

Frederik Weiß

Optimale Konzept- auslegung elektrifizierter Fahrzeugantriebsstränge

Eine computergestützte
Methodik zur Beschleunigung
des Auslegungsprozesses

AutoUni – Schriftenreihe

Band 122

Reihe herausgegeben von/Edited by
Volkswagen Aktiengesellschaft
AutoUni

Die Volkswagen AutoUni bietet Wissenschaftlern und Promovierenden des Volkswagen Konzerns die Möglichkeit, ihre Forschungsergebnisse in Form von Monographien und Dissertationen im Rahmen der „AutoUni Schriftenreihe“ kostenfrei zu veröffentlichen. Die AutoUni ist eine international tätige wissenschaftliche Einrichtung des Konzerns, die durch Forschung und Lehre aktuelles mobilitätsbezogenes Wissen auf Hochschulniveau erzeugt und vermittelt.

Die neun Institute der AutoUni decken das Fachwissen der unterschiedlichen Geschäftsbereiche ab, welches für den Erfolg des Volkswagen Konzerns unabdingbar ist. Im Fokus steht dabei die Schaffung und Verankerung von neuem Wissen und die Förderung des Wissensaustausches. Zusätzlich zu der fachlichen Weiterbildung und Vertiefung von Kompetenzen der Konzernangehörigen, fördert und unterstützt die AutoUni als Partner die Doktorandinnen und Doktoranden von Volkswagen auf ihrem Weg zu einer erfolgreichen Promotion durch vielfältige Angebote – die Veröffentlichung der Dissertationen ist eines davon. Über die Veröffentlichung in der AutoUni Schriftenreihe werden die Resultate nicht nur für alle Konzernangehörigen, sondern auch für die Öffentlichkeit zugänglich.

The Volkswagen AutoUni offers scientists and PhD students of the Volkswagen Group the opportunity to publish their scientific results as monographs or doctor's theses within the "AutoUni Schriftenreihe" free of cost. The AutoUni is an international scientific educational institution of the Volkswagen Group Academy, which produces and disseminates current mobility-related knowledge through its research and tailor-made further education courses. The AutoUni's nine institutes cover the expertise of the different business units, which is indispensable for the success of the Volkswagen Group. The focus lies on the creation, anchorage and transfer of new knowledge.

In addition to the professional expert training and the development of specialized skills and knowledge of the Volkswagen Group members, the AutoUni supports and accompanies the PhD students on their way to successful graduation through a variety of offerings. The publication of the doctor's theses is one of such offers. The publication within the AutoUni Schriftenreihe makes the results accessible to all Volkswagen Group members as well as to the public.

Reihe herausgegeben von/Edited by

Volkswagen Aktiengesellschaft

AutoUni

Brieffach 1231

D-38436 Wolfsburg

<http://www.autouni.de>

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/15136>

Frederik Weiß

Optimale Konzept- auslegung elektrifizierter Fahrzeugantriebsstränge

Eine computergestützte
Methodik zur Beschleunigung
des Auslegungsprozesses

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr.-Ing. Thomas von
Unwerth

 Springer

Frederik Weiß
Wolfsburg, Deutschland

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2017.

Einreichungstitel: „Methodik zur optimalen Konzeptauslegung elektrifizierter Fahrzeugantriebsstränge“

D93

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse der im Rahmen der AutoUni – Schriftenreihe veröffentlichten Doktorarbeiten sind allein die der Doktorandinnen und Doktoranden.

AutoUni – Schriftenreihe
ISBN 978-3-658-22096-9 ISBN 978-3-658-22097-6 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-22097-6>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Geleitwort

Frederik Weiß entwickelt im Rahmen seiner Dissertation eine Methodik zur optimalen Konzeptauslegung elektrifizierter Fahrzeugantriebsstränge. Der Fokus möglicher Optimierungsziele liegt dabei neben den Fahrleistungen auf den Herstellungskosten und dem Kraftstoff-/ Energieverbrauch bzw. der elektrischen Reichweite. In Anbetracht sinkender Schadstoffgrenzwerte und einer folglich immer stärkeren Elektrifizierung von Antrieben kommen sowohl dem betrachteten Antriebsportfolio als auch dem Ziel sinkender Kosten und steigender Reichweiten eine hohe praktische Bedeutung zu. Auch theoretisch sind die behandelten Optimierungs- und Modellierungsansätze von großer Relevanz. Insbesondere die Reichweitensteigerung durch geeignete Betriebsstrategien von Hybridfahrzeugen ist in der Literatur Gegenstand diverser Untersuchungen.

