

Berichte zur Thermodynamik und Verfahrenstechnik

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing, Prof. Dr.-Ing. Stefan Will

Schriftenreihe Heft 2022-1

ROBERT KERSTEN

Thermodynamische Potentialanalyse einer elektrifizierten Hochaufladung am R4-Ottomotor

**Thermodynamische Potentialanalyse einer
elektrifizierten Hochaufladung am R4-Ottomotor**

**Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg**

**zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.**

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Robert Kersten
aus Dresden

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 30. September 2021

Vorsitzende/r des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Knut Graichen

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing
Prof. Dr.-Ing. Frank Atzler

Berichte zur Thermodynamik und Verfahrenstechnik

Band 1/2022

Robert Kersten

**Thermodynamische Potentialanalyse einer
elektrifizierten Hochaufladung am R4-Ottomotor**

D29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Düren 2022

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.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8409-2

ISSN 2365-3957

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 Dissertation entstand während meiner Tätigkeit in der Abteilung Vorentwicklung und Thermodynamik Ottomotoren der Audi AG in Ingolstadt in Zusammenarbeit mit der Friedrich-Alexander-Universität (FAU) Erlangen-Nürnberg. Die wissenschaftliche Betreuung wurde von Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing, Professur für Technische Thermodynamik der Technischen Fakultät der FAU Erlangen-Nürnberg, übernommen. Ihm gilt mein Dank für die Übernahme des Hauptreferats, die wertvollen Hinweise und wohlwollende Förderung der Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Atzler, Leiter des Lehrstuhls Verbrennungsmotoren und Antriebstechnik am Institut für Automobiltechnik Dresden (IAD) der TU Dresden, danke ich für die Übernahme des Koreferats.

Mein großer Dank gilt dem damaligen Leiter der Vorentwicklung und Thermodynamik Ottomotoren der Audi AG Herrn Dr.-Ing. Rainer Wurms sowie dem damaligen Leiter des Teams Aufladung/ Applikation/ Abgas, Herrn Markus Sonner, die mir die Promotion in der Vorentwicklung Ottomotoren ermöglicht haben. Das große entgegengebrachte Vertrauen, die großzügige Förderung, stetige Unterstützung und hervorragende Betreuung der Arbeit sowie die Bereitstellung der notwendigen Ressourcen haben entscheidend zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Darüber hinaus danke ich den Kollegen der Vorentwicklung Ottomotoren, die mich während meiner Promotion unterstützt und motiviert haben. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Uwe Rosenberger, ohne dessen fachliche Unterstützung, wertvollen Ratschläge, wichtigen Hilfestellungen und konstruktiven Diskussionen wäre der Erfolg der Arbeit nicht möglich gewesen. Mit seinem unermüdlichen und beharrlichen Einsatz lenkte er meinen Blick stets auf das Wesentliche.

Sehr herzlicher Dank gilt meinen Eltern für die fortwährende Unterstützung in meinem Denken und Handeln, den absoluten Rückhalt in allen Lebensphasen und der anhaltenden Förderung.

Der größte Dank gilt meiner Frau Anja. Durch ihre hohe Opferbereitschaft, stetige Unterstützung und ausdauernde Motivation ist das Promotionsvorhaben überhaupt nur möglich gewesen.

Ingolstadt, den 08. März 2021

Robert Kersten

Kurzfassung

Die ausweitende Regulierung der zulässigen CO₂-Emissionen im Individualverkehr für eine nachhaltige Mobilität in Verbindung mit dem anhaltenden Absatzzuwachs im SUV-Fahrzeugsegment stellt eine große Herausforderung an die Zulassung zukünftiger motorischer Antriebskonzepte dar. Für die notwendige Verbrauchsreduzierung bei gleichzeitigem Ausbau souveräner Fahrleistungen gewinnt die Aufladung des Verbrennungsmotors weiter an Bedeutung.

Die zunehmende Elektrifizierung der Antriebsstränge bietet hierbei neue vielversprechende Ansätze, insbesondere die Abgasturboaufladung für den Einsatz am Ottomotor weiterzuentwickeln. Vor allem im Bereich niedriger Drehzahlen muss, mit stetig steigenden Aufladegraden, das stationäre und transiente Ladedruckangebot einer bestehenden Abgasturboaufladung für die Sicherstellung eines überzeugenden Fahrverhaltens verstärkt mit Zusatzmaßnahmen unterstützt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wird ein effizientes und performantes Aufladesystem mit maßgeschneiderter Auslegung einer Zusatzmaßnahme für die Umsetzung einer Hochaufladung am Reihenvierzylinder-Ottomotor realisiert. Ein wesentliches Ziel ist die Erreichung der herausragenden Antriebs Eigenschaften eines hubraumstarken, mechanisch aufgeladenen 3.0l-V6-TFSI 245kW mit einem leistungsgleichen, verbrauchsärmeren 2.0l-R4-TFSI (123,5kW/l).

