

Vorwort des Herausgebers

Die Komplexität des verbrennungsmotorischen Antriebes ist seit über 100 Jahren Antrieb für kontinuierliche Aktivitäten im Bereich der Grundlagenforschung sowie der anwendungsorientierten Entwicklung. Die Kombination eines instationären, thermodynamischen Prozesses mit einem chemisch reaktiven und hochturbulenten Gemisch, welches in intensiver Wechselwirkung mit einer Mehrphasenströmung steht, stellt den technologisch anspruchsvollsten Anwendungsfall dar. Gleichzeitig ist das Produkt des Verbrennungsmotors aufgrund seiner vielseitigen Einsetzbarkeit und zahlreicher Produktvorteile für sehr viele Anwendungen annähernd konkurrenzlos. Nun steht der Verbrennungsmotor insbesondere aufgrund der Abgasemissionen im Blickpunkt des öffentlichen Interesses. Vor diesem Hintergrund ist eine weitere und kontinuierliche Verbesserung der Produkteigenschaften des Verbrennungsmotors unabdingbar.

Am Institut für Kolbenmaschinen am Karlsruher Institut für Technologie wird deshalb intensiv an der Weiterentwicklung des Verbrennungsmotors geforscht. Übergeordnetes Ziel dieser Forschungsaktivitäten ist die Konzentration auf drei Entwicklungsschwerpunkte. Zum einen ist die weitere Reduzierung der Emissionen des Verbrennungsmotors, die bereits im Verlauf der letzten beiden Dekaden um circa zwei Größenordnungen reduziert werden konnten aufzuführen. Zum zweiten ist die langfristige Umstellung der Kraftstoffe auf eine nachhaltige Basis Ziel der verbrennungsmotorischen Forschungsaktivitäten. Diese Aktivitäten fokussieren gleichzeitig auf eine weitere Wirkungsgradsteigerung des Verbrennungsmotors. Der dritte Entwicklungsschwerpunkt zielt auf eine Systemverbesserung. Motivation ist beispielsweise eine Kostenreduzierung, Systemvereinfachung oder Robustheitssteigerung von technischen Lösungen. Bei den meisten Fragestellungen wird aus dem Dreiklang aus Grundlagenexperiment, Prüfstandversuch und Simulation eine technische Lösung erarbeitet.

Die Arbeit an diesen Entwicklungsschwerpunkten bestimmt die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten des Instituts. Hierbei ist eine gesunde Mischung aus grundlagenorientierter Forschung und anwendungsorientierter Entwicklungsarbeit der Schlüssel für ein erfolgreiches Wirken. In nationalen als auch internationalen Vorhaben sind wir bestrebt, einen wissenschaftlich wertvollen Beitrag zur erfolgreichen Weiterentwicklung des Verbrennungsmotors beizusteuern. Sowohl Industriekooperationen als auch öffentlich geförderte Forschungsaktivitäten sind hierbei die Grundlage guter universitärer Forschung.

Zur Diskussion der erarbeiteten Ergebnisse und Erkenntnisse dient diese Schriftenreihe, in der die Dissertationen des Instituts für Kolbenmaschinen verfasst sind. In dieser Sammlung sind somit die wesentlichen Ausarbeitungen des Instituts niedergeschrieben. Natürlich wer-

den darüber hinaus auch Publikationen auf Konferenzen und in Fachzeitschriften veröffentlicht. Präsenz in der Fachwelt erarbeiten wir uns zudem durch die Einreichung von Erfindungsmeldungen und dem damit verknüpften Streben nach Patenten. Diese Aktivitäten sind jedoch erst das Resultat von vorgelagerter und erfolgreicher Grundlagenforschung.

Jeder Doktorand am Institut beschäftigt sich mit Fragestellungen von ausgeprägter gesellschaftlicher Relevanz. Insbesondere Nachhaltigkeit und Umweltschutz als Triebfedern des ingenieurwissenschaftlichen Handelns sind die Motivation unserer Aktivität. Gleichzeitig kann er nach Beendigung seiner Promotion mit einer sehr guten Ausbildung in der Industrie oder Forschungslandschaft wichtige Beiträge leisten.

