



Technische
Universität
Braunschweig



M. Sc. René Ernst

Entwicklungspotentiale der PKW-Dieselaufladung durch Elektrifizierung

Berichte aus dem ivb | Band 33 | Braunschweig 2021

Entwicklungspotentiale der PKW- Dieselaufladung durch Elektrifizierung

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhemina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: René Ernst
geboren in (Geburtsort): Bühl

eingereicht am: 26.11.2020
mündliche Prüfung am: 15.07.2021

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükcay
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts
Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch

Berichte aus dem ivb

Band 33

René Ernst

**Entwicklungspotentiale der PKW-Dieselaufladung
durch Elektrifizierung**

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8283-8

ISSN 2364-3862

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 im Rahmen meiner Tätigkeit als Doktorand im Bereich Forschung / Vorentwicklung der Daimler AG am Standort Stuttgart. In dieser Zeit haben mich viele Personen begleitet, gefordert und gefördert, weshalb ich diese Gelegenheit nutzen möchte, um allen Personen, die mich im Zuge meiner Promotion unterstützt haben, zu danken.

Herrn Dipl.-Ing. Siegfried Weber danke ich für die firmenseitige Übernahme der Betreuung, die fachliche Unterstützung und wichtige Impulse zu den richtigen Zeiten. Den Herren Abteilungsleitern Dipl.-Ing. Guido Vent und Dr.-Ing. Günther Karl danke ich für das Ermöglichen der Doktorandentätigkeit. Der Daimler AG im Allgemeinen gilt mein Dank für die Unterstützung durch Projektbudgets, Nutzungsmöglichkeiten der vorhandenen Anlagen und ein breites Netzwerk von Experten.

Einen besonderen Dank möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Heiko Beil aussprechen. Neben der Unterstützung bei Prüfstandstätigkeiten sind insbesondere die zahl- und ertragreichen fachlichen Gespräche hervorzuheben.

Meinem Teamkollegen, Herrn Dipl.-Ing. Thomas Kuhn gilt ebenfalls mein ausgesprochen Dank. Neben vielen Unterhaltungen auf höchstwissenschaftlichem Niveau einte uns vor allem die Leidenschaft für Verbrennungsmotoren, Geschwindigkeit und Humor.

Den Herren Dipl.-Ing. Klaus Rabes und Dipl.-Ing. Gerhard Schlickmann danke ich für die umfassende Unterstützung im Bereich Motorelektronik und Sondersoftware. Es war ausgesprochen schön zu sehen, wie einstige Ideen zu funktionierender Hard- und Software werden.

Herrn Jürgen Bachschmid gebührt ebenfalls ein großer Dank. Seine Unterstützung in der Motorenvorbereitung und sein unglaubliches Knowhow im Bereich der Prüfstandstechnik waren für den Erfolg der Arbeit von größtem Wert.

Darüber hinaus möchte ich mich bei den Teams von Prüffeld und Werkstatt bedanken. Ihr Engagement, auch augenscheinlich Unmögliches möglich zu machen, trug maßgeblich zum Erfolg der Arbeit bei. Insbesondere seien an dieser Stelle die Herren Siegfried Zinke, Stefan Schröder und Albrecht Schütt namentlich genannt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts gilt ebenfalls mein ausgesprochen Dank für die Betreuung meiner Promotion. Neben der Gewährung vieler Freiheiten in der Ausgestaltung und Durchführung war Herr Professor Eilts immer ein sehr interessierter Betreuer, der mich mit allen notwendigen Informationen versorgte und es verstand, durch die richtigen Fragen zur richtigen Zeit entscheidende Impulse zur inhaltlichen Ausgestaltung der Arbeit zu geben. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch für die Übernahme des Korreferats sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay für die Bereitschaft, den Vorsitz im Promotionsverfahren zu übernehmen.

Zu guter Letzt möchte ich meinen Eltern und meiner Familie, sowie meiner Partnerin, die mich auf meinem bisherigen Lebensweg in jedweder Form selbstlos unterstützt und mir somit meinen Werdegang ermöglicht haben, meinen uneingeschränkten Dank aussprechen.

Ohne sie wäre dies alles nicht möglich gewesen.

In Gedenken an den Mann, der mich die Neugier an Technik gelehrt hat. Ohne Dich, Opa, wäre dies ein leeres Blatt Papier. Danke für alles.

Leimersheim, im Sommer 2021

Kurzfassung

Im Spannungsfeld stetig strenger werdender Emissionsvorschriften, ansteigender Konkurrenz durch alternative Antriebstechnologien wie Brennstoffzellen- und Elektroantriebe sowie steigender Kundenanforderungen gilt es mehr denn je, Verbrennungsmotoren effizienter zu gestalten. Neben einer Hybridisierung und den damit verbundenen Vorteilen für den Verbrennungsmotor liegt der Schlüssel hierzu insbesondere in der Verwendung innovativer Aufladetechnologien. In der vorliegenden Arbeit wird anhand von zwei unterschiedlichen Konzepten untersucht, welche Potenziale eine Elektrifizierung der Aufladetechnologie für den Einsatz am Diesel-Verbrennungsmotor bietet. Ziel ist es hierbei, entsprechende Potenziale zu finden, zu bewerten und gegebenenfalls Weiterentwicklungsmöglichkeiten aufzuzeigen.

In einem ersten Schritt wird das Konzept „Nennleistungsbooster“ untersucht. Hierbei handelt es sich um einen parallel zum konventionellen Abgasturbolader eingesetzten, zweistufigen, elektrischen Verdichter, der im Nennleistungsbereich zusätzliche Luft zur Leistungssteigerung in den Verbrennungsmotor fördert. Es erfolgt zunächst die Auslegung der Aufladeinheit unter Verwendung verschiedener Simulationen in der 1D-Motorprozesssimulationssoftware *GT Suite* von *Gamma Technologies LLC*. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird ein Prototyp des Aufladeaggregats gefertigt und am Motorprüfstand im Verbund mit einem Dieselmotor, welcher zunächst als Basis vermessen wurde, untersucht. Hierbei können die Ergebnisse der Simulation bestätigt werden. Es wird gezeigt, dass das Konzept je nach Dimensionierung Potentiale in den Bereichen Verbrauch und Emissionen sowie im Bereich der Leistungssteigerung bieten kann.

Das zweite betrachtete Konzept, der „eTurbo“, wird innerhalb einer zweistufigen Aufladekonfiguration an einem Vierzylinder-Dieselmotor untersucht. Hierbei wird die Niederdruckstufe, welche in der Grundauslegung eine variable Turbinengeometrie aufweist, gegen einen elektrisch unterstützten Abgasturbolader mit Wastegate ausgetauscht. Analog des ersten Konzepts erfolgt zunächst die Auslegung mittels 1D-Motorprozesssimulation. Nach Fertigung eines entsprechenden Prototyps und einer Vermessung des Basisaggregats erfolgt die Erprobung des Gesamtsystems am Motorprüfstand. Wiederum können die Ergebnisse der Simulation bestätigt, darüber hinaus jedoch weitere Potenziale aufgezeigt werden. Es wird eine Abgasrückführ-Strategie für den Teillastbetrieb entwickelt, welche den Freiheitsgrad des elektrischen Antriebs des Abgasturboladers nutzt, um den bekannten Emissions-Verbrauchs-Tradeoff durch Lastpunktverschiebungen zu optimieren. Darüber hinaus wird ein erhebliches Potential zur Verringerung der Emissionen dargestellt, welches sich hauptsächlich in der verbesserten Möglichkeit der Abgasrückführung, auch und insbesondere in bisher kritischen Lastfällen wie beispielsweise Lastsprüngen oder im Volllastbereich, begründet. Darüber hinaus wird durch eine Untersuchung des eTurbo am Brennkammerprüfstand eine innovative Methode vorgestellt und erprobt,

um Abgasnachbehandlungselemente bereits vor dem Start des Verbrennungsmotors vorzuheizen und somit die Kaltstartemissionen signifikant zu senken. Sowohl die Simulation, als auch der Motorversuch zeigen die Performancepotenziale des Systems auf. Der bisher insbesondere in der Auslegung der Aufladesysteme vorherrschende Zielkonflikt zwischen guter Dynamik und hoher Nennleistung kann durch die Verwendung des elektrisch unterstützten Abgasturboladers aufgelöst werden. Neben einer signifikanten Steigerung der Nennleistung kann im Lastsprung auch ein deutlich verbessertes Verhalten im Vergleich zur bereits leistungsstarken und hochdynamischen Basis dargestellt werden.

Abstract

In the tension field of ever stricter emission regulations, increasing competition from alternative drive technologies such as fuel cell and electric drives as well as increasing customer requirements, it is more important than ever to make combustion engines more efficient. In addition to hybridization and the associated advantages for the internal combustion engine, the key to this lies in particular in the use of innovative charging technologies. This work presents two different concepts to investigate the potential of electrification of the charging technology for use on the diesel internal combustion engine. The aim is to find the corresponding potential, to evaluate it and, if possible, to point out opportunities for further development.

In a first step, the concept „nominal power booster“ is examined. This is a two-stage electric compressor that is used in parallel to the conventional exhaust gas turbocharger and is intended to deliver additional air in the nominal output range to increase performance in the internal combustion engine. First, the charger is designed using various simulations in the *GT Suite* 1D engine process simulation software from *Gamma Technologies LLC*. Based on the knowledge gained, a prototype of the turbocharger is manufactured and examined on the engine test bench in conjunction with a diesel engine, which was initially measured as the basis. The results of the simulation can be confirmed. It is shown that, depending on the dimensions, the concept can offer potential in the areas of fuel consumption and emissions as well as in the area of performance enhancement.

The second concept examined, the „eTurbo“, is investigated in a two-stage turbocharger configuration on a four-cylinder diesel engine. Here, the low-pressure stage, which has a variable turbine geometry in the basic design, is replaced by an electrically assisted exhaust gas turbocharger containing a wastegate. Analogous to the first concept, the design is first carried out using 1D engine process simulation. After the manufacturing of a corresponding prototype and a measurement of the basic unit, the entire system is examined on the engine test bench. Again, the results of the simulation can be confirmed, but further potential can be shown. An exhaust gas recirculation strategy for part-load operation is being developed, that uses the degree of freedom of the electric drive of the exhaust gas turbocharger to optimize the known emissions-fuel-consumption-tradeoff by shifting the load point. In addition, a considerable potential for reducing emissions is shown, which is mainly due to the improved possibility of exhaust gas recirculation, also and in particular in previously critical load cases such as load jumps or in the full load range. In addition, an examination of the eTurbo on the combustion chamber test bench introduces and examines an innovative method to preheat exhaust gas aftertreatment elements before the engine is started and thus significantly reduces cold start emissions.

Both the simulation and the engine test show the performance potential of the system. The conflict of objectives between good dynamics and high nominal output that

has prevailed in particular in the design of the charging systems can be resolved by using the electrically assisted exhaust gas turbocharger. In addition to a significant increase in the nominal power, a significantly improved behavior compared to the already powerful and highly dynamic basis can also be shown in the load step.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	III
Nomenklatur	XI
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	2
2.1 Klassische Aufladung von Verbrennungsmotoren	2
2.2 Elektrifizierte Aufladetechnologien	12
3 Motivation, Problemstellung und Zielsetzung	17
4 Methodik	19
4.1 Definition der bewertbaren Potenziale	19
4.2 1D-Motorprozesssimulation	20
4.3 Vollmotor-Prüfstand	20
4.4 Brennkammer-Prüfstand	22
5 Elektrischer Nennleistungsbooster	24
5.1 Vorüberlegung und Einsatzzwecke	24
5.2 Komponentenaufbau	25
5.2.1 Basismotor	25
5.2.2 Nennleistungsbooster	26
5.3 Systemaufbau und Funktionsweise	29
5.4 Simulation	31
5.4.1 Basisauslegung	31
5.4.2 Verbrauchspotenzial	33
5.4.3 Performancepotenzial	35
5.4.4 Emissionspotenzial	37
5.4.5 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse	38
5.5 Vermessung	39
5.5.1 Basisvermessung	39
5.5.2 Verbrauchspotenzial	42
5.5.3 Stationäre Volllast	43
5.5.4 Zusammenfassung der Motoregebnisse	49
5.6 Potenzialbewertung	50
6 Elektrisch unterstützter Turbolader	51
6.1 Vorüberlegung und Einsatzzweck	51

6.2	Komponentenaufbau	52
6.2.1	Basismotor	52
6.2.2	eTurbo	52
6.3	Systemaufbau und Funktionsweise	53
6.4	Simulation	55
6.4.1	Basisauslegung	55
6.4.2	Stationäre Vollastkurven mit eTurbo	57
6.4.3	Dynamikuntersuchungen	61
6.4.4	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse	64
6.5	Vermessung	65
6.5.1	Basisvermessung	65
6.5.2	Stationäre Vollastkurven mit eTurbo	68
6.5.3	Dynamikuntersuchungen	73
6.5.4	AGR-Strategien	81
6.5.5	Rekuperation	86
6.5.6	Katheizen	88
6.5.7	Zusammenfassung der Motoregebnisse	98
6.6	Potenzialbewertung	100
7	Fazit und Empfehlungen	101
7.1	Diskussion der Ergebnisse	101
7.2	Fazit	102
7.3	Empfehlungen	102
Anhang A:	eTurbo	107
A.1	Übersicht: Simulation der Lastsprünge mit / ohne elektrische Unterstützung	107
A.2	Übersicht: Vermessung der Lastsprünge im Vergleich mit der Basis	115
A.2.1	Vermessung der Lastsprünge ohne AGR	115
A.2.2	Vermessung der Lastsprünge mit AGR	121