

Schlussbericht

„Identifikation optimaler Antriebsstrangkonfigurationen für Elektrofahrzeuge“ Förderkennzeichen 19U9035

Braunschweig, den 16. November 2011

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projektkoordination:

INSTITUT
FÜR

FAHRZEUGTECHNIK
PROF. DR.-ING. FERIT KÜÇÜKAY

Projektpartner:



Institut für Mechatronische
Systeme im Maschinenbau



Institut für
Elektrische
Energiewandlung

Inhaltsverzeichnis

1.	Vorhaben.....	3
1.1.	Aufgabenstellung.....	3
1.2.	Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens.....	3
1.3.	Planung und Ablauf des Vorhabens	3
1.4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand	4
1.5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	6
2.	Ergebnisse	8
2.1.	Arbeitspaket 1: Definition EV	9
2.1.1.	Einsatzprofil (Fahrer, Fahrzeug, Fahrumgebung), Kundenzyklus	9
2.1.2.	Mindestanforderungen	12
2.1.3.	Definition Antriebstopologien.....	15
2.1.4.	Komponentenkatalog.....	16
2.1.5.	Grundparameter	17
2.1.6.	Komponenten-Plausibilitäts-Prüfung.....	18
2.2.	Arbeitspaket 2: Bewertungsfunktion	18
2.2.1.	Definition der Kennparameter	18
2.2.2.	Kennparameter und deren Gewichtungen in der Bewertungsmatrix.....	19
2.3.	Arbeitspaket 3: Simulationsmodell	21
2.3.1.	Modelle	24
2.3.2.	Validierung	24
2.4.	Arbeitspaket 4: Optimierung.....	25
2.4.1.	Versuchsplan (DoE) & Simulation	25
2.4.2.	Empirische Modellbildung.....	27
2.4.3.	Optimierungsalgorithmus	27
2.5.	Arbeitspaket 5: Analyse	28
2.5.1.	Optimale Fahrzeugkonzepte	28
2.5.2.	Stadtfahrzeug	28
2.5.3.	Verteilerfahrzeug	32
2.5.4.	Sensitivitätsanalyse Stadtfahrzeug	35
2.5.5.	Variation der Gewichtungen der Zielfunktion	40
2.6.	Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	42
2.7.	Schlussfolgerungen.....	42
3.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	44
4.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	45
5.	Voraussichtlicher Nutzen	46

6. Fortschritt bei anderen Stellen	47
7. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	50
ANLAGE A: LITERATURVERZEICHNIS	51
ANLAGE B: ERFOLGSKONTROLLBERICHT	52
ANLAGE C: BERICHTSBLATT	56

1. Vorhaben

1.1. Aufgabenstellung

Die Entwicklung moderner Fahrzeuge und insbesondere der elektrifizierten Antriebe ist gekennzeichnet durch die hohe Komplexität und hohe Variantenvielfalt bei steigenden Kundenerwartungen. Im Hinblick auf eine an diese Randbedingungen optimierten Auslegung der Antriebe stehen ebenfalls gesetzliche, Lastenheft- und Kundenanforderungen an das Fahrzeug im Vordergrund. Für die Schaffung eines optimalen Fahrzeugkonzepts ist jedoch nicht die Auslegung der einzelnen Komponenten auf die eben genannten Anforderungen Ziel führend – die ganzheitliche Betrachtung des Fahrzeugsystems erfordert einen komponentenübergreifenden Ansatz.

Aus diesem Grund stellt das Ziel des Forschungsvorhabens die Ermittlung einer in Bezug auf vorab definierte Bewertungsparameter optimalen Auslegung eines elektrischen Antriebsstrangs für zwei Fahrzeugkonzepte in ihrem jeweiligen Einsatzraum bzw. Nutzungsszenario dar (Betrachtung westeuropäischer Einsatzraum). Der Antriebsstrang wird hierbei durch Topologie, elektrische Maschinen, Leistungselektronik, Energiespeicher und mechanische Leistungsübertragung, insbesondere dem Getriebe definiert. Für die Untersuchungen wird ein auf Kennfeldern basierendes Antriebsstrangmodell verwendet, welches in das Gesamtfahrzeugmodell integriert und durch das Fahrer- und Fahrumgebungsmodell ergänzt wird.

Primäre Ergebnisse des Forschungsvorhabens stellen die optimale Topologie sowie optimale und realistische Eigenschaften der Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs der beiden Fahrzeuge dar. Weiterhin dient eine Sensitivitätsanalyse des optimalen Konzepts bei Variation von Grundparametern dazu, den Einfluss von Triebstrangkomponenten-Eigenschaften auf das Gesamtkonzept zu untersuchen.

1.2. Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Um die Entwicklung wettbewerbsfähiger Elektrofahrzeuge zu ermöglichen, wurde der „nationale Entwicklungsplan Elektromobilität“ ins Leben gerufen. Im Rahmen des Konjunkturpakets II mit dem Schwerpunkt „Antriebskonzepte für Elektro- und Hybridfahrzeuge“ wurde das hier erläuterte Projekt als Gemeinschaftsprojekt der TU Braunschweig und der TU Darmstadt initiiert.

Ziel dieses Projekts ist es, eine Methodik zu entwickeln um Antriebsstränge für Elektrofahrzeuge zu optimieren. Die Optimierung findet anhand von Simulationen mit Wirkungsgrad-Kennfeldern statt, welche zuvor an Prüfständen vermessen wurden. Die vielen Freiheitsgrade innerhalb der Optimierung erlauben es, die Optimierung auf die Bedürfnisse verschiedener Interessengruppen anzupassen.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Dieses Forschungsvorhaben untergliedert sich in fünf Arbeitspakete, welche das Ziel der Identifikation der optimalen Antriebsstrangkonfiguration für zwei in ihrem Einsatzprofil differierende Fahrzeugkonzepte gemein haben.

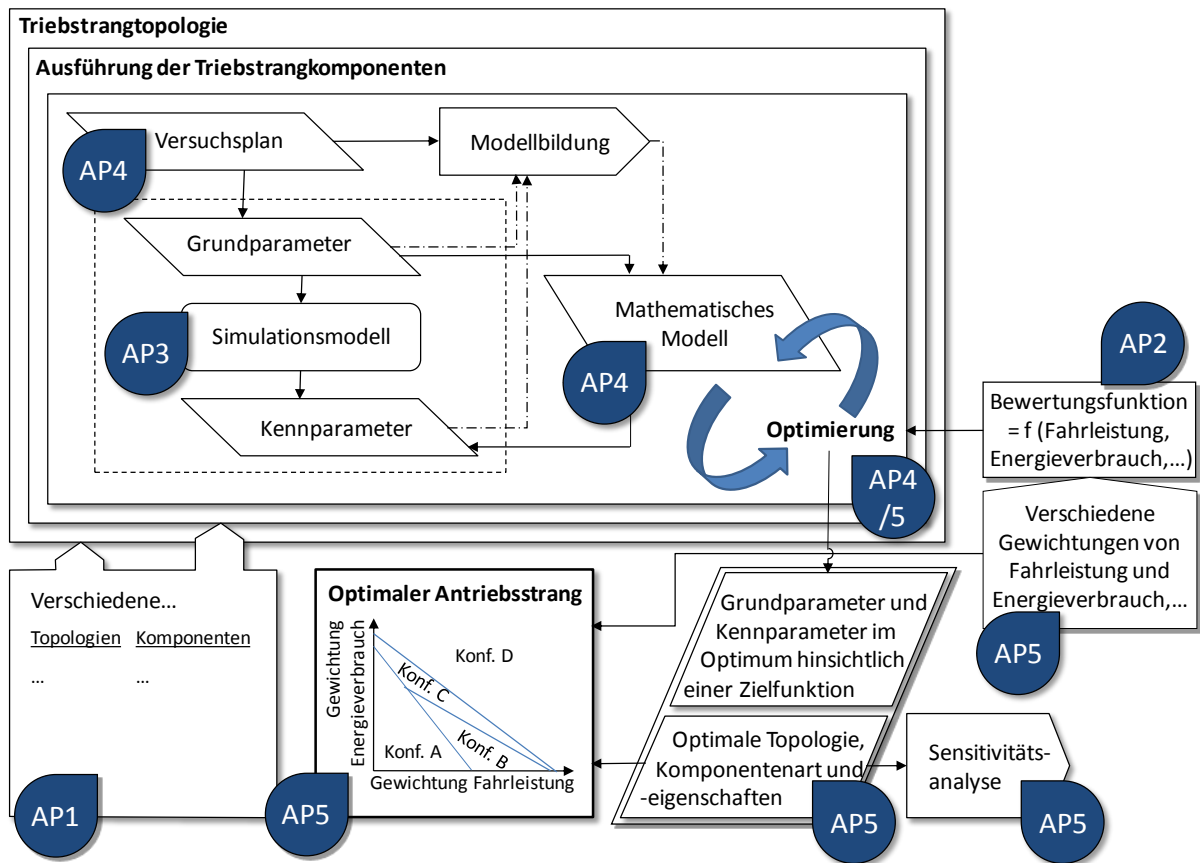


Abbildung 1 Zuweisung der Forschungsinhalte zu den Arbeitspaketen

Die Definition der E-Fahrzeuge (AP1 - siehe Abbildung 1) hinsichtlich des Einsatzprofils und der möglichen Topologie- und Komponentenkombinationen bildet in Zusammenhang mit der Identifikation der Mindestanforderungen die Grundlage für die Generierung einer Bewertungsmatrix (AP2), welche unterschiedliche Kennparameter mittels differierender Gewichtungen berücksichtigt. Der anschließende Aufbau des Simulationsmodells (AP3), welches die Simulation der verschiedenen Triebstrangkonfigurationen durch einen automatisierten Algorithmus erlaubt, dient der Identifikation dieser Kennparameter. Diese werden neben den in ihrem Verstellbereich variierenden Grundparametern zur Bildung von mathematischen Modellen (AP4) herangezogen, welche in Zusammenhang mit dem Versuchsplan eine rechenzeitminimierte Identifikation der optimalen Antriebsstrangkonfiguration für das jeweilige Einsatzprofil ermöglichen (AP5). Die in AP5 betrachteten Ergebnisse der Triebstrangvariationen bei verschiedenen Gewichtungen der Kennparameter (wie z.B. Energieverbrauch, Fahrleistung, etc.) in einer Sensitivitätsanalyse dienen einer Überprüfung der optimalen Triebstrangkonfigurationen in ihrem jeweiligen Einsatzprofil.

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Elektrofahrzeuge sind in einer ersten Forschungsoffensive Mitte der 90er Jahre bei vielen Fahrzeugherstellern entwickelt worden, wobei diese Entwicklung vom bevölkerungsreichsten Bundesstaat der USA, Kalifornien, durch den „Clean Air Act“ vorangetrieben wurde. Es wurden zunächst Gleichstrommaschinen als Hauptantriebe für PKWs der unteren Leistungsklasse (ACEA small) mit entsprechenden einfachen Gleichspannungsstellern und Bleiakkumulatoren entwickelt, die auf älteren ausgeführten

Anwendungen basieren. So wurden Gleichstromantriebe in elektrisch betriebenen Gabelstaplern, elektrisch betriebenen Dienstfahrzeugen der öffentlichen Hand (wie z.B. der österreichischen Bundespost) und in diversen Sonderfahrzeugen eingesetzt. Die Betriebsspannung der Akkumulatoren war zunächst mit ca. 100V vergleichsweise niedrig angesetzt, doch wurde rasch klar, dass höhere Spannungen bis ca. 300-400V deutlich günstigere Motorentwürfe zulassen. In der Folge wurde die bürstenlose Drehstromtechnik als wartungsärmere Variante der Drehstromtechnik vorangetrieben und löste die Gleichstromtechnik ab. Es kamen flüssigkeitsmantelgekühlte Asynchron- und Permanentmagnet-Synchronantriebe zum Einsatz, die als Zentralantriebe über ein einstufiges Getriebe mit einer typischen Übersetzung 1:5-1:8 drehzahlveränderbar betrieben wurden. Damit ergaben sich Drehzahlen der Motoren bis ca. 10000/min, um eine Fahrzeughöchstgeschwindigkeit von ca. 160km/h zu erzielen. Die Wechselrichter-Technologie wurde aus den Industriestandards als IGBT-Variante in sechspulsiger Brückenschaltung mit Pulsweitenmodulation übernommen. In gleicher Weise waren die E-Antriebe wegen der geringen Stückzahlen der Prototypen aus den Industrieantrieben abgeleitet. Nachdem, auch durch politische Umstände bedingt, diese erste Entwicklungsoffensive erlahmte, wurde in einer zweiten Phase in jüngster Zeit dem Thema Elektromobilität wieder erhöhtes Augenmerk zugewendet. Aus den Entwicklungen der ersten Phase war bekannt, dass die hauptsächliche Schwäche die zu geringe Energie- und Leistungsdichte der Energiespeicher war. Eine stürmische Entwicklung auf diesem Gebiet in den letzten Jahren brachte mit der NiMH-Batterie und der Lilon-Akkumulatoren deutliche Fortschritte, während z.B. die sehr interessante NaS-Batterie aus Sicherheitsgründen nicht weiter verfolgt wurde. Als zweite Erkenntnis der ersten Entwicklungsphase ergab sich die Notwendigkeit, für die Elektroautos spezielle Umrichter und Elektromotoren zu entwickeln, deren Ausführung sich deutlich von ihren Vorbildern der industriellen Antriebstechnik unterscheidet. So stehen heute unterschiedliche hochkompakte Maschinentopologien und Maschinenvarianten mit Flüssigkeitskühlung zur Verfügung. Deren optimaler Einsatz im Gesamtsystem des Fahrzeuges unter betrieblichen Gesichtspunkten ist aber noch nicht endgültig geklärt. Die soll im vorliegenden Forschungsvorhaben bearbeitet werden. Weiter muss einschränkend bemerkt werden, dass das Know-How zu den unterschiedlichen E-Motorvarianten im Wesentlichen bei unterschiedlichen Entwicklungsabteilungen unter Verschluss ist. Für einen wissenschaftlichen Vergleich unterschiedlicher Konzepte müssen daher diese Modelle zusammengeführt werden, wobei auf dem aktuellen Stand elektromagnetischer Ausnützung, erzielbarer Momentendichten, auftretender Verlustdichten und Erwärmungsverhalten aufgesetzt werden muss. Auch dies ist Ziel dieses Forschungsvorhabens. Somit stehen im Szenario der unterschiedlichen E-Antriebe im Wesentlichen hochkompakte Käfigläufer-Asynchronmaschinen, permanentmagneterregte Synchronmaschinen in unterschiedlichster Ausführung, geschaltete und synchrone Reluktanzmaschinen und weitere Sonderformen wie die elektrisch erregte Synchronmaschine, die Transversalfeldmaschine und daraus abgeleitete Hybridformen zur Verfügung. Bei den Permanentmagnetmaschinen sind die Varianten mit verteilter und konzentrierter Wicklung mit vergrabenen und mit Oberflächenmagneten, und für die unterschiedlichen getriebelosen und getriebebehafteten Varianten in hochpoligen und niederpoligen Ausführungen zu unterscheiden. Auf diesem Stand der Technik setzt das Forschungsvorhaben auf; für die Regelungsstrategie sind weiterhin Drehzahl und rotorlagegeberbehaftete und geberlose Ausführungen möglich. Dies sind im Wesentlichen

konstruktive und damit bauraumeinengende Unterschiede, sowie Gesichtspunkte der Robustheit, die bei der jeweiligen Fahrzeugtopologie zu beachten sind.

Beim elektrischen Antriebsstrang spielt auch das Getriebe eine wesentliche Rolle, obwohl die E-Maschinen im Gegensatz zu Verbrennungskraftmaschinen einen Kennungswandler nicht zwingend erfordern. Dennoch spielt auch beim Elektroantrieb die Wandlung von Wirkungsgradkennfeldern oder die Anpassung an einen gewünschten Fahrzustand durch ein Getriebe, bzw. eine Übersetzungsstufe eine große Rolle. Wird auf eine Kennungswandlung gänzlich verzichtet, ist die E-Maschine direkt an das Rad anzubinden. Beim so genannten Radnabenantrieb liegt das Drehzahlniveau in Abhängigkeit der Radgröße und der zu erzielenden Höchstgeschwindigkeit im Bereich von 1.500 bis 2.000 1/min. Zur Bereitstellung der erforderlichen Leistung sowie zur Realisierung entsprechender Steigungsfähigkeit und Anfahrtdynamik muss das Drehmoment der E-Maschinen um mehr als eine Größenordnung höher liegen als bei Verbrennungskraftmaschinen. In Prototypfahrzeugen (z. B. Mitsubishi Lancer, Lightning GT) sind solche Ausführungen bereits dargestellt worden. Werden hingegen Getriebe als Kennungswandler eingesetzt, lässt sich das Drehzahlniveau anheben und damit das Drehmomentniveau bei Bereitstellung gleicher Leistungsdaten reduzieren. In der Folge ergeben sich auch signifikant verringerte Gewichte und Kosten der E-Maschinen. Der Großteil der Prototypfahrzeuge (z. B. Tesla Roadster, Mitsubishi i-MiEV, E-Mini, Mercedes SLS) weist diese Lösung auf. Mittlerweile wird aber auch verstärkt über den Einsatz von Getrieben mit zwei oder drei Gängen nachgedacht, wie kürzlich erst wieder das FVA E-MOTIVE Expertenforum „Elektrische Fahrzeugantriebe“, 09./10.09.2009 in Hannover mit Beiträgen von Getrag und Magna bestätigte. Die Motivation hierfür liegt in der verbesserten Fahrleistung und insbesondere im erhöhten Systemwirkungsgrad. Darüber hinaus wird die Möglichkeit eröffnet, das Drehzahlniveau, wie bei Industrieantrieben, auf Höchstdrehzahlen von über 20.000 1/min anzuheben, um das Drehmomentniveau weiter zu senken. Ein solches Konzept wurde von Getrag bereits in einem smart als Prototyplösung realisiert. Beim Mehrganggetriebe spielt dann auch die Schaltstrategie eine wichtige Rolle, welche insbesondere bei der Realisierung von Systemen, die eine Zugkraftunterbrechung erfordern, komfort- oder verbrauchsorientiert realisiert werden können.

Für die Identifikation der optimalen Triebstrangkomponenten aus der oben beschriebenen Variantenvielfalt unter Berücksichtigung des Gesamtantrieb-Verhaltens sind verschiedene Anforderungen zu berücksichtigen. Dies sind auf der einen Seite die gesetzlichen Vorgaben, welche z.B. aus Fahrzyklen wie dem NEFZ erwachsen und somit zu den fixen Anforderungen zählen. Gleiches gilt für die markenspezifischen Lastenheftanforderungen der Fahrzeughersteller, welche jedoch nicht immer deckungsgleich sind mit den aus dem Kundenbetrieb resultierenden Anforderungen. Die daraus resultierenden Über- oder Unterdimensionierung von Komponenten kann nur durch eine anforderungsoptimierte Auslegung vermieden werden.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Bei dem Projekt handelt es sich um ein Gemeinschaftsprojekt der TU Braunschweig und der TU Darmstadt. Während die TU Braunschweig die Gesamtkoordination des Projekts innehat und auch die Messungen und Prüfstandarbeiten durchführte, wurden die simulativen Arbeitspakete gemeinsam vom Institut für elektrische Energiewandlung (EW), dem Institut für Mechatronische Systeme im Maschinenbau (IMS) (beide TU Darmstadt) sowie dem Institut für Fahrzeugtechnik (IfF, TU Braunschweig) erarbeitet.

Neben der gemeinsamen Bearbeitung fand auch ein reger Kontakt zu verschiedenen Industriepartnern statt. So wurde ein Fragebogen von verschiedenen Experten ausgefüllt und es fanden Austausch und Gespräche bezüglich der Komponenten und ihres Wirkungsgradverhaltens statt.

Neben dem direkten Kontakt zu verschiedenen Industrieunternehmen gibt es einen Lenkungsausschuss der FVA, welcher ebenfalls aus Industrievertretern besteht. Als Obmann des Projekts bzw. des Lenkungsausschusses steht Herr Dr. Bernd Vahlensieck der ZF Friedrichshafen AG unterstützend an der Seite der Projektpartner TUBs und TUD.

2. Ergebnisse

Das Forschungsvorhaben wurde am 30.09.2011 abgeschlossen. Die Arbeitspakete sowie die jeweiligen Arbeitsschritte (mittlere Spalte) und das Vorgehen (rechte Spalte) sind in Tabelle 1 gelistet. Die dabei erzielten Ergebnisse werden in den nachfolgenden Kapiteln erläutert und diskutiert.