In diesem Exemplar der Schriftenreihe berichtet Herr Kaniut über die Ergebnisse aus umfangreichen Untersuchungen an einem zweistufigen Turboaufladesystem in Reihe mit Zwischenkühlung an einem schweren Nutzfahrzeugmotor. Ziel hierbei war es, den Kraftstoffverbrauch unter Einhaltung der gesetzlichen Emissionsgrenzwerte wesentlich zu senken. Durch einen neuartigen Entwicklungsansatz, der mit Hilfe verschiedener Werkzeuge, wie z.B. parametrisierten CAD-Modelle und maschinellem Lernen arbeitet, werden die beiden Verdichter- und Turbinenstufen ausgelegt. Das daraus entstehende Gesamtsystem wird durch umfangreiche experimentelle Untersuchungen an einem Vollmotorenprüfstand besonders in Hinblick auf die Druckaufteilung und den Aufladewirkungsgrad analysiert und mit berechneten Grenzwerten verglichen. Als Teil dieser Untersuchungen wird der Motor mit unterschiedlichen Einlassnockenwellen ausgestattet um den Einfluss eines frühen und späten Einlassventil schließen in Kombination mit der Zweistufigkeit genauer zu ermitteln. Die resultierenden Ergebnisse werden in umfassender Weise diskutiert und ermöglichen ein besseres Verständnis für die Neuauslegung von zweistufigen Turboaufladesystemen mit Zwischenkühlung für schwere Nutzfahrzeugmotoren und damit die Entwicklung von Motoren mit deutlich reduziertem Kraftstoffverbrauch.

Kurzfassung

Die heutige Entwicklung von schweren Nutzfahrzeugen liegt im Spannungsdreieck von Kundenanforderungen, Einhaltung legislativer Vorschriften und gesellschaftlicher Akzeptanz. Gerade die Akzeptanz ist im Laufe der letzten Jahre immer mehr in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt, denn der Verkehrssektor ist in der EU für ca. 23 % der CO₂-Emissionen verantwortlich [IW17]. Ein Hauptentwicklungsschwerpunkt liegt hier auf der Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs, weil dies neben den Betriebskosten auch den CO₂-Ausstoß mindert und somit der Umwelt zugutekommt.

Eine Möglichkeit stellt hierbei die zweistufige Turboaufladung mit Zwischenkühlung dar. In der vorliegenden Publikation wird untersucht, wie ein solches Turboladersystem ausgelegt werden kann und dabei gleichzeitig den Luftbedarf des Motors bei bestmöglichem Wirkungsgrad deckt. Die Auslegung erfolgt mit digitalen Methoden. Zusätzlich werden die Eigenschaften, die zu einem hohen Gesamtaufładewirkungsgrad führen, experimentell nachgewiesen. Dazu gehören die Bereitstellung hoher Ladedrücke, der Einfluss des Zwischenkühlers, eine optimale relative Druckaufteilung zwischen den Stufen und der Einsatz des Miller-Verfahrens. Die daraus resultierende Verbrauchsreduzierung wird an einem Dieselmotor für Nutzfahrzeuge (12,8 l) der Daimler Truck AG untersucht.

In einem ersten Schritt wird das Lastkollektiv eines für Nutzfahrzeuge relevanten Fahrzyklus analysiert. Das Ergebnis ist die Identifizierung von zwei Verbrauchsschwerpunkten, die als Auslegungspunkte bezeichnet werden: einer im niedrig- und einer im hochlastigen Bereich des Motorkennfeldes. Durch Referenzmessungen und 1D-Simulationen wird anschließend der Luftbedarf in diesen Punkten ermittelt. Darauffolgend kommt ein im Rahmen dieser Arbeit entwickelter Algorithmus zum Einsatz, der die einzelnen Randbedingungen und Zielgrößen für Verdichter und Turbinen in den jeweiligen Auslegungspunkten berechnet. In einem zweiten Schritt werden mit Hilfe parametrisierter CAD-Modelle sowohl Verdichter als auch Turbinen erstellt und durch Skalierung und anschließende Parametervariation insgesamt 715 verschiedene Bauteilvarianten erzeugt. Mit den zuvor ermittelten Randbedingungen werden dann die einzelnen Komponenten per CFD-Simulation bewertet und aus den gewonnenen Simulationsergebnissen Ersatzmodelle erzeugt, mit denen eine weitere Optimierung erfolgt. Aus diesem Ansatz ergeben sich unterschiedliche Varianten, die zu einem Baukastensystem führen und eine Leistungsanpassung des Systems ermöglichen.

