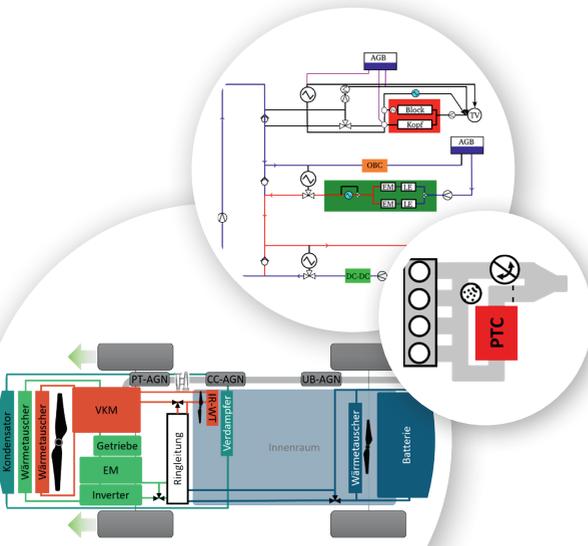


Konzeptionierung eines ganzheitlichen Thermomanagementsystems für ein Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)



Konzeptionierung eines ganzheitlichen Thermomanagementsystems für ein Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)

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

Dissertation

vorgelegt von

Michael Conin, M.Sc.

aus Frankfurt am Main

Berichterstatter: Prof. Dr. techn. Beidl
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Kulzer
Tag der Einreichung: 01.03.2024
Tag der mündlichen Prüfung: 30.04.2024

Darmstadt 2024

D17

Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und
Fahrzeugantriebe

Band 30

Michael Conin

**Konzeptionierung eines ganzheitlichen
Thermomanagementsystems für ein
Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2024

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., 2024

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9524-1

ISSN 2365-3795

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

Op dat, wat is,
op dat, wat kütt
und op dat, wat wor.

Kasalla

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfen, selbständig verfasst habe.

Darmstadt, den 01. März 2024

Michael Conin

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner fünfjährigen Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe sowie bei der IVD-Deutschland GmbH. Während dieser Zeit haben mir Herr Prof. Beidl und Prof. Hohenberg die Möglichkeit gegeben, wissenschaftliche Forschungsprojekte durchzuführen. Alle Projekte waren von einem intensiven und sehr konstruktiven Austausch begleitet und mir wurde stets große Freiheit und Vertrauen entgegengebracht. Daher danke ich Herrn Prof. Beidl und Prof. Hohenberg dafür, diese Chancen und Möglichkeiten erhalten zu haben. Ebenso bedanke ich mich bei den Projektpartnern und Projektträgern der vom BMW geförderten Projekte „INES“ und „De⁴LoRa“, die die Grundlage meiner Dissertation liefern.

Viele Ergebnisse meiner Projekte und Veröffentlichungen sind in Zusammenarbeit mit Studierenden der TU Darmstadt in Form von wissenschaftlichen Arbeiten und Stellen als Hilfswissenschaftler entstanden. Auch bei euch bedanke ich mich für die stets konstruktive Zusammenarbeit, die immer sehr bereichernd war.

Besonders alle Kollegen und Kolleginnen haben dazu beigetragen, dass meine Zeit am vom nicht nur fachlich spannend, sondern auch menschlich sehr wertvoll war. Durch euch war die Arbeit am vom immer mit viel Freude verbunden und hat zu einem sehr angenehmen Arbeitsklima geführt. Dies gilt insbesondere auch für die Werkstatt, das E-Labor und das Sekretariat. Ein besonderer Dank gilt meinen Kollegen und Freunden Johannes Hipp für die Motivation, am vom zu promovieren und Philipp Demel für die persönliche und fachliche Unterstützung in Projekten und Diskussionen.

Mein abschließender Dank gilt meinen Eltern und Geschwistern, von denen ich stets uneingeschränkte Unterstützung und Rückhalt erhalten habe, sowie meiner Freundin Domi, die mir während der intensiven Dissertationsphase den Rücken gestärkt und mir, auch wenn's mal stressig war, ein Lächeln auf die Lippen gezaubert hat.

Kurzfassung

Der Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren, Abgasnachbehandlungssystemen und elektrischen Antriebssystemen weist eine hohe Sensitivität gegenüber der jeweiligen Systemtemperatur auf. Eine optimale thermische Konditionierung dieser Systeme ermöglicht daher einen effizienten und emissionsarmen Betrieb und wird der Forderung nach einer nachhaltigen Individualmobilität gerecht. Diese Dissertation trägt zur Integration des Antriebssystems und des Thermalkreislaufsystems zu einem Energiemanagementsystem eines Diesel-Hybridfahrzeugs bei. Für die Integration bedarf es eines Thermomanagementsystems, das eine bestmögliche thermische Konditionierung der Antriebskomponenten und des Abgasnachbehandlungssystems adressiert. Die Zielsetzung dieser Arbeit ist daher die Konzeptionierung eines ganzheitlichen Thermomanagementsystems, das sich aus einem hochintegrierten Thermalkreislaufsystem und einem innovativen Diesellabgasnachbehandlungssystem zusammensetzt.

Das hochintegrierte Thermalkreislaufsystem ermöglicht durch eine direkte Verbindung der Teilthermalkreisläufe des Verbrennungsmotors, der E-Maschinen und der Leistungselektronik sowie der Batterie einen situationsbasierten Transfer von Wärmeströmen zwischen den Antriebssystemen zur thermischen Konditionierung. Für diese erstmalige Umsetzung zeigen Simulationen das Potenzial der Kopplung der Thermalkreisläufe auf. Am speziell für Co-Simulationsversuche entwickelten Systemprüfstand „ThermoLab EVO 2“ können diese Ergebnisse bestätigt werden. Insbesondere bei kritischen Betriebsbedingungen bietet das hochintegrierte Thermalkreislaufkonzept Vorteile hinsichtlich der Fahrzeugeffizienz und der Sicherstellung der Einhaltung thermischer Systemgrenzen.

Im Rahmen des Thermomanagementsystems des PHEV wird zusätzlich ein Abgasnachbehandlungssystem gestaltet, das unmittelbar nach einem Motorstart sehr hohe Schadstoffkonvertierungen erreicht. Die speziell beim Dieselmotor herausfordernde Stickoxidminderung wird durch die Positionierung eines SCR-Systems vor dem Abgasturbolader adressiert. Das erhöhte Temperaturniveau vor dem Turbolader führt zu einem schnelleren Erwärmen des Systems im Vergleich zu einem konventionellen Abgasnachbehandlungssystem. Das Pre-Turbo-SCR-System verfügt über einen Bypass, der ein Umströmen des Pre-Turbo-SCR im Falle von Sonderbetriebsarten und bei betriebswarmen Unterbodensystem ermöglicht. Die Vermessung des ganzheitlichen Pre- und -Post-Turbo-AGN in dynamischen Prüfstandtests zeigt, dass durch eine angepasste AdBlue®-Betriebsstrategie Umsatzraten von über 90 % in Kaltstartversuchen möglich sind, ohne CO₂-intensive Heizmaßnahmen durchführen zu müssen. Damit adressiert das System den Zielkonflikt von CO₂ und Zero-Impact-Emission.

Abstract

The efficiency of internal combustion engines, exhaust aftertreatment systems, and electric propulsion systems exhibits high sensitivity to their respective operating temperatures. Therefore, optimal thermal conditioning of these systems enables efficient and low-emission operation, meeting the demand for sustainable individual mobility. This dissertation contributes to the integration of the propulsion system and the thermal management system into an energy management system of a diesel-hybrid vehicle. Integration requires a thermal management system that addresses the best possible thermal conditioning of the drive components and the exhaust gas aftertreatment system. The objective of this work is the conceptualization of a holistic thermal management system, consisting of a highly integrated thermal circuit system and an innovative diesel exhaust aftertreatment system.

The highly integrated thermal circuit system allows for a situation-based transfer of heat flows between the propulsion systems for thermal conditioning by directly connecting the individual thermal circuits of the internal combustion engine, the electric motors and power distribution unit, and the battery. Simulations demonstrate the potential of coupling the thermal circuits and can be confirmed through co-simulation experiments on the system test bench "ThermoLab EVO 2". Particularly in critical operating conditions, the highly integrated thermal circuit concept offers advantages in terms of vehicle efficiency and ensuring compliance with thermal system limits.

Within the framework of the thermal management system, it is also necessary to design the exhaust gas aftertreatment system to achieve high emission conversions immediately after an engine start to meet future global emission requirements. The challenging reduction of nitrogen oxides, especially in diesel engines, is addressed by positioning an SCR-system upstream of the turbocharger. The higher temperature level upstream of the turbocharger leads to faster light-off of the system compared to a conventional exhaust aftertreatment system after the turbocharger. The Pre-Turbo-SCR-system features a bypass that allows for bypassing the Pre-Turbo-SCR in special operating modes and when the underfloor system is warm for operation. Measurements of the comprehensive Pre- and Post-Turbo-systems in dynamic test bench tests shows that with an adapted AdBlue[®] operating strategy, conversion rates of over 90 % are possible in cold start tests without performing CO₂-intensive heating measures. Thus, the system addresses the trade-off between CO₂ and zero-impact emissions.

Inhaltsverzeichnis

Erklärung.....	i
Vorwort	ii
Kurzfassung.....	iii
Abstract	iv
Inhaltsverzeichnis.....	v
Abbildungsverzeichnis.....	x
Tabellenverzeichnis	xvi
Formelverzeichnis	xvii
Abkürzungsverzeichnis.....	xviii
Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes	xxi
1 Einleitung	1
1.1 Technischer Hintergrund und Motivation	1
1.2 Gliederung der Arbeit	4
2 Grundlagen	5
2.1 Politische Rahmenbedingungen.....	5
2.2 Grundlagen der Thermodynamik.....	6
2.2.1 Der erste Hauptsatz der Thermodynamik für offene Systeme	6
2.2.2 Wärmeübertragung.....	8
2.3 Antriebsstrangkomponenten und -systeme im Fahrzeug.....	10
2.3.1 Verbrennungskraftmaschine	11
2.3.2 Elektrische Maschinen	26
2.3.3 Leistungselektronik.....	30
2.3.4 Traktionsbatterie	32
2.3.5 Antriebsstrangtopologien hybridisierter Fahrzeuge.....	35

2.4	Thermalkreislaufkomponenten und thermische Systeme im Fahrzeug	36
2.4.1	Anforderungen an Thermomanagementsysteme	36
2.4.2	Thermalkreislaufkomponenten.....	37
2.4.3	Thermalkreislaufsysteme unterschiedlicher Antriebsarchitekturen	39
3	Zielsetzung der Arbeit.....	44
3.1	Konzeptionierung eines ganzheitlichen Thermomanagementsystems zur Bewältigung kritischer, instationärer Fahrzenarien.....	44
3.2	Forschungsfragen im Kontext öffentlicher Förderprojekte	47
4	Konzeptionierung eines hochintegrierten PHEV-Thermalkreislaufsystems..	49
4.1	Anforderungen an den Konzeptionsprozess.....	49
4.1.1	Thematische Differenzierung der Teilaufgaben für die Konzeptionierung eines Thermalkreislaufsystems	49
4.1.2	Thermalkreislauf des Vergleichsfahrzeugs – Ausgangszustand	51
4.2	Konzeptionierung eines Thermalkreislaufmodells für ein PHEV	52
4.2.1	Effizienzpotenziale eines innovativen Thermalkreislaufsystems am Beispiel der Traktionsbatterie	53
4.2.2	Direkte Verbindung von Thermalkreisläufen zum situationsbasierten Wärmetransfer.....	54
4.2.3	3D Modellierung des Thermalkreislaufkonzepts für prototypische Umsetzung am PST.....	59
4.3	Modellbildung und Analyse eines thermisch repräsentativen Fahrzeugmodells	60
4.3.1	Architektur des echtzeitfähigen Fahrzeugmodells	61
4.3.2	Potenzialabschätzung zur Steigerung des Fahrzeugwirkungsgrads durch eine Thermalkreislaufintegration in ausgewählten Szenarien.....	68
4.3.3	Schnittstellen zum Co-Simulationsbetrieb am Hardware-in-the-Loop-Prüfstand.....	71
4.4	Thermalkreislaufkomponentenentwicklung.....	71
4.4.1	Thermohydraulischer Komponentenprüfstand – ThermoLab EVO 1	72

4.4.2	Entwicklung von Thermomanagementmodulen.....	73
4.4.3	Batteriekühlmodul.....	74
4.5	Teilsystemvalidierung am dynamischen thermohydraulischen Prüfstand – ThermoLab EVO 2	77
4.5.1	Der thermische Emulator als dynamisches Substitut von Komponenten und Antriebssystemen am thermohydraulischen Prüfstand	77
4.5.2	Teilsystemvalidierung des integrierten Thermalkreislaufsystems für instationäre Szenarien am ThermoLab EVO 2.....	85
4.6	Zusammenfassung der methodischen Konzeptionierung eines hochintegrierten Thermalkreislaufkonzepts.....	93
4.6.1	Der ThermoLab-Ansatz zur methodischen Entwicklung für effiziente Thermomanagementsysteme.....	93
4.6.2	Hochintegriertes Thermalkreislaufsystem zur Bewältigung kritischer Fahrscenarien	94
4.6.3	Ausblick.....	95
5	Potenzialanalyse eines Niedrigstemissionssystems für Diesel-Pkw.....	96
5.1	Motivation und Herausforderungen bei der Entwicklung eines Abgasnachbehandlungssystems mit Pre-Turbo-Katalysator.....	96
5.2	Effektive Nutzung der thermischen Randbedingungen vor Turbolader zur NO _x -Minderung durch Positionierung eines SCR-Systems vor der Turbine	98
5.2.1	Anforderungen an ein ganzheitliches Abgasnachbehandlungskonzept für einen Dieselhybrid-Pkw mit 48 V P1-Architektur.....	98
5.2.2	Konzept des ganzheitlichen Abgasnachbehandlungssystems für ein optimiertes Aufwärmverhalten.....	99
5.2.3	Herausforderungen und Forschungsfragen zur Analyse des Abgasnachbehandlungssystems.....	102
5.3	Versuchsumgebung und methodisches Vorgehen.....	103
5.3.1	Engine-in-the-Loop Motorprüfstand.....	103
5.3.2	Messtechnik und Messketten	104

5.3.3	Versuchsmotor	104
5.3.4	Abgasnachbehandlungssysteme für die Anwendung vor dem Abgasturbolader	105
5.3.5	Fahrtszenarien.....	107
5.4	Einfluss des Pre-Turbo-Abgasnachbehandlungssystems auf den Motorprozess und das NO _x -Emissionsverhalten.....	108
5.4.1	Einfluss des PT-SCR auf die Zylinderfüllungsparameter	109
5.4.2	Einfluss des PT-SCR auf die NO _x -Rohemissionen.....	112
5.4.3	Zusammenfassung der Auswirkungen des PT-SCR auf den Motorprozess 114	
5.5	Auswahl einer SCR-Technologie vor dem Abgasturbolader	115
5.5.1	Vergleich chemischer Eigenschaften von Kupfer- und Eisenzeolithkatalysatoren	115
5.5.2	Entwicklung einer flexiblen HWL-Dosierstrategie für verschiedene SCR- Technologien und Randbedingungen	117
5.5.3	Vergleich des Umsatzverhaltens von Kupfer- und Eisenzeolithkatalysator vor Abgasturbolader	120
5.5.4	Schlussfolgerungen zur Auswahl einer SCR-Technologie vor Abgasturbolader	126
5.6	Analyse des Emissionsminderungspotenzials des ganzheitlichen Abgasnachbehandlungssystems.....	127
5.6.1	Inbetriebnahme der Bypassklappenstrategie	127
5.6.2	Ermittlung der Massenstromaufteilung zwischen Bypass und Pre-Turbo- SCR bei geöffneter Bypassklappe	128
5.6.3	Umsetzung der DPF-Regeneration am Motorprüfstand	130
5.6.4	Analyse des NO _x -Minderungspotenzials des Pre- und Post-Turbo- Abgasnachbehandlungssystems	133
5.7	Zusammenfassung der Ergebnisse und weitere Potenziale	138
5.7.1	Zusammenfassung der Konzeptionierung eines Emissionsminderungssystems für Diesel-Pkw	139



5.7.2	Emissionsminderungspotenzial des AGN mit PT-SCR unter Berücksichtigung zukünftiger Motortechnologien	140
5.7.3	Ausblick	142
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	144
6.1	Zusammenfassung	144
6.2	Ausblick	146
Anhang	148
A	Anhänge zu Einleitung und Grundlagen	148
B	Thermalkreislaufsystem	152
C	Lebenslauf Michael Conin.....	153
Literaturverzeichnis.....		154
Verzeichnis studentischer Arbeiten im Rahmen dieser Dissertation.....		163
Wissenschaftliche Veröffentlichungen.....		166