Der Forschungsbedarf ergibt sich aus der Variantenvielfalt alternativer Antriebskonzepte, wie z. B. den Parallelhybriden und Brennstoffzellenfahrzeugen sowie deren möglicher Auslegungen, die vom Vollhybriden bis zum Range-Extender reichen. Dem begegnet der Verfasser mit einem systematischen Entscheidungsprozess, der die Methodik auf eine allgemeingültige, wissenschaftlich begründete Basis stellt. Die Umsetzung erfolgt für eine Auswahl an Antriebsstrangarchitekturen, die ein breites Spektrum der elektrifizierten Antriebskonzepte abdecken. Es schließen sich Herleitungen und Umsetzungen von Modellierungsansätzen und Optimierungsalgorithmen an. Ein neu entwickelter Ansatz einer rechenzeitoptimierten Betriebsstrategie ermöglicht darüber hinaus den objektiven Vergleich unterschiedlicher Antriebskonzepte bezüglich des Kraftstoffverbrauchs.

Ein wesentlicher Beitrag der Arbeit ist die Beschreibung und Modellierung der Wechselwirkungen von Komponenteneigenschaften im Antriebsstrang. Dafür wird erstmals im Rahmen einer Antriebsstrangoptimierung das Zeitverhalten der elektrischen Antriebskomponenten abgebildet. Die beispielhafte Optimierung eines Mischhybriden zeigt auf, dass bereits in der frühen Entwicklungsphase Anforderungen an die Reproduzierbarkeit der Fahrleistungen berücksichtigt werden können. Bei der Antriebsstrangoptimierung eines Brennstoffzellenfahrzeugs stehen die wechselseitigen Einflüsse der Komponentenspannungen im Fokus. Hier wird u. a. deutlich, dass in diesem Fall ein batterieseitiger Gleichspannungswandler sinnvoll und aus Kostensicht für diesen Antrieb eine Auslegung als Plug-In Hybrid mit leistungsstarker Traktionsbatterie optimal ist. Damit trägt die vorliegende Arbeit zum Verständnis von Kosten und Nutzen unterschiedlicher Antriebsstrangauslegungen bei.

Insgesamt handelt es sich um eine richtungweisende Arbeit, die dem Ingenieur und Techniker als Basis und Orientierung für weiterführende Optimierungsansätze im Bereich der Fahrzeugantriebsentwicklung dienen mag. Ich wünsche dem Werk viele geneigte Leser, die mit Hilfe der hierin gewonnenen Erkenntnisse die Zukunft der Antriebstechnologien mitgestalten.

Prof. Dr.-Ing. Thomas von Unwerth

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Doktorand in der Abteilung Antriebssysteme der Konzernforschung der Volkswagen AG.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die durch ihre Unterstützung zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. T. von Unwerth, Leiter der Professur Alternative Fahrzeugantriebe der TU Chemnitz, für die Betreuung und Begutachtung der Dissertation sowie für die vielen Anregungen und Diskussionen. Weiterhin bedanke ich mich bei Professor Dr.-Ing. R. Mayer, Leiter der Professur Fahrzeugsystemdesign der TU Chemnitz, für die Übernahme der Rolle des Zweitgutachter.

Danken möchte ich auch meinen Vorgesetzten und allen Kollegen, Diplomanden und Praktikanten der Abteilung Antriebssysteme der Konzernforschung der Volkswagen AG, die mich durch die gute Zusammenarbeit, die Beantwortung fachlicher Fragen, einen konstruktiven Meinungsaustausch sowie ihre Hilfsbereitschaft unterstützt haben. Die Möglichkeit, sich auf kurzem Wege mit Experten zu allen Aspekten des Fahrzeugsantriebsstrangs austauschen zu können, hat wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Mein besonderer Dank gilt dabei meinen Betreuern seitens der Volkswagen AG, Dr.-Ing. Oliver Ludwig und Dr.-Ing. Hendrik Schröder, die mir mit zahlreichen Anregungen, Ideen und ihrem Wissen zur Seite standen. Insbesondere die vielen fachlichen Diskussionen waren in diesem Zusammenhang eine große Bereicherung für mich.

Meinen Eltern danke ich herzlich für die Förderung meiner Ausbildung und für den stets bedingungslosen Rückhalt.

Abschließend bedanke ich mich ganz besonders bei meiner Frau für die Unterstützung, das Verständnis und die vielen motivierenden Worte während der gesamten Promotionsdauer.

Frederik Weiß

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XVII
Abkürzungs- und Formelverzeichnis	XIX
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Ansätze in der Literatur	3
2.2 Handlungsbedarf und Zielsetzung	6
2.3 Einordnung in den Fahrzeugentwicklungsprozess	8
2.4 Aufbau der Arbeit	9
3 Grundlagen elektrifizierter Antriebsstränge	11
3.1 Architekturen	11
3.2 Komponenten	13
3.3 Betriebsstrategie	21
4 Methodisches Vorgehen	23
4.1 Systematischer Entscheidungsprozess	23
4.1.1 Allgemeingültigkeit	24
4.1.2 Problemformulierung	24
4.1.3 Auslegungskriterien und Randbedingungen	25
4.1.4 Architekturen und Variationsparameter	27
4.1.5 Auswahl und Bewertung der Antriebsstrangkonfigurationen	29
4.2 Gewählte Methodik	31
4.2.1 Ablaufplan	31
4.2.2 Bedarfskennfeld zur Eingrenzung des Suchraums	34
4.2.3 Synthese des Antriebsstrangs	37
5 Ermittlung der Auslegungskriterien und Randbedingungen	43
5.1 Modellierungstiefe	43
5.2 Modellierung des Antriebsstrangs	44
5.2.1 Statische und dynamische Simulation	44
5.2.2 Modulare Simulationsumgebung	45
5.2.3 Berechnung der Fahrleistungen	51
5.2.4 Fahrscenarien	53
5.3 Modellierung und Skalierung der Antriebsstrangkomponenten	54
5.3.1 E-Maschine und Inverter	56
5.3.2 Getriebe	59
5.3.3 Traktionsbatterie	63
5.3.4 Brennstoffzellensystem	67
5.3.5 Verbrennungsmotor	70
5.3.6 Kupplung	73

5.3.7	Gleichspannungswandler	74
5.4	Reproduzierbarkeit der Fahrleistungen	77
5.5	Kostenmodelle	80
5.6	Ergebnisgüte der Simulationsmodelle	80
5.6.1	Vergleich Messung und quasi-statische Kennfeldsimulation	80
5.6.2	Vergleich Vorwärts- und Rückwärtssimulation	81
6	Betriebsstrategie	85
6.1	Eignung existierender Betriebsstrategien	86
6.2	Entwicklung einer allgemeingültigen regelbasierten Strategie	90
6.3	Schaltstrategie	102
6.4	Ergebnisgüte der entwickelten regelbasierten Strategie	104
7	Optimierung des Antriebsstrangs	109
7.1	Grundlagen der statischen Optimierung	109
7.2	Ansätze zur Verringerung des Berechnungsaufwands	111
7.3	Optimierungsalgorithmus	113
7.3.1	Anforderungen	113
7.3.2	Auswahl eines geeigneten Optimierungsalgorithmus	114
7.3.3	Allgemeiner Ablauf Genetischer Algorithmen	116
7.3.4	Ausgewähltes Verfahren	118
7.4	Einstellungen der genetischen Operatoren	121
8	Anwendung und Diskussion der Methodik	127
8.1	Validierung	127
8.1.1	Fahrleistung und Verbrauch	127
8.1.2	Optimale Komponenteneigenschaften	129
8.2	Anwendung 1: Brennstoffzellenfahrzeug als Vollhybrid	132
8.2.1	Problemstellung	132
8.2.2	Analyse der Ergebnisse	136
8.2.3	Sensitivitätsanalyse	141
8.2.4	Diskussion der Ergebnisse	146
8.3	Anwendung 2: Plug-In Mischhybrid	148
8.3.1	Problemstellung	148
8.3.2	Analyse der Ergebnisse	153
8.3.3	Diskussion der Ergebnisse	159
9	Zusammenfassung und Ausblick	163
	Literaturverzeichnis	167
A	Systematische Literaturrecherche	177
B	Simulationsumgebung	181
B.1	Referenz-Simulationsumgebung	181
B.2	Fahrzyklen	181
B.3	Komponentenmodellierung	182

B.4	Simulationsdaten	183
B.4.1	Fahrzeugdaten Optimierungseinstellungen	183
B.4.2	Komponenteneigenschaften Anwendung Brennstoffzellenfahrzeug	184
B.4.3	Komponentendaten Anwendung Mischhybrid	185
C	Optimaler Betrieb mit Dynamic Programming	187
C.1	Definition der Problemstellung	187
C.2	Algorithmus	188
C.3	Vorgehensweise	189
C.4	Anbindung an die Antriebsstrangsimulation	191

Abbildungsverzeichnis

2.1	Einordnung in den Fahrzeugentwicklungsprozess, in Anlehnung an [16]	8
3.1	Basisarchitekturen hybrider Antriebsstränge	11
3.2	Schematische Darstellung typischer Drehmoment- (links) und Leistungskennlinien (rechts) verschiedener Verbrennungsmotorvarianten	14
3.3	Schematische Darstellungen der Dauer- und Peakleistung (links, in Anlehnung an [16]) sowie des Einflusses der Traktionsnetzspannung auf das maximale Drehmoment (rechts) einer elektrische Maschine (EM)	15
3.4	Funktionsweise und Aufbau einer Brennstoffzelle (links), Spannungskennlinie einer typischen Niedertemperatur-Polymerelektrolytmembran (NT-PEM) Brennstoffzelle (rechts)	18
3.5	Brennstoffzellensystem mit den wichtigsten Nebenaggregaten	19
3.6	Steuerungsarchitektur des Antriebsstrangs am Beispiel des Parallelhybriden	22
4.1	Auslegungskriterien der Fahrzeugentwicklung nach Küçükay [82]	25
4.2	Ausgewählte Antriebsstrangarchitekturen	28
4.3	Nutzwert-Kosten-Diagramm nach [112]	30
4.4	Lineare Straffunktion als Wertfunktionstyp (links), Gewichtung der Zielgrößen in Anlehnung an [145] (rechts)	31
4.5	Gesamtablaufplan der Optimierungsmethodik	32
4.6	Vorgehensweise zur Ermittlung der antriebsunabhängigen Mindestanforderungen	35
4.7	Ablaufplan eines Optimierungsdurchlaufs	37
4.8	Abhängigkeit der Spannungslage der Traktionsbatterie	38
4.9	Allgemeine Darstellung des elektrischen Antriebsstrangs	40
5.1	Prinzip der vorwärts- und rückwärtsbasierten Antriebsstrangsimulation	45
5.2	Modulare Unterteilung der quasi-statischen Längsdynamiksimulation	47
5.3	Fahrwiderstände am freigeschnittenen Fahrzeug (vgl. [16])	47
5.4	Modulare Struktur der entwickelten Simulationsumgebung mit einer Beispielkonfiguration als Hybridfahrzeug (HEV) und den Schnittstellengrößen der Rückwärtssimulation	50
5.5	Zugkraftangebot und Fahrwiderstände zur Ermittlung der Höchstgeschwindigkeit am Beispiel eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor und 7-Gang-Getriebe	52
5.6	Qualitativer Verlauf eines Grenzfahrprofils	54
5.7	Schnittstellengrößen des EM-Modells	57
5.8	Skalierung der aktiven Länge [48] (leicht modifiziert)	58
5.9	Resultierendes Wirkungsgradkennfeld einer Permanenterrgte Synchronmaschine (PSM)-Ausprägung bei Verringerung der Leistung um 30 %	59
5.10	Schnittstellengrößen des Getriebemodells	59
5.11	Verlustmomentkennfeld eines Getriebes für den 2. Gang: Referenz (links), Modellfunktion (mittig), prozentuale Abweichung (rechts)	61
5.12	Verlustkennfeld eines Getriebes für den 2. Gang nach Verringerung der Übersetzung (links) und das Differenzkennfeld (rechts)	62
5.13	Schnittstellengrößen des Batteriemodells	63
5.14	Von der Zelle zum Batteriesystem	63

5.15	Ersatzschaltbild zur Modellierung einer Batteriezelle, in Anlehnung an [58]	64
5.16	Spannungskennfelder zweier Verschaltungen mit zwei bzw. drei parallelen Strängen und identischem Energieinhalt	65
5.17	Mögliche Zellverschaltungen bei definiertem zulässigen Spannungsbereich eines beispielhaften Batteriesystems	66
5.18	Schnittstellengrößen des Brennstoffzellensystemmodells	67
5.19	Skalierung der Verdichterleistung (links); Stapel, Verdichter und Systemleistung (mittig); Wirkungsgradverlauf (rechts)	69
5.20	Schnittstellengrößen des Verbrennungsmotormodells	70
5.21	Einfluss der Aufladung auf Leistung und Betriebsbereich des Motors (links) [57], Begrenzungen des maximalen effektiven Mitteldrucks (rechts) [57]	71
5.22	be-Kennfeld des Referenzmotors (links) und des skalierten Motors (rechts)	73
5.23	Schnittstellengrößen des Kupplungsmodells	73
5.24	Ein- und Ausgangsgrößen des Gleichspannungswandlermodells	74
5.25	Mit der Modellgleichung 5.33 berechnete Wirkungsgradverläufe eines Hochsetzstellers über der Eingangsleistung	76
5.26	Leistungsfluss (links) und Erwärmungskurve (rechts) exemplarisch für die EM	78
5.27	Thermisches Modell (links), Abhängigkeit des Kühlungswärmestroms von der in der Komponente gespeicherten Wärmemenge (rechts)	79
5.28	Vergleich von Messung und quasi-statischer Simulation anhand des Kraftstoffvolumenstroms eines Dieselmotors	81
5.29	Vergleich der für die Optimierungsmethodik erstellten Rückwärtssimulation mit einer Vorwärtssimulation	82
6.1	Klassifizierung von Betriebsstrategien in Anlehnung an [32]	86
6.2	Verallgemeinerter Energiefluss der betrachteten hybriden Antriebsstränge	91
6.3	Veranschaulichung der möglichen Leistungsaufteilung zwischen den Quellen	92
6.4	Exemplarisches Lastprofil für ein Hybridfahrzeug bestehend aus einer Phase mit niedriger und einer mit hoher Lastanforderung, die a) im Lastfolgebetrieb und b) mit Lastpunktverschiebung erfüllt wird	92
6.5	Energieflussdiagramme für b ₀) Lastpunktanhebung und b ₁) Lastpunktabsenkung	93
6.6	Leistungsverlauf und Energiefluss für den Sonderfall der maximalen Lastpunktabsenkung zum rein elektrischen Fahren	95
6.7	Exemplarische Wirkungsgradkennfelder des Brennstoffzellensystems (links) und der Traktionsbatterie (rechts)	97
6.8	Einsparung durch Lastpunktanhebung in Abhängigkeit der Brennstoffzellenleistung bei einer Leistungsanforderung von 2kW	98
6.9	Einsparung durch Lastpunktabsenkung in Abhängigkeit der Brennstoffzellenleistung bei einer Leistungsanforderung von 47kW	99
6.10	Einsparungskennfeld und optimale Steuerungskennlinien in Abhängigkeit der Leistungsanforderung	99
6.11	Adaptives Anpassen der Kennlinie zur Steuerung des Ladezustands (links) und der aus der Kennlinie resultierende Betriebsbereich des Brennstoffzellensystem (BZS) (rechts)	100
6.12	Ablauf der regelbasierten Schaltstrategie am Beispiel eines Parallelhybriden mit Verbrennungsmotor und E-Maschine als Drehmomentquellen	103

6.13	Vergleich der regelbasierten (ROLV) mit einer optimalen Betriebsstrategie (DP): links Applikation der ROLV-Kennlinie, rechts Verteilung der Betriebspunkte im Ladungserhaltung (CS)-Betrieb des Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (WLTC)	104
6.14	Häufigkeitsverteilung der Betriebspunkte des Brennstoffzellensystems im WLTC mit der regelbasierten (ROLV) und der optimalen Betriebsstrategie (DP)	105
6.15	Vergleich der entwickelten regelbasierten (ROLV) mit einer optimalen Betriebsstrategie (DP) im CS-Betrieb des WLTC: Zeitliche Verläufe	106
7.1	Allgemeine Darstellung einer Pareto-Front	110
7.2	Direkte Optimierung der Zielfunktion (links), Erstellung und anschließende Optimierung des Metamodells (rechts)	111
7.3	Darstellung lokaler und globaler Extrema in einem beispielhaftem Lösungsraum [138]	114
7.4	Kategorisierung globaler Optimierungsalgorithmen nach Weise [138]	115
7.5	Allgemeiner Ablauf eines Genetischen Algorithmus in Anlehnung an [122, 138]	116
7.6	Einige Grundbegriffe der Genetischen Algorithmen und die entsprechenden Bezeichnungen innerhalb der Methodik	117
7.7	Ermittlung des Rangs und der Crowding Distance (CDT) einzelner Individuen einer Population nach dem Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)	119
7.8	Zulässiger Bereich der Kinder bei der Rekombination eines Elternpaares nach dem Blend Crossover (BLX- α) Verfahren, in Anlehnung an [122]	120
7.9	Berechnung des Hypervolumens einer Pareto-Front zur Bewertung der Ergebnisgüte	122
7.10	Untersuchung der Güte von Optimierungsergebnissen in Abhängigkeit der Turniergröße und Mutationswahrscheinlichkeit eines Genetischen Algorithmus	123
7.11	Untersuchung der Güte von Optimierungsergebnissen in Abhängigkeit der Mutations- und Rekombinationswahrscheinlichkeit eines Genetischen Algorithmus	124
7.12	Untersuchung der Güte von Optimierungsergebnissen in Abhängigkeit der Mutationsmethode eines Genetischen Algorithmus (links); Vergleich der identifizierten Einstellungen mit den Referenzeinstellungen (rechts)	125
8.1	Höchstgeschwindigkeit vom Volkswagen e-Golf und BMW i3 nach Simulation und Katalog	128
8.2	Elektrischer Verbrauch und Beschleunigungszeit vom Volkswagen e-Golf und BMW i3 nach Simulation und Katalog	129
8.3	Optimierungsergebnis Jetta Hybrid (links), Vergleich ermittelter und in Serie verwendeter Komponenteneigenschaften (links)	131
8.4	Kraftstoffverbräuche der betrachteten Vollhybride	132
8.5	Wertefunktionen für die Auslegungskriterien Beschleunigungszeit (links) und Wasserstoffverbrauch im Zyklus bzw. Konstantfahrt (rechts)	134
8.6	Gewichtung der Auslegungskriterien	134
8.7	Wirkungsgradkennlinien der BZS-Varianten (links), Leistungscharakteristik der EM (rechts)	135
8.8	Pareto-optimale Antriebsstrangkonfigurationen	136
8.9	Komponententechnologien der optimalen Antriebsstrangkonfigurationen	137
8.10	FCEV Konfiguration 1: Minimale Kosten	138
8.11	Lastpunktverteilung im NEFZ (Konfiguration 1: Minimale Kosten)	139

8.12	FCEV Konfiguration 2: Hoher Nutzwert	140
8.13	Komponententechnologien der optimalen Antriebsstrangkonfigurationen bei verringerten BZS-Kosten von 160 €/kW auf 75 €/kW	142
8.14	Lastpunktverteilungen unterschiedlicher BZS-Varianten im Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ)	143
8.15	Komponententechnologien der optimalen Antriebsstrangkonfigurationen (Verbrauchszyklus WLTC)	144
8.16	Bewertung der optimalen Antriebsstrangkonfigurationen im WLTC: links mit ursprünglicher Funktion für den NEFZ, rechts mit angepasster Funktion für den WLTC	145
8.17	Leistungsfreigabe des parallel-seriellen Hybrids.	153
8.18	Pareto-optimale Antriebsstrangkonfigurationen	153
8.19	Ausgewählte Komponenteneigenschaften der pareto-optimale Antriebsstrangkonfigurationen	154
8.20	Pareto-optimale Antriebsstrangkonfiguration mit minimalen Kosten (ohne Einhaltung der Randbedingung an die Reproduzierbarkeit der Fahrleistungen)	155
8.21	Simulation des Grenzfahrprofils mit der kostenminimalen pareto-optimale Antriebsstrangkonfiguration	157
8.22	Mechanische Leistungsfreigabe über der Geschwindigkeit der unterschiedlichen optimalen Antriebsstrangkonfigurationen	158
B.1	Geschwindigkeitsverlauf (links) und Histogramme zur Geschwindigkeits- (mittig) und Beschleunigungsverteilung (rechts) vom Federal Test Procedure 72 (FTP-72) und NEFZ	181
B.2	Geschwindigkeitsverlauf (links) und Histogramme zur Geschwindigkeits- (mittig) und Beschleunigungsverteilung (rechts) vom WLTC und Kundenzyklus	182
B.3	Beispielhafter Wirkungsgradverlauf eines Gleichspannungswandlers für die Anwendung in einem Brennstoffzellenfahrzeug in Abhängigkeit des Stroms und der Anzahl versetzt getakteter Zweige N_{SC} [53]	182
C.1	Optimale Zustandstrajektorie x^* eines dynamischen Optimierungsproblems am Beispiel des Ladezustand (SOC)-neutralen Betriebs eines Hybridfahrzeugs	188
C.2	Veranschaulichung des Optimalitätsprinzips nach R.E. Bellman [98]	188
C.3	Ermittlung der minimalen Kosten durch Variation der Steuerung u	190
C.4	Ablaufplan der Dynamische Programmierung (DP) Berechnung	191
C.5	Schnittstellen zwischen DP-Algorithmus und Antriebsstrangsimulation	192

Tabellenverzeichnis

4.1	Auslegungskriterien der Antriebsstrangoptimierung	26
4.2	Randbedingungen der Antriebsstrangoptimierung	26
4.3	Variationsparameter der Antriebsstrangoptimierung	29
4.4	Zusätzliche Variationsparameter der Antriebsstrangoptimierung	39
5.1	Zur Bedatung des Fahrzeugmodells erforderliche Parameter	49
5.2	Kenndaten der betrachteten Verbrauchszyklen	53
5.3	Wachstumsgesetze und angewandte Skalierungsmethoden für E-Maschinen in der Literatur	57
5.4	Verlustarten und Abhängigkeiten im Fahrzeuggetriebe nach [10]	60
5.5	Skalierung des Gewichts einzelner Komponenten des Batteriesystems	66
5.6	Einfluss der Skalierung des Brennstoffzellenstapels durch Variation der Zellanzahl und Änderung der aktiven Fläche	68
5.7	Einfluss der Hubraumskalierung auf Reibmoment und Reibmitteldruck	72
5.8	Spezifische Kosten der Antriebsstrangkomponenten	80
5.9	Verbrauchsunterschiede eines Elektrofahrzeugs zwischen Rückwärts- und Vorwärts-simulation	82
6.1	Erfüllung der Anforderungen unterschiedlicher Betriebsstrategien	90
6.2	Möglichkeiten zur Adaption der Steuerungskennlinie	101
6.3	Vergleich der entwickelten regelbasierten mit einer optimalen Betriebsstrategie im CS-Betrieb	106
6.4	Vergleich der entwickelten regelbasierten mit einer optimalen Betriebsstrategie im Entladung (CD)-Betrieb	107
7.1	Referenzeinstellungen genetischer Operatoren nach Moses [93]	121
7.2	Identifizierte zielführende Optimierungseinstellungen	125
8.1	Fahrzeugdaten des Volkswagen e-Golf und BMW i3 [136, 60, 103, 12, 91]	128
8.2	Fahrzeugdaten untersuchter Vollhybride [95, 15, 5, 80, 143]	130
8.3	Fahrzeugdaten, Auslegungskriterien, Randbedingungen	133
8.4	Variationsparameter für die Optimierung des Brennstoffzellenfahrzeugs	136
8.5	Vergleich optimaler Antriebsstrangkonfigurationen bei unterschiedlichen BZS-Kosten	143
8.6	Fahrzeugdaten, Auslegungskriterien, Randbedingungen	150
8.7	Variationsparameter für die Optimierung des parallel-seriellen Hybriden	151
8.8	Optimale Parameter der Antriebsstrangkonfigurationen mit minimalen Kosten ohne (1) und mit (2&3) Berücksichtigung der Anforderung an die Reproduzierbarkeit der Fahrleistungen	157
8.9	Fahrzeugeigenschaften der Antriebsstrangkonfigurationen mit minimalen Kosten ohne (1) und mit (2&3) Berücksichtigung der Anforderung an die Reproduzierbarkeit der Fahrleistungen	159
A.1	Für die Literaturrecherche verwendete Datenbanken	179
B.1	Fahrzeugdaten für die Ermittlung passender Einstellungen für die genetischen Operatoren	183

B.2 Komponenteneigenschaften Anwendung Brennstoffzellenfahrzeug	184
B.3 Komponenteneigenschaften Anwendung Mischhybrid	185

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Formelzeichen

E	Energie	[J, kWh]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
i	Übersetzung	[-]
I	Strom	[A]
l	Länge	[m]
M	Drehmoment	[Nm]
m	Masse	[kg]
n	Drehzahl	[1/min]
P	Leistung	[W, kW]
r	Radius	[m]
SOC	Ladezustand der Traktionsbatterie (bezogen auf den nutzbaren Energieinhalt)	[%]
t	Zeit	[s]
U	Spannung	[V]
v	Geschwindigkeit	[m/s]
η	Wirkungsgrad	[%]
μ	Reibkoeffizient	[-]
ω	Winkelgeschwindigkeit	[rad/s]

Abkürzungen

ABS	Antiblockiersystem
ADVISOR	Advanced Vehicle Simulator
ASG	Airbag-Steuergerät
ASM	Asynchronmaschine
ASR	Antriebsschlupfregelung
BEV	Elektrofahrzeug
BLX-α	Blend Crossover
BMS	Batteriemanagementsystem
BP	Bremspedal
BSG	Bremsensteuergerät
BS	Betriebsstrategie
BZS	Brennstoffzellensystem
BZ	Brennstoffzelle
CAN	Controller Area Network

CDT	Crowding Distance
CD	Entladung, Abk. aus engl.: Charge Depleting
CS	Ladungserhaltung, Abk. aus engl.: Charge Sustaining
CVT	Stufenloses Getriebe, Abk. aus engl.: Continuously Variable Transmission
DIRECT	Dividing Rectangles
DP	Dynamische Programmierung, Abk. aus engl.: Dynamic Programming
DoE	Statistische Versuchsplanung, Abk. aus engl.: Design of Experiments
ECMS	Äquivalenzverbrauch-Minimierungsstrategie, Abk. aus engl.: Equivalent Consumption Minimization Strategy
EM	elektrische Maschine
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeug, Abk. aus engl.: Fuel Cell Electric Vehicle
FP	Fahrpedal
FTP-72	Federal Test Procedure 72
GA	Genetische Algorithmen
GDL	Gasdiffusionsschicht, Abk. aus engl.: Gas Diffusion Layer
HEV	Hybridfahrzeug, Abk. aus engl.: Hybrid Electric Vehicle
HMI	Mensch-Maschine-Schnittstelle, Abk. aus engl.: Human Machine Interface
IGBT	Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode, Abk. aus engl.: Insulated Gate Bipolar-Transistor
KNN	Künstliche Neuronale Netze
LE	Leistungselektronik
LP+	Lastpunktanhebung
LP-	Lastpunktabsenkung
Li-Ion	Lithium-Ionen
MSG	Motorsteuerggerät
MW	Mutationswahrscheinlichkeit
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
NV	Nebenverbraucher
PCU	Antriebssteuerggerät, Abk. aus engl.: Powertrain Control Unit
NT-PEM	Niedertemperatur-Polymerelektrolytmembran
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
PMP	Pontryaginsches Minimumprinzip, Abk. aus engl.: Pontryagin's Minimum Principle

PQ	Primäre Quelle
PSAT	Powertrain Systems Analysis Toolkit
PSM	Permanenterregte Synchronmaschine
PSO	Schwarmoptimierung, Abk. aus engl.: Particle Swarm Optimization
RBFNN	Radial Basis Function Neural Network Method
ROLV	Regeln zur Optimalen Lastpunktverschiebung
RQ	Reversible Quelle
RW	Rekombinationswahrscheinlichkeit
SA	Simuliertes Abkühlen, Abk. aus engl.: Simulated Annealing
SM	Synchronmaschine
SOC	Ladezustand, Abk. aus engl.: State of Charge
SOP	Start of Production
TCU	Getriebesteuergerät, Abk. aus engl.: Transmission Control Unit
TG	Turniergröße
VM	Verbrennungsmotor
WLTC	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedures

Indizes

Um eine Dopplung zu vermeiden, werden im Folgenden die Indizes ausgelassen, die auch als Abkürzung verwendet werden.

∅	Durchschnitt
Antr	Antriebsstrang
B	Beschleunigung
BM	Bemessungsgröße
chem	chemisch
Dauer	dauerhaft
eff	effektiv
el	elektrisch
Erf	erforderlich
F	Fluid
Fix	konstant, fixiert
Fzg	Fahrzeug
ges	gesamt
HA	Hinterachse
i	Zählvariable / innen / indiziert
KP	Ankopplung
Komp	Komponente
Kpp	Kupplung

Kr	Kraftstoff
L	Luft
Max	Maximum
Min	Minimum
Nenn	Nenngröße, z. B. Nennleistung
oA	ohne Antriebskomponenten
OCV	Leerlauf
p	parallel
Peak	kurzzeitig, Spitzenwert
Rad	Größe am Rad
Ref	Referenz
Rev	reversibel
Ro	Roll
rot	rotatorisch
S	Schwerpunkt
s	seriell
Soll	Sollgröße
Spez	spezifisch
St	Steigung
Sys	System
TN	Traktionsnetz
trans	translatorisch
VA	Vorderachse
Verl	Verlust
W	Wand



1 Einleitung

Die politischen und gesellschaftlichen Forderungen nach einer immer stärkeren Reduzierung der Schadstoffemissionen und insbesondere des CO₂-Ausstoßes von Kraftfahrzeugen nehmen weltweit zu. Beispielsweise fordert die Europäische Union, die durchschnittlichen CO₂-Emissionen der Fahrzeugflotten der Automobilhersteller bis zum Jahr 2020 auf 95 g/km zu senken [41]. Ähnliche Gesetze wurden auch in anderen wichtigen Automobilmärkten, wie den USA, China und Japan beschlossen [39, 104]. Bis zum Jahr 2025 und darüber hinaus wird in der Europäischen Union eine weitere deutliche Verschärfung der Grenzwerte diskutiert [39]. Elektrifizierte Antriebe bieten das Potenzial, Emissionen und (Kraftstoff-)Verbrauch zu senken oder gänzlich zu vermeiden und darüber hinaus einen Kundenmehrwert hinsichtlich Fahrleistung und Fahrkosten zu generieren. Hybrid- und Elektrofahrzeuge sind daher bereits heute fester Bestandteil des Produktportfolios der großen Automobilhersteller. Im Hinblick auf die geplanten CO₂-Grenzwerte wird deren Anteil voraussichtlich in Zukunft nochmals deutlich zunehmen.

Die aktuell verfügbaren elektrifizierten Antriebe umfassen eine große Bandbreite unterschiedlicher Ausprägungen hinsichtlich der Architektur und des Elektrifizierungsgrads. Die Architekturen reichen beispielsweise von Parallelhybriden, die im Wesentlichen eine Erweiterung konventioneller Antriebe mit Verbrennungsmotor darstellen, über Fahrzeuge mit leistungsverzweigten Hybridgetrieben bis zu den Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeugen. Bei den beiden Letztgenannten wird vollständig auf einen Verbrennungsmotor verzichtet. Hinsichtlich des Elektrifizierungsgrads wird bei den stärker elektrifizierten Hybridfahrzeugen zwischen Voll- und Plug-In Hybriden unterschieden. Beide bieten die gesamte Bandbreite der Hybridfunktionen, wobei nur mit den extern aufladbaren Plug-In Hybriden über längere Strecken und größere Geschwindigkeiten rein elektrisch gefahren werden kann. Diese Vielfalt zeigt, dass das geeignete Antriebskonzept von diversen Faktoren abhängig ist: u. a. von den Auslegungszielen hinsichtlich Fahrleistung, Emissionen und Kosten sowie der Strategie und den verfügbaren Komponenten eines Herstellers. Vor dem Hintergrund der sich kontinuierlich weiterentwickelnden Technologien ist es notwendig, regelmäßige Neubewertungen der unterschiedlichen Konzepte durchzuführen.

Durch die zusätzlichen Freiheitsgrade bei der Auslegung hybrider Antriebsstränge ergibt sich im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen eine deutlich höhere Anzahl möglicher Antriebskonzepte und -dimensionierungen. Darüber hinaus existiert eine starke wechselseitige Beeinflussung der verschiedenen Antriebskomponenten, sodass die isolierte Betrachtung jeder einzelnen Komponente nicht zielführend ist. Eine umfassende Suche nach dem für den jeweiligen Anwendungsfall optimalen Gesamtsystem kann daher nur mit Hilfe systematischer computergestützter Methoden erfolgen. Mit dem Ziel immer kürzerer Entwicklungszeiten ist eine möglichst frühe Konzeptbewertung unter Berücksichtigung vieler Einflüsse und Randbedingungen anzustreben.

In dieser Arbeit wird eine simulationsgestützte Methodik zur Identifikation optimaler Antriebsstränge vorgestellt. Diese bietet die Möglichkeit, eine Vielzahl unterschiedlicher Antriebsstrangarchitekturen hinsichtlich ihrer Komponenten- und Systemeigenschaften zu optimieren und trägt dadurch wesentlich zur Steigerung der Effizienz der Fahrzeugentwicklung in der frühen Konzeptphase bei.