Die Bewertung der Varianten erfolgt am Vollmotorenprüfstand. Hierbei werden sowohl Teillastkurven als auch Motorkennfelder gemessen, während die Auslegungspunkte selbst genau validiert werden. Die Validierung zeigt für den niedriglastigen Auslegungspunkt eine gute Übereinstimmung, während der hochlastige Punkt eine größere Abweichung aufzeigt. Des Weiteren stellt sich heraus, dass für eine effiziente Absenkung des Kraftstoffverbrauches und somit für die Maximierung des Aufladewirkungsgrades die relative Druckaufteilung einen betriebspunktabhängigen Optimalwert einnehmen muss. Zusätzlich wird ein frühes Einlassventilschließen, Millerprozess genannt, und spätes Einlassventilschließen durch das Tauschen unterschiedlicher Nockenwellen bewertet. Es zeigt sich, dass bei hohen Gesamtdruckverhältnissen der Einsatz dieses Verfahrens besonders effektiv ist. Abschließend

erfolgt eine Bewertung der Zwischenkühlung. Am Prüfstand konnte der Kraftstoffverbrauch des Motors durch den Einsatz dieser Technologien signifikant gesenkt werden.

Alle gewonnenen Ergebnisse tragen zu verschiedenen neuen Erkenntnissen bei der Entwicklung eines zweistufigen Turboaufladesystems bei und sind in einer neuen Auslegungsmethodik zusammengefasst. Besonders hervorzuheben ist hierbei der ermittelte Zusammenhang von Komponentenwirkungsgrad, Zwischenkühlung, Gesamtdruckverhältnis und relativer Druckaufteilung in einer Gleichung.

Abstract

Today's development of heavy-duty vehicles lies in a triangle of customer requirements, compliance with legislative regulations and social acceptance. The last point in particular has come more and more important for the public over the past few years. The transport sector is thereby responsible for about 23 % of the CO₂ emissions in the EU [IW17]. The main focus of development is therefore on enhancing fuel consumption, because in addition to reducing operating costs, it also reduces CO₂ emissions.

One possibility to reach this goal is the usage of a dual stage turbocharging with interstage cooler. This publication examines how a dual stage turbocharger system can be designed and fulfills the engine's air requirement with the best possible efficiency. The design process is a digital one. In addition, the properties leading to a high overall charging efficiency are proven experimentally. This includes the provision of high boost pressure, the influence of the interstage cooler, an optimal pressure distribution and the usage of the Miller process. The resulting reduction in fuel consumption is examined on a 12.8l heavy-duty diesel engine from the Daimler Truck AG.

In a first step, the load spectrum of a driving cycle is analyzed. The result is the identification of two operating points with a high share in fuel consumption, which are referred to as design points, one in the low- and one in the high-load area of the engine map. The air requirements in these points are then determined using reference engine measurements and 1D simulations. By means of an algorithm developed within the scope of this work, the individual boundary conditions and target variables for the two compressors and turbines are calculated in each design point.

In a second step, the individual components, both compressors and turbines are created with help of parameterized CAD models. By scaling and subsequent parameter variation a total of 715 different geometry variants are generated. With the previously determined boundary conditions, each individual component is evaluated using CFD simulation and with the obtained simulation results substitute models are generated on which a further optimization takes place. This approach results in different "optimal variants", which lead to a modular system where the power output of the system can be adjusted.

The evaluation of the modular system takes place on the full engine test bench. Here part load curves as well as full engine maps are generated while the design points are getting evaluated in a detailed way. The validation shows a good agreement for the low-load design point, while there are larger deviations for the high-load point. Furthermore it turns out

Roadmap

In dieser Arbeit werden eine neuartige Auslegungsmethodik für zweistufige Turboladersysteme und die entsprechenden Validierungsergebnisse vorgestellt. Das Trägerprojekt dieser Doktorarbeit hat den Namen ‚HDEP-Grenzpotenzial‘, bei dem es sich um ein Forschungsprojekt der Daimler Truck AG handelt. Ziel ist es, einen Motor mit bestmöglichem Kraftstoffverbrauch unter Einhaltung der Abgasnormen für das Supertruck-2-Projekt bereitzustellen. Während im Projekt eine Vielzahl von Technologien wie Downspeeding, spezielle Versuchskolben und neuartige Einspritzsysteme zum Einsatz kommen, liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit in der zweistufigen Turboaufladung.

Im Kapitel 1 (Einleitung) wird auf den Rahmen, die konkrete Zielsetzung und den aktuellen Stand der Technik eingegangen. Hierzu erfolgt eine Literaturrecherche zu bisherigen Auslegungsmethoden für Turbolader und im Speziellen zur Auslegung zweistufiger Systeme. Auch wird das Supertruck-2-Projekt kurz vorgestellt.