Tabelle 1 **Arbeitsplan zu den Arbeitspaketen 1 bis 5 des Forschungsvorhabens**

Arbeitspaket	Arbeitsschritte	Vorgehen
AP1: Definition EV	Einsatzprofil / Kundenzyklus Mindestanforderungen Def. Antriebstopologien Komponentenkatalog Komponenten-Plausibilitäts- Prüfung	EV-Messungen: Auswertung / Recherche Analyse Fragebogen / Recherche Definition / Erfassung des Variantenspektrums (Topologien, Grundparameter) Kontakt / Austausch mit Industriepartnern Programmierung einer Plausibilisierung der miteinander kombinierten Komponenten.
AP2: Bewertungs- funktion	Definition Kennparameter Bewertungsmatrix (Gewichtung einzelner Kennparameter)	Recherche (z.B. KiD-Studie), Gespräche mit Industriepartnern Auswertung Umfragebogen an Industrie und Universität
AP3: Simulationsmodell	Aufbau eines modularen Fahrer-, Fahrzeug- und Fahrumgebungsmodells Modulare Erweiterung des Fahrzeugmodells um elektrische Komponenten Validierung des Simulationsmodells	Simulink Modell, welches alle Triebstrangvarianten und Fahrzyklen (gesetzliche und Kundenzyklen) für die beiden E-Fahrzeuganwendungen automatisiert simuliert Messfahrten mit Getrag E-Smart Januar 2011
AP4: Optimierung	Verstellbereiche der Grundparameter festlegen Aufstellung eines Versuchsplans (DoE) Simulation der Varianten laut Versuchsplan Empirische Modellbildung Optimierung anhand der in AP2 aufgestellten Bewertungsmatrix	Recherche zu plausiblen und Berechnung von physikalischen Grenzen für die Parameterräume Vollfaktorieller Versuchsplan zur Erstellung eines Polynommodells Evolutionärer Optimierungsalgorithmus zur Mehrgrößenoptimierung
AP5: Analyse	Darlegung des methodischen Vorgehens Darstellung der zwei optimalen Konzepte Durchführung einer Sensitivitätsanalyse Variation der Gewichtungen in der Zielfunktion Schlussfolgerungen Ausblick: Erweiterungspotentiale der Methodik aufzeigen	Erläuterung der Arbeitsschritte Analyse der Ergebnisse aus Simulationen und Optimierungen für Stadt- und Verteilerfahrzeug Vorstellung und Motivation des bereits genehmigten Nachfolgeantrags

2.1. Arbeitspaket 1: Definition EV

Für die anforderungsgerechte Auslegung von Elektrofahrzeugen ist das Einsatzprofil des Fahrzeugs von grundlegender Bedeutung. In diesem Zusammenhang ist der Kundeneinsatzraum durch die Definition des Fahrzeugs (z.B. Mittel-, Oberklasse) in einer bestimmten Fahrumgebung (z.B. Stadt, Land) für verschiedene Fahrweisen (z.B. schonend, durchschnittlich) zu klären (Kapitel 2.1.1). Zudem stehen bei der Betrachtung des Fahrzeugkonzepts einer Fahrzeugklasse verschiedene Antriebstopologien und Komponenten zur Auswahl. Die in Frage kommenden Kombinationen aus Fahrzeugkonzept, Antriebstopologien und deren Komponenten (Topologie- und Konzeptvarianten – siehe Kapitel 2.1.3) müssen parametrisiert (Kapitel 2.1.4) und anschließend mittels einer Komponenten-Plausibilitäts-Prüfung (Kapitel 2.1.6) eingegrenzt werden. Die definierten Mindestanforderungen (Kapitel 2.1.2) werden in der Optimierung (Kapitel 2.4.3) verwendet, um nicht geeignete Fahrzeuge zu identifizieren und durch eine negative Bewertung auszuschließen. Zum Abschluss dieses Arbeitspakets sind zwei in ihrem Einsatzprofil differierende Fahrzeugkonzepte definiert, welche im Fortgang dieses Projektes auf ihre optimale Auslegung bezüglich Antriebstopologie und deren Komponenten untersucht werden.

Im Folgenden werden die Ergebnisse zu den einzelnen Arbeitsschritten des AP1 detailliert erläutert.

2.1.1. Einsatzprofil (Fahrer, Fahrzeug, Fahrumgebung), Kundenzzyklus

Im Kundeneinsatzraum werden ein Fahrzeug im urbanen Umfeld (im Folgenden als Stadtfahrzeug bezeichnet) sowie ein im Stadt- und Überlandverkehr betriebenes Verteilerfahrzeug der mittleren Klasse betrachtet. Die Definition des Einsatzprofils umfasst folgende Fragestellungen:

- a. *Fahrzeug*: Welche Fahrzeugklasse und welche Fahrzeugparametrierung werden für das Stadt- und das Verteilerfahrzeug betrachtet?
- b. *Fahrumgebung*: Welche Fahrstrecken befahren die Fahrzeuge?
- c. *Fahrer*: Wie wird ein Fahrer ein Elektrofahrzeug in der Regel bewegen (Stichwort Fahrstil)?
- d. *Kundenzzyklus*: Welche Eigenschaften besitzt ein repräsentativer Kundenzzyklus für die geforderten Einsatzprofile?

Diese Fragestellungen üben unmittelbaren Einfluss auf die Mindestanforderungen aus, welche im Anschluss in Kapitel 2.1.2 erörtert werden.

Zu a) Das Stadtfahrzeug ist ein Fahrzeug der Kleinstwagen-Klasse (Bsp. *Smart Fortwo*). Für das Verteilerfahrzeug wird ein Hochdachkombi (Bsp. *Caddy Maxi*) zugrunde gelegt. Für beide Fahrzeuge gelten die „Ausgangsparametrierungen“ aus Tabelle 2, welche für jeden Fahrzeugtyp eine maximale Fahrzeuggesamtmasse, eine Fahrzeugleerkörpermasse sowie eine minimale Nutzlast berücksichtigt.

Tabelle 2 Grundparametrierung der E-Fahrzeugmassen: feste (fix) und variable (var) Werte

Bezeichnung	Beschreibung	fix/var	Stadtfahrzeug	Verteilerfahrz eug
Fahrzeugklasse	--		Kleinstwagen (Smart)	Hochdachkombi (Caddy Maxi)
Fahrzeugleerkörpermasse	<u>Ohne</u> Triebstrang, <u>mit</u> 1Fahrer	fix	580 kg	1270 kg
Max. Fahrzeugleermasse	<u>Mit</u> Triebstrang, <u>mit</u> 1Fahrer	var	1.175 kg	1.850 kg
Min. Nutzlast	Zuladung	var	225 kg	650 kg
Max. Fzg.-Gesamtmasse	<u>Mit</u> Triebstrang, <u>mit</u> 1Fahrer, <u>mit</u> Nutzlast	var	1.400 kg	2.500 kg

Ausgehend von einer festen Masse des Fahrzeuges ohne Antriebsstrang (Fahrzeugleerkörpermasse) kann für jede Antriebsstrangkonfiguration durch die Summe der Massen der Teilkomponenten zuzüglich der Mindestnutzlast die zu erwartende Fahrzeuggesamtmasse ermittelt werden. Diese Fahrzeuggesamtmasse muss unterhalb des definierten Maximalwerts liegen, andernfalls resultiert ein Ausschluss der jeweiligen Antriebsstrangkonfiguration in der Optimierung.

Beide Massen-Definitionen (max. Fahrzeuggesamtmasse und min. Nutzlast) resultieren wiederum in einer Obergrenze der Fahrzeugleermasse, mit welcher das Fahrzeuggewicht inklusive Triebstrang und Fahrer (68 kg + 7 kg Handgepäck nach Richtlinie EG 92/21) gemeint ist. Das bedeutet, dass bei einer niedrigeren Fahrzeug-Leermasse die resultierende Nutzlast des Fahrzeuges höher ist als bei einem Fahrzeug mit einer höheren Leermasse.

Zu b) Die Fahrstrecken der E-Fahrzeuge resultieren aus dem definierten Einsatzprofil. Das Stadtfahrzeug soll sich ausschließlich Innerorts bewegen. Die maximale Geschwindigkeit resultiert aus Fahrten auf Ausfallstraßen mit maximal 70 km/h, Landstraßen- oder Autobahnanteile sind für dieses Fahrzeug nicht vorgesehen. Dieses Verhalten spiegelt sich nicht in den durchschnittlichen Jahresfahrleistungen für PKWs im privaten Gebrauch wider (1), welche in dem linken Diagramm aus Abbildung 2 nach den Straßenkategorien differenziert wurden. Im Rahmen dieses Projektes liegt der Fokus dennoch auf einem Fahrzeug, welches bei einem weltweit starken Trend der Urbanisierung ausschließlich auf den Einsatz in der Stadt ausgelegt ist.

Für das Verteilerfahrzeug müssen Landstraßenfahrten und somit ebenfalls „langsame Fahrten“ auf der Autobahn ermöglicht werden, weshalb die Mindestanforderung an die Maximalgeschwindigkeit bei 120 km/h liegt. Die nach den Straßenkategorien differenzierte Jahresfahrleistung für LKW mit einer Nutzlast geringer 3,5 Tonnen in dem rechten Diagramm aus Abbildung 2 soll als Grundlage zur Definition der Fahrstreckenanteile bei der Generierung eines repräsentativen Zyklus dienen.

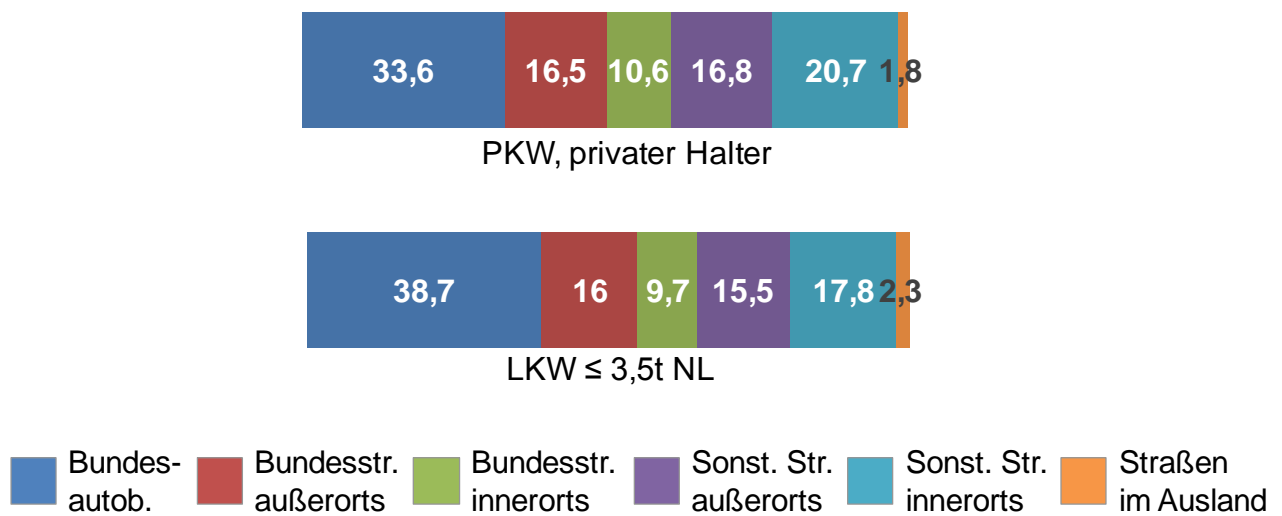


Abbildung 2 Anteil der Jahresfahrleistungen nach Straßenkategorie für PKW (private Halter) und LKW ≤ 3,5t Nutzlast. Quelle: (1)

Zu c) Das Fahrerverhalten des Fahrzeugführers im Stadtfahrzeug wird als durchschnittlich, das des Fahrers im Verteilerfahrzeug als sportlich eingestuft. Diese Definition beruht auf Umfrageergebnissen (siehe Abbildung 3), welche anhand eines Fragebogens ermittelt wurden, der an Partner aus der Industrie und universitären Einrichtungen gerichtet war.

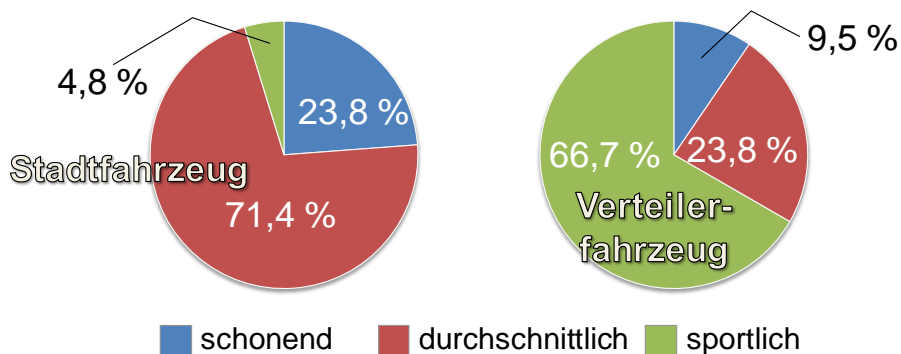


Abbildung 3 Ergebnis Umfragebogen: Einschätzung des Fahrerverhaltens im Stadt- und im Verteilerfahrzeug

Zu d) Die Definitionen zum Einsatzprofil (d.h. Fahrer-, Fahrumgebungs- und Fahrzeuggrößen), welche in a) bis c) getroffen wurden, haben einen unmittelbaren Einfluss auf die Generierung des Kundenzyklus, welcher im Optimierungsprozess zur Identifikation des optimalen Antriebsstrangkonzeppts eingesetzt wird.

Die Kundenzyklen für ein Stadt- und ein Verteilerfahrzeug werden unter anderem aus aktuellen Messungen mit einem E-Fahrzeug und einem konventionellen Fahrzeug generiert (siehe Abbildung 4). Die Ergebnisse dieser Messungen zeigen, dass der so genannte 3F-Fingerprint¹ für Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebsstrangkonzeppts bei gleichem Leistungsgewicht (siehe Fahrzeugparameter Tabelle 3) identisch ist (ergänzende

¹ 3F-Fingerprint: Die Fahrzeuglängsdynamik betreffende Größen wie Geschwindigkeits-, Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten, welche das fahrertypabhängige Verhalten bei verschiedenen Fahrzeug- und Fahrumgebungsparametern widerspiegeln.

Informationen hierzu in (2)). Diese Erkenntnis ermöglicht die Nutzung einer umfangreichen Messdatenbasis von verschiedensten Fahrzeugen, welche am Institut für Fahrzeugtechnik der TU Braunschweig vorliegt, und die Ermittlung des statistischen Fahrer-, Fahrzeug- und Fahrumgebungsverhaltens (3F) unterschiedlicher Antriebsstränge ermöglicht. Diese Statistiken dienen wiederum der Generierung der Kundenzyklen, welche in Abhängigkeit vom Einsatzprofil, d.h. der Fahrumgebung, dem Fahrzeug und dem Fahrstil, erstellt werden.

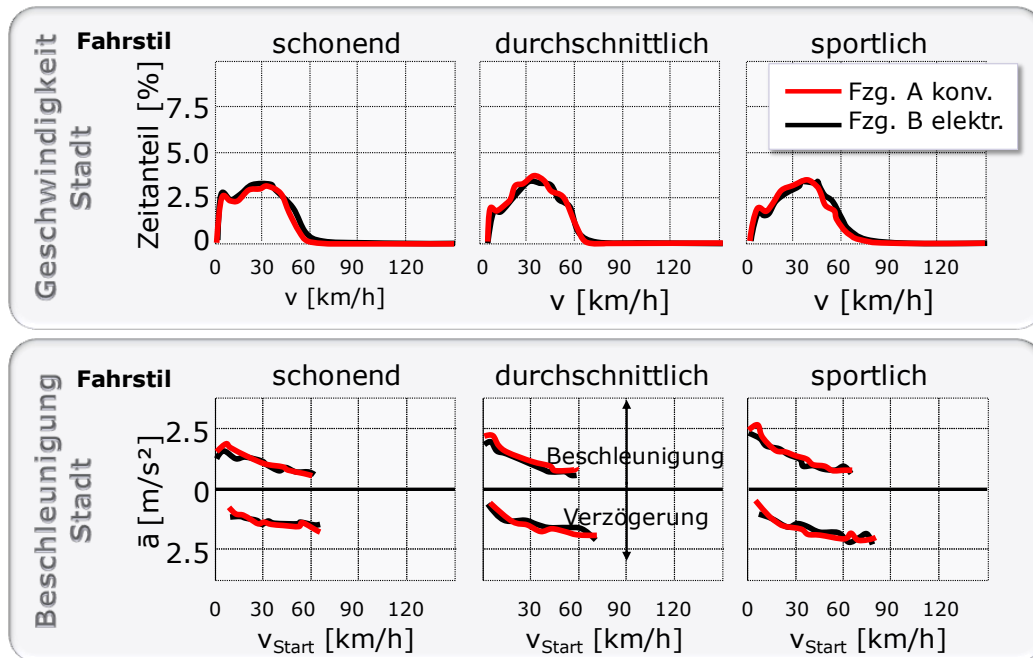


Abbildung 4 Messungen mit einem konventionellen (Fzg. A) und einem elektrischen Antrieb (Fzg. B) gleichen Leistungsgewichts: 3F-Fingerprint bezüglich der Geschwindigkeitsverteilung und der durchschnittlichen Beschleunigung bzw. Verzögerung bei definierten Geschwindigkeitsklassen.

Tabelle 3 Fahrzeugparameter: Messungen konventioneller Antrieb vs. Elektrofahrzeug

Fahrzeug	Fahrzeug A	Fahrzeug B
Antriebsstrang	konventionell	elektrisch
Antrieb	Front-Quer	Front / Zentral
VKM	1,2 L (Otto)	--
Antriebsleistung	43 kW (VKM)	36 kW (EM)
Höchstgeschwindigkeit	151 km/h	120 km/h
Fahrzeuggewicht	voll beladen: 1.095 kg	920 kg
Leistungsgewicht	25,5 kg/kW	25,6 kg/kW

2.1.2. Mindestanforderungen

An die E-Fahrzeuge werden Mindestanforderungen gestellt, welche sich aus den jeweiligen Einsatzprofilen ergeben (Kapitel 2.1.1) und die Vielfalt der in Frage kommenden Topologie- und Konzeptvarianten (Kapitel 2.1.3) in der Optimierung (Kapitel 2.4.3) durch eine negative Bewertung einschränken. Folgende Kennparameter werden in ihrem Wertebereich durch die Festlegung einer Ober- bzw. Untergrenze als so genannte Mindestanforderungen an die E-Fahrzeuge definiert:

- a. Minimale Reichweite
- b. Minimale Anfahrssteigfähigkeit
- c. Steigfähigkeit bei 60 km/h
- d. Mindest-Höchstgeschwindigkeit
- e. Maximale Beschleunigungszeit
- f. Elastizität
- g. Maximales E-Maschinen-Gewicht bei Radnabenantrieb (kein Kennparameter)
- h. Minimale Nutzlast (kein Kennparameter)

Zu a) Die Festlegung des Wertes für eine minimale Reichweite des Stadt- und des Verteilerfahrzeugs erfolgt über die Studie „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland“ (Quelle: (3)), aus welcher sowohl durchschnittliche Fahrleistungen pro Tag und Strecke (siehe Tabelle 4) als auch Fahrtweitenverteilungen (Abbildung 5) für verschiedene Nutzerprofile zu beziehen sind.

Tabelle 4 Durchschnittliche Fahrleistungen für PKW Gesamt² Mo-So (Quelle: (4) und LKW ≤ 3,5t NL³ Mo-Fr (Quelle: (3))

Fahrzeug	PKW, Gesamt ² Mo-So	LKW ≤ 3,5t NL ³ Mo-Fr
∅ Fahrzeugfahrleistung pro Kfz und Tag (Mittlere Tagesfahrleistung)	63 km	113,7 km
∅ Fahrzeugfahrleistung pro Kfz und Strecke (Mittlere Fahrtweite)	25,8 km	9,8 km
∅ Fahrtenhäufigkeit pro Kfz und Tag (d.h. i/ii)	2,4	11,6

Für das *Stadtfahrzeug* wurden die PKW-Statistiken Gesamt² im vollen Wochenbereich (d.h. Mo-So) herangezogen. Der Mittelwert der Fahrleistung beträgt laut Tabelle 4 pro Tag 63 km. Wird das Fahrverhalten einer statistisch relevanten Gruppe in der kumulierten Fahrtweitenverteilungen aus Abbildung 5 berücksichtigt, so ist ersichtlich, dass der 90%-Fahrer eine Strecken-Fahrtweite im Bereich von 0 bis 40 km anstrebt. Für die Berechnung der Mindestreichweite eines Stadtfahrzeugs nehmen wir nun an, dass diese Strecke zwei Mal gefahren wird (Hin- und Rückfahrt vom bzw. zum Zielort: zwei Mal 40 km), woraus eine Mindestanforderung von 80 km resultiert.

Für die Bestimmung der minimalen Reichweite des *Verteilerfahrzeugs* dienen die Statistiken für LKW bis 3,5t Nutzlast³, welche sich auf die Werktage (Mo-Fr) beziehen. Die Tagesfahrleistung liegt hier durchschnittlich bei 113,7 km, während die mittlere Fahrtweite aufgrund der hohen Fahrthäufigkeit mit 9,8 km relativ niedrig ist. Der Wert für den 90%-Fahrer aus Abbildung 5 liegt hier im Bereich bis 60 km. Wird die gleiche Berechnungsgrundlage wie beim Stadtfahrzeug angewendet, resultiert dies für das Verteilerfahrzeug in einer Mindestreichweite von 120 km.

² Private und gewerbliche Halter

³ im Wirtschaftszweig Verkehr- und Nachrichtenübermittlung

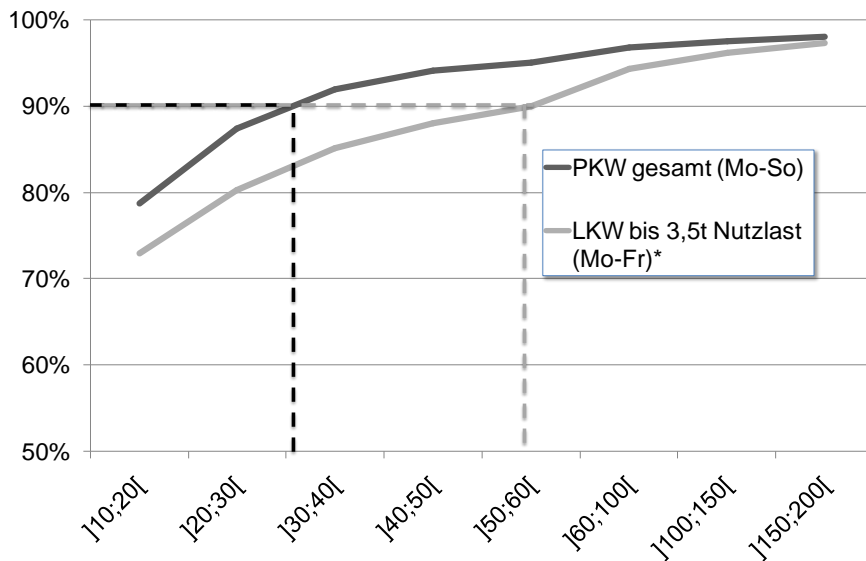


Abbildung 5 Kumulierte Fahrtweitenverteilung in km/Stretch
 - für PKW Gesamt von Mo-So; Quelle: (4)
 - für LKW bis 3,5t Nutzlast im Wirtschaftszweig Verkehr- und Nachrichtenübermittlung an Werktagen; Quelle: (3)

Zu b) Als Orientierungsmaßstab bei der Festlegung der minimalen Anfahrsteigfähigkeit dient die Garagenverordnung (GaVo) von 2006 (5) für die maximale Steigung von Rampen auf öffentlichen Verkehrsflächen. Diese legt für Rampen von Mittel- und Großgaragen in §4 Absatz 1 eine maximale Steigung von 15 % fest. Dieser Wert orientiert sich maßgeblich an den potentiellen Schäden im Front- und Heckbereich von Fahrzeugen bei Überschreiten dieses Grenzwertes.

