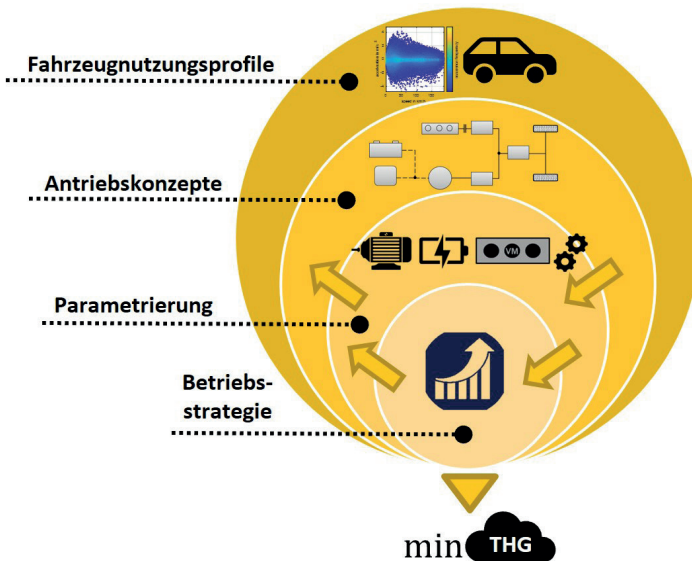



Realfahrtbasierte Bewertung des ökologischen Potentials von Fahrzeugantriebskonzepten

Autor: Arved Eßer
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. S. Rinderknecht



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT





Realfahrtbasierte Bewertung des ökologischen Potentials von Fahrzeugantriebskonzepten

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Arved Eßer, M.Sc.

aus Seeheim-Jugenheim

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Christian Beidl
Tag der Einreichung:	06.04.2021
Tag der mündlichen Prüfung:	15.06.2021

Darmstadt 2021

D17

Forschungsberichte Mechatronische Systeme im Maschinenbau

Arved Eßer

**Realfahrtbasierte Bewertung des ökologischen
Potentials von Fahrzeugantriebskonzepten**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

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.: Darmstadt, 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 978-3-8440-8236-4

ISSN 2198-8536

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

Kurzfassung

Um die Auswirkungen des menschengemachten Klimawandels einzudämmen besteht im Kontext der Individualmobilität das Bestreben, möglichst klimafreundliche Pkw-Antriebskonzepte zu gestalten, wozu die vergleichende Bewertung der lebenswegbezogenen Treibhausgasbilanz von hoher Relevanz ist. Üblicherweise werden die zu vergleichenden Fahrzeuge verschiedener Antriebskonzepte auf Basis der Auslegung und der Verbrauchswerte von bestehenden Marktfahrzeugen charakterisiert, wodurch eine realitätsnahe Bewertung der aktuellen Umsetzung der Konzepte ermöglicht wird. Allerdings bleibt bei diesem Vorgehen unbekannt, wie die Antriebskonzepte in der Bewertung abschneiden würden, wenn ihre Auslegung und Betriebsweise zur Erreichung der minimal möglichen THG-Bilanz, welche als ökologisches Potential definiert wird, optimiert werden.

Um einen realfahrtbasierten und belastbaren Vergleich des erreichbaren Potentials zur Reduktion der THG-Emissionen zu ermöglichen, welches mit verschiedenen Antriebskonzepten einhergeht, wird im Rahmen dieser Arbeit eine Gesamtumgebung auf Basis eines Optimierungsansatzes umgesetzt. Für eine bestmögliche Vergleichbarkeit werden stets einheitliche Anforderungen, Fahrzeugnutzungsprofile und Randbedingungen zugrunde gelegt. Zur kompakten Darstellung der distanzabhängigen Fahrweise eines Nutzungsprofils werden eine Klassifizierung der ursprünglichen Fahrten in mehrere Distanzbereiche sowie die Synthese eines jeweils repräsentativen Fahrzyklus für jeden Distanzbereich verwendet. Die Nutzbarkeit der synthetischen Fahrzyklen zur Abbildung der Gesamtheit der ursprünglichen Fahrdaten wird durch einen neuen Validierungsprozess überprüft, wodurch eine realfahrtbasierte Bewertung ermöglicht wird. Ein genetischer Algorithmus wird für den Optimierungsansatz verwendet, um modellbasiert die bestmögliche Auslegung jedes Antriebskonzepts zu identifizieren. Innerhalb des Optimierungsverfahrens wird eine gütefunktional-basierte Betriebsstrategie eingesetzt, um das quasi-optimale Betriebsverhalten für jede Antriebsparametrierung zu ermitteln. Durch die Bestimmung der optimalen Auslegung und Betriebsweise jedes Antriebskonzepts mittels der Gesamtumgebung entsteht eine einheitliche Bewertungsbasis, die den belastbaren Vergleich des ökologischen Potentials der Konzepte ermöglicht.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das ökologische Potential verschiedener Antriebstechnologien für die Fahrzeugnutzung in Deutschland in den Bezugsjahren 2020 und 2030 untersucht. In Abhängigkeit von der charakteristischen Fahrweise und der Verteilung von Fahrdistanzen eines Fahrzeugnutzungsprofils sowie den relevanten Randbedingungen werden spezifische Vor- und Nachteile der verschiedenen Antriebskonzepte herausgearbeitet, wobei kein Antriebskonzept für alle Fahrzeugnutzungsprofile uneingeschränkt geeignet ist. Im Allgemeinen zeigt sich durch den Optimierungsansatz, dass eine Plug-in-Option und die Erreichung eines hohen elektrischen Fahranteils erforderlich sind, um geringe THG-Emissionen zu erzielen. Gleichzeitig ergibt sich je nach Fahrzeugnutzungsprofil sowohl in 2020 als auch in 2030 die weitere anteilige Nutzung von Kraftstoffen auf längeren Fahrten in hybriden Fahrzeugen mit Plug-in-Option als ökologisch optimal.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Inhaltsverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	VIII
Nomenklatur.....	IX
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation der Arbeit.....	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit.....	2
1.3 Struktur der Arbeit.....	5
2 Methodische Grundlagen.....	7
2.1 Beschreibung der Fahrweise durch repräsentative Fahrzyklen	7
2.1.1 Übersicht von Verfahren der Fahrzyklensynthese	8
2.1.2 Markov-Ketten-Verfahren	10
2.1.3 Bewertung der Güte von synthetischen Fahrzyklen	13
2.2 Stellvertreterfahrzeuge in der ökologischen Bewertung von Antriebskonzepten.....	14
2.3 Modellbasierte Auslegung von Fahrzeugantrieben.....	16
3 Erfassung der relevanten Betriebs- und Umgebungsdaten.....	19
3.1 Versuchsfahrzeug und Datenaufzeichnung	19
3.2 Rekonstruktion der Straßensteigung	21
3.3 Klassifizierung der Fahrdistanzen.....	23
3.4 Außentemperatur.....	29
4 Fahrzeugsimulationsmodell	32
4.1 Simulationsanforderungen und Modelltyp.....	32
4.2 Fahrwiderstände	34
4.3 Generische Topologie.....	37
4.4 Erfüllung der Traktionsanforderungen durch die Antriebsmaschinen.....	39
4.5 Auslegungsanforderungen.....	43
4.6 Modellierung der Antriebskomponenten	45
4.6.1 Elektrische Maschine und Leistungselektronik	45
4.6.2 Verbrennungsmotor.....	48
4.6.3 Brennstoffzellensystem.....	50
4.6.4 Getriebe.....	51

4.6.5	Batterie	57
4.6.6	Kraftstofftanks	61
4.7	Betriebsstrategie	65
4.7.1	Betriebsstrategie zur Erfüllung der Traktionsanforderungen.....	65
4.7.2	Elektrische Betriebsstrategie der FCEV-Konzepte	68
4.7.3	Betriebsverhalten im Vergleich von Fahrten geringer und hoher Distanz	69
4.8	Modellierung der Nebenverbraucher	71
4.9	Verbrauchsermittlung anhand beispielhafter Fahrzeugsimulationen	74
4.9.1	Konventionelles Fahrzeug	76
4.9.2	Batterieelektrisches Fahrzeug	77
4.9.3	Plug-in-Hybridfahrzeug in P2-Topologie	81
4.9.4	Brennstoffzellenfahrzeug.....	84
4.9.5	DHT-Antriebskonzept „TDT4LR“	86
5	Synthese repräsentativer Fahrzyklen und Validierung der Nutzbarkeit	91
5.1	Grundlagen des Validierungsprozesses	91
5.2	Hybrides Zyklensyntheseverfahren	95
5.2.1	Umsetzung des Markov-Ketten-Verfahrens	96
5.2.2	Umsetzung des Segmentierungsverfahrens	98
5.3	Kriteriensatz zur Vorauswahl der Fahrzyklen.....	100
5.4	Ermittlungsfahrzeuge für den Verbrauchsabgleich.....	101
5.5	Validierungsergebnisse für die Realfahrdaten.....	103
5.5.1	Validierungsprozess am Beispiel des Gesamtfahrprofils des Poolfahrzeugs.....	103
5.5.2	Validierungsprozess am Beispiel des zweiten Teilfahrprofils des Poolfahrzeugs ...	112
5.6	Synthetische Fahrzyklen zur Abbildung des Nutzungsprofils des Poolfahrzeugs ...	114
5.7	Übersicht aller untersuchten Fahrzeugnutzungsprofile	117
6	Vorgehen zur Ermittlung des ökologischen Potentials von Antriebskonzepten	120
6.1	Modellierung der Treibhausgasemissionen	120
6.1.1	THG-Emissionen in der Produktionsphase.....	121
6.1.2	THG-Emissionen in der Nutzungsphase.....	125
6.1.3	THG-Emissionen in der Entsorgungsphase.....	128
6.2	Genetische Optimierung zur Identifikation des ökologischen Potentials	129
7	Ergebnisse der realfahrtbasierten Bewertung des ökologischen Potentials	133
7.1	Ökologisches Potential im Bezugsjahr 2020.....	133
7.1.1	Artemis MiD400-Profil im Bezugsjahr 2020.....	134
7.1.2	Nutzungsprofil des Poolfahrzeugs im Bezugsjahr 2020	142
7.1.3	WLTC-MiD100-Profil im Bezugsjahr 2020.....	148
7.1.4	Artemis-Highway-Profil im Bezugsjahr 2020	151

7.1.5	Sensitivitätsanalyse der Reichweitenforderungen für BEV.....	153
7.2	Ökologisches Potential im Bezugsjahr 2030.....	156
7.2.1	Artemis-MiD400-Profil im Bezugsjahr 2030	156
7.2.2	Nutzungsprofil des Poolfahrzeugs im Bezugsjahr 2030	159
7.2.3	WLTC-MiD100-Profil im Bezugsjahr 2030.....	162
7.2.4	Artemis-Highway-Profil im Bezugsjahr 2030	163
7.2.5	Sensitivitätsanalyse mit erhöhtem Anteil erneuerbarer Kraftstoffe für das Artemis-MiD400-Profil im Bezugsjahr 2030	164
7.3	Schlussbetrachtung der Ergebnisse des ökologischen Potentials.....	167
7.3.1	Übersicht der Ergebnisse in 2020 und 2030.....	168
7.3.2	Kritische Betrachtung der Ergebnisse	172
8	Zusammenfassung und Ausblick	175
Anhang A	Fahrzyklensynthese und Validierung der Nutzbarkeit	182
Anhang A1	Diskretisierung des Markov-Ketten-Verfahrens in der Literatur	182
Anhang A2	Parametrierungen der Ermittlungsfahrzeuge für den erweiterten Verbrauchsabgleich	183
Anhang B	Bewertung von THG-Emissionen	189
Anhang B1	Kraftstoffeigenschaften	189
Anhang B2	Rohstoffbasis von Bioethanol.....	190
Anhang C	Überprüfung der Konvergenz des genetischen Algorithmus.....	191
Anhang C1	Parametrierungen des BEV-2	191
Anhang C2	Parametrierungen des PHEV(P2)	192
Anhang D	Weiterführende Details der Ergebnisse	193
Anhang D1	Parametrierung de BEV-1 im Artemis-MiD400-Profil.....	193
Anhang D2	Poolfahrzeug-Profil im Bezugsjahr 2020	194
Anhang D3	Ergebnisse Artemis-Highway-Profil in 2020	194
	Literaturverzeichnis.....	197