Ausgehend von einem Vergleich motorischer Eigenschaften konventionell aufgeladener Motorkonzepte in Abhängigkeit des Aufladegrads bzw. der Nennleistung (185kW-245kW) sowie deren Einfluss auf das Fahrverhalten im Gesamtfahrzeug, werden zunächst Bewertungskriterien und motorische Zielgrößen herausgearbeitet. Unter Einsatz der numerischen Simulation und dem experimentellen Versuch am Motorprüfstand, werden anschließend potentielle Varianten von Zusatzmaßnahmen mit unterschiedlichen Arten der Leistungsaufnahme und –übertragung auf Basis von 12V sowie 48V vorgestellt, in ihrem Wirkprinzip quantitativ beschrieben und am Zielmotorkonzept 2.0l-R4-TFSI untersucht bzw. im direkten Vergleich bewertet. Dieses methodische Vorgehen ermöglicht eine detaillierte System- und Funktionsanalyse, thermodynamische Potentialanalyse sowie eine vollständige Effizienzbetrachtung der untersuchten Zusatzmaßnahmen durch Bilanzierung der eingesetzten Zusatzleistung in Nutz- und Verlustleistung an ausgewählten Betriebspunkten.

Für die Fahrzeugintegration eines elektrisch angetriebenen Zusatzverdichters (EAV) auf 48V-Basis, als vielversprechendste Zusatzkomponente, in eine bestehende Ansaug- bzw. Hochdruckstrecke eines 2.0l-R4-TFSI mit weltweitem Einsatz müssen eine Vielzahl an Anforderungen berücksichtigt werden. Mit Hilfe einer umfangreichen Sensitivitätsanalyse wird die erreichbare Leistungsfähigkeit der Aufladekomponente in Abhängigkeit von möglichen Ladeluftstrecken aufgezeigt und bewertet. Eine Ableitung entsprechender stationärer und transients Potentiale des ermittelten Zielsystems, eine zweistufige, teilelektrifizierte Abgasturboaufladung unter Einsatz eines 48V-EAV mit optimierter,

doppelter Ladeluftkühlung auf die Längsdynamik erfolgt im Anschluss im Fahrzeug unter kundenrelevanten Fahrsituationen. Das herausgearbeitete Aufladesystem am 2.0l-R4-TFSI 245kW kann hierbei die souveränen Fahrleistungen des 3.0l-V6-TFSI in den sechs untersuchten Bewertungskriterien in einem Bereich von 85% bis 100% relativer Performance erreichen. Damit erzielt das hochaufgeladene Versuchsfahrzeug mit intelligenter Elektrifizierung des Antriebsstrangs bei spontaner und kraftvoller Leistungsentfaltung ein hohes Komfortniveau und beeindruckende Fahrleistungen bei attraktiven Verbräuchen und stellt eine Antriebsalternative in schweren Komfortfahrzeugen dar.

Die thermodynamische Robustheit und technische Grenzen des leistungsbegrenzten 48V-EAV werden abschließend an einem extrem hochaufgeladenen Downsizing-Aggregat mit einer spezifischen Leistung von 185,5kW/l aufgezeigt.

Auf Basis der herausgearbeiteten Erkenntnisse und getätigten Überlegungen wird im Rahmen dieser Arbeit erstmalig eine geeignete Kombination und Verschaltung von zwei aufeinander abgestimmten elektrischen Zusatzverdichtern in Verbindung mit Abgasturboaufladung als innovativen Lösungsansatz vorgestellt.

Mit einer elektrifizierten dreistufig geregelten Aufladung (e3S) können die Antriebseigenschaften des hubraumstarken Referenzaggregats 3.0l-V6-TFSI mit hohen Drehmoment- und Leistungswerten bei spontanem Ansprechverhalten mit dem extrem hochaufgeladenen 2.0l-R4-TFSI 368kW beibehalten und zum Teil übertroffen werden.

Abstract

The intensification of permissible CO₂-emissions in private transport for sustainable mobility in combination with the continued growth in sales in the SUV vehicle segment is a major challenge for the approval of future drive concepts with combustion engines. For the necessary reduction in fuel consumption while at the same time improvement in driving performance, the charging of combustion engine will become more and more important.

