische Beaufschlagung gerade bei geringer Zylinderanzahl berücksichtigt.

Gemeinsam mit einer analytischen Vorhersage der Verdichterpumpengrenze sind damit drei Aspekte für eine weiterführende Forschung genannt. Doch bereits mit dem jetzt Erreichten, kann der Applikationsprozess zielgerichteter und damit schneller und kostengünstiger gestaltet werden.

Peter Pelz
Darmstadt, am 08.06.2015

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fluidsystemtechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt dem Institutsleiter und zugleich meinem Doktorvater, Herrn Professor Peter Pelz, für die fachliche Betreuung und die zahlreichen Anregungen. Dazu gehört auch die durch ihn initiierte, sehr interessante und herausfordernde Fragestellung meiner Doktorarbeit, aus der mehrere internationale und nationale Veröffentlichungen hervorgegangen sind. Rückblickend bleibt mir nur zu sagen: Ich habe viel von Ihnen gelernt!

Herrn Professor H.-P. Schiffer, Leiter des Fachgebiets Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe, danke ich herzlich für die Übernahme des Koreferats. Hervorheben möchte ich seine Unterstützung bei der Beschaffung wichtiger Messdaten für meine Arbeit.

Meinen Dank richte ich auch an die IAV GmbH für die Finanzierung des Forschungsvorhabens, insbesondere an die Herren Schultalbers, Horn und Frase für das entgegengebrachte Vertrauen. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dr. Däubler für die kontinuierlichen und inspirierenden Fachgespräche bedanken.

Meinen Kollegen am Institut danke ich nicht nur für den stetigen fachlichen Austausch, sondern auch für das angenehme Arbeitsklima über die Jahre hinweg. Herrn Matschok gilt mein Dank für seine besondere Hilfsbereitschaft und Unterstützung. Danken möchte ich auch meinen Studenten und HiWis für ihre tolle Mitarbeit, allen voran Thibaut.

Meinen Eltern danke ich dafür, dass sie mir diesen Werdegang ermöglicht haben. Meiner Lebensgefährtin, Anna-Lena Schultz, danke ich für ihre Geduld und ihren Rückhalt.

Mehdi Nakhjiri
Darmstadt, im Frühjahr 2014

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Vorgehensweise	4
2	Literaturüberblick	7
3	Physikalische Modellierung	11
3.1	Modellierungsansatz	12
3.2	Grundlagengleichungen	15
3.3	Dimensionslose Kennzahlen	20
3.4	Verdichter	25
3.4.1	Verluste	25
3.4.2	Parasitäre Effekte	30
3.4.3	Simulationsergebnisse	32
3.4.4	Dimensionslose Kennlinien	38
3.5	Turbine	43
3.5.1	Verluste	43
3.5.2	Simulationsergebnisse	45
4	Experimentelle Untersuchung der Wärmeströme	49
4.1	Scheinbarer Verdichterwirkungsgrad	53
4.1.1	Erste Methode: Skalierung	58
4.1.2	Zweite Methode: Adiabate Leistungszahl über Durchflusszahl	61
4.1.3	Dritte Methode: Wärmemodell	63
4.2	Scheinbarer Turbinenwirkungsgrad	65
4.3	Wärmemodell	70
4.3.1	Wärmewiderstände im Verdichter	73
4.3.2	Wärmewiderstände in der Turbine	75
4.3.3	Wärmewiderstände im Lagergehäuse	75

4.3.4	Berechnung der Wärmeströme	77
4.3.5	Weitere Erkenntnisse mit dem Wärmemodell	84
5	Experimentelle Untersuchung am Motorprüfstand	87
5.1	Messkonzept	88
5.1.1	Prüfstands Aufbau	88
5.1.2	Messprogramm	91
5.2	Auswertung	92
5.2.1	Stationäre Messergebnisse	92
5.2.2	Instationäre Messergebnisse	96
6	Zusammenfassung und Ausblick	101
	Literaturverzeichnis	109
A	Messunsicherheit	117
A.1	Messgrößen	118
A.2	Kennfelder	119
B	Mechanischer Wirkungsgrad	120