Die technischen Grundlagen zum weiteren Verständnis werden in Kapitel 2 (Grundlagen) vermittelt. Hier stehen die thermodynamischen Grundlagen eines Motors im Vordergrund. Des Weiteren werden die wesentlichen Aspekte der Turboaufladung, der Optimierung und des maschinellen Lernens vermittelt, die im Rahmen der Arbeit angewendet werden. Zudem wird der Versuchsträger, ein OM471-Motor der Daimler Truck AG, präsentiert.

Kapitel 3 (Zweistufige Turboladerentwicklung) umfasst die im Rahmen dieser Arbeit neu verwendete Auslegungsmethodik. Es werden die einzelnen Schritte dieser Vorgehensweise und die besonderen Eigenschaften von zweistufigen Systemen dargelegt. Auch wird hier der Aufladewirkungsgrad für zweistufige Turboladersysteme mit Zwischenkühlung hergeleitet. Des Weiteren werden die Randbedingungen und die Zielgrößen ermittelt, die für Auslegung notwendig sind. Dabei wird zwischen motorischen und Turbolader-spezifischen Zielgrößen unterschieden, wobei Letztere durch den Einsatz eines eigens programmierten Berechnungsverfahrens gewonnen werden. Die Geometrieerzeugung erfolgt mit Hilfe eines auf Algorithmen basierenden Auslegeverfahrens. Dieser Ansatz beinhaltet parametrisierte CAD-Modelle, CFD-Simulationen sowie die Anwendung statistischer Versuchsplanung und Optimierung. Eine besondere Bedeutung kommt den Parametern zu, die für die Erreichung der gewünschten Zielgrößen ausgewählt werden.

Das Kapitel 4 (Dedicated 2 Stage) beschreibt die Realisierung der zuvor beschriebenen Methodik. Dabei wird auf die Berechnungsergebnisse und Komponentenvarianten des Systems eingegangen, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind. Das Ergebnis ist ein Baukastensatz, der als ‚Dedicated 2 Stage‘ bezeichnet wird.

Kapitel 5 (Messergebnisse) befasst sich mit den gewonnenen Messergebnissen des Vollmotorenprüfstands. Hierbei erfolgt eine Validierung der Zielgrößen in den Auslegungspunkten.

Zudem werden der Einfluss der relativen Druckaufteilung, die Kombination der Zweistufigkeit mit dem Millerzyklus (auch Millerprozess oder Millerverfahren genannt) sowie die Zwischenkühlung experimentell ermittelt.

In Kapitel 6 (Analyse) werden die Ergebnisse analysiert und Schlussfolgerungen gezogen; Kapitel 7 beschließt die Arbeit in Form einer Zusammenfassung.

Verwendung von Wälzlagern, die Bearbeitung der Zylinderlaufflächen und der Einsatz reib-reduzierter Kolben. Weitere Optimierungsmaßnahmen sind die Anwendung neuer Einspritzverfahren, die Absenkung der Wandwärmeverluste durch Beschichtungen und die Leistungsreduzierung von Hilfsaggregaten.

Zuletzt kann die Motoreffizienz durch eine Verbesserung des Aufladesystems erreicht werden. Für den Daimler-Versuchsmotor soll hier ein zweistufiges Aufladesystem mit Zwischenkühlung zum Einsatz kommen.

1.3 Zielsetzung

Die Zielsetzung dieser Dissertation ist die Entwicklung eines zweistufigen Turboladersystems für schwere Nutzfahrzeuganwendungen. Dabei kommt eine neue Auslegungsmethodik zum Einsatz, mit der mehrere Prototypen (Varianten) erstellt werden. Bei der Auslegung dreht sich der Fokus um die Maximierung des Gesamtaufładewirkungsgrades (auch nur Aufładewirkungsgrad genannt), um einen möglichst niedrigen Kraftstoffverbrauch zu erzielen. Die Prototypen werden anschließend am Vollmotorenprüfstand validiert und die Besonderheiten der zweistufigen Aufładung genauer quantifiziert. Der Schwerpunkt liegt auf den folgenden vier Fragen, die sich ausschließlich auf das Aufladesystem beschränken, jedoch nicht auf anderweitige motorische Vorgänge. Die zu untersuchenden Fragestellungen sind:

1. Welche Größen beeinflussen den Aufładewirkungsgrad eines zweistufigen Turboladersystems in Reihenschaltung mit Zwischenkühlung?
Während bei einstufigen Systemen der Aufładewirkungsgrad über eine Multiplikation von Verdichter- und Turbinenwirkungsgrad ermittelt werden kann, ist dies bei zweistufigen Systemen nicht möglich. Über eine Energiebilanz kann der Wert zwar ermittelt werden, es fehlt jedoch der Bezug zu den einzelnen Komponenten. Hinzu kommt die Frage, wie in diesem Zusammenhang der Zwischenkühler zu bewerten ist. Aktuell existiert noch keine Berechnungsmethode, weshalb sie in dieser Arbeit analytisch hergeleitet wird.
2. Gibt es eine optimale relative Druckaufteilung?
Zur Bereitstellung des Ladedrucks wird die Luft zuerst über die Niederdruck- und anschließend über die Hochdruckstufe verdichtet. Wie die Aufteilung zwischen den beiden Stufen zu wählen ist, sodass ein möglichst hoher Aufładewirkungsgrad erreicht wird, soll im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden. Wie müssen die beiden Verdichter und Turbinen aufeinander abgestimmt sein?
3. Wie groß ist der Einfluss der Zwischenkühlung in einem zweistufigen System?
Der Zwischenkühler senkt die Temperatur des Luftmassenstromes vor dem Eintritt in den Hochdruckverdichter ab und sorgt damit für eine Abnahme der benötigten

Verdichterleistung. Häufig werden zweistufige Systeme jedoch auch ohne die Implementierung eines Zwischenkühlers umgesetzt. Ein Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Quantifizierung des Einflusses der Zwischenkühlung.

4. Lässt sich ein neuer Entwicklungsansatz hieraus ableiten?

Um den Luftbedarf, die Abgasrückführung (HD-AGR) und das geforderte Druckverhältnis bei gleichzeitiger Maximierung des Aufladewirkungsgrades zu erreichen, wird eine auf Algorithmen basierende Auslegungsmethodik verwendet. Dabei kommen parametrisierte CAD-Modelle von Verdichter und Turbinen, CFD-Berechnungen und Verfahren des maschinellen Lernens zum Einsatz. Für die Ermittlung der einzelnen Zielgrößen wird ein im Rahmen dieser Arbeit neu entwickeltes Berechnungsprogramm eingesetzt und zudem der erste Prototyp eines zweistufigen Systems in Reihenschaltung mit Zwischenkühlung und asymmetrischer Hochdruckturbinen unter Verwendung dieses Ansatzes entwickelt. Die Entwicklungsmethode mit dem Ziel eines maximalen Aufladewirkungsgrades wird hierbei abgeleitet.

1.4 Stand der Technik

Zur zweistufigen Turboaufladung existieren aktuell nur wenige publizierte Forschungsarbeiten, obwohl sie heute in schnelllaufenden Hochleistungsdieselmotoren sowie Mittelschnellläufern vorkommt und in der Vergangenheit in erster Linie zur Leistungssteigerung verwendet wurde. Ladedrücke größer als 4 bar sind nur schwer über ein einstufiges Aufladesystem bei gleichzeitig hohem Wirkungsgrad realisierbar [PZ12]. Zweistufige Systeme hingegen können ohne Probleme Ladedrücke von über 7 bar realisieren. Gleichzeitig ermöglicht die zweistufige Aufladung neben der Implementierung eines Zwischenkühlers die effektive Anwendung des Millerprozesses. Die gesteigerte Komplexität, geschuldet einem zweiten Turbolader und der Verwendung zusätzlicher Technologien, stellt die Entwicklung eines zweistufigen Turboladersystems vor neue Herausforderungen, ermöglicht aber auch mehr Freiheitsgrade bei der Auslegung.

Matching von Turboladersystemen

Während das Matching eines einstufigen Systems gut bekannt ist, ist das Matching bei einem zweistufigen System noch relativ unerforscht. In [L10] werden wichtige Auslegungskriterien für zweistufige Systeme aufgeführt, unter anderem in welchen Bereichen des Verdichterkennfeldes sich das Wirkungsgradmaximum befinden und welches Verhalten die Niederdruckturbinen mit steigender Motorlast am besten für den Motor zeigen sollte. Für die Neuauslegung wäre ein strukturierter Ansatz zu verwenden, wobei einige Entwicklungsschritte bei der Auslegung einstufiger Systeme übernommen werden könnten.

Nach [B05] erfolgt das Turboladermatching in folgenden Schritten:

1. Wahl der Motorbetriebspunkte und Festlegung des benötigten Ladedrucks