The increasing electrification of the powertrains offers new promising approaches, especially in order to enhance exhaust-gas turbocharging for use on a gasoline engine. Most of all in area of low engine speeds, with steadily increasing charging levels, the stationary and transient charging pressure behavior needs to be supported by additional technology measures to ensure a convincing driving performance.

In this work, an efficient and high-performance charging system with a tailor-made matching of an additional technology measures is realized for the implementation of a high charging concept on the in-line four-cylinder gasoline engine. An essential goal is to achieve the outstanding drive characteristics of a high-displacement, mechanically charged 3.0l-V6-TFSI 245kW with a performance-equal, lower-consumption 2.0l-R4-TFSI (123,5kW/l).

First, evaluation criteria and targets are identified based on a comparison of engine characteristics of conventionally charged engine concepts depending on the charging level or rather the nominal power (185kW-245kW) and their influence on the driving behavior in the vehicle. Subsequently, potential variants of additional technology measures with different types of power consumption and transmission based on 12V and 48V are presented and quantitatively described in its function. These systems are analyzed und evaluated in direct comparison at the target engine concept 2.0l-R4-TFSI by using numerical simulation and the experiment on the engine test bench.

This methodological approach enables a detailed system and function analysis, thermodynamic potential analysis as well as a complete efficiency assessment of the additional technology measures. The latter is achieved by accounting for the additional power in useful power output and power dissipation at selected operating points.

For the vehicle integration of an electric compressor (EAV) with 48V, as the most promising additional technology measures, into a periphery of the charge-air duct of a 2.0l-R4-TFSI, a variety of requirements needs to be taken into account. Based on an extensive sensitivity analysis, the achievable performance of the EAV will be analyzed and compared depending on possible charge-air ducts.

Afterwards an analysis of longitudinal dynamics by using the target system, a two-stage, partially electrified exhaust-gas turbocharging using a 48V-EAV with optimized, double charge air cooling is taking place in the vehicle under customer-relevant driving situations. The determined charging

system on the 2.0l-R4-TFSI 245kW can achieve in six evaluation criteria examined in a range of 85% to 100% relative performance the sovereign driving performance of the 3.0l-V6 TFSI. With intelligent electrification of the powertrain, the highly charged vehicle achieves a high level of comfort and impressive driving performance with attractive fuel consumption and is a drive alternative in heavy comfort vehicles.

The thermodynamic robustness and technical limits of a power-limited 48V-EAV-system are finally demonstrated by using an extremely high-charged downsizing engine with a specific power output of 185,5kW/l.

Based on of the results and considerations, in this work a combination and interconnection of two electrical compressors with exhaust-gas turbocharging is presented for the first time as an innovative solution.

With an electrified three-stage controlled charging (e3S) the drive characteristics of the high displacement 3.0l-V6-TFSI reference aggregate with high torque and power values with spontaneous response can be ensured and partially exceeded with the extremely high-charged 2.0l-R4-TFSI 368kW.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung	III
Abstract	V
1 Einleitung	1
1.1 Entwicklung der SUV-Modelle und R4-TFSI-Motoren	1
1.2 Hochaufladung als Chance für zukünftige Ottomotoren	3
2 Abgasturboaufladung als Schlüsseltechnologie	9
2.1 Stand der Technik der heutigen Ottomotorenaufladung	9
2.2 Thermodynamik der Abgasturboaufladung	12
2.3 Zielkonflikt und Optimierungsansätze	17
2.3.1 Aktuelle Weiterentwicklungsschwerpunkte am ATL	17
2.3.2 Erhöhung der Variabilität am Abgasturbolader	20
2.3.3 Mehrstufige Aufladesysteme	23
2.4 Handlungsableitung für die Weiterentwicklung der Turboaufladung	26
3 Methodisches Vorgehen empirischer Untersuchungen	29
3.1 Vorstellung der Methodikwerkzeuge und Versuchsträger	29
3.1.1 2.0l-R4-TFSI EA888Gen.3 als Basismotor	31
3.1.2 Stationärer Motorfunktionsprüfstand	32
3.1.3 1D-Ladungswechselsimulation	35
3.1.4 Versuchsfahrzeug - Audi SQ5 S-tronic quattro	36
3.1.5 Validierung und Gegenüberstellung der Methodikwerkzeuge	37
3.2 Analyse kundenrelevanter Fahrsituationen / -profile	39
3.3 Identifizierte Anforderungen an die Drehmomentcharakteristik des hochaufgeladenen Ottomotors	46
4 Thermodynamische Potentialanalyse von Zusatzmaßnahmen	49
4.1 Arten des Leistungseinsatzes	49
4.1.1 Direkter Weg über Kurbeltrieb	50
4.1.2 Indirekter Weg über Luftpfad mit thermodynamischem Leistungshebel	50
4.2 Zusatzaufladetechnologien und deren stationäre Funktionsanalyse	53

4.2.1	Mechanische Unterstützung.....	53
4.2.2	Elektro-mechanische Unterstützung	55
4.2.3	Elektrische Unterstützung	59
4.3	Gegenüberstellung der stationären Leistungsaufnahme zur Darstellung der Ziel-Volllast am Beispiel 1500min^{-1} / 2000min^{-1}	61
4.4	Potentiale zur Verbesserung des Ansprechverhaltens.....	63
4.4.1	Analyse des instationären Wirkprinzips.....	63
4.4.2	Quantifizierung der instationären Energiebilanz	68
4.4.3	Einordnung von transienten Ergebnissen des hochaufgeladenen Ottomotors mit Zusatzmaßnahmen	70
4.5	Dynamikpotentiale in Abhängigkeit der motorischen Nennleistung	75
4.6	Bewertung der untersuchten Zusatzaufladetechnologien.....	77
4.7	48V-Hybridisierung vs. 48V-Zusatzaufladung	81
5	Untersuchung von 48V-EAV Anordnungskonfigurationen für eine elektrifizierte Hochoaufladung	85
5.1	Übersicht der untersuchten Varianten einer möglichen Ladeluftstrecke.....	85
5.2	Thermodynamische Sensitivitätsanalyse der EAV / LLK-Position	89
5.2.1	Einfluss auf den dynamischen Drehmomentaufbau	89
5.2.2	Einfluss auf das Low-End-Torque	95
5.2.3	Einfluss auf die motorische Nennleistung.....	97
5.3	Bewertung der EAV/LLK – Zielkonfiguration im Fahrzeug unter kundenrelevanten Fahrsituationen/ -profilen	100
5.3.1	Landstraße in definierter Getriebestufe	100
5.3.2	Elastizität aus konstanter Geschwindigkeit / Durchbeschleunigung	101
5.3.3	Einordnung der Ergebnisse und Bewertung	104
6	Grenzbetrachtung der e-Aufladung	107
6.1	Hochleistungsaggregat EA888 2.0l-R4-TFSI 368kW	107
6.1.1	Stationäre / dynamische Volllastkennlinie	107
6.1.2	Anforderung an die stationäre elektrische EAV-Leistungsaufnahme	108
6.1.3	Darstellbare Dynamikpotentiale in Abhängigkeit der Motordrehzahl.....	110
6.2	e3S als Lösungsansatz zur Erschließung weiterer Potentiale	114
6.2.1	Systemaufbau.....	114
6.2.2	Anpassung der EAV-Systeme für eine Verschaltung mehrstufiger elektrifizierter Verdichter	116
6.2.3	Einordnung von transienten Untersuchungsergebnissen	118
6.2.4	Einordnung von stationären Untersuchungsergebnissen	121

7 Zusammenfassung	125
8 Literaturverzeichnis	133
9 Publikationen	139
10 Abkürzungsverzeichnis	141
11 Symbol- und Formelzeichenverzeichnis	147
12 Abbildungsverzeichnis	151
13 Tabellenverzeichnis	155
A Anhang	157
A.1 Motorkenndaten EA837Gen.4evo 3.0I-V6-TFSI.....	157
A.2 Motorkenndaten EA888Gen.3 2.0I-R4-TFSI	158
A.3 Schematischer Messstellenplan am stationären Motorprüfstand	159
A.4 Navier-Stokes-Gleichungen.....	160
A.5 Beschreibung 1D-Ladungswechselmodell	161
A.6 Messaufbau im Versuchsfahrzeug.....	163
A.7 Analyse kundenrelevanter Fahrsituationen / -profile	164
A.7.1. Elastizität aus konstanter Geschwindigkeit	164
A.7.2. Durchbeschleunigen mit Kick-Down.....	166
A.7.3. Anfahrperformance / Vollast-Beschleunigung aus dem Stand	167
A.8 Bewertung der Zusatzaufladekonzepte nach VDI 2225	169
A.9 Verbrauchseinsparungspotentiale 48V-EAV/ 48V-RSG.....	170
A.10 Studentische Arbeiten	172