Unter Berücksichtigung eines notwendigen Zugkraftüberschusses zur Bewältigung dieser 15 %-Steigung mit akzeptablen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen größer Null und einer Beladung über der geforderten minimalen Nutzlast, wird der Wert für die minimale Anfahrsteigfähigkeit beider Fahrzeuge unter Berücksichtigung einer Reserve auf 30 % festgelegt.

Zu c) Bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 60 km/h wurde eine minimale Steigfähigkeit von $p = 6 \%$ festgelegt. Dieser Wert orientiert sich an den Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RAST (6)), welche eine Höchstlängsneigung von 6 % bei 70 km/h vorsehen.

Zu d) Die Höchstgeschwindigkeit, welche minimal zu erfüllen ist, resultiert aus den Definitionen zu dem Einsatzgebiet beider Fahrzeuge aus Kapitel 2.1.1 unter Punkt b). Hier wurde für das Stadtfahrzeug eine Mindest-Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h, für das Verteilerfahrzeug von 120 km/h definiert.

Zu e) Die maximal aufzubringende Zeit für eine Beschleunigung von 0 auf 60 km/h für das Stadtfahrzeug und von 0 auf 100 km/h für das Verteilerfahrzeug orientiert sich an den Werten aktueller Elektrofahrzeuge. Für das Stadtfahrzeug sind maximal 8 Sekunden vorgesehen, während das Verteilerfahrzeug maximal 20 Sekunden für die Beschleunigung benötigen darf.

Zu f) Die Elastizität des Stadtfahrzeuges wird in dem Zeitwert für eine Beschleunigung von 30 auf 60 km/h, für das Verteilerfahrzeug für eine Beschleunigung von 60 auf 100 km/h berücksichtigt. Diese Mindestanforderung stellt eine Ergänzung zu jener aus e) dar, mit dem Ziel träge Beschleunigungen im Bereich der End-Geschwindigkeit zu vermeiden. Das Stadtfahrzeug darf maximal 5 Sekunden für die Beschleunigung von 30 auf 60 km/h aufweisen – dies sind maximal 62,5 % jener Beschleunigungszeit von 0 km/h auf 60 km/h. Für das Verteilerfahrzeug liegt das Verhältnis durch einen Zeitwert von maximal 12 Sekunden bei 60 % der Beschleunigungs-Zeit von 0 auf 100 km/h.

Zu g) Mit dem Ziel, die Erhöhung der reifengefederte Massen zu begrenzen, wird für E-Fahrzeuge mit Radnabenantrieb ein maximales E-Maschinengewicht definiert. Ferner stehen das maximale Drehmoment und das Volumen der E-Maschine in einem direkt proportionalen Verhältnis, weshalb vor dem Hintergrund eines beschränkten Bauraums auf Radebene die Definition eines maximalen E-Maschinengewichts sinnvoll ist. Diese Obergrenze liegt für das Stadtfahrzeug bei 20 kg, für das Verteilerfahrzeug bei 30 kg.

Zu h) Die Untergrenze der Nutzlast für das Stadtfahrzeug liegt, wie bereits in Kapitel 2.1.1 unter Punkt a) beschrieben, bei 225 kg. Diese Grenze resultiert aus dem Normgewicht für 3 Personen à 68 kg plus 7 kg Handgepäck (Richtlinie EG 92/21). Die Untergrenze der Nutzlast für das Verteilerfahrzeug von 650 kg orientiert sich an dem Stand der Technik für Fahrzeuge in der Klasse der Hochdachkombis.

Die Mindestanforderungen a)-h) an beide Fahrzeuge sind in Tabelle 5 zusammengefasst:

Tabelle 5 Mindestanforderungen an das Stadt- und das Verteilerfahrzeug

Fahrzeug	Stadtfahrzeug	Verteilerfahrzeug
Minimale Reichweite	80 km	120 km
Minimale Anfahrsteigfähigkeit	30 %	30 %
Minimale Steigfähigkeit bei 60 km/h	6 %	6%
Mindest-Höchstgeschwindigkeit	70 km/h	120 km/h
Maximale Beschleunigungszeit	8 s	20 s
Elastizität	5 s	12 s
Maximales E-Maschinengewicht bei Radnabenantrieb	20 kg	30 kg
Minimale Nutzlast	225 kg	650 kg

2.1.3. Definition Antriebstopologien

Die für die Identifikation des optimalen Antriebsstrangkonzpts in Frage kommenden Topologie- und Konzeptvarianten sind in Abbildung 6 anschaulich dargestellt. Zunächst stellt der EV-Würfel die möglichen Varianten unter Berücksichtigung des Einbauortes (Zentral-, Tandem- oder Radnabenantrieb), der Antriebsachse (Vorderachs-, Hinterachs- oder Allradantrieb) und der Getriebe-Ganganzahl dar. Dieser EV-Würfel spannt ein dreidimensionales Variantenspektrum auf. Zieht man jedoch die möglichen Varianten der Antriebskomponenten in Betracht, so gewinnt der Variantenraum einige weitere Dimensionen.

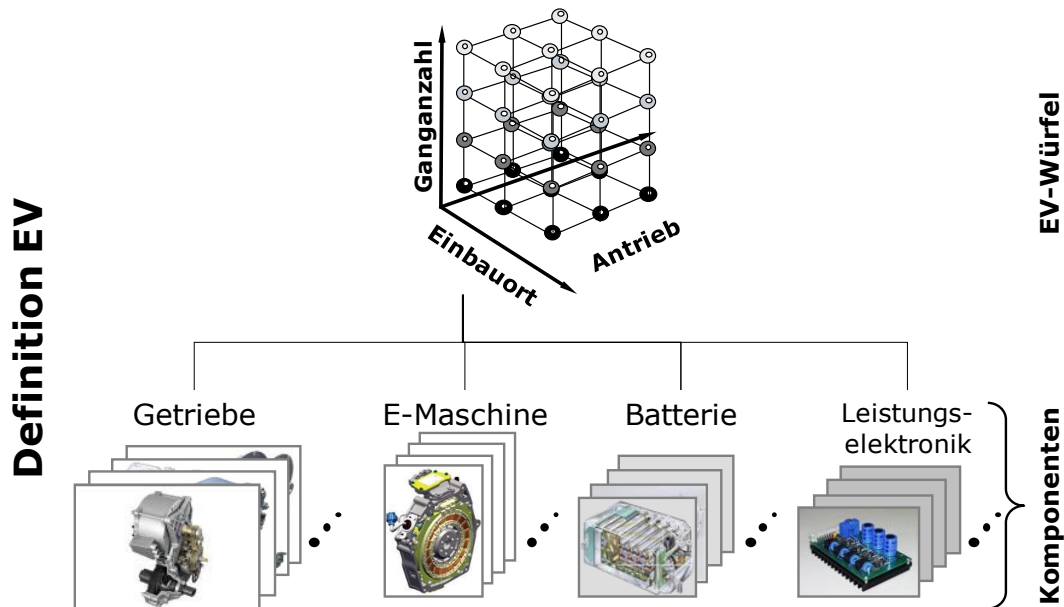


Abbildung 6 Spektrum der möglichen Topologie- und Konzeptvarianten.

Diese Variantenvielfalt ist für eine ganzheitliche Untersuchung wünschenswert. In Anbetracht einer effektiven Optimierung wird diese Vielzahl an Varianten jedoch im Vorfeld durch eine Komponenten-Plausibilitäts-Prüfung (Kapitel 2.1.6) sowie im weiteren Verlauf der Optimierung mittels der oben definierten Mindestanforderungen (Kapitel 2.1.2) eingegrenzt.

2.1.4. Komponentenkatalog

Im Komponentenkatalog sind die Kennfelder und Parameter der Komponentenvarianten hinterlegt. Für die Nomenklatur der Komponenten wird dabei das Prinzip aus Abbildung 7 angewandt: Die Gesamt-Fahrzeugnomenklatur resultiert aus den Namen der Komponenten. Für die Benennung der Komponenten sind prägnante Differenzierungsmerkmale gewählt, wie z.B. Typ und maximale Leistung der E-Maschine, damit die Grundparametrierung eines Fahrzeugs anhand der Namensgebung einfach nachzuvollziehen ist.

Kennfelder und Parameter der Komponenten wurden von Industriepartnern zur Verfügung gestellt. Um jedoch ein hohes Maß an Varianz in Bezug auf die Komponenten-Differenzierungsmerkmale zu erzielen, werden weitere Kennfelder durch die Skalierung der vorhandenen Kennfelder erzeugt. Die Skalierungsgrenzen sind dabei durch den betrachteten Grundparameter-Wertebereich definiert (Kapitel 2.1.5), welcher in dem Arbeitsschritt der Optimierung unter AP4 variiert wird.

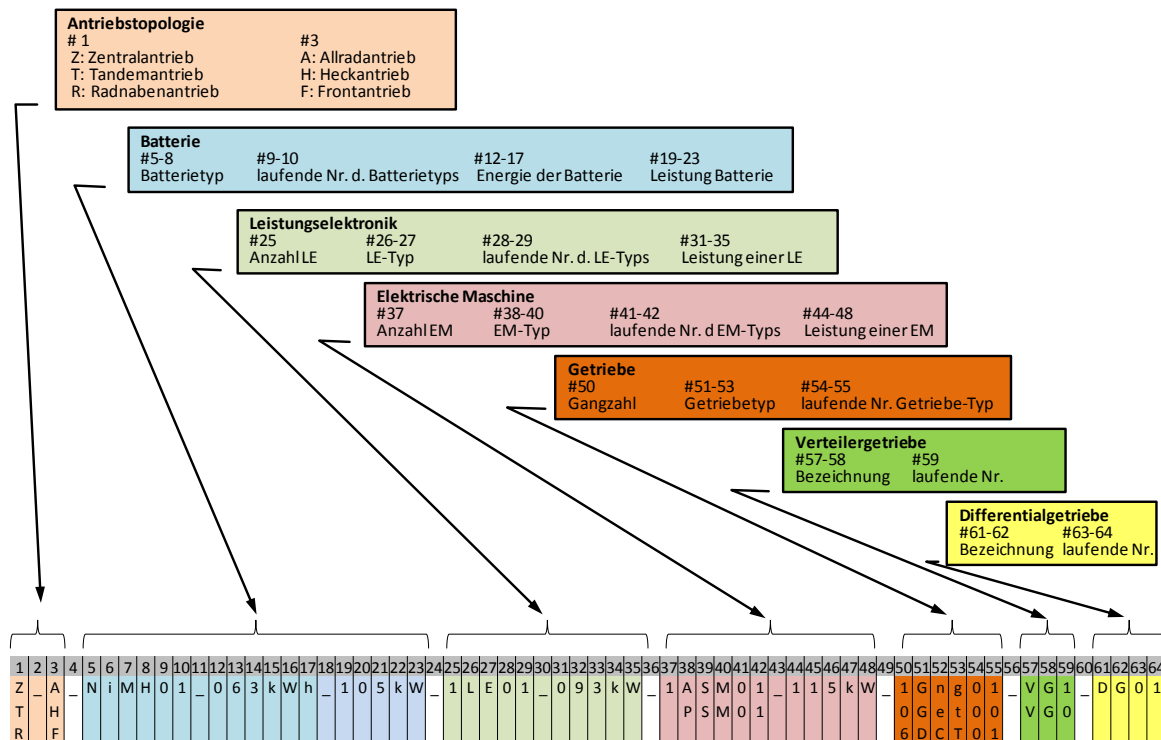


Abbildung 7 Fahrzeug- und Komponenten-Nomenklatur.

2.1.5. Grundparameter

Werden Komponenten variiert und miteinander kombiniert (Kapitel 2.1.4), handelt es sich um diskrete Veränderungen, die dazu führen, dass ein neues Fahrzeug in einer neuen Datei angelegt wird. Zusätzlich zu diesen diskreten Variationen gibt es kontinuierlich verstellbare Parameter, die so genannten Grundparameter (siehe a)-f)). Grundparameter werden in AP4 in der Simulation für jedes Fahrzeug in diskreten Schritten variiert (Kapitel 2.4.1) und anschließend durch die Bildung analytischer Funktionen (Kapitel 2.4.2) angenähert, um so das kontinuierliche Verhalten der Parameter zu ermitteln. Die Grundparameter, welche variiert werden, sind:

- Übersetzung erster Gang i_1
- Getriebebespreizung φ
- Progressionsfaktor p
- Skalierung Drehmoment EM $skal_M_{EM}$
- Skalierung Drehzahl EM $skal_n_{EM}$
- Parallele Batteriezellen $Cell_par$

Zu a-c) Die Parameter a)-c) dienen zur Manipulation der Getriebekennfelder. Zum Einstellen der Getriebeübersetzungen werden die drei herkömmlichen Getriebeparameter i_1 , φ und p verwendet. Der Parameter i_1 muss für alle Getriebe definiert werden, während φ für Fahrzeuge mit zwei oder mehr und p für Getriebe mit drei oder mehr Gängen eingestellt werden. Aufgrund der drei Variablen lassen sich die Übersetzungen eines Getriebes mit bis zu drei Gängen völlig frei gestalten, ab vier Gängen sind die Übersetzungen nicht mehr vollständig frei wählbar.

Zu d-e) Mit Hilfe der Parameter d) und e) werden die E-Maschinen Kennfelder skaliert. Die Wirkungsgradkennfelder liegen in Abhängigkeit des Drehmoments und der Drehzahl vor. Die Stützstellen des Drehmomentenvektors werden mit $skal_{M_{EM}}$, bzw. die Stützstellen des Drehzahlvektors mit $skal_{n_{EM}}$ multipliziert. Somit ergeben sich neue Drehmoment- und Drehzahlvektoren, die entweder gestaucht ($skal_{X_{EM}} < 1$) oder gestreckt ($skal_{X_{EM}} > 1$) werden. Die Leistung der manipulierten E-Maschine ändert sich somit um den Faktor $skal_{M_{EM}} \cdot skal_{n_{EM}}$. Ebenso wird die Kennlinie des maximalen Drehmoments mit $skal_{M_{EM}}$ multipliziert.

Zu f) Da das Batteriemodell auf einzelnen Zellen basiert, kann die Batterie über die Anzahl der parallelen Zellen variiert werden. Die Anzahl der in Reihe geschalteten Zellen bleibt dabei konstant. Der Energieinhalt der Batterie ist linear abhängig von der Anzahl der parallelen Zellen. Real können die Batteriezellen nur in diskreten Schritten verändert werden. Dennoch findet die Variation im mathematischen Modell kontinuierlich statt.

2.1.6. Komponenten-Plausibilitäts-Prüfung

Anders als zu Beginn des Projektes geplant, wird keine Vorselektierung durchgeführt, sondern eine Plausibilitätsprüfung der miteinander kombinierten Komponenten. Die „Selektierung“ aufgrund der gestellten Mindestanforderungen aus AP 1 (Kapitel 2.1.2) findet während der Optimierung statt, da zu diesem Zeitpunkt alle Varianten auf Basis der Grundparametervariationen bekannt sind, und somit überprüft werden können. Die Komponenten-Plausibilitäts-Prüfung testet wiederum, ob die zur Verfügung gestellte Leistung der Batterie größer ist als die der verwendeten E-Maschine(n). Des Weiteren wird überprüft, ob Drehmoment- und Drehzahlbereiche der Getriebe und E-Maschine(n) zueinander passen.

2.2. Arbeitspaket 2: Bewertungsfunktion

Für die Ermittlung eines optimalen Fahrzeugkonzepts ist es erforderlich, möglichst objektive Bewertungskriterien aufzustellen, und deren Aussagekraft zu bewerten. Das AP2 besteht aus folgenden Arbeitsschritten:

1. Definition der Kennparameter
2. Definition einer Bewertungsmatrix für die Gewichtung einzelner Kennparameter

Als Ergebnis dieses AP2 liegen abschließend Kennparameter und deren Wertigkeit vor, mit deren Hilfe ein E-Fahrzeug nach seinem optimalen Antriebskonzept beurteilt werden kann.

2.2.1. Definition der Kennparameter

Die Definition von *Kennparametern* ermöglicht unter Berücksichtigung der Kennparametergewichtung eine objektive Bewertung der Topologie- und Konzeptvarianten. Die in Kapitel 2.1.2 definierten Mindestanforderungen stellen dabei die Ober- bzw. Untergrenzen der Kennparameter dar. Für die Kennparameter „Kosten“ und „Energiebilanz“ sind aufgrund eines für diese Parameter möglichst breiten Variantenspektrums keine Mindestanforderungen berücksichtigt.

In Tabelle 6 sind die in der Bewertungsmatrix berücksichtigten Kennparameter gelistet (linke Spalte). Die signifikantesten Einflussgrößen auf die Kennparameter sind hier ebenfalls in Zusammenhang gestellt.

Tabelle 6 Einflussgrößen auf die Kennparameter

Kennparameter	Abhängigkeit 1	Abhängigkeit 2	Abhängigkeit 3
Reichweite	Batteriekapazität	Energiebilanz	
v_{\max}	Fahrzeugmasse	Antriebsleistung	Getriebeübersetzung (möglichst kleine Übersetzung: $v_{\text{Fzg}} = 1/i_{\text{ges}} * n_{\text{mot}}$)
Beschleunigung	Fahrzeugmasse	Antriebsleistung (Eckpunkt der Motorgrenzkennlinie; Maximalleistung)	Getriebeübersetzung (möglichst große Übersetzung: $M_{\text{Rad}} = i_{\text{ges}} * M_{\text{mot}}$)
Elastizität	Fahrzeugmasse	Antriebsleistung (Eckpunkt der Motorgrenzkennlinie; Maximalleistung)	Getriebeübersetzung
Anfahrsteigungsvermögen	Fahrzeugmasse	EM M_{\max}	Übersetzung im 1. Gang
Steigvermögen bei 60 km/h	Fahrzeugmasse	Antriebsleistung (Eckpunkt der Motorgrenzkennlinie; Maximalleistung)	Getriebeübersetzung
Energiebilanz	Triebstrangeffizienz	Fahrzeuggewicht	
Kosten	Batteriekapazität (€/kWh)	EM/LE-Leistung (€/kW)	Getriebe: Ganganzahl, Typ
Nutzlast	Batteriekapazität (kg/kWh)	EM/LE-Leistung (kg/kW)	Getriebe: kg/Gang

Der in Tabelle 6 grau hinterlegte Kennparameter „Nutzlast“ wird nicht in der Bewertungsmatrix berücksichtigt, da die Kennparameter der Bewertungsmatrix ein orthogonales System bilden müssen. Die Fahrzeugmasse stellt jedoch eine wichtige Einflussgröße bei einigen der weiteren Kennparameter dar und die Einflussgrößen von „Kosten“ und „Nutzlast“ sind identisch.

2.2.2. Kennparameter und deren Gewichtungen in der Bewertungsmatrix

In der Bewertungsmatrix werden die Kennparameter und die dazugehörigen Gewichtungsfaktoren berücksichtigt. Einem Kennparameter ist durch die *Gewichtung* eine Wertigkeit zugeordnet. Diese wurde einerseits anhand eines Fragebogens ermittelt, welcher an verschiedene OEMs und deren Zulieferer sowie die universitären Einrichtungen gerichtet war, zum anderen wurde recherchiert, welche Kundenanforderungen an heutige Fahrzeugkonzepte gestellt werden.

Der Wertebereich für die Gewichtung eines Kennparameters ist zwischen 0 und 10 festgelegt. Dabei entsprechen 0 = gar keine Relevanz und 10 = sehr große Relevanz.

Die Kennparameter (KP) und deren Gewichtungen sind der Tabelle 7 zu entnehmen. Für diese Darstellung wird eine Clusterung solcher Kennparameter gewählt, welche einen thematischen Zusammenhang bilden. Der Anteil der Kennparameter-Gewichtung an der Gewichtungssumme ist der Spalte „Gewichtungsnote“ zu entnehmen (Gewichtung in Abhängigkeit von der Anzahl der KP in einem Cluster), während die Prozentwerte in der Spalte „genormte Gewichtungsnote“ aus der Relation der Gewichtungsnote zu der Summe aller Gewichtungsnotenwerte resultiert.

Tabelle 7 Gewichtungsnote (GN) einzelner Kennparameter (KP) nach Gruppierung

Cluster	Kennparameter	Gewichtungsfaktoren Stadtfahrzeug				Gewichtungsfaktoren Verteilerfahrzeug			
		Pkt.	Anzahl KP in Cluster	GN	GN Norm [%]	Pkt.	Anzahl KP in Cluster	GN	GN Norm [%]
Energiebilanz	Reichweite	8	2	4,0	18,6%	10	2	5,0	23,0%
	Energiebilanz	9		4,5	20,9%	9		4,5	20,7%
Fahrleistung	v_{max}	6	5	1,2	5,6%	6	5	1,2	5,5%
	Beschleunigung	5		1,0	4,7%	4		0,8	3,7%
	Elastizität	4		0,8	3,7%	4		0,8	3,7%
	Anfahrsteigvermögen	5		1,0	4,7%	6		1,2	5,5%
	Steigvermögen bei 60 km/h	5		1,0	4,7%	6		1,2	5,5%
Kosten	Kosten	8	1	8,0	37,2%	7	1	7,0	32,3%
SUMME		50		21,5	100%	50		21,7	100%

Die Kennparameter werden in der Bewertungsfunktion in Form von „Kennparameter-Noten“ berücksichtigt. Die Kennparameter-Noten sollen einen qualitativen Vergleich unterschiedlichster Kennparameter ermöglichen, welche sich im Wertebereich und in ihren physikalischen Einheiten stark voneinander unterscheiden. Die Ermittlung der Kennparameternoten erfolgt im Zuge der Erstellung von mathematischen Modellen während der Simulation mittels DoE, in welcher die Grenzen und Verteilungen der Kennparameterwerte unter Variation der Grundparameterwerte berechnet werden. Sofern definiert, stellen die Mindestanforderungen die Ober- bzw. Untergrenze in der Häufigkeitsverteilung der Kennparameter-Werte dar. Im Anschluss an die DoE-Simulation aller möglichen Fahrzeugkonfigurationen werden die Kennparameter-Häufigkeitsverteilungen kumuliert und normiert (siehe Abbildung 8). Am Beispiel des Kennparameters „Reichweite“ ist zu erkennen, dass der Maximalwert der DoE-Simulation bei ca. 200 km liegt, was zu einer Kennparameter-Bestnote von 1,0 führt. Bei einem „inversen“ Kennparameter wie der „Energiebilanz“ aus Abbildung 8 wird deutlich, dass die

Bestnote für das Minimum der Häufigkeitsverteilung vergeben wird, während der Maximalwert von 15 kWh/100km zur schlechtesten Note mit dem Wert Null führt.

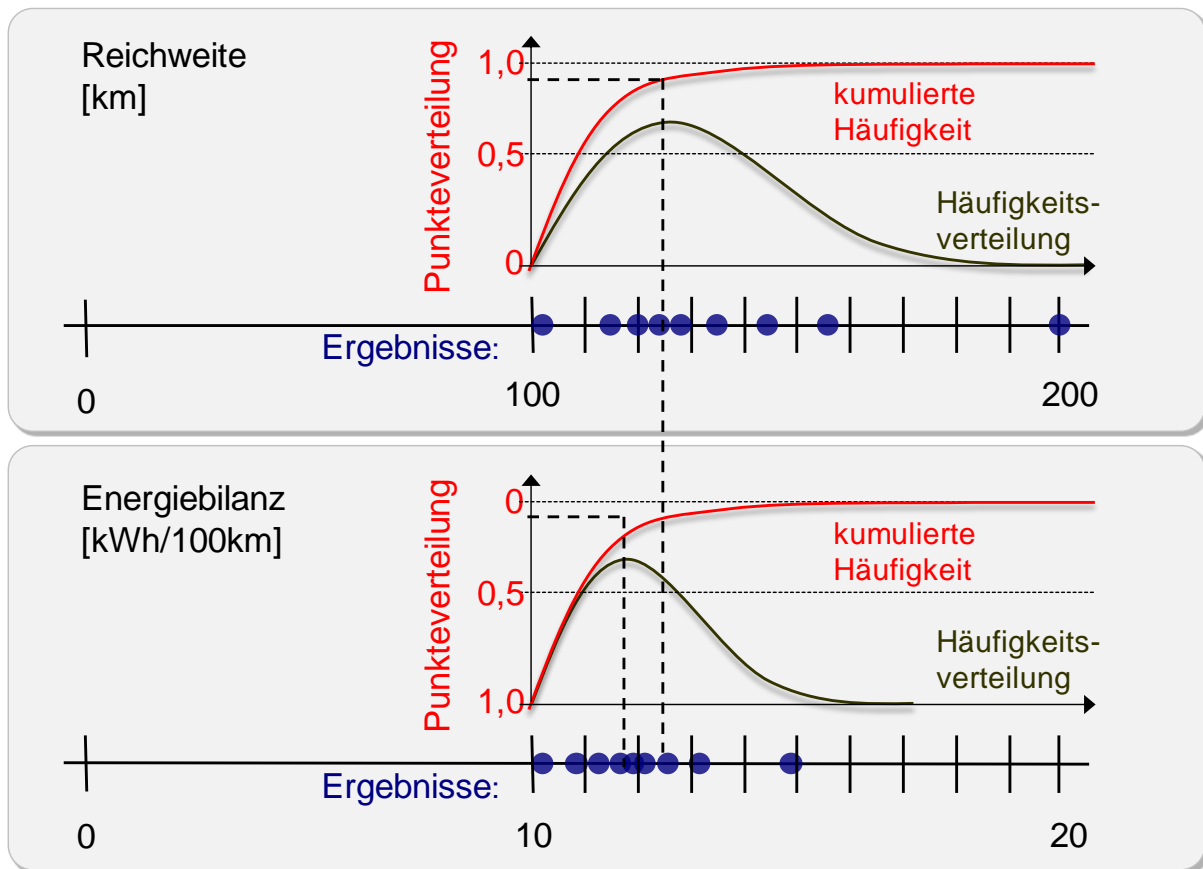


Abbildung 8 Ermittlung der Kennparameternoten anhand der Häufigkeitsverteilungen aus einer Simulation nach DoE exemplarisch dargestellt

Die Vergabe der Kennparameter-Noten mittels dieser Methode verhindert im Vergleich zu einer linearen Punkteverteilung eine überdurchschnittliche Bewertung der „Kennparameter-Ausreißer“ in der Bewertungsmatrix. Eine lineare Punkteverteilung weist wiederum einen negativen Aspekt auf, welcher dieses Verfahren für das weitere Vorgehen ausschloss. Bei z.B. drei Werten für den Verbrauch, von denen zwei sehr nahe beieinander liegen und der dritte mit einer größeren Differenz (z.B. 10, 12 und 30 kWh/100km), bekämen die zwei beieinander liegenden Werte nahezu gleiche Punkte, während der Ausreißer aufgrund der schlechten Punktzahl in der Optimierung keine Berücksichtigung fände.

2.3. Arbeitspaket 3: Simulationsmodell

Das modulare Simulationsmodell ist, wie in Abbildung 9 dargestellt, aufgebaut. Je nach Antriebsstrangkonfiguration (Zentral-, Tandem- oder Radnabenantrieb) und Topologie (Vorderrad-, Hinterrad- oder Allradantrieb) werden die Komponenten in der Parametrierung aktiviert oder deaktiviert. Das Fahrzeug besteht aus einer Batterie und einer bis vier E-Maschinen, die jeweils eine Leistungselektronik benötigen. Der E-Maschine können ein Getriebe mit variabler Übersetzung (Mehrganggetriebe), ein Verteilergetriebe und/oder ein Differentialgetriebe mit fester Übersetzung folgen. Diese Komponenten sind im Simulationsmodell variabel parametrierbar. Die hier erläuterte Simulation liefert Werte für die Reichweite sowie die Energiebilanz (kWh/100km) im Kundenzyklus.

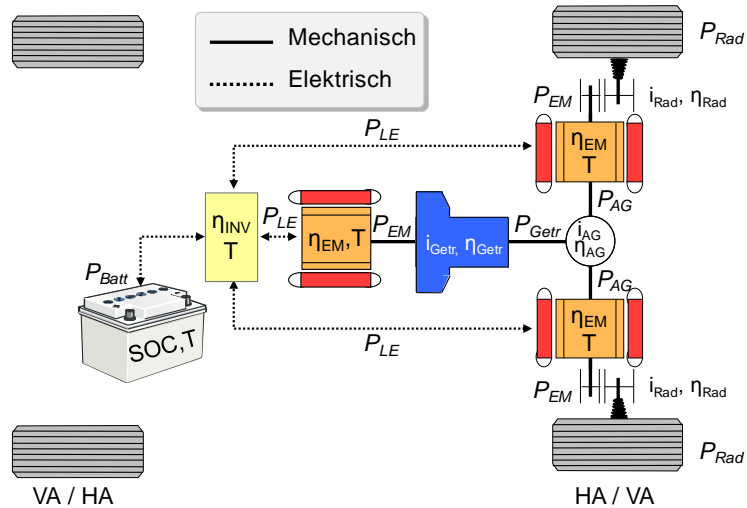
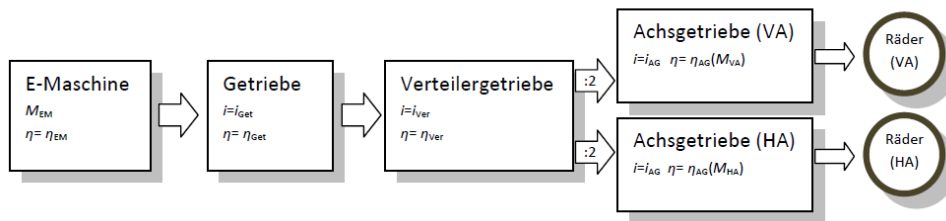


Abbildung 9 Modulares Simulationsmodell

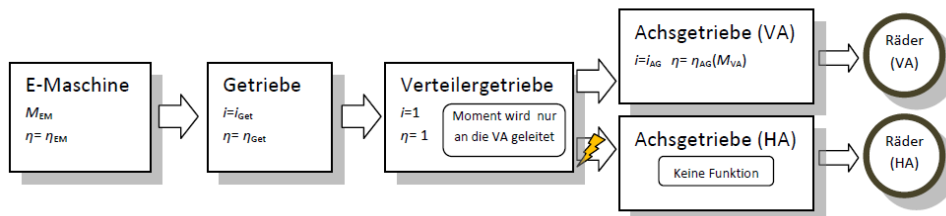
Handelt es sich bei einer betrachteten Antriebsstrangkonfiguration um einen einachsigen Antrieb, wird das Fahrzeug als Viertelfahrzeug (Einradmodell) dargestellt, im Falle eines mit Allrad angetriebenen Fahrzeugs als Einspurmodell. Der jeweils resultierende Momentenfluss im Simulationsmodell ist in den folgenden Abbildungen gezeigt. Beim Zentralantrieb (Abbildung 10) wird das Drehmoment in einem Getriebe, falls vorhanden, verlustbehaftet umgeformt. Bei einem Allradfahrzeug teilt ein Verteilergetriebe mit dem Wirkungsgrad η_{Ver} das Drehmoment auf Vorder- und Hinterachse auf. Mit Hilfe der Übersetzung und dem Wirkungsgrad des Achsgetriebes wird das am Rad resultierende Drehmoment berechnet.

Beim Radnaben- oder Tandemantrieb (Abbildung 11) haben das Getriebe und das Verteilergetriebe keine Funktion, d.h. Übersetzung und Wirkungsgrad sind gleich Eins. Werden die E-Maschinen bei diesem Antrieb mit einer Übersetzung versehen, wird diese durch das Achsgetriebe dargestellt. Der Radnaben- oder Tandemantrieb hat keine oder eine feste Übersetzung.

Zentralantrieb Allrad



Zentralantrieb Frontantrieb



Zentralantrieb Heckantrieb

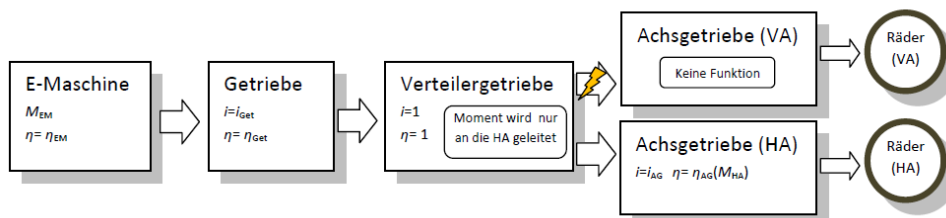
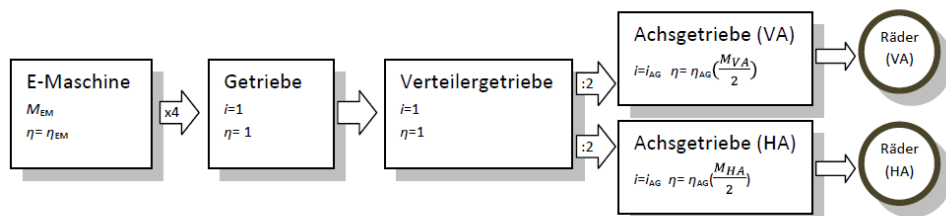
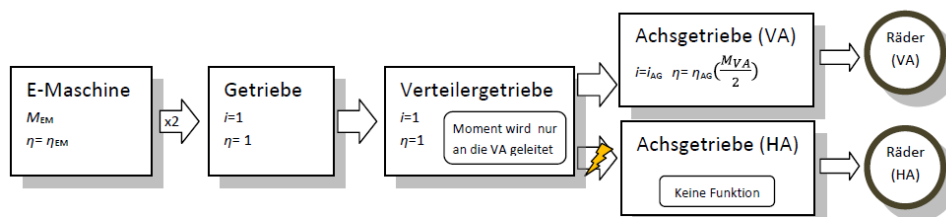


Abbildung 10 Zentralantrieb: Momentenfluss der möglichen Antriebsstrangkonfiguration-Kombinationen

Radnabenantrieb/Tandemantrieb Allrad



Radnabenantrieb/Tandemantrieb Frontantrieb



Radnabenantrieb/Tandemantrieb Heckantrieb

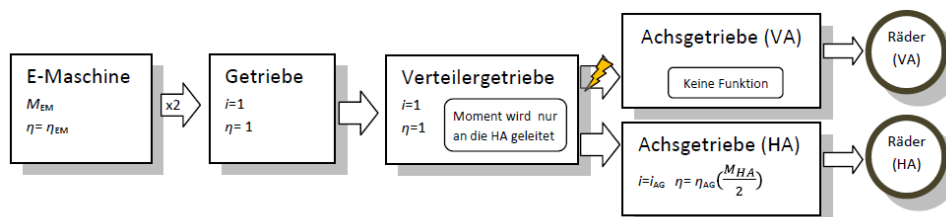


Abbildung 11 Radnaben-/Tandemantrieb: Momentenfluss der möglichen Triebstrangkombinationen

2.3.1. Modelle

Die *Batterie* basiert auf einem einfachen Modell mit einer idealen Spannungsquelle, welche mit einem seriellen Widerstand zu einer realen Spannungsquelle kombiniert wird. Eine einzelne Zelle wird durch Reihen- und Parallelschaltung zu einer Gesamtbatterie verschaltet. Eine kennfeldbasierte Simulation ist nicht möglich, da die benötigten Wirkungsgradkennfelder von den Industriepartnern nicht zur Verfügung gestellt werden konnten. Weitere wichtige Eigenschaften der Batterie sind das Gewicht sowie der Preis pro kWh.

E-Maschine, Leistungselektronik und Getriebe werden mit Hilfe von Wirkungsgradkennfeldern simuliert (siehe z.B. Abbildung 12). Diese Kennfelder werden von Industriepartnern geliefert. Darüber hinaus spielen bei den mechanischen Komponenten (E-Maschine und Getriebe) die Massenträgheiten eine wichtige Rolle zur Bestimmung der Dynamik des Antriebsstrangs. Auf die Leistung (LE und EM) bzw. das übertragbare Drehmoment und die Ganganzahl bezogen, werden Kosten und Gewichte der Komponenten bestimmt.

Das *Fahrermodell* ist durch eine Kombination aus inversem Fahrzeugmodell als Vorsteuerung sowie einem PI-Fahrerregler realisiert.

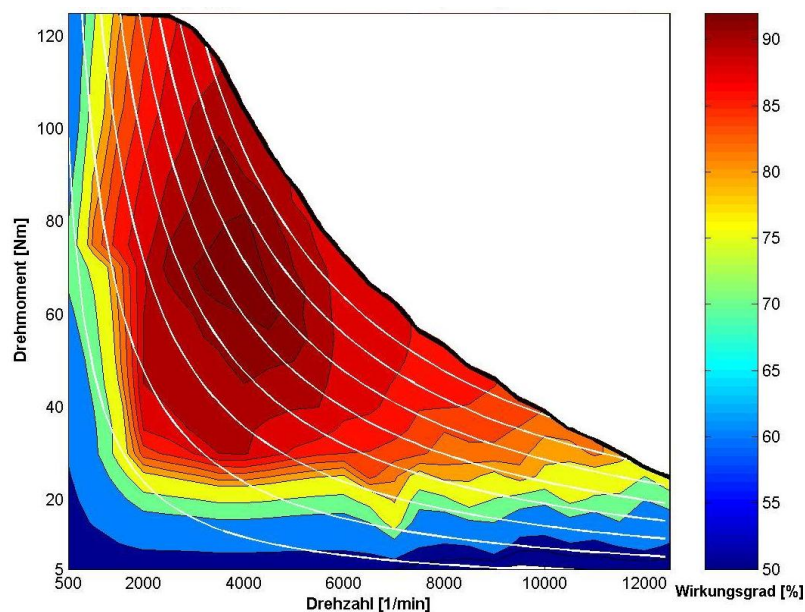


Abbildung 12 Wirkungsgradkennfeld für eine permanentmagneterregte Synchronmaschine (7)

2.3.2. Validierung

Zur Validierung des Simulationsmodells wurden Messfahrten mit dem *Getrag eSmart* durchgeführt. Dieser hat einen Zentralmotor mit Heckantrieb. Bei der E-Maschine handelt es sich um eine permanentmagneterregte Synchronmaschine mit 22 kW Dauerleistung. Das Getriebe ist ein automatisiertes Schaltgetriebe mit zwei Übersetzungen ($i_1 = 21,8$; $i_2 = 16,2$).

Zu Validierung des Simulationsmodells wird ein Beschleunigungsverlauf des realen *eSmart* (Schaltvorgang des Fahrzeugs bei Sekunde 21) mit der Simulation eines äquivalenten Fahrzeugs verglichen (Abbildung 13). Dazu wurde das Simulationsmodell mit den Daten und Kennfeldern des *eSmart* parametrisiert und die Eingangsgrößen Geschwindigkeit und aktueller Gang aus einer Messung verwendet. Wie in dem linken Diagramm aus Abbildung 13 zu

sehen, folgt die Geschwindigkeit des Simulationsmodells (gestrichelt) der des realen Fahrzeugs (durchgezogen) sehr genau. Abweichungen resultieren daraus, dass die Ist-Geschwindigkeit des realen Fahrzeugs die Geschwindigkeitsvorgabe des Fahrerreglers darstellt, welcher eine leichte Verzögerung im Anfahren, bewirkt, was sich ebenfalls im rechten Diagramm aus Abbildung 13 widerspiegelt.

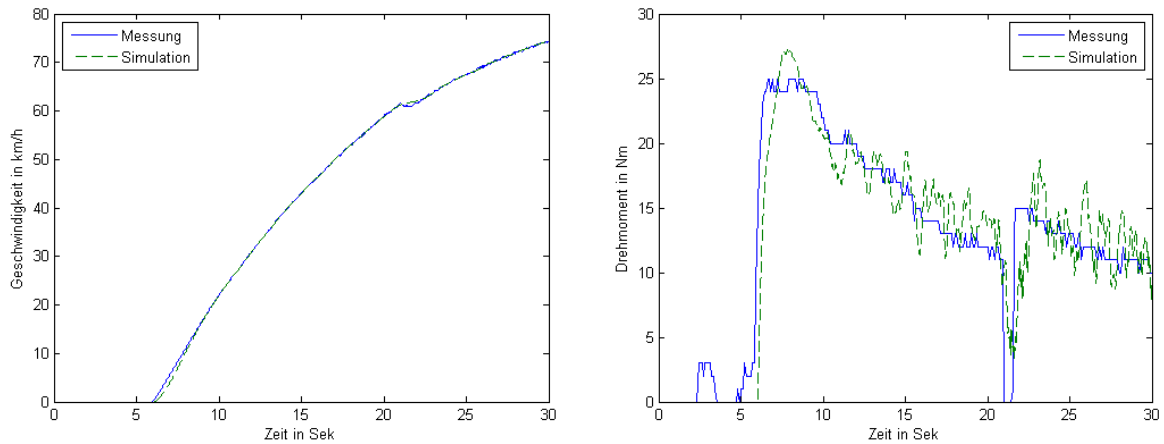


Abbildung 13 Vergleich der Geschwindigkeiten (links) und zweier Drehmomente (rechts) eines Beschleunigungsvorgangs

In diesem sind ein Vergleich des simulierten E-Maschinen Drehmoments (gestrichelt) und dem errechneten Drehmoment des Fahrzeugsteuergeräts (durchgezogen) zu sehen. Es ist zu beachten, dass aufgrund verschiedener Berechnungen Abweichungen resultieren. Das Signal aus der Messung stellt ein berechnetes Drehmoment aus dem Sollstrom des Wechselrichters dar, das simulierte Signal ist das vom Elektromotor abgegebene Drehmoment. Trotz einiger hochfrequenter Abweichungen stimmen die miteinander verglichenen Drehmomente weitestgehend überein. Ein Vergleich des Energieverbrauchs ist auf Grund fehlender Informationen über die Leistungselektronik und die Batterie nicht möglich.

2.4. Arbeitspaket 4: Optimierung

Nach Erstellung des Simulationsmodells werden die aus vorhandenen Kennfeldern initialisierten Fahrzeuge nacheinander simuliert. Grundlage für die Simulation ist der vorgegebene Versuchsplan (siehe Kapitel 2.4.1), in dem die Verstellbereiche der Grundparameter definiert sind. Nach Simulation der vorgegebenen Variationen werden die Ergebnisse jeder Fahrzeugkonfiguration zur Bildung der mathematischen Modelle auf Basis von Polynomfunktionen genutzt (Kapitel 2.4.2). Mit Hilfe der aus den mathematischen Modellen und weiteren Berechnungsfunktionen resultierenden Kennparameter und deren Gewichtungen wird im Optimierungsalgorithmus (Kapitel 2.4.3) das Optimum eines Fahrzeugs in seinem Einsatzgebiet identifiziert.

2.4.1. Versuchsplan (DoE) & Simulation

Für die sechs Grundparameter (GP) werden jeweils vier Variationen (k) zugrunde gelegt, da ein Polynom dritten Grades verwendet wird. Somit ergeben sich je Fahrzeug 4096 Versuche ($n = k^{GP}$). Ein Polynom höheren Grades führt zwar zu einer höheren Modellgüte, bedarf aber auch einer höheren Anzahl von Versuchen. Da jedoch sechs Grundparameter bei allein über 200 Stadtfahrzeug-Konfigurationen bereits in einem hohen Variantenspektrum resultieren, wurde das Polynom dritten Grades gewählt, um somit die Anzahl der Versuche und die daraus resultierende Rechenzeit vertretbar zu gestalten.

Die Verstellbereiche der Grundparameter ergeben sich zum einen aus plausiblen und zum anderen aus physikalischen Bedingungen. Die Zahlenwerte und Abhängigkeiten der Grenzen sind in Tabelle 8 dargestellt und werden im Folgenden erläutert.

Übersetzung 1. Gang i_1

Die minimale Übersetzung des ersten Gangs wurde zu $i_{1,min} = 5$ festgelegt. Diese Grenze ist nicht physikalisch bedingt. Da jedoch die Nutzung eines Energieumformers Wirkungsgradverluste mit sich bringt, ist die minimale Übersetzung so festgelegt, dass eine signifikante Erhöhung des Zugkraftangebots resultiert.

Das Maximum für die Übersetzung des ersten Gangs hängt im Wesentlichen von der minimalen Spreizung φ_{min} , der maximalen Drehzahl der E-Maschine $n_{EM,max}$ sowie der maximalen Fahrgeschwindigkeit im Kundenzyklus $v_{cycle,max}$ ab. Des Weiteren geht der Radius des Reifens mit in die Umrechnung der Drehzahl in Geschwindigkeit ein. Somit ergibt sich die maximale Übersetzung zu:

$$i_{1,max} = \varphi_{min} \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n_{EM,max} \cdot r_{Reifen}}{60 \cdot v_{cycle,max}} \right) \quad (1)$$

Durch Formel (1) ist sichergestellt, dass die Übersetzung des ersten Gangs so begrenzt ist, dass die maximale Geschwindigkeit des Fahrzyklus mit allen Varianten erreicht werden kann. Überschreitet $i_{1,max}$ nach Formel (1) den Wert 30, wird die Übersetzung des ersten Gangs auf diesen Wert begrenzt.

Tabelle 8 Verstellbereiche der Grundparameter

Grundparameter	Minimum	Maximum
Übersetzung 1. Gang i_1	5	$f(\varphi_{min}, n_{EM,max}, v_{cycle,max})$
Spreizung φ	1,1	$f(GSS_{grenz}, GZ, p_{min})$
Progressionsfaktor p	1	$f(\varphi_{min}, GZ)$
Skalierung Drehmoment	0,8	1,5
Skalierung Drehzahl	0,8	1,5
Parallele Batteriemodule Stadtfahrzeug	10 (\cong 15 kWh)	20 (\cong 31 kWh)
Parallele Batteriemodule Verteilerfahrzeug	15 (\cong 23 kWh)	30 (\cong 46 kWh)

$n_{EM,max}$: Maximale Drehzahl der E-Maschine, $v_{cycle,max}$: Maximale Geschwindigkeit im Fahrzyklus, GZ: Ganganzahl, GSS_{grenz} : Grundstufensprung-Grenze

Spreizung φ

Da die Spreizung eines Getriebes größer als Eins sein muss, ist das Minimum auf $\varphi_{min} = 1,1$ gesetzt. Das Maximum kann theoretisch beliebig groß gewählt werden, jedoch entstehen dadurch hohe Stufensprünge. Deshalb erfolgt die Begrenzung in Abhängigkeit der Ganganzahl GZ, des Progressionsfaktors p sowie des maximal erwünschten Stufensprungs GSS_{grenz} . Dieser wurde in der Berechnung auf $GSS_{grenz} = 3$ festgelegt, was für herkömmliche Getriebe bereits ein hoher Wert ist, da hohe Stufensprünge maßgeblichen Einfluss auf den Fahrkomfort haben (8). Die hier maximal zulässige Spreizung ergibt sich somit zu:

$$\varphi_{max} = GSS_{grenz}^{(GZ-1)} \cdot p_{min}^{(0,5(GZ-2)(GZ-1))} \quad (2)$$

Progressionsfaktor p

Für einen Progressionsfaktor $p = 1$ ergibt sich eine geometrische Getriebeabstufung. Daraus resultiert auch das Minimum für die zulässige Progression. Der maximale Progressionsfaktor wiederum ergibt sich aus Formel (3).

$$p_{max} < \varphi_{min} \left(\frac{1}{0,5 \cdot (GZ-2) \cdot (GZ-1)} \right) \quad (3)$$

Diese Formel resultiert aus der Bedingung, dass der Grundstufensprung größer als Eins sein muss. Wird der GSS in Formel (2) zu Eins, ergibt sich Formel (3) durch Umstellung nach p .

Skalierung Drehmoment & Drehzahl

Für die Skalierung der E-Maschine gibt es im positiven Zahlenbereich keine Grenzen, die in der Simulation nicht realisierbar sind. Dennoch soll der Bereich, in dem Drehmoment und Drehzahl der E-Maschine variieren, eingegrenzt werden. Deshalb werden Drehmoment und Drehzahl auf maximal 150 % skaliert, was zu einer maximalen Leistungssteigerung auf 225 % führt. Der untere Grenzwert beider Parameter beträgt 80 %, was wiederum in einer minimalen Leistung von 64 % vom Ausgangswert resultiert. Somit wird die Leistung, bezogen auf den Ausgangszustand, in etwa halbiert bzw. verdoppelt.

Parallele Batteriezellen Stadt- & Verteilerfahrzeug

Das Batteriemodell basiert auf Kombination mehrerer Zellen in Reihen oder Parallelschaltung. Bei einer Reihenschaltung von 100 Zellen wird ein Spannungsniveau von ca. 350 V erzielt. Ausgehend von einer Kapazität von 4,4 Ah je Zelle, kann durch Parallelschaltung die gewünschte Energiemenge erreicht werden. Bei 10 parallelen Zellen (Minimum für Stadtfahrzeug) werden 15,4 kWh mitgeführt. Die minimale Reichweite von 80 km für das Stadtfahrzeug sollte mit dieser Energiemenge problemlos fahrbar sein. Das Maximum von 20 Zellen (30,8 kWh) führt bereits zu einem Batteriegewicht von etwa 300 kg. Die Anzahl der Batteriezellen des Verteilerfahrzeugs wurden an den höheren Energieverbrauch (aufgrund des Gewichts, der Fahrzeugparameter und der höheren Fahrgeschwindigkeit) sowie die höhere minimale Reichweite angepasst.

2.4.2. Empirische Modellbildung

Die Modellbildung dient dazu, die simulierten Variationen der Grundparameter in einer mathematischen Funktion abzubilden, und damit einen kontinuierlichen Parameterraum für den erzielbaren Energieverbrauch einer Fahrzeugkonfiguration zu erreichen. Wie zu Beginn erwähnt, wird ein Polynom dritten Grades zur Modellerzeugung verwendet. Durch ein Polynom höherer Ordnung oder einen anderen Modellansatz (z.B. durch neuronale Netze), kann eine höhere Modellgüte erzielt werden.

Die Erzeugung der mathematischen Modelle erfolgt mit Hilfe des MATLAB-Befehls *nlinfit*, welcher auf der Methode der nichtlinearen kleinsten Quadrate basiert und eine beliebige Kurve an eine Datenpunktwolke annähern kann.

2.4.3. Optimierungsalgorithmus

Bei den Optimierungsalgorithmen wird grundsätzlich zwischen analytischen und numerischen Optimierungsmethoden unterschieden. Während die analytischen Methoden konkrete analytische Darstellungen der Zielfunktion bzw. deren Ableitungen benötigen, ist

für die Anwendung numerischer Methoden die Möglichkeit der Auswertung der Zielfunktion für beliebige Parameterkombinationen ausreichend, was für die Anwendung bei dieser Methodik ausschlaggebend ist.

Bei den numerischen Methoden unterscheidet man wiederum stochastische und deterministische Methoden. Deterministische Methoden arbeiten häufig auf Grundlage der Gradienten der Zielfunktion und haben gemeinsam, dass sie, ausgehend von einem gegebenen Startwert, reproduzierbar auf dem gleichen Weg zu einem Zielwert konvergieren. Das Optimierungsergebnis eines deterministischen Optimierungsalgorithmus hängt also stark von der Startposition ab. Um der beschriebenen Gefahr zu entgehen, nutzen stochastische Methoden Zufallszahlen im Verlauf der Optimierung. Bei den stochastischen Optimierungsalgorithmen werden wiederum verschiedene Methoden unterschieden, bei denen evolutionäre Verfahren mit der größten Wahrscheinlichkeit im globalen Optimum terminieren (9). Aufgrund dieser Überlegungen wird die Optimierung mit der *GEATbx* von Pohlheim (10) durchgeführt, welche auf evolutionären Algorithmen beruht.

2.5. Arbeitspaket 5: Analyse

Arbeitspaket 5 umfasst im Wesentlichen die Auswertung der Ergebnisse dieses Projekts und bezieht sich somit auf die vorherigen Kapitel des Berichts. Dieses Kapitel konzentriert sich darauf die zwei optimalen Konzepte darzustellen (Kapitel 2.5.1), Sensitivitätsanalysen durchzuführen (Kapitel 2.5.4) und die Gewichtungen der Zielfunktion zu variieren (Kapitel 2.5.5).

2.5.1. Optimale Fahrzeugkonzepte

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Optimierung für das Stadtfahrzeug und für das Verteilerfahrzeug vorgestellt. Im darauffolgenden Kapitel 2.5.4 folgt die Analyse der optimalen Konzepte und ihrer Sensitivitäten.

2.5.2. Stadtfahrzeug

Bei dem optimalen Stadtfahrzeug handelt es sich um ein Fahrzeug mit zentralem Frontantrieb und permanenterregter Synchronmaschine (PSM) sowie einem Dreiganggetriebe. Die Fahrzeugdaten sind in der folgenden Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 9 Fahrzeug-Parameter des optimalen Antriebsstrangkonzpts für das Stadtfahrzeug

Fahrzeug	E-Maschine (PSM)	Getriebe	Batterie
Stadtfahrzeug	56 kW	3 Gang MT	192 kW
Zentral-Frontantrieb	104 Nm	$i^{\vec{}} = [11,93; 8,38; 6,20]$	19 kWh
1014 kg	10.000 U/min		

Ausgangsbasis für dieses Fahrzeug ist eine PSM mit 47 kW, 69 Nm Nenndrehmoment und 12.500 U/min Maximaldrehzahl, die mit den Grundparametern $skal_{M_{EM}} = 1,5$ und $skal_{n_{EM}} = 0,8$ multipliziert wurde. Beim Getriebe handelt es sich um das Kennfeld eines dreigängigen Handschaltgetriebes mit den Ausgangsübersetzungen $i_1 = 31,45$, $i_2 = 4,65$ und $i_3 = 1,71$. Mit Hilfe der Grundparameter $i_1 = 11,93$, $\varphi = 1,92$ und $p = 1,05$ werden die Übersetzungen vom Optimierungsalgorithmus zu $i^{\vec{}} = [11,93; 8,38; 6,20]$ verändert. Die Batterie hat mit $Cell_{par} = 12,44$ einen Energieinhalt von 19 kWh. Die Kennparameterwerte

und -noten aus der Optimierung für das optimale Stadtfahrzeug sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10 Kennparameterwerte und -noten für das optimale Stadtfahrzeug

Kennparameter (KP)	Ergebnis Optimierung	Punkte nach h-Verteilung	Gewichtung in % (Festwert)	KP-Note (Punkte • Gewichtung) in %
Energie / kWh/100km	5,88	1,00	18,6	18,60
Reichweite / km	326	0,81	20,9	16,93
v_{\max} / km/h	173	0,63	5,6	3,53
$t_{v=0-60}$ / Sekunden	4,65	0,90	4,65	4,19
$t_{v=30-60}$ / Sekunden	2,45	0,90	3,72	3,35
$p_{\max,v=5}$ / %	41,5	0,49	4,65	2,28
$p_{\max,v=60}$ / %	32,5	0,38	4,65	1,77
Kosten / Euro	24.249	0,94	37,2	34,97
<i>Summe</i>	--	<i>6,01</i> <i>(max. 8,0)</i>	<i>100</i>	<i>85,62</i> <i>(max. 100)</i>

Auf den Plätzen 2 und 3 der Optimierung folgen zwei Fahrzeuge, die mit derselben E-Maschine ausgestattet sind. Im Gegensatz zum optimalen Konzept handelt es sich jedoch bei beiden um ein 6-Gang Getriebe, welches ebenfalls auf einem MT basiert. Die Konzepte enthalten grundsätzlich gleiche Komponenten, jedoch ist ein Fahrzeug mit Front- das andere mit Heckantrieb ausgerüstet. Generell fallen die höheren Kosten der Getriebe nicht ins Gewicht, da die Batteriekosten stark dominieren. Tabelle 11 und Tabelle 12 stellen die wichtigsten Daten der zwei Fahrzeuge dar.

Tabelle 11 Fahrzeug-Parameter für Platz 2 aus der Stadtfahrzeug-Optimierung

Fahrzeug	E-Maschine (PSM)	Getriebe	Batterie
Stadtfahrzeug	65 kW	6 Gang MT	183 kWh
Zentral-Heckantrieb	104 Nm	$i^{\rightarrow} = [11,52; 9,25; 7,43; 5,98; 4,82; 3,89]$	18 kWh
1010 kg	11.487 U/min		

Tabelle 12 Fahrzeug-Parameter für Platz 3 aus der Stadtfahrzeug-Optimierung

Fahrzeug	E-Maschine (PSM)	Getriebe	Batterie
Stadtfahrzeug	65 kW	6 Gang MT	183 kWh
Zentral-Frontantrieb	104 Nm	$i^{\rightarrow} = [11,53; 9,15; 7,27; 5,79; 4,60; 3,67]$	18 kWh
1010 kg	11.541 U/min		

Es ist zu erkennen, dass sich die zwei Fahrzeuge kaum voneinander unterscheiden. Der größte Unterschied der beiden Konzepte liegt beim Grundparameter φ , welcher um den Wert $\Delta\varphi = 0,2$ abweicht. Deshalb werden nachfolgend auch nur die Ergebnisse des Konzepts auf Platz 2 aufgeführt. Die Endergebnisse der Optimierung weichen ebenfalls nur minimal

voneinander ab. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass auf Platz 4 das Fahrzeug mit den gleichen Komponenten wie Platz 1 folgt, jedoch wiederum mit Heckantrieb. Auch hier liegen die Grundparameter sehr nah bei denen des Konzepts mit Frontantrieb.

Tabelle 13 Kennparameterwerte und -noten für Platz 2 aus der Optimierung des Stadtfahrzeugs

Kennparameter (KP)	Ergebnis Optimierung	Punkte nach h-Verteilung	Gewichtung in % (Festwert)	KP-Note (Punkte • Gewichtung) in %
Energie / kWh/100km	5,76	1,00	18,6	18,60
Reichweite / km	317	0,76	20,9	15,88
v_{\max} / km/h	182	0,68	5,6	3,81
$t_{v=0-60}$ / Sekunden	4,62	0,90	4,65	4,19
$t_{v=30-60}$ / Sekunden	2,34	0,91	3,72	3,39
$\rho_{\max,v=5}$ / %	40,2	0,46	4,65	2,14
$\rho_{\max,v=60}$ / %	37,4	0,52	4,65	2,42
Kosten / Euro	24.250	0,94	37,2	34,97
<i>Summe</i>	--	<i>6,01</i> <i>(max. 8,0)</i>	<i>100</i>	<i>85,40</i> <i>(max. 100)</i>

In der Optimierung liegen die hier beschriebenen Fahrzeuge mit 3- und 6-Gang Getriebe sehr nah beieinander. Bei der Gestaltung eines Stadtfahrzeugs mit Elektroantrieb erscheint ein Getriebe mit drei Gängen bereits als überdimensioniert. Jedoch lassen sich mit zunehmender Ganganzahl neben dem Verbrauch auch die Fahreigenschaften, wie Beschleunigung oder Höchstgeschwindigkeit, verbessern, was insgesamt zu einer sehr guten Bewertung führt. Lediglich das Steigungsvermögen wird mittelmäßig bewertet, was auf den direkten Vergleich mit der besonders guten Steigfähigkeit der Allradkonzepte zurückzuführen ist. Die nicht so hohe Bewertung der maximalen Geschwindigkeit resultiert aus der vergleichsweise geringen Leistung der E-Maschine.

Das erste Fahrzeug mit einer festen Übersetzung erscheint mit 80% der maximal erreichbaren KP-Note erst auf Platz 15. Der Energieverbrauch bei diesem Fahrzeug ist im Vergleich zu dem optimalen Konzept mit einer um 6,3 % schlechteren Bilanz bei 6,25 kWh/100km im mathematischen Modell dennoch akzeptabel. In Abbildung 14 werden die Betriebspunkte des optimalen Konzepts mit denen der besten Konfiguration mit 1-Gang-Getriebe verglichen. Bei einer etwas längeren Übersetzung des ersten Ganges werden im unteren Diagramm höhere Betriebspunkthäufigkeiten im Bereich hoher Drehmomente und niedriger Drehzahlen erzielt. Da jedoch das Mehrgang-Getriebe in dem zweiten und dritten Gang länger übersetzt als das 1-Gang-Getriebe, resultieren im unteren Diagramm höhere Zeitanteile im Bereich niedriger Drehmomente bei hohen Drehzahlen. Die Betriebshäufigkeiten der 1-Gang-Variante füllen demnach einen weiteren Bereich des Wirkungsgrad-Kennfelds aus LE, EM und Getriebe im Vergleich zu dem optimalen 3-Gang-Konzept, welches in der Lage ist, in den gangabhängig besten Wirkungsgradbereichen zu fahren (siehe Abbildung 14).

Die Höchstgeschwindigkeit als Kennparameter der besten 1-Gang-Variante ist mit ca. 100 km/h ausreichend, verglichen mit den Geschwindigkeiten der Mehrgänger auf den ersten Plätzen aber deutlich geringer. Dennoch stellen 80 % der maximal erreichbaren

Punkte für den besten Eingänger bei einer Spanne von 50,7 % (schlechteste Konfiguration) bis 85,6 % (beste Konfiguration) ein gutes Ergebnis dar.

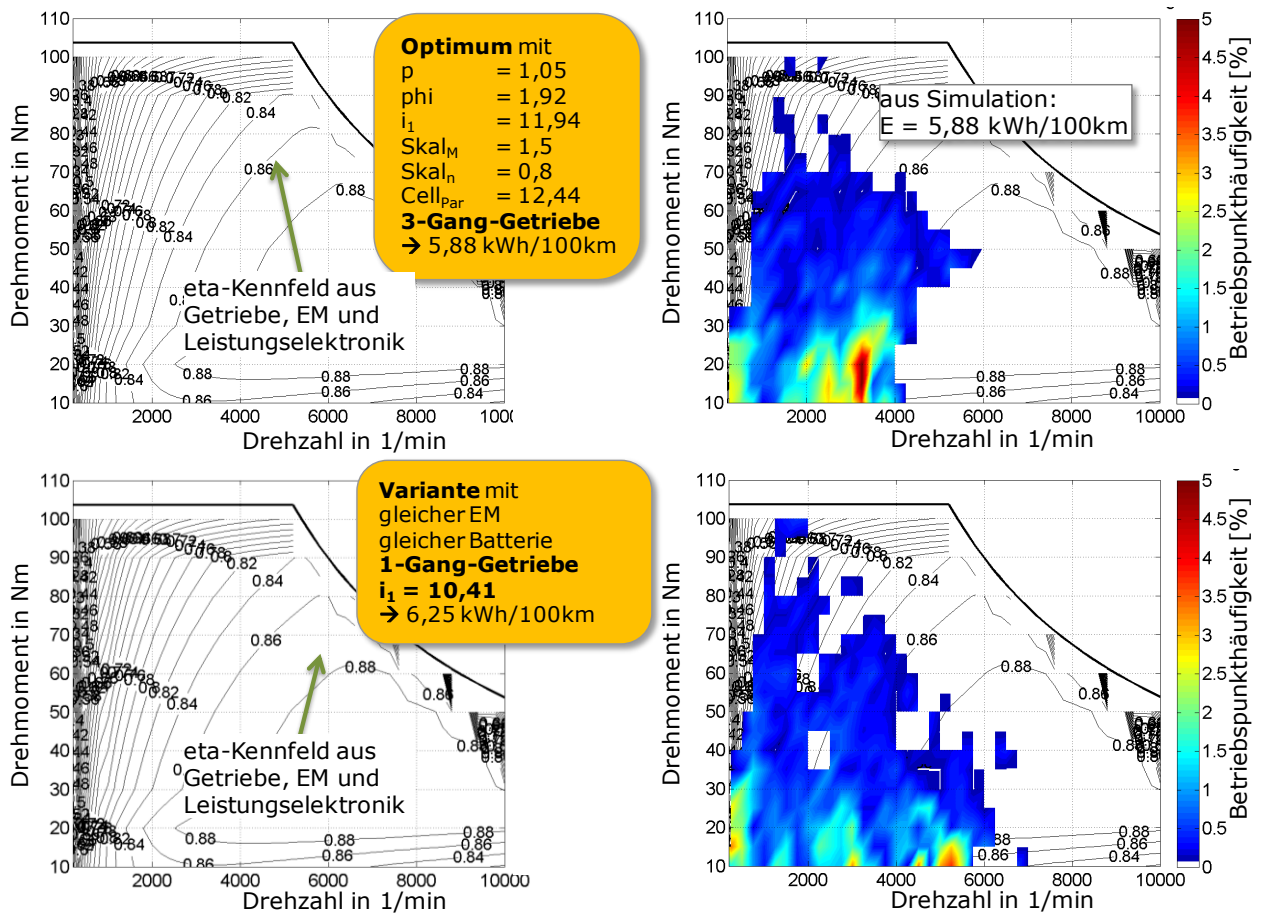


Abbildung 14 Vergleich der Betriebspunkte im η -Kennfeld aus EM, LE und Getriebe. Eta-Kennfeld (links) und Betriebshäufigkeiten (rechts) für a) obere Reihe: das optimale Konzept und b) untere Reihe: bestes Konzept mit einem 1-Gang-Getriebe (Platz 15).

Eine direkte Gegenüberstellung der betriebsoptimalen Gangwahl bei dem 3-Gang-Getriebe im Vergleich zu einem 1-Gang-Getriebe ist in Abbildung 15 dargestellt. In der oberen Reihe sind die Betriebspunkte des optimalen Konzeptes mit 3 Gängen zu erkennen, während in der unteren Reihe eine Variante mit den gleichen Komponenten und Grundparameter-Werten simuliert wurde, welche allerdings nur den Betrieb im 1. Gang zulässt. Die Verschiebung der Betriebspunkte hin zu höheren Drehzahlen bei niedrigeren Lasten resultiert in einer im Vergleich zu dem optimalen Konzept um 14,7 % schlechteren Energiebilanz von 6,75 kWh/100km.

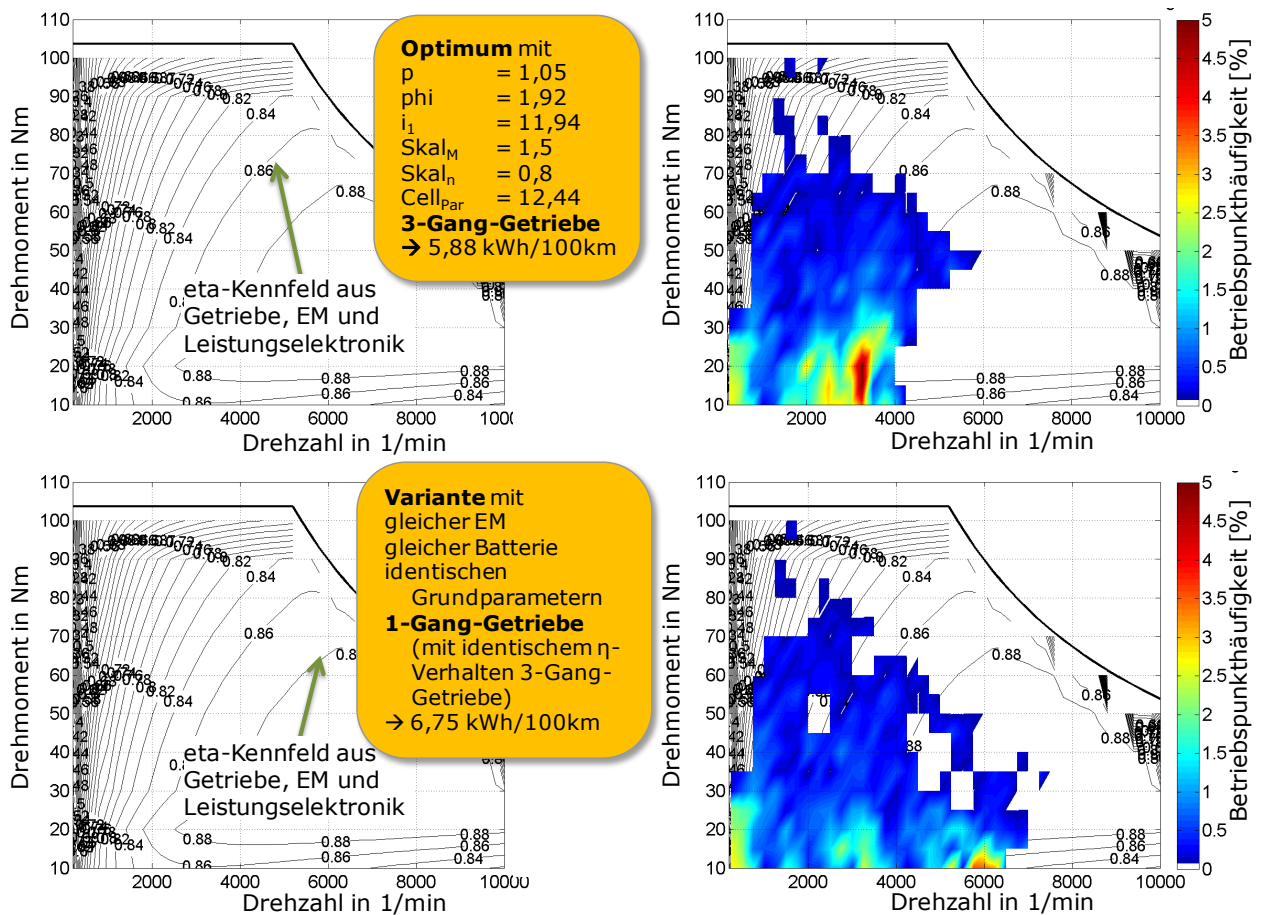


Abbildung 15 Einfluss der Ganganzahl auf die Betriebspunkte im η -Kennfeld aus EM, LE und Getriebe. Eta-Kennfeld (links) und Betriebshäufigkeiten (rechts) für a) obere Reihe: das optimale Konzept und b) untere Reihe: Variante mit gleichen Komponenten und Grundparameter-Werten bei nur einem Gang.

2.5.3. Verteilerfahrzeug

Bei dem optimalen Verteilerfahrzeug handelt es sich um ein Fahrzeug mit zentralem Heckantrieb und Asynchronmaschine (ASM) sowie einem Zweiganggetriebe. Die Fahrzeugdaten sind in der folgenden Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14 Fahrzeug-Parameter des optimalen Antriebsstrangkonzpts für das Verteilerfahrzeug

Fahrzeug	E-Maschine (ASM)	Getriebe	Batterie
Verteilerfahrzeug	197 kW	2 Gang MT	360 kW
Zentral-Heckantrieb	313 Nm	$i \vec{=} [8,8; 7,3]$	36 kWh
2237 kg	16.500 U/min		

Ausgangsbasis für dieses Fahrzeug ist eine ASM mit 112 kW, 268 Nm Nenndrehmoment und 11.000 U/min Maximaldrehzahl, die mit den Grundparametern $skal_{M_{EM}} = 1,17$ und $skal_{n_{EM}} = 1,5$ multipliziert wurde. Beim Getriebe handelt es sich um das Kennfeld eines zweigängigen Handschaltgetriebes mit den Ausgangsübersetzungen $i_1 = 31,45$ und $i_2 = 6,77$. Mit Hilfe der Grundparameter $i_1 = 8,88$, $\phi = 1,22$ und $p = 0$ werden die Getriebe-

übersetzungen zu $i^{\rightarrow} = [8,88; 7,30]$ verändert. Die Batterie hat mit $Cell_par = 23,39$ einen Energieinhalt von 36 kWh.

Die Kennparameterwerte und -noten aus der Optimierung für das optimale Verteilerfahrzeug sind in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15 Kennparameterwerte und -noten für das optimale Verteilerfahrzeug

Kennparameter (KP)	Ergebnis Optimierung	Punkte nach h-Verteilung	Gewichtung in % (Festwert)	KP-Note (Punkte • Gewichtung) in %
Energie / kWh/100km	16,85	1,00	23,0	23,0
Reichweite / km	214	0,9	20,7	18,7
v_{max} / km/h	243	0,82	5,5	4,5
$t_{v=0-60}$ / Sekunden	6,63	0,88	3,7	3,3
$t_{v=30-60}$ / Sekunden	2,95	0,98	3,7	3,6
$\rho_{max,v=5}$ / %	49,23	0,77	5,5	4,2
$\rho_{max,v=60}$ / %	49,23	0,82	5,5	4,5
Kosten / Euro	51750	0,9	32,3	29,1
<i>Summe</i>	--	<i>7,07</i> <i>(max. 8,0)</i>	<i>100</i>	<i>90,92</i> <i>(max. 100)</i>

Auf den Plätzen 2 und 3 der Optimierung folgen zwei Fahrzeuge, die mit derselben E-Maschine ausgestattet sind. Im Gegensatz zum optimalen Konzept handelt es sich jedoch um ein 6-Gang (2. Platz) und ein 1-Gang-Getriebe (3. Platz). Beide Konzepte enthalten, abgesehen vom Getriebe, gleiche Komponenten, jedoch ist ein Fahrzeug mit Front- das andere mit Heckantrieb ausgerüstet. Grundsätzlich fallen die höheren Kosten der Getriebe nicht bedeutend ins Gewicht, da die Batteriekosten auch hier stark dominieren. Tabelle 16 und Tabelle 17 stellen die wichtigsten Daten der zwei Fahrzeuge dar.

Tabelle 16 Fahrzeug-Parameter für Platz 2 aus der Verteilerfahrzeug -Optimierung

Fahrzeug	E-Maschine (ASM)	Getriebe	Batterie
Verteilerfahrzeug	163 kW	6 Gang MT	384 kW
Zentral-Heckantrieb	347 Nm	$i^{\rightarrow} = [11,52; 9,24; 7,43; 5,98; 4,82; 3,89]$	38 kWh
2.272 kg	12.339 U/min		

Tabelle 17 Fahrzeug-Parameter für Platz 3 aus der Verteilerfahrzeug -Optimierung

Fahrzeug	E-Maschine (ASM)	Getriebe	Batterie
Verteilerfahrzeug	194 kW	1 Gang MT	363 kW
Zentral-Frontantrieb	309 Nm	$i_1 = 8,07$	36 kWh
2.239 kg	16.500 U/min		

Im Gegensatz zu dem Stadtfahrzeug weisen die Konzepte auf den ersten beiden Plätzen in einigen Komponenten-Parametern bedeutende Unterschiede auf. Das Konzept auf dem

3. Platz ist wiederum in vielen Komponenteneigenschaften dem optimalen Konzept sehr ähnlich. Allein der zweite Gang des optimalen Konzepts ist ein signifikantes Differenzierungsmerkmal beider Fahrzeuge. In der Endbewertung weisen die Kennparameter-Noten mit 89,3 für den 2. Platz und 87,0 für den 3. Platz dennoch eine große Distanz zum Erstplatzierten auf (zum Vergleich: schlechtestes Konzept mit 75,7 Punkten). Tabelle 18 gibt einen Überblick über die erzielten Kennparameter-Werte: Die sich ähnelnden Konzepte auf Platz 1 und 3 weisen die größten Unterschiede in der Energiebilanz bzw. Reichweite und der v_{max} -Fähigkeit auf, was auf den Betrieb bei besseren Wirkungsgraden sowie die bessere Ausnutzung des oberen EM-Drehzahlbereichs durch den zweiten Gang des optimalen Konzepts zurückzuführen ist. Diese Feststellung ist äquivalent zu den Resultaten der Ergebnis-Präsentation für das Stadtfahrzeug.

Tabelle 18 Ergebnisse der Optimierung: Kennparameter-Werte für Platz 1-4 des Verteilerfahrzeugs

Kennparameter (KP)	Platz 1	Platz 2	Platz 3	Platz 4
Energie / kWh/100km	16,85	18,65	18,32	19,37
Reichweite / km	213,76	205,59	198,35	191,01
v_{max} / km/h	242,68	226,87	219,68	234,09
$t_{v=0-60}$ / Sekunden	6,63	7,07	7,22	7,09
$t_{v=30-60}$ / Sekunden	2,95	3,64	3,09	3,25
$\rho_{max,v=5}$ / %	49,2	53,1	44,2	47,4
$\rho_{max,v=60}$ / %	48,4	47,4	43,4	46,6
Kosten / Euro	51750	51750	51751	52512

Ferner ist der 4. Platz hervorzuheben, da auf diesem ein frontgetriebener Tandemantrieb (zwei radnahe PSM) mit 86,7 Punkten nah an dem Zentralantrieb mit Eingang-Getriebe auf dem 3. Platz liegt. Bei etwa gleicher Antriebsleistung beider Fahrzeugkonzepte erzielt der Tandemantrieb (siehe Tabelle 19) bei den Kennparametern im Fahrleistung-Cluster überwiegend bessere Werte, was auf die hohe Drehmomentstärke von 380 Nm (bessere Beschleunigungs- und Steigfähigkeit bei niedrigen Geschwindigkeiten) und die längere Getriebereduktionsstufe (hohe v_{max} -Fähigkeit) des Tandemantriebs zurückzuführen ist. Aufgrund der hohen Gewichtung der Kennparameter aus dem Energie-Cluster, bei denen der Tandemantrieb eher schlecht abschneidet, ist dennoch der Zentralantrieb mit der Reduktionsstufe als besser zu bewerten.

Tabelle 19 Platz 4 der Optimierung für das Verteilerfahrzeug

Fahrzeug	E-Maschine (PSM)	Getriebe	Batterie
Verteilerfahrzeug	90 kW	--	370 kW
Tandem-Frontantrieb	190 Nm	$i_1 = 7,07$	37 kWh
2.290 kg	15.420 U/min		

2.5.4. Sensitivitätsanalyse Stadtfahrzeug

In diesem Kapitel werden Sensitivitäten, d.h. das Verhalten des Systems bei Änderung der Grundparameterwerte, diskutiert. Hierbei wird das Stadtfahrzeug exemplarisch betrachtet.

Getriebe-Grundparameter

In Abbildung 16 ist der Energieverbrauch des optimalen Konzepts über der Übersetzung des ersten Gangs i_1 sowie der Getriebespreizung φ zu sehen. Der rote Punkt bildet das Optimum aus der Optimierung aller Kennparameter in der Bewertungsfunktion ab und somit nicht zwangsläufig das Minimum im Verbrauch. Die roten Kurven bilden zum einen die Sensitivität von i_1 (φ konstant) und zum anderen die Sensitivität von φ (i_1 konstant) ab. Alle anderen Grundparameter sind konstant in ihrem Optimalwert gehalten. Rechts ist weiterhin die Sensitivität der Progression p gezeigt, wobei die rote vertikale Linie den Optimalwert (φ und i_1 konstant) kennzeichnet. Verglichen mit den Sensitivitäten von i_1 und φ hat p eine geringe Auswirkung auf den Energieverbrauch.

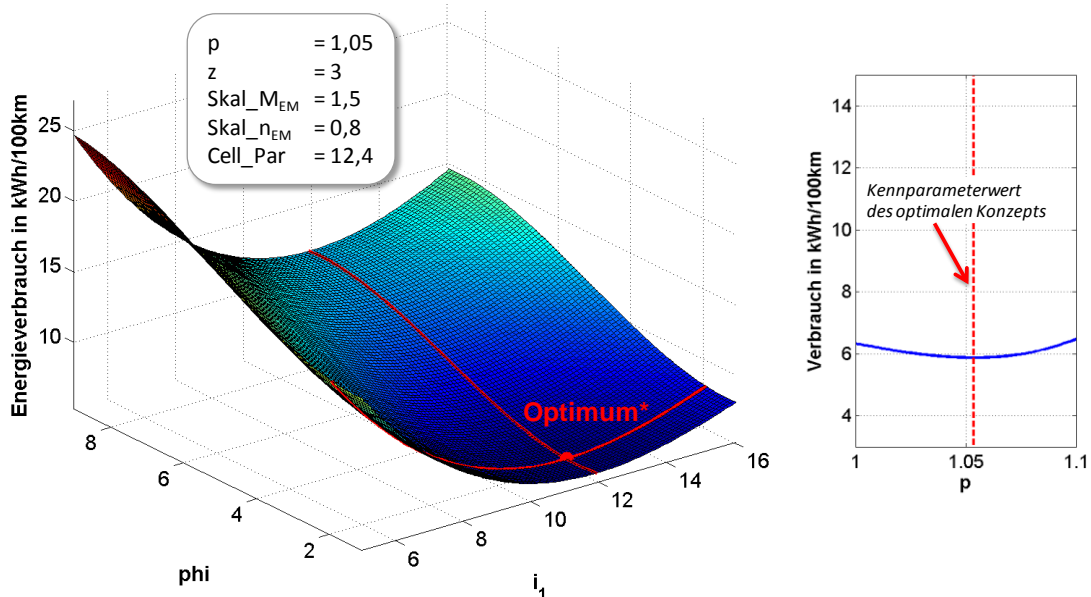


Abbildung 16 Energieverbrauch des optimalen Konzepts über den Getriebegrundparametern i_1 und φ (links) und Sensitivität des Progressionsfaktors (rechts).

*resultiert aus der Optimierung der Kennparameterfunktion; muss nicht zwangsläufig das Minimum im Energieverbrauch darstellen

In Abbildung 17 sind Varianten für die Übersetzung des ersten Gangs i_1 des optimalen Konzepts dargestellt. Ausgehend von den höchsten Verbräuchen bei niedrigen Übersetzung (hier im Beispiel $i_1=6,0$) sinkt der Verbrauch hin zum optimalen Konzept bei $i_1 = 11,94$ aufgrund niedrigerer Spitzendrehmomente bei gleichzeitig steigendem Drehzahlniveau, weshalb E-Maschine, Getriebe und Leistungselektronik in einem Bereich des besseren Wirkungsgrades betrieben werden.

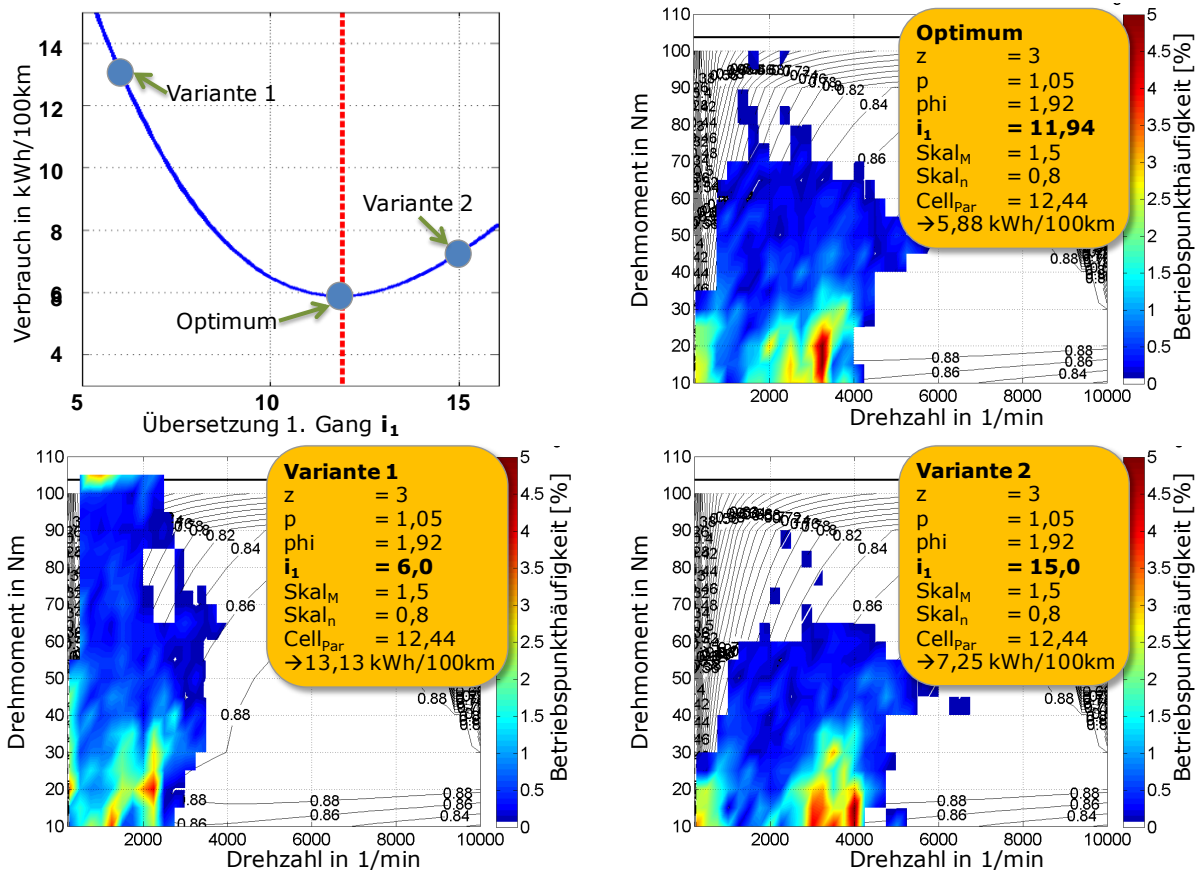


Abbildung 17 Untersuchung der Sensitivität von i_1 mittels der Betriebspunkthäufigkeiten im η -Kennfeld aus EM, LE und Getriebe. Obere Zeile: Verbrauch über der Variation von i_1 (links), Betriebspunkte des optimalen Konzepts (rechts); Untere Zeile: Betriebspunkte für Variante 1 mit niedrigem i_1 (links) und für Variante 2 mit hohem i_1 .

Diese Verschiebung der Betriebspunkthäufigkeiten ist nicht allein auf die differierenden Übersetzungen in den 1. Gängen zurückzuführen. Bei einer Variation der Getriebeübersetzung i_1 werden gleichzeitig alle anderen Grundparameter, und somit auch die Getriebe Größen φ und p in ihrem Wertebereich konstant gehalten. Somit ergibt sich für die Übersetzungen aller Gänge der 1. Variante ($i^{\rightarrow} = [6,0; 4,2; 3,1]$) eine im Vergleich zu dem optimalen Konzept ($i^{\rightarrow} = [11,93; 8,38; 6,20]$) über den gesamten Übersetzungsbereich relativ lange Auslegung der Gänge. Die weitere Erhöhung von i_1 in Variante 2 ($i^{\rightarrow} = [15,0; 10,5; 7,8]$) verdeutlicht die Tendenz zum Betrieb in höheren Drehzahlbereichen bei gleichzeitig sinkenden Spitzendrehmomenten, was jedoch aufgrund der Wirkungsgrad-Charakteristik der Komponenten wieder in einer Erhöhung des Verbrauchs resultiert.

Abbildung 18 zeigt die Sensitivität des Energieverbrauchs bei Variation der Getriebespreizung φ . Ausgehend vom optimalen Konzept mit $\varphi = 1,92$ werden bei Erhöhung auf $\varphi = 5,0$ die Bereiche maximaler Betriebspunkthäufigkeit in Richtung niedrigerer Drehzahlen bei gleichzeitig steigendem Drehmomentenniveau verschoben. Diese Verschiebung resultiert allein auf dem Betrieb in den Gängen 2 und 3, welche bei der 1. Variante mit längeren Gangübersetzungen ($i^{\rightarrow} = [11,9; 5,2; 2,4]$) realisiert werden, als bei der Ausgangsvariante des optimalen Konzepts ($i^{\rightarrow} = [11,93; 8,38; 6,20]$). Diese Verschiebung, welche eine signifikante Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs bewirkt, lässt sich mit der Variante 2 und einer hohen Getriebespreizung von $\varphi = 8,0$ noch besser verdeutlichen ($i^{\rightarrow} = [11,9; 4,1; 1,5]$).

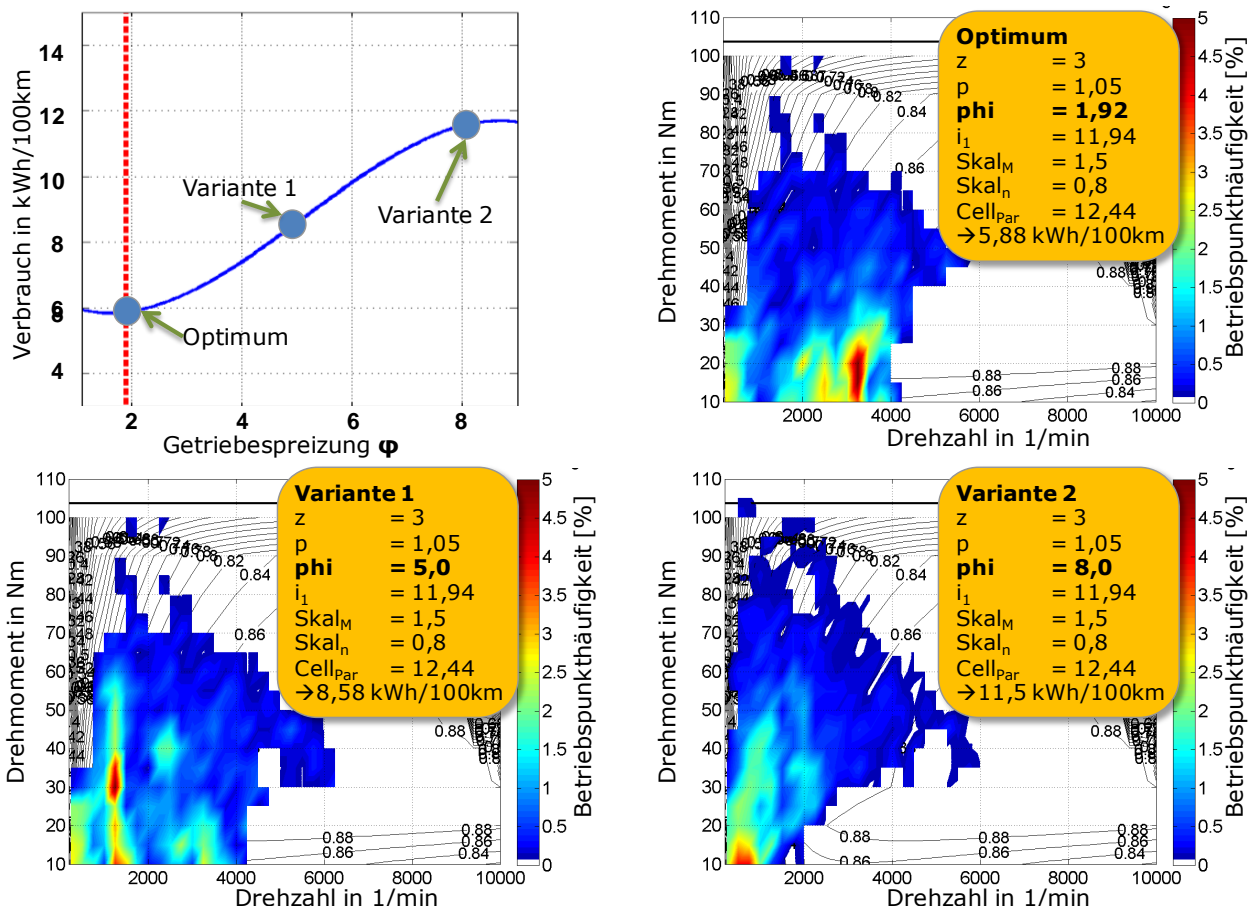


Abbildung 18 Untersuchung der Sensitivität von ϕ mittels der Betriebspunkthäufigkeiten im η -Kennfeld aus EM, LE und Getriebe. Obere Zeile: Verbrauch über der Variation von ϕ (links), Betriebspunkte des optimalen Konzepts (rechts); Untere Zeile: Betriebspunkte für Variante 1 mit mittlerem ϕ (links) und für Variante 2 im Bereich hoher ϕ

Eine abschließende Beurteilung der Sensitivität der Konzepte bei Variation der Getriebegrundparameter orientiert sich an dem Spektrum der Verbrauchswerte. In dem betrachteten DoE-Variationsbereich der Getriebespreizung ϕ ist zwischen dem Verbrauch des optimalen Konzepts und dem Verbrauch aus der Variante 2 mit 95 % nahezu eine Verdoppelung der Energiewerte zu verzeichnen, was auf eine hohe Sensitivität des Getriebegrundparameters ϕ schließen lässt. Für die Übersetzung des 1. Ganges i_1 ist sogar ein breiteres Spektrum zu verzeichnen, bei welchem die Variante 1 mit 13,13 kWh/100km einen um 123 % höheren Verbrauch erzielt als das optimale Konzept. Wie bereits erwähnt, weist der Grundparameter p nur eine geringe Sensitivität in Bezug auf den Verbrauch des Stadtfahrzeugs aus. So werden in den Grenzbereichen des DoE-Variationsbereich 6,34 kWh/100km ($p = 1$) bzw. 6,48 kWh/100 ($p = 1,1$) verzeichnet, womit die maximale Streubreite zum optimalen Konzept bei 10 % liegt.

E-Maschinen-Grundparameter

In Abbildung 19 ist der Energieverbrauch des optimalen Konzepts über dem Drehmomenten-Skalierungsfaktor $skal_M_{EM}$ sowie dem Drehzahl-Skalierungsfaktor $skal_n_{EM}$ der E-Maschine zu sehen. Die Prinzipskizze in Abbildung 19 soll den Verstellbereich dieser Grundparameter verdeutlichen. Der rote Punkt bildet das Optimum aus der Optimierung aller Kennparameter in der Bewertungsfunktion ab, und somit nicht zwangsläufig das Minimum im Verbrauch. Die roten Kurven bilden zum einen die Sensitivität von $skal_M_{EM}$ ($skal_n_{EM}$ konstant) und zum

anderen die Sensitivität von $skal_n_{EM}$ ($skal_M_{EM}$ konstant) ab. Alle anderen Grundparameter sind konstant in ihrem Optimalwert gehalten.

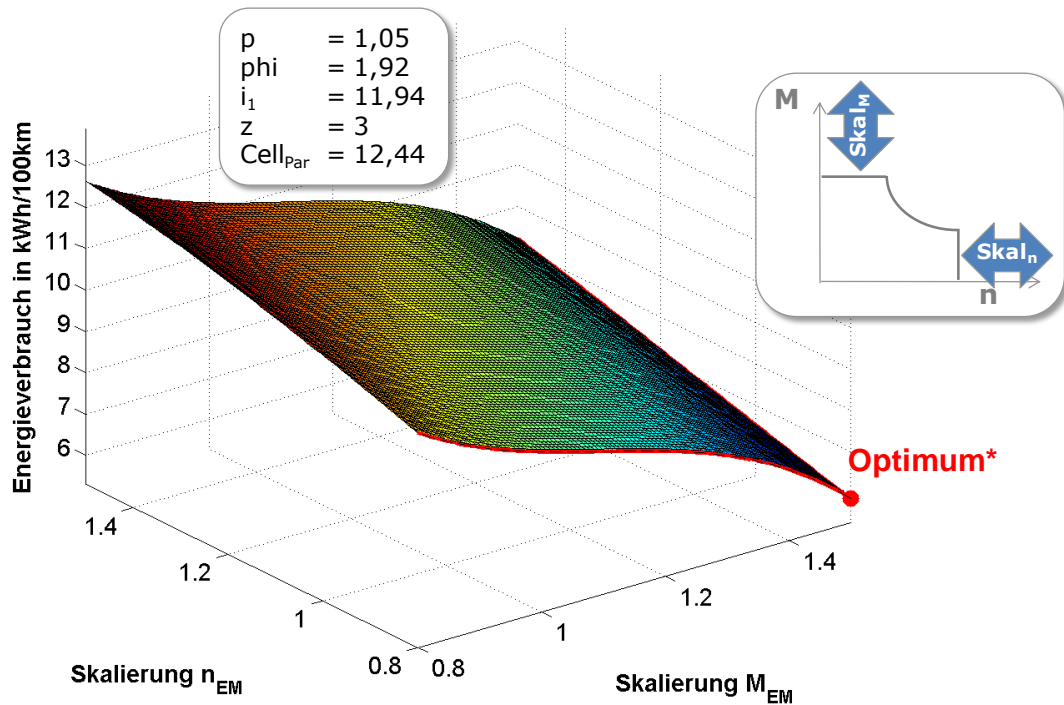


Abbildung 19 Energieverbrauch des optimalen Konzepts über den E-Maschinengrundparametern $Skal_M_{EM}$ und $Skal_n_{EM}$ (links).

*resultiert aus der Optimierung der Kennparameterfunktion; muss nicht zwangsläufig das Minimum im Energieverbrauch darstellen

Abbildung 20 verdeutlicht die Sensitivität des Energieverbrauchs bei Variation der EM-Momentenskalierung $skal_M_{EM}$. Ausgehend vom optimalen Konzept mit $skal_M_{EM} = 1,5$ werden bei Minderung auf $skal_M_{EM} = 1,2$ die Bereiche maximaler Betriebspunkthäufigkeit in Richtung niedrigerer Wirkungsgrade bei Momenten nahe der Vollastlinie verschoben. Diese Tendenz lässt sich mit der Variante 2 und einem niedrigen Skalierungsfaktor von $skal_M_{EM} = 0,8$ (siehe Abbildung 20 rechts unten) noch besser verdeutlichen.

In Abbildung 21 sind die Betriebspunkte bei Variation der EM-Drehzahlskalierung $Skal_n_{EM}$ dargestellt. Es wird deutlich, dass bereits die Verringerung des Drehzahlbandes bei dem optimalen Konzept auf $Skal_n_{EM} = 0,8$ eine Reduzierung im Verbrauch erwirkt. Es ist zu vermuten, dass aufgrund der Wirkungsgrad-Charakteristik der vorliegenden Komponenten eine weitere Verringerung des Drehzahlbandes zu noch stärkeren Verbrauchseinsparungen führen würde, da somit der Betrieb im wirkungsgradoptimalen Bereich bei $\eta = 0,9$ möglich wäre.

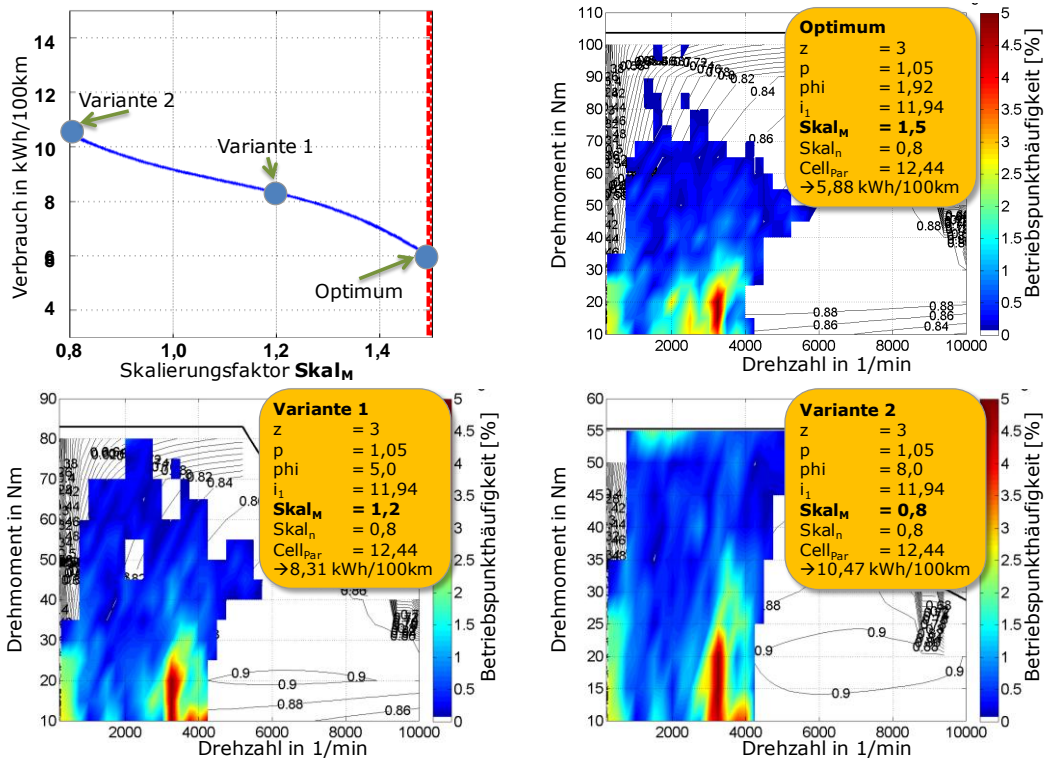


Abbildung 20 Untersuchung der Sensitivität von $skal_{M_{EM}}$ im η -Kennfeld aus EM, LE und Getriebe. Obere Zeile: Verbrauch über der Variation von $skal_{M_{EM}}$ (links), Betriebspunkte des optimalen Konzepts (rechts); Untere Zeile: Betriebspunkte für Variante 1 mit mittlerem $skal_{M_{EM}}$ (links) und für Variante 2 im Bereich niedriger $skal_{M_{EM}}$.

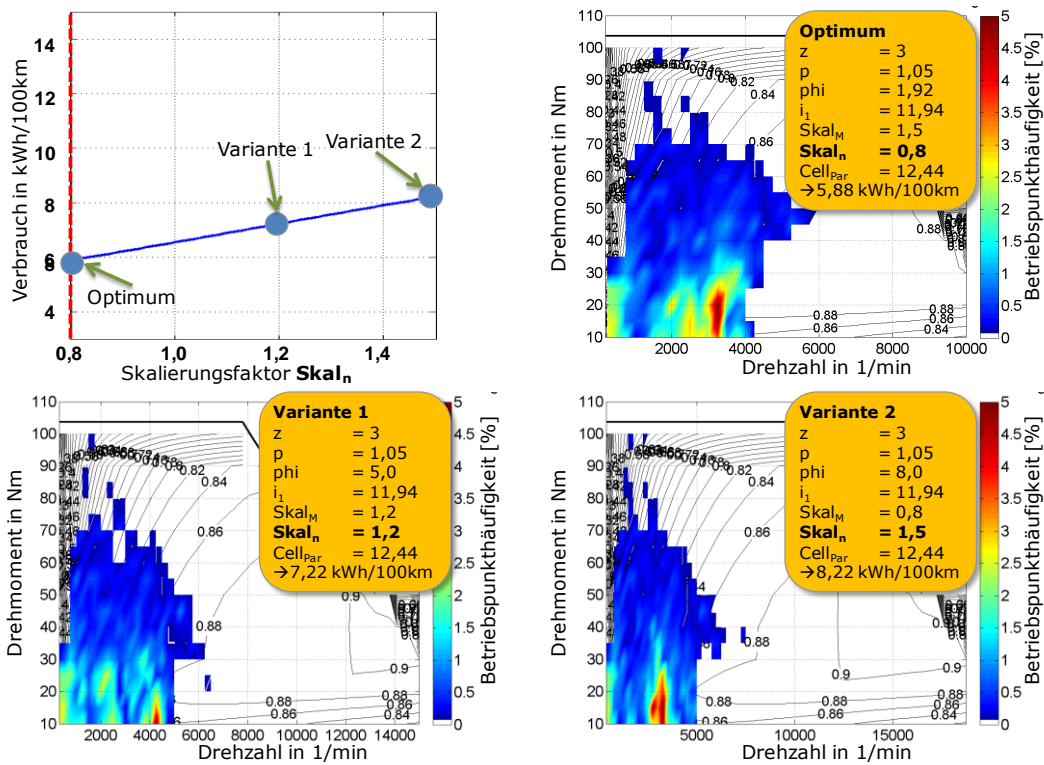


Abbildung 21 Untersuchung der Sensitivität von $skal_{n_{EM}}$ im η -Kennfeld aus EM, LE und Getriebe. Obere Zeile: Verbrauch über der Variation von $skal_{n_{EM}}$ (links), Betriebspunkte des optimalen Konzepts (rechts); Untere Zeile: Betriebspunkte für Variante 1 mit mittlerem $skal_{n_{EM}}$ (links) und für Variante 2 im Bereich hoher $skal_{n_{EM}}$.

Die Sensitivitäten der E-Maschinen-Grundparameter sind im Vergleich zu den Getriebe-Grundparametern als etwas geringer einzustufen. Die Variation des Drehmomenten-Skalierungsfaktors $skal_{M_{EM}}$ bewirkt eine maximale Verbrauchseinsparung von 78 % durch das optimale Konzept im Vergleich zu Variante 2. Bei dem Drehzahl-Skalierungsfaktor $skal_{M_{EM}}$ liegt das Reduktionspotential bei 39,8 % (Vergleich Variante 2 zu optimalen Konzept). Die Sensitivität dieses Grundparameters ist im Vergleich zu den Getriebe-Parametern i_1 und φ geringer, bei dem identifizierten Reduktionspotential jedoch nicht vernachlässigbar.

2.5.5. Variation der Gewichtungen der Zielfunktion

Die Ausgangs-Gewichtungen des Stadtfahrzeugs (vergleiche hierzu Tabelle 7) werden in drei Schritten variiert. Der Fokus mit der maximalen Gewichtungsnote von 10 Punkten wurde hierbei in der ersten Variation auf das Cluster Energiebilanz, als nächstes auf die Fahrleistung und im letzten Schritt auf die Kosten gelegt. Liegt der Fokus z.B. auf dem Cluster Fahrleistung (2. Variation), so werden die eingangs definierten Gewichtungen („Startgewichtungen“) in den Clustern Energiebilanz und Kosten jeweils halbiert und aufgerundet. Die so entstehenden Gewichtungen der einzelnen Kennparameter sind in Tabelle 20 zu sehen. Das hervorgehobene Cluster hat somit jeweils einen Anteil von ca. 55-60 %, die anderen beiden 20-25 %.

Tabelle 20 Punkte und prozentualer Anteil der variierten Gewichtungen (G-Note = Gewichtungsnote)

Kenn- parameter (KP)	Gewichtungen							
	Start- gewichtungen		Variation 1 Energiebilanz		Variation 2 Fahrleistung		Variation 3 Kosten	
	G-Note	G-Note Norm [%]	G-Note	G-Note Norm [%]	G-Note	G-Note Norm [%]	G-Note	G-Note Norm [%]
Energiebilanz	8/2	18,6	10/2	29,8	4/2	10,8	4/2	11,6
Reichweite	9/2	20,9	10/2	29,8	5/2	13,5	5/2	14,5
v_{max}	6/5	5,6	3/5	3,6	10/5	10,8	3/5	3,5
Beschleunigung	5/5	4,7	3/5	3,6	10/5	10,8	3/5	3,5
Elastizität	4/5	3,7	2/5	2,4	10/5	10,8	2/5	2,3
p bei 0 km/h	5/5	4,7	3/5	3,6	10/5	10,8	3/5	3,5
p bei 60 km/h	5/5	4,7	3/5	3,6	10/5	10,8	3/5	3,5
Kosten	8/1	37,2	4/1	23,8	4/1	21,6	10/1	57,8
Summe	21,5	100	16,8	100	18,5	100	17,3	100

Variation 1: Energiebilanz

Wird die Energiebilanz stärker gewichtet (mit ca. 60 %), resultiert für das Stadtfahrzeug als optimales Konzept das Fahrzeug mit denselben Komponenten wie in Kapitel 2.5.1. Darüber hinaus weichen auch die Werte für Grundparameter für die E-Maschine und das Getriebe kaum vom optimalen Konzept ab. Die Batterie ist allerdings, aufgrund der geringen Gewichtung der Kosten, mit 14,2 Zellen (22 kWh) etwas größer, so dass eine höhere Reichweite resultiert. Das Fahrzeug erreicht eine Gesamtwertung von 88 %.

Variation 2: Fahrleistung

Werden die Fahrleistungseigenschaften auf etwa 55 % Gesamtanteil erhöht, resultiert ein Fahrzeug mit 2-Gang Getriebe als optimales Konzept. Auch die E-Maschine ist bei diesem Fahrzeug eine andere als bei den Stadtfahrzeugen der vorderen Plätze. Die wichtigsten Fahrzeugdaten sind in Tabelle 21 gegeben.

Tabelle 21 Optimale Antriebsstrangkonfiguration für das Stadtfahrzeug mit Fokus „Fahrleistung“

Fahrzeug	E-Maschine (PSM)	Getriebe	Batterie
Stadtfahrzeug	98 kW	2 Gang MT	156 kWh
Zentral-Frontantrieb	195 Nm	$i^{\rightarrow} = [15,42; 9,19]$	15,6 kWh
1007 kg	18.000 U/min		

Das Fahrzeug ist etwas leichter als die Konzepte zuvor und hat eine leistungsstarke E-Maschine. Die Batterie fällt kleiner aus, was sich positiv auf Gewicht und Kosten auswirkt, jedoch eine schlechtere Reichweite bewirkt, welche aufgrund der geringeren Gewichtung dennoch keinen starken Einfluss auf die Bewertung hat. Zur Erzielung der guten Fahrleistung (Steigungs- und Beschleunigungsvermögen) sind, abgesehen von v_{max} , zwei Gänge vollkommen ausreichend, da diese im Wesentlichen in niedrigen Geschwindigkeitsbereichen bestimmt werden. Bei dem optimalen Konzept aus der Gewichtungsvariante 2 wird aufgrund der hohen Maximaldrehzahl der E-Maschine dennoch eine gute Höchstgeschwindigkeit erreicht, welche eine hohe Punktzahl in der Bewertung bewirkt.

Variation 3: Kosten

Bei höchster Gewichtung der Kosten löst Platz 2 aus der ursprünglichen Optimierung Platz 1 ab. Allerdings ist die Differenz in der Gesamtnote auch hier minimal. Aufgrund der hohen Gewichtung der Kosten fällt die Batterie mit ca. 16 kWh kleiner aus. Ansonsten unterscheidet sich die Variante dieses Fahrzeugs kaum von der Optimierung aus Kapitel 2.5.1. Die erzielten Ergebnisse der drei Variationen der Gewichtungen sind in Tabelle 22 aufgezeigt.

Tabelle 22 Ergebnisse der Optimierung mit variierten Gewichtungen (G-Note = Gewichtungsnote)

Kennparameter (KP)	Energiebilanz		Fahrleistung		Kosten	
	Ergebnis Optim.	G-Note Norm [%]	Ergebnis Optim.	G-Note Norm [%]	Ergebnis Optim.	G-Note Norm [%]
Energie / kWh/100km	6,2	29,8	7,6	10,8	5,4	11,6
Reichweite / km	354	28,3	205	2,0	295	9,2
v_{max} / km/h	170	2,2	210	9,5	183	2,4
$t_{v=0-60}$ / Sekunden	4,77	3,2	2,16	10,7	4,53	3,2
$t_{v=30-60}$ / Sekunden	2,51	2,1	1,28	10,7	2,30	2,1
$p_{max,v=5}$ / %	40,5	1,7	66,8	10,8	40,9	1,7
$p_{max,v=60}$ / %	31,6	1,3	55,8	9,6	38,5	1,9
Kosten / Euro	27.000	19,6	24.250	20,4	22.000	57,0
Summe	--	88,1	--	84,6	--	89,1

2.6. Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Wie in der Aufgabenstellung als Ziel des Forschungsvorhabens beschrieben, soll der ideale Antriebsstrang für zwei Fahrzeugkonzepte in ihrem jeweiligen Einsatzraum nach vorab definierten Bewertungsparametern ermittelt werden. Dieses Ziel wurde erreicht und in Kapitel 2.5 ausführlich erläutert. Die Ergebnisse wurden darüber hinaus einer Sensitivitätsanalyse verschiedener Grundparameter (Kapitel 2.5.4) sowie weiteren Analysen unterzogen (Kapitel 2.5.5). Da das Simulationsmodell auf realen Kennfeldern basiert und zusätzlich validiert wurde, ist von den realistischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten auszugehen. Das Simulationsmodell ermöglicht eine anforderungsoptimierte Entwicklung und modellbasierte Überprüfung von elektrischen und mechanischen Komponenten.

Durch den Lenkungsausschuss der FVA und dem ständigen Informationsaustausch mit den Industriepartnern wurde auch eines der Ziele des „nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität“, die Vernetzung von Wissenschaft und Wirtschaft, erreicht.

Ein weiterer wichtiger Aspekt aus Sicht der Wissenschaft ist das methodische Vorgehen bei der Erlangung der genannten Ziele. Das in fünf Arbeitspakete unterteilte Projekt (siehe Kapitel 2.1 bis 2.5) beinhaltet verschiedene systematische Schritte zur Optimierung des Antriebsstrangs für Elektrofahrzeuge. Zu Beginn wurden zu betrachtende E-Fahrzeuge und Einsatzprofile sowie Mindestanforderungen und Bewertungsparameter definiert. Anschließend wurde ein modulares Simulationsmodell aufgebaut, welches jegliche Antriebstopologien simulieren kann. Im darauffolgenden Arbeitspaket wurden die verschiedenen Fahrzeugkonzepte simuliert und anschließend optimiert. Als letzter Schritt folgte die Auswertung mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen und Parametervariationen. Der erreichte Lösungsgrad ermöglicht es, durch minimale Anpassung auf angepasste Anforderungen in der Optimierung einzugehen.

Aspekte auf die nicht eingegangen werden konnte, die aber in der Vorhabenbeschreibung erwähnt wurden, sind im Folgenden erläutert. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um die Vielfalt der Simulationen, also der Anzahl von Komponenten, sowie den Detaillierungsgrad. Es wurden für Fahrzeuge relevante Kennfelder von E-Maschinen, Getrieben etc. vom IfF vermessen, und teilweise von den Industriepartnern geliefert, d.h. diese basieren auf vorhandenen Komponenten. Im Antrag wurden teilweise Komponenten für Elektrofahrzeuge in Erwägung gezogen, die interessant für die Forschung sind, jedoch keine Rolle im Repertoire der Hersteller spielen, und somit nicht zur Vermessung vorlagen. Dies trifft beispielsweise für Kurzzeitenergiespeicher oder Reluktanzmaschinen zu. Des Weiteren war geplant, Temperatureinflüsse der Komponenten zu berücksichtigen. Da jedoch nicht alle Kennfelder diese Temperaturabhängigkeiten aufweisen, und eine Vergleichbarkeit gegeben sein soll, wurden alle Komponenten bei Betriebstemperatur betrachtet.

2.7. Schlussfolgerungen

Im Laufe der Bearbeitung des Projekts hat sich ein umfangreiches, aber effektives Tool entwickelt. Durch die umfangreiche Vorbereitung der Simulationen und Optimierungen, mit Mindestanforderungen sowie verschiedenen Grund- und Kennparametern etc., lässt sich der Findungsprozess des optimalen Konzepts den gewünschten Bedürfnissen anpassen. Es kann an verschiedenen Stellen auf den Detaillierungsgrad und den Umfang der Optimierungen Einfluss genommen werden.

Die Optimierungen, die in einem ersten Schritt durchgeführt und hier vorgestellt wurden, zeigen hierbei bereits einen hohen Komplexitätsgrad auf. Es liegen viele Kennfelder vor und es werden alle gewählten Grundparameter in einem weiten Spektrum variiert. Für Detailoptimierungen von Komponenten kann es sinnvoll sein, verschiedene Grundparameter und Kennfelder konstant zu halten. Dies erleichtert auch die Interpretation der Zusammenhänge der Ergebnisse.

Um die Anzahl der durchgeführten Simulationen in Grenzen zu halten, wurde ein Polynom dritten Grades verwendet. Hier hat sich bei den Ergebnissen gezeigt, dass teilweise Abweichungen zwischen den Ergebnissen der mathematischen Modelle und den Ergebnissen der Simulationen vorliegen, die durch Verwendung eines anderen mathematischen Ansatzes vermindert werden könnten. Auch in diesem Fall erscheint es sinnvoll, die Anzahl der Kennfelder und/oder Grundparameter zu beschränken und deutlich mehr Variationen zu simulieren.

Der verwendete Optimierer wurde mit Bedacht ausgewählt und arbeitet zuverlässig, da er auch bei Variationen der Gewichtungen ähnliche Fahrzeugkonzepte findet. Optimierungspotenzial besteht derzeit noch bei der Ermittlung der Kennparameternoten. Derzeit wird für die Verteilung der Punkte die Häufigkeitsverteilung der erreichten Kennparameterwerte herangezogen. Der verwendete Ansatz hat ebenfalls Einfluss auf die Ergebnisse der Optimierung.

Trotz der Komplexität und der Verbesserungspotenziale der Methodik lässt sich beim Stadtfahrzeug ein eindeutiger Trend hin zu Mehrganggetrieben sehen. Das erste Fahrzeug mit einem Gang liegt abgeschlagen auf Platz 15 der Optimierung. Tandem- und Radnabenantriebe liegen sogar noch dahinter. Die Platzierungen des Verteilerfahrzeug weichen von diesem Trend etwas ab (Tandemantrieb auf Platz 4), da aber die vorliegenden E-Maschinen Kennfelder eher für kleine Fahrzeuge ausgelegt sind (daran zu erkennen, dass die Skalierungsfaktoren der E-Maschinen beim Verteilerfahrzeug mit Zentralantrieb alle größer Eins sind), wäre eine erneute Optimierung mit auf das Verteilerfahrzeug ausgelegten Kennfeldern interessant. Dass bei der Optimierung des Antriebsstrangs des Stadtfahrzeugs auch 6-Gang Getriebe eine gute Platzierung erreichen, liegt unter anderem daran, dass die Kosten der Batterie sehr dominieren. Dieser Trend lässt sich auch nicht durch eine Änderung der Gewichtungen beeinflussen. In diesem Fall wären zukünftige Optimierungen mit angepassten Kostenmodellen zielführend.

3. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Es gibt keine Abweichungen zu dem Finanzierungsplan zu benennen.

4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Eine Grundvoraussetzung für die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Automobilindustrie ist der Vorsprung in Technologie und Forschung. Die Entwicklung von anforderungsoptimierten Elektrofahrzeugen, welche in ökonomischer und ökologischer Hinsicht einen Vorsprung zu bislang auf dem Markt vertretenen Fahrzeugen bringen sollen, ist hierzu ein bedeutender Beitrag.

Elektrofahrzeuge eröffnen den deutschen Automobilherstellern – aber auch im Wesentlichen den in Deutschland ansässigen kleinen und mittelständischen Unternehmen – vielfältige Möglichkeiten sich auf neuen Geschäftsfeldern zu betätigen. Die deutsche Volkswirtschaft hängt stark vom Export der Automobilwirtschaft ab. Umso wichtiger ist ein Technologievorsprung bei E-Fahrzeugen, denen unter anderem im Hinblick auf durch den Gesetzgeber geforderten Einsatz von emissionsarmen Fahrzeugen ein zukünftig bedeutender Marktwert zugesprochen wird. Somit leistet dieses Projekt einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der beteiligten Unternehmen.

Wissenschaftlich wurde diese Methode, die im Rahmen des Vorhabens angewandt wird, schon an komplexen Systemen am Institut für Fahrzeugtechnik mit Erfolg benutzt. Aus diesem Grund sind die Erfolgsaussichten mit sehr gut zu bewerten.

Ergänzende Erläuterungen sind der ANLAGE B: ERFOLGSKONTROLLBERICHT in den Abschnitten „wissenschaftliche/wirtschaftliche“ und „technische Erfolgsaussichten“ zu entnehmen.

5. Voraussichtlicher Nutzen

Die Methodik zur Ermittlung eines optimalen Konzepts für definierte Einsatzprofile und beliebig anpassbare Bewertungsfunktionen stellt einen wissenschaftlichen Beitrag dieses Forschungsvorhabens dar. Die dafür eingesetzten Werkzeuge zeigen, dass das methodische Vorgehen jederzeit eine Anpassung an die Anforderungen von Industrieunternehmen ermöglicht.

Nicht zu vernachlässigen ist das Potential bei der Weiterentwicklung bereits bestehender Komponenten durch das Verständnis ihres Einflusses auf den Gesamtantriebsstrang mittels dieser Methodik. Für kleine und mittlere Unternehmen entsteht hier die Möglichkeit, die Leistungsfähigkeit ihrer Produkte durch die im EVID-Projekt systematisch durchgeführten Simulationen zu analysieren bzw. die Anwendbarkeit im Kundenbetrieb zu untersuchen. Somit kann sichergestellt werden, dass die Produkte im Zusammenspiel mit anderen Komponenten optimal operieren.

Gleiches gilt auf mittelfristige Sicht bei der Entwicklung von Antriebs- und Peripheriekomponenten entsprechend der identifizierten Anforderungen an die gefundenen optimalen Fahrzeugtopologien. Bei der Ausrichtung der Produktionsstätten auf eben jene Anforderungen wird ein auf langfristige Sicht resultierender Nutzen der Verzahnung aus Forschungsarbeit und Produktionsstrategie erzielt. Somit können die aus diesem Projekt resultierenden Forschungserkenntnisse dem Fortschritt in der Produktentwicklung dienen.

Letztlich sind auf Grundlage der in diesem Forschungsvorhaben zum Einsatz kommenden Methodik innovative Lösungen sowohl auf der Komponenten- als auch auf der Gesamtfahrzeugebene zu erwarten, welche zu neuen Produkten und Dienstleitungen führen.

6. Fortschritt bei anderen Stellen

TU-München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik – Forschungsaktivität: „Energetische Topologiebewertung von Elektrofahrzeugen“, <http://www.fahrzeugtechnik-muenchen.de>:

Auf Basis eines Simulationstools sollen verschiedene mögliche Topologien elektrischer Antriebsstränge hinsichtlich ihrer Energieeffizienz bewertet werden. Dabei werden ausschließlich PKW betrachtet. Das Einsatzgebiet wird laut den Informationen ebenfalls variiert, unter anderem wird dabei der Stadtbetrieb mit Tagesfahrleistungen unter 50 km genannt. Die Simulation umfasst Komponenten des Antriebsstranges (E-Maschine, Getriebe, Reifen und Batterie), Nebenverbraucher sowie ein individuelles Nutzungsverhalten werden ebenfalls berücksichtigt. Der Einsatz von Optimierungsalgorithmen wird nicht explizit genannt. Es werden keine Aussagen über die Modellierungstiefe getroffen.

TU-München, Fachgebiet Energiewandlungstechnik, mehrere Forschungsaktivitäten: „Skalierbare Gesamtfahrzeugsimulation“, <http://www.ewt.ei.tum.de>:

Es werden variable Antriebsstrangmodelle entwickelt, die durch ihre Parametrierbarkeit eine Vielzahl möglicher Triebstrangkonfigurationen abbilden können. Das Gesamtmodell umfasst axial und radial skalierbare Modelle von Asynchron- und Synchronmaschinen, elektrischen Energiespeichern, Getrieben, Brennstoffzellen, Leistungselektroniken, Verbrennungsmotoren und Nebenaggregaten. Die Modellvalidierung wird durch Prüfstandsmessungen vollzogen. Es werden Optimierungsalgorithmen entwickelt, welche eine multikriterielle Optimierung des Gesamtantriebsstrangs unter Beachtung der Wechselwirkung zwischen den Komponenten ermöglicht. Detaillierte Aussagen zum Optimierungsverfahren werden nicht getroffen. Ergebnisse des Projektes sind nicht bekannt, was eine Aussage zum Fortschritt dieser Forschungsaktivitäten verhindert.

„Auslegung und Dimensionierung elektrischer Antriebsstränge“

Elektrische Energiewandler werden unter Verwendung einer Gesamtfahrzeuganalyse anwendungsorientiert ausgelegt. Hierzu wird die Verteilung der Lastpunkte bei gegebenen Fahrzeugrandbedingungen und Fahrzyklen ermittelt, woraus anschließend die Anforderungen an den elektrischen Antrieb synthetisiert werden. Durch spätere Messungen an einem Antriebsstrang-Prüfstand wird die Auslegung validiert. Schnittpunkte zu den oben genannten Forschungsaktivitäten bei der „skalierbaren Gesamtfahrzeugsimulation“ sind zu erwarten. Aufgrund fehlender Veröffentlichungen ist eine Aussage zum Stand der Forschung hier jedoch ebenfalls nicht möglich.

„Betriebsstrategien für Hybrid- und Elektrofahrzeuge“

Unter Verwendung eines Simulationsmodells werden Betriebsstrategien entwickelt und auf Basis einer zugehörigen Antriebsstrangtopologie durch Parametervariation optimiert. Die resultierenden Zusammenhänge zwischen Antriebsstrang und Betriebsstrategie werden abgeleitet. Weiterhin werden Betriebsstrategien entwickelt, welche die optimale Parametrierung durch Prädiktion während der Fahrt einstellen.

RWTH Aachen, Institut für Verbrennungskraftmaschinen, Forschungsaktivität auf dem Gebiet: „Hybridantriebe“, <http://www.vka.rwth-aachen.de>:

Im Rahmen eines EU-Projektes und der Kooperation mit der Automobilindustrie wird der Einsatz von elektrischen Antrieben zur Hybridisierung von Fahrzeugen der oberen Mittelklasse mit verkleinerter Verbrennungskraftmaschine („Downsizing“) mit Turboaufladung untersucht. Das hohe Anfangs-Drehmoment der E-Maschine soll dazu genutzt werden,

Drehmomenteinbußen der verkleinerten, turboaufgeladenen Verbrennungskraftmaschinen im niedrigen Drehzahlbereich („Turboloch“) auszugleichen. Die Optimierung soll durch eine Kombination aus Simulation und numerischer Feldberechnung erfolgen. Die Simulationen umfassen Modelle der elektrischen Triebstrangkomponenten, der Verbrennungskraftmaschine und der Betriebsstrategie. Ähnlich wie bei dem in diesem Schlussbericht beschriebenen Projekt wird ein mathematisches Modell aus Ergebnissen einer statistischen Versuchsplanung erstellt, um anhand dessen ein globales Optimum zu identifizieren.

List, H. (AVL List GmbH), *Der Pkw-Antrieb der Zukunft*, ATZ extra 125 Jahre Automobil, 04/2011, Springer Fachmedien GmbH, Wiesbaden

Die AVL prognostiziert in Ihrem Bericht für die nächsten Jahrzehnte eine wachsende Vielfalt der Energieträger und der Antriebsstrangtechnologien sowie die Entstehung bislang nicht dagewesener Nischenprodukte, getrieben von zunehmender Urbanisierung und dem Beginn der Nachfrage von Schwellenländern nach kostengünstigen Mobilitätslösungen.

AVL führt Simulationen auf Systemebene aus, bei denen alle möglichen Technologiekombinationen und Betriebsstrategien betrachtet werden. Dabei kommen reelle Nutzerprofile zum Einsatz. AVL verwendet zur Strukturierung eine dreidimensionale Kombinationsmatrix aus Fahrzeugtyp, Antriebsstrangtopologie und Kraftstoffart. Von der Anwendung eines „Optimierungsalgorithmus“ wird jedoch nicht explizit berichtet. Nutzen dieser Simulationen sind Rückschlüsse über systemgerechte Betriebsstrategien sowie die effizienteste Anordnung von Teilkomponenten im Antriebsstrang für eine kostenoptimale Abdeckung eines breiten Anwendungsspektrums.

Des Weiteren soll die Berücksichtigung „vorausschauender“ Betriebsstrategien für Range Extender unter Nutzung von GPS-Daten zu einem kleineren, leichteren und günstigeren Package führen.

Laut Aussage von AVL stellen Plug-In-Hybride derzeit die sinnvollste Antriebselektifizierung dar, da sie hinsichtlich elektrischen Fahrens, Reichweite, Tank- und Ladezeiten sowie Flexibilität die beste Alternative zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen bieten.

Pautzke, F., Rischel, W., Zöllner, H. (HS Bochum), Schäfer, C., Woeste, G. (Delphi Deutschland), *Zweckgerichtete Entwicklung eines Elektro-Kleintransporters*, ATZ 03/2011, Springer Fachmedien GmbH, Wiesbaden

Die Autoren beschreiben, wie am Beispiel des Kleintransporters „BOmobil“ neue Trends der Märkte und der Automobilentwicklung bzw. -produktion evaluiert werden. Beeinflusst vom Trend kommender Massenmärkte werden neue Antriebsstrangtopologien – insbesondere dezentrale ein- und zweiachsige Radantriebe – betrachtet. Beim Konzeptfahrzeug „BOmobil“ des Nordrhein-Westfälischen Firmenkonsortiums wurde eine neue Richtung der Konstruktion eingeschlagen, bei der das Fahrzeug um den Antriebsstrang konzipiert wurde. So wurde mit dem bisherigen konservativen Verhalten, neue Komponenten in bestehende Fahrzeugkonzepte zu integrieren, gebrochen, wodurch neue Plattformperspektiven eröffnet werden. Intelligentes Energiemanagement sowie die Reduzierung von Betriebs- und Ruhestromen stellen dabei einen zentralen Entwicklungspunkt dar. Wichtigste Aspekte des modernen Fahrzeugbaus werden laut Aussage der Autoren Kosten, Gewicht, Ressourcenverbrauch, Produzierbarkeit und Wiederverwertbarkeit der verwendeten Materialien sein.

Kuchenbuch, K. (VW Wolfsburg), Vietor, T. (TU-Braunschweig), Stieg, J. (VW Wolfsburg), *Optimierungsalgorithmen für den Entwurf von Elektrofahrzeugen*, ATZ 07-08/2011, Springer Fachmedien GmbH, Wiesbaden

Die Volkswagen AG in Wolfsburg erarbeitet zusammen mit der TU-Braunschweig (Institut für Konstruktionstechnik) ein Simulationstool, welches die Wechselwirkung zwischen Batterie, Fahrzeugkonzept und Fahrzeugeigenschaften im frühen Entwicklungsstadium abbildet. Anders als bei dem in diesem Schlussbericht beschriebenen Projekt, bei welchem die Identifikation eines möglichst effizienten Antriebsstrangs für zwei verschiedene Fahrzeugtypen betrachtet wird, steht bei diesem Optimierungsansatz die Wechselwirkung zwischen dem Fahrer bzw. dem Fahrkomfort und dem Batteriepackaging und der Fahrleistung im Fokus (z.B.: aufrechte Sitzposition <> größeres mögliches Batterievolumen <> größere Querspanfläche <> höherer Verbrauch). Bei der Optimierung kommen evolutionäre Algorithmen zum Einsatz, die Gewichtung wird mittels Pareto-Fronten (Kompromisslösung zwischen Fronten von Zielkonflikten) realisiert. Optimierungsziele (z.B.: max. Reichweite bei min. Verbrauch) und Randbedingungen (z.B.: max. Fahrzeuglänge) müssen vom Benutzer vorgegeben werden. Ein Optimierungslauf umfasst ca. 300.000 Fahrzeugkonfigurationen. Es existiert eine Schnittstelle zu CatiaV5 worin die Konfiguration als vereinfachtes Box-Model visualisiert werden kann.

Knödel, U., Stein, F.-J., Schlenkermann, H. (Getrag), *Variantenvielfalt der Antriebskonzepte für Elektrofahrzeuge*, ATZ 07-08/2011, Springer Fachmedien GmbH, Wiesbaden

Die Autoren schildern die aