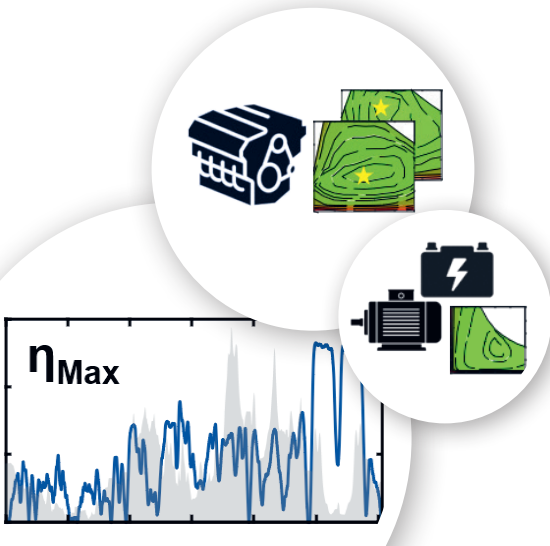


# Wirkungsgradbezogene Potenzialanalyse von Technologiepfaden für ottomotorische Hybridantriebe



---

# Wirkungsgradbezogene Potenzialanalyse von Technologiepfaden für ottomotorische Hybridantriebe

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

## Dissertation

vorgelegt von  
**Alexander Kuznik, M.Sc., M.Eng.**  
aus Frankfurt am Main

Berichterstatter: Prof. Dr. techn. Christian Beidl  
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. André Casal Kulzer  
Tag der Einreichung: 05.12.2023  
Tag der mündlichen Prüfung: 30.01.2024

Darmstadt 2024

D17

---



---

Schriftenreihe  
des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe

Band 28

Alexander Kuznik

**Wirkungsgradbezogene Potenzialanalyse von Technologiepfaden für  
ottomotorische Hybridantriebe**

D17 (Dissertation 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 978-3-8440-9483-1

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

---

---

## Vorwort

---

Diese Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe der Technischen Universität Darmstadt entstanden. Die Inhalte stammen im Wesentlichen aus den Forschungsprojekten *ICE2025+*: *Ultimate System Efficiency* und *ICE2030*, die beide jeweils von der FVV e.V. finanziert wurden.

Ich möchte meinem Doktorvater Prof. Christian Beidl dafür danken, dass er mir die Möglichkeit gegeben hat, am Institut arbeiten und promovieren zu können. Außerdem bedanke ich mich für das entgegengebrachte Vertrauen und die Unterstützung während der Projektbearbeitung.

Mein weiterer Dank gilt Prof. André Casal Kulzer zum einen für die Übernahme des Korreferats, zum anderen für die Unterstützung und Zusammenarbeit als Obmann und Projektpartner im Rahmen der beiden genannten Forschungsprojekte.

Ich danke allen meinen Kollegen und Kolleginnen des Instituts für die freundschaftliche Zusammenarbeit und große Unterstützung während meiner gesamten Zeit am Institut. Einen besonderen Dank möchte ich an meine Kollegen Harun Zlojo, Maximilian Stumpp, Philipp Demel, Tim Steinhaus und Lars Knaup richten, die stets ein offenes Ohr für mich hatten und mit denen ich kritisch über meine Ideen diskutieren konnte. Auch möchte ich mich bei allen Studierenden bedanken, die in Form ihrer Abschlussarbeiten oder als Hilfwissenschaftler einen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Ich danke außerdem Arndt Döhler für seine Unterstützung und sein großes Engagement als Obmann beider Projekte. Darüber hinaus danke ich meinen Kollegen und Kolleginnen der Uni Stuttgart, der TU Braunschweig und der RWTH Aachen für die angenehme und konstruktive Zusammenarbeit sowie den Arbeits- und Steuerkreisen für ihr Interesse und die kritischen Diskussionen.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die immer hinter mir stand und mich stets in meinem Vorhaben bestärkt hat. Speziell danke ich meiner Cousine Leonie für das Korrekturlesen meiner Arbeit. Besonders möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, ohne die mein bisheriger Werdegang nicht möglich gewesen wäre und die einen großen Anteil am Gelingen dieser Arbeit haben. Zum Schluss möchte ich meiner Freundin danken, die mich in schwierigen Phasen ermutigt hat und mir die Möglichkeit gegeben hat, mich auf meine Arbeit und die Promotion zu konzentrieren.

Alexander Kuznik

Darmstadt, 05.12.2023



---

---

## Kurzfassung

---

Zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen nach dem Pariser Klimaabkommen und dem Klimaschutzpaket *Fit For 55* stellen elektrifizierte Fahrzeugantriebe einen wichtigen Baustein dar. Aktuelle Verkaufszahlen und Marktprognosen zeigen, dass Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor in näherer Zukunft weiterhin einen wesentlichen Anteil an der Fahrzeugflotte haben werden. Abhängig vom Anwendungsfall bieten Hybridfahrzeuge großes Potenzial, da sie hohe Wirkungsgrade und einen geringen Verbrauch versprechen und gleichzeitig nicht auf den großflächigen Aufbau der Ladeinfrastruktur angewiesen sind. Durch die Verfügbarkeit zweier Energiespeicher und -wandler besitzt der Hybridantriebsstrang zusätzliche Freiheitsgrade, die einen vergrößerten Variationsraum in Bezug auf Konzeptionierung, Auslegung und Betrieb des Antriebsstrangs ergeben. Um ein optimales Verbrauchsergebnis erzielen zu können, dürfen die Antriebsstrangkomponenten nicht isoliert entwickelt werden, sondern müssen im Gesamtsystem ausgelegt und bewertet werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden elf verschiedene Verbrennungsmotorkonzepte in vier verschiedenen Hybridantriebssträngen simulativ untersucht. Ziel der Untersuchungen ist zum einen das Ermitteln und Aufzeigen der Synergien von Technologiepfaden von ottomotorischen Hybridantrieben und zum anderen die Bestimmung von Fahrzeugwirkungsgradpotenzialen. Um den Antriebsstrang jeder Variante optimal auszulegen, werden die Antriebsstrangkomponenten mithilfe eines Genetischen Algorithmus optimiert. Dabei muss jede Auslegungsvariante zwingend optimal betrieben werden, um eine faire Vergleichsbasis untereinander gewährleisten zu können. Hierfür wird der Betrieb mithilfe der Dynamischen Programmierung optimiert. Die Untersuchung wird sowohl für den Betrieb im WLTC als auch für unterschiedliche Realfahrtszenarien durchgeführt. Im letzten Schritt der Evaluierung werden die Varianten mithilfe einer Co-Simulation mit weiterentwickelten Komponentenmodellen tiefergehend untersucht, um somit die Potenziale bezüglich des Fahrzeugwirkungsgrads zu bestimmen.

Die Ergebnisse zeigen ein hohes Wirkungsgradpotenzial für den Betrieb mit Methanol als Kraftstoff. Unabhängig von der Hybridisierung erzielen diese Varianten die höchsten Fahrzeugwirkungsgrade. Motoren mit magerer Verbrennung stellen aufgrund der erhöhten Anforderungen an die Abgasnachbehandlung durch elektrisches Heizen nur für stärker hybridisierte Varianten eine Alternative dar. Die Beimischung von Wasserstoff zur Darstellung von extrem mageren Verbrennungen zeigt ebenfalls große Potenziale aufgrund des hocheffizienten Verbrennungsmotors und der reduzierten Anforderungen an die Abgasnachbehandlung. Der P2-Hybrid mit 400 V-Batterie und der leistungsverzweigte Hybrid erzielen im Mittel für verschiedene Fahrtszenarien mit 45,6 % und 46,4 % die höchsten Fahrzeugwirkungsgrade.





---

---

## Abstract

---

Electrified vehicle drives are an important part of reducing greenhouse gas emissions in accordance with the Paris Climate Agreement and the *Fit For 55* climate protection package. Current sales figures and market forecasts show that vehicles with combustion engines will continue to make up a significant proportion of the vehicle fleet in the near future. Depending on the application, hybrid vehicles offer great potential as they promise high efficiency and low consumption and at the same time are not dependent on the large-scale construction of the charging infrastructure. The availability of two energy storage systems and converters gives the hybrid powertrain additional degrees of freedom, resulting in greater scope for variation in terms of the conception, design, and operation of the powertrain. To achieve an optimum consumption result, the powertrain components must not be developed in isolation, but must be designed and evaluated as part of the overall system.

In this work, eleven different combustion engine concepts in four different hybrid powertrains are simulatively investigated. The aim of the investigations is, on the one hand, to determine and demonstrate the synergies of technology paths of gasoline engine powered hybrid powertrains and, on the other hand, to determine vehicle efficiency potentials. To optimally design the powertrain of each variant, the powertrain components are optimized using a genetic algorithm. Each design variant must be operated optimally to ensure a fair basis for comparison. For this purpose, operation is optimized with the aid of dynamic programming. The investigation is carried out both for operation in the WLTC and for different real driving scenarios. In the final step of the evaluation, the variants are examined in greater depth using a co-simulation with advanced component models to determine the potential in terms of vehicle efficiency.

The results show a high efficiency potential for operation with methanol as fuel. Regardless of the hybridization, these variants achieve the highest vehicle efficiencies. Engines with lean combustion are only an alternative for more hybridized variants due to the increased demands on exhaust gas aftertreatment through electric heating. The addition of hydrogen for extremely lean combustion also shows great potential due to the highly efficient combustion engine and the reduced requirements for exhaust gas aftertreatment. The P2 hybrid with 400 V battery and the power-split hybrid achieve the highest average vehicle efficiencies for various driving scenarios at 45.6% and 46.4%.



---

---

## Inhaltsverzeichnis

---

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abbildungsverzeichnis.....	v
Tabellenverzeichnis.....	xi
Formelverzeichnis .....	xiii
Abkürzungsverzeichnis.....	xv
Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes.....	xix
1 Einleitung .....	1
1.1 Motivation .....	1
1.2 Wissenschaftliche Fragestellung.....	3
1.3 Forschungsprojekte <i>ICE2025+</i> und <i>ICE2030</i> .....	4
1.4 Methodisches Vorgehen und Gliederung der Arbeit.....	5
2 Grundlagen von Hybridantriebssträngen und Stand der Technik.....	7
2.1 Hybridantriebsstränge .....	7
2.1.1 Definition und Antriebsstrangkomponenten .....	7
2.1.2 Hybridfunktionen .....	12
2.1.3 Klassifizierung und Topologie.....	15
2.1.4 Wirkungsgradbewertung von Hybridfahrzeugen.....	22
2.2 Hybridbetriebsstrategien.....	23
2.2.1 Regelbasierte Betriebsstrategien .....	24
2.2.2 Dynamische Programmierung.....	26
2.3 Wirkungsgradsteigerung von Ottomotoren durch Technologien und alternative Kraftstoffe .....	27
2.4 Stand der Technik von hocheffizienten Ottomotoren.....	38
2.5 Stand der Technik von hocheffizienten Hybridantriebssträngen .....	47
3 Randbedingungen zur Entwicklung von hocheffizienten Hybridfahrzeugen.....	53

3.1	Fahrzeug und Hybridkonzepte .....	53
3.1.1	Fahrzeugparameter und Leistungseigenschaften .....	53
3.1.2	Hybridkonzepte.....	55
3.1.3	Ableitung von Komponentenanforderungen .....	56
3.2	Motorkonzepte .....	61
3.2.1	Stöchiometrische Motorkonzepte .....	63
3.2.2	Magerbetriebene Motorkonzepte.....	71
3.2.3	Magerbetriebene Motorkonzepte mit Wasserstoffbeimischung.....	76
3.3	Elektrische Antriebsstrangkomponenten .....	86
3.4	Fahrzyklen und -strecken .....	89
3.4.1	Worldwide Light-duty Test Cycle (WLTC) .....	89
3.4.2	Strecken des realen Fahrbetriebs.....	89
4	Optimale Dimensionierung und optimaler Betrieb von Hybridfahrzeugen.....	93
4.1	Ermittlung des optimalen Betriebs mittels Dynamischer Programmierung	93
4.1.1	Aufbau des Gesamtmodells .....	93
4.1.2	Modellstruktur der parallelen Hybride .....	95
4.1.3	Modellstruktur des leistungsverzweigten Hybrids .....	98
4.1.4	Modellierung des Verbrennungsmotors .....	100
4.1.5	Modellierung der elektrischen Komponenten .....	101
4.1.6	Festlegung der Diskretisierung und der Randbedingungen .....	102
4.1.7	Definition der Kostenfunktion .....	105
4.2	Ermittlung der optimalen Dimensionierung mittels des Genetischen Algorithmus .....	106
4.2.1	Implementierung und Parametrierung .....	107
4.2.2	Optimierung der einzelnen Antriebsstrangkomponenten.....	107
4.3	Ergebnisse zur optimalen Dimensionierung und zum optimalen Betrieb	114
4.3.1	P1-Hybrid.....	115
4.3.2	P2-Hybrid (48 V).....	127
4.3.3	P2-Hybrid (400 V).....	138

4.3.4	Leistungsverzweigter Hybrid.....	147
5	Effizienzuntersuchungen mittels Gesamtfahrzeugsimulation .....	157
5.1	Aufbau des Co-Simulationsmodells.....	157
5.2	Modellierung der Antriebsstrangkomponenten .....	158
5.2.1	Modellierung des Verbrennungsmotors .....	158
5.2.2	Modellierung der Abgasnachbehandlung .....	161
5.2.3	Modellierung der elektrischen Antriebsstrangkomponenten .....	167
5.2.4	Modellierung von Getriebe und Kupplung .....	169
5.3	Ableitung der regelbasierten Betriebsstrategien .....	171
5.4	Ergebnisse der Gesamtfahrzeugsimulation.....	178
5.4.1	Ergebnisse der P1-Hybrid-Simulationen.....	179
5.4.2	Ergebnisse der P2-Hybrid-Simulationen (48 V).....	182
5.4.3	Ergebnisse der P2-Hybrid-Simulationen (400 V).....	184
5.4.4	Ergebnisse der Simulationen der leistungsverzweigten Hybride .....	187
6	Ergebnisdiskussion ausgewählter Hybridfahrzeugkonzepte.....	191
6.1	Hybridfahrzeug mit maximalem Fahrzeugwirkungsgrad .....	191
6.2	Hybridfahrzeug mit minimalen CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	196
6.3	Hybridfahrzeug mit hohem Fahrzeugwirkungsgrad und reduzierter Komplexität .....	197
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	203
Anhang	.....	207
A	Fragenbogen zur Bestimmung der Fahrzeugparameter .....	207
B	Randbedingungen zur Simulation der Beschleunigungsmanöver .....	208
C	Nebenstudie: Untersuchung zur streckenoptimalen Dimensionierung ...	209
D	Nebenstudie: Untersuchung zur Variation des Start-SoC und dessen Einfluss auf die optimale Dimensionierung.....	211
Literaturverzeichnis.....		215
Curriculum Vitae .....		225