

Schriftenreihe
des Instituts für
Fahrzeugtechnik
TU Braunschweig



Nr: 64

**M.Sc.
Hendrik Gronau
2020**

Synthese und Konzeptionierung elektrifizierter Antriebssysteme

Herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay

Synthese und Konzeptionierung elektrifizierter Antriebssysteme

Von der Fakultät für Maschinenbau

DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT
CAROLO-WILHELMINA ZU BRAUNSCHWEIG

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Hans-Hendrik Gronau
geb. Piechottka
aus: Dresden

eingereicht am: 22.01.2019

mündliche Prüfung am: 18.11.2019

Gutachter:

- Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükkay
- Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts
- Prof. Dr.-Ing. Jürgen Köhler

Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik
TU Braunschweig

Band 64

Hendrik Gronau

**Synthese und Konzeptionierung elektrifizierter
Antriebssysteme**

Shaker Verlag
Düren 2020

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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7271-6

ISSN 1619-6325

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

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Doktorand in der Abteilung Simulation Antrieb der Audi AG.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich direkt und indirekt unterstützt und somit zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay, Leiter des Instituts für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig. Durch seine hervorragende Betreuung und Leitung bot sich mir die Möglichkeit, diese wissenschaftliche Arbeit zum Thema *Synthese und Konzeptionierung elektrifizierter Antriebssysteme* zu erstellen. Durch seine fachlichen Anmerkungen und Diskussionen hat er meine Arbeit immer wieder bereichert. Mein Dank gilt ebenso Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts, Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität Braunschweig, für die Übernahme des Koreferats sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Jüren Köhler, Leiter des Instituts für Thermodynamik der Technischen Universität Braunschweig, für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuss.

Den Mitarbeitern des Instituts für Fahrzeugtechnik danke ich für die stets angenehme Arbeitsatmosphäre und den fachlichen Austausch bei meinen Besuchen in Braunschweig. Besonders hervorheben möchte ich die großartige Zusammenarbeit, die gemeinsamen Veröffentlichungen und die anregenden Diskussionen mit Axel Sturm, Mark Schudeleit und Andreas Lange.

Danken möchte ich auch meinen Vorgesetzten sowie allen Kollegen und Doktoranden der Abteilung Simulation Antrieb der Audi AG, die mich durch die gute Zusammenarbeit, die Beantwortung fachlicher Fragen, einen konstruktiven Meinungsaustausch sowie ihre Hilfsbereitschaft unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt dabei meinen Betreuern und Unterstützern seitens der Audi AG, Dr.-Ing. Sebastian Grams, Dr.-Ing. Albrecht Rothe, Tobias Schwarzmann, Rainer Misch, Frank Vollmer, Felix Kercher und Prof. Dr.-Ing. Michael Auerbach (aktuell Hochschule Esslingen, Fakultät Fahrzeugtechnik), die mir mit Anregungen und Ideen, fachlichem Wissen sowie als kompetente Diskussionspartner und Co-Autoren zur Seite standen.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, allen voran meiner Ehefrau Corinna Gronau und meinen Freunden, die mir durch ihre soziale Unterstützung den nötigen Rückhalt zum Anfertigen dieser Arbeit gegeben haben.

Ich widme diese Arbeit meiner Tochter:

Leonora Felicia

* 05.08.2018

Wer eine Synthese recht prägnant in sich fühlt, der hat eigentlich das Recht zu analysieren, weil er am äußeren Einzelnen sein inneres Ganzes prüft und legitimiert.

Johann Wolfgang von Goethe, *Dichtung und Wahrheit* IV, 19. Buch, Bd. 24, S. 283

Kurzfassung

Weltweit sinkende gesetzliche CO₂- und Emissionsobergrenzen haben zur Folge, dass die Optimierung konventioneller Antriebstechnologien nur noch begrenzt zur Reduktion der Flottenemissionen beitragen kann. Die Fahrzeughersteller reagieren darauf mit einer zunehmenden Elektrifizierung ihrer Antriebsportfolios, wobei der Elektrifizierungsgrad einzelner Fahrzeugantriebe stetig steigt. Mit der Erhöhung der elektrischen Leistung ergibt sich ein umfangreiches Lösungsfeld möglicher Technologien - von 48 V Mild-Hybriden bis hin zu rein elektrischen Konzepten. Zudem nimmt auch die Komplexität der Antriebsstränge proportional zum Elektrifizierungsgrad zu. Darüber hinaus ändern sich die marktspezifischen Mobilitätsansprüche und -gewohnheiten der Kunden. In der Folge wird das Lösungsfeld möglicher Antriebstechnologien multidimensional und zunehmend diffizil. Durch die Digitalisierung von Prozessen und Entwicklungsabläufen in Form von virtuellen Methoden und Werkzeugen soll die Komplexität besser beherrschbar werden.

Die beschriebene Entwicklung bildet die Grundlage für das Kooperationsprojekt „Zukunftskonzepte Powertrain“ der AUDI AG und dem Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig. Ziel ist es, eine virtuelle Entwicklungskette zu erarbeiten, die es dem Systemingenieur erlaubt, zukünftige, elektrifizierte Antriebsstränge für Premiumfahrzeuge zu konzeptionieren. Die virtuelle Entwicklungskette wird inkrementell aufgebaut und umfasst verschiedene Rechnerwerkzeuge, welche die Teilschritte zur Identifikation, Auslegung, Bewertung und Optimierung von elektrifizierten Antriebssträngen abbilden. Die Rechnerwerkzeuge reduzieren den sich wiederholenden Aufwand zur Konzeptfindung und unterstützen den Produktentstehungsprozess bereits in einer frühen Phase. Dieser methodische Ansatz trägt langfristig dazu bei, die Entwicklungszeit und -kosten zu reduzieren und gleichzeitig die Kunden- und Produktanforderungen zu erfüllen.

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst Grundlagen zu Antriebssystemen, insbesondere zu Hybridantrieben und deren Eigenschaften, erläutert. Zudem wird der Stand der Technik anhand einer Systematik am Markt erhältlicher Hybridfahrzeuge dargelegt sowie ein Überblick an Methoden zum Konzipieren und Bewerten technischer Systeme gegeben. Anschließend wird die entwickelte rechnergestützte Synthese neuer Antriebssysteme beschrieben. Anhand einiger synthetisierter Beispielantriebskonzepte wird die modulare Längsdynamik-Simulation vorgestellt. Sie erlaubt es, die Wertebereiche von technischen Kriterien zu quantifizieren. Kombiniert mit Kosten- und Massemodellen werden alle relevanten Kriterien für die anschließende Bewertung abgeleitet, simuliert und für jede untersuchte Topologie mit Daten hinterlegt. Damit erfolgt eine Bewertung bekannter und neuer Antriebssysteme hinsichtlich technischer, wirtschaftlicher und psychologischer Attribute.

Abstract

The ever more stringent global CO₂ and pollutant emission regulations imply that the optimization of conventional powertrains can only provide partial reductions in fleet emissions. Vehicle manufacturers are reacting with increasing electrification of their powertrain portfolios, resulting in higher levels of electrification of the powertrain units. The increasing demand for electric power leads to a comprehensive range of possible technologies - from 48V mild hybrids to pure electric concepts. The raising degree of electrification is accompanied by a proportional increase of powertrain complexity. Furthermore, the market-specific mobility requirements and interests of customers change. As a result, the range of possible powertrain technologies have become multidimensional and is growingly incomprehensible. However, complexity can be better managed through digitalization of development processes in the form of virtual methods and tools.

The described development forms the basis for further research with the aim of designing a virtual development process that allows the user to identify the most ideal future electrified powertrains for premium vehicles. The virtual development process is incrementally developed and includes various computer tools which represent the series of steps for identification, design and evaluation of electrified powertrains. The simulation-based process leads to an optimal design of the energy converters and storage units. The computer tools reduce the time and repetitive effort required to conceptualize and support the product creation process at an early stage. This methodological approach can help to reduce development time and costs while also meeting customer and product requirements.

In this dissertation, the basics of electrified powertrains, in particular hybrid powertrains and their properties, are explained. The state of the technology is based on current hybrid electric vehicles available on the market. Furthermore, an overview of methods for designing and evaluating technical systems is provided. Subsequently, the developed, computer-aided synthesis of new powertrain systems is described. Based on synthesized powertrain concepts, the modular longitudinal dynamics simulation environment is presented. It allows the value ranges of technical criteria to be quantified. Combined with cost and mass models, all relevant criteria for the subsequent evaluation are derived, simulated and stored with data for each examined topology. This results in an evaluation of known and new electrified powertrains in terms of technical, economic and psychological attributes.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	IX
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XV
1 Einführung	1
1.1 Zielsetzung der Arbeit	6
1.2 Aufbau der Arbeit	8
2 Stand der Technik	11
2.1 Elektrifizierte Antriebssysteme	11
2.1.1 Grad der Elektrifizierung	12
2.1.2 Struktur der Elektrifizierung	13
2.1.3 Systematik und Funktionsstruktur hybrider Antriebssysteme	20
2.2 Methodische Produktentwicklung	22
2.2.1 Konstruktionsmethodik	22
2.2.2 Widerspruchsorientierte Methodik	24
2.2.3 Bionische Methode	24
2.2.4 Auswirkungsanalyse	26
2.2.5 Technische Synthese und Abgrenzung zum Stand der Technik	27
2.3 Bewertungsverfahren	31
2.3.1 Prinzipieller Bewertungsprozess	32
2.3.2 Entscheidungssituationen	33
2.3.3 Multikriterielle Bewertungsverfahren	37
3 Anforderungsstruktur	43
3.1 Ermitteln und Präzisieren von Anforderungen	43
3.2 Hierarchisches Zielsystem	47

4 Methodik	63
4.1 Systemtechnik	65
4.2 Synthese elektrifizierter Antriebe	74
4.2.1 Komponenten katalog	77
4.2.2 Suchstrategien und Verträglichkeitsmatrix	79
4.3 Bewertung	84
4.3.1 Automatisierte Auslegung der Antriebsstrang-Modelle	85
4.3.2 Automatisierte Bewertung der synthetisierten Antriebsstränge	105
5 Anwendung	111
5.1 Fahrzeug, Anforderungen und Hybridfunktionen	111
5.2 Synthese	113
5.3 Dimensionierung der Schlüsselkomponenten	120
5.4 Adaptive Simulation	123
5.5 Automatisierte Bewertung und Konzeptentscheid	133
6 Zusammenfassung	143
6.1 Zusammenfassung	143
6.2 Ausblick	146
Literaturverzeichnis	149
A Anhang	A
B Anhang	E
C Anhang	G

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Zielkonflikt bei der Elektrifizierung des Antriebsstrangs	2
Abb. 1.2:	Merkmale des Produktentstehungsprozesses	5
Abb. 1.3:	Multidimensionaler Lösungsraum	7
Abb. 1.4:	Aufbau der Dissertation	9
Abb. 2.1:	Einbaulagen der EM in einem Parallel-Hybrid	15
Abb. 2.2:	Serielle Leistungsübertragung	16
Abb. 2.3:	Klassifizierung elektrisch leistungsverzweigter Getriebe	18
Abb. 2.4:	Elektrifizierungsgrad von Hybridfahrzeugen	19
Abb. 2.5:	Systematik hybrider Antriebssysteme	20
Abb. 2.6:	Ebene der Funktionsstruktur mit Beispiel-Topologie	21
Abb. 2.7:	Konzeptionierung	23
Abb. 2.8:	Fahrzeug nach dem Vorbild der Natur	25
Abb. 2.9:	FMEA-Vorgehensweise	26
Abb. 2.10:	Prinzipieller Bewertungsprozess	33
Abb. 2.11:	Merkmale von Bewertungsverfahren Teil 1	34
Abb. 2.12:	Merkmale von Bewertungsverfahren Teil 2	37
Abb. 3.1:	3F-Parameterraum	44
Abb. 3.2:	Leistungsbedarf der Nebenverbraucher in einem SUV	45
Abb. 3.3:	Min. Generatorleistung in [kW] für ein Mittelklassefahrzeug	46
Abb. 3.4:	Dokumentation der Anforderungen	47
Abb. 3.5:	Hierarchie der Bewertungskriterien	48
Abb. 3.6:	Korrelation zwischen Fahrzeuggewicht und -volumen	49
Abb. 3.7:	Anteil der Antriebskomponenten an den Kosten	50
Abb. 3.8:	Definition der EM-Kosten	52
Abb. 3.9:	Ermittlung des PFI bzw. ePFI	52
Abb. 3.10:	Auszug eines hierarchischen Zielsystems für elektrifizierte Antriebe	54
Abb. 3.11:	Konträre Seiten des Spektrums der Antriebsdominanz	55
Abb. 4.1:	Virtuelle Entwicklungskette	63
Abb. 4.2:	Das Antriebssystem und Beispiel-Subsysteme	65
Abb. 4.3:	Dekomposition des Antriebssystems in Komponenten und Bauteile	66
Abb. 4.4:	Antriebsarchitektur – Transformation der Funktionsstruktur zur Topologie .	67

Abb. 4.5:	Umfeldorientierte Betrachtung des Antriebs	68
Abb. 4.6:	Gleichgewicht längs- und vertikaldynamischer Kräfte	69
Abb. 4.7:	Bedarfskennfeld	73
Abb. 4.8:	Schematische Darstellung bekannter Hybridstrukturen	75
Abb. 4.9:	Black Boxen mit diversen farblich codierten Ein- und Ausgangsparametern	79
Abb. 4.10:	Theoretische Suchstrategie und praktische Umsetzung der Synthese	80
Abb. 4.11:	Beispielhafte Matrixdarstellung eines Power-Split-Antriebs	81
Abb. 4.12:	Interpolation von Verbrauchskennfeldern	85
Abb. 4.13:	Kraftschlussgrenze	87
Abb. 4.14:	„Auseinanderziehen“ und Nummerieren eines Minusgetriebes	89
Abb. 4.15:	Ergebnis der Gleichungssysteme (4.19) und (4.20) für einen Input-Split	91
Abb. 4.16:	Abhängigkeit der variablen Übersetzung i_{eCVT} vom Verhältnis der Leistungsverzweigung ε am Beispiel der Standübersetzung $i_0 = -3$	93
Abb. 4.17:	Abstrahierter Modellaufbau am Beispiel eines P2-Parallelhybrids	94
Abb. 4.18:	Adaptives Platzhaltermodell	95
Abb. 4.19:	Willans-Linien und absoluter Wirkungsgrad	98
Abb. 4.20:	Beispiel einer Lastpunktanhebung mit maximalem Wirkungsgrad	100
Abb. 4.21:	Darstellung der unterschiedlichen Betriebsmodi	102
Abb. 4.22:	Darstellung der unterschiedlichen Betriebsmodi	104
Abb. 4.23:	Verschiedene Zielwertfunktionen	108
Abb. 4.24:	Prinzip des zweistufigen Bewertungsverfahrens	110
Abb. 5.1:	Schematische Darstellung von drei seriennahen Hybridstrukturen	115
Abb. 5.2:	Ravigneaux-Satz in der Darstellung nach Stangl und Kutzbachplan	117
Abb. 5.3:	Schematische Darstellung von drei serienfernen Hybridstrukturen	118
Abb. 5.4:	Leistungsspektrum über unterschiedlichen Zulassungszyklen	120
Abb. 5.5:	Masse der Antriebsstrangkonzepte normiert auf den Parallel-Hybrid	124
Abb. 5.6:	Kosten der Antriebsstrangkonzepte normiert auf den Parallel-Hybrid	125
Abb. 5.7:	Gesamtwirkungsgrad, Drehzahl und -moment eines leistungsverzweigten Hybrids im NEFZ	126
Abb. 5.8:	Gesamtwirkungsgrad eines leistungsverzweigten Hybrids im NEFZ	128
Abb. 5.9:	Gesamtwirkungsgrad eines leistungsverzweigten Hybrids im Zyklus „Kasseler Berge“ mit 140 km/h und unterschiedlicher VKM-Leistung	129
Abb. 5.10:	Vergleich des Verhaltens von leistungsverzweigtem Hybrid und 4-Wellen-Hybrid im Autobahnzyklus mit maximal 165 km/h	131
Abb. 5.11:	Unterschiede der sechs Topologien im kombinierten Kraftstoff-Verbrauch basierend auf einem definierten Zyklusmix (normiert auf den P1,2 Hybrid)	132
Abb. 5.12:	VKM-Charakteristik des 4-Wellen-Hybrids und des leistungsverzweigten Hybrids bei konstant 140 km/h in den Kasseler Bergen	133
Abb. 5.13:	Gegenüberstellung der Wertzahlen der sechs Beispiel-Topologien	140

Abb. 5.14: Wichtung der Kriterien-Cluster	140
Abb. 5.15: Rangfolge der besten Erfüllung der sechs Beispiel-Topologien	141
Abb. C.1: Beispiel für das hierarchische Zielsystem mit drei Alternativen	G
Abb. C.2: Aggregation der Daten des Beispiel-Zielsystems	I

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1:	Verkürzter Auszug der elektrochemischen Spannungsreihe nach [Hol19, S. 19]	3
Tab. 2.1:	Konzeptionierung – iterative Zyklen in sechs Schritten	22
Tab. 3.1:	Preise für unterschiedliche Batteriesysteme	51
Tab. 3.2:	9-Punkteskala von Saaty für die Paarvergleiche	57
Tab. 4.1:	Symbole zur abstrakten Darstellung von Antriebskomponenten	74
Tab. 4.2:	Vergleich des Auslegungsergebnisses mit dem Lexus GS 450h	93
Tab. 5.1:	Technische Daten des Audi A4 Avant 2.0 TFSI ultra	112
Tab. 5.2:	Reduzierter Komponentenkatalog für die vorliegende Beispielbetrachtung	113
Tab. 5.3:	Auszug der Dimensionierung von Schlüsselkomponenten	122
Tab. 5.4:	Auszug des hierarchischen Zielsystems mit exemplarischen Kennparametern	134
Tab. 5.5:	Übersicht der Topologien und Zusammenfassung der Ergebnisse	138
Tab. A.1:	Anforderungsliste - Teil 1	A
Tab. A.2:	Anforderungsliste - Teil 2	B
Tab. A.3:	Anforderungsliste - Teil 3	C
Tab. A.4:	Anforderungsliste - Teil 4	D
Tab. C.1:	Maßzahlen der drei Beispiel-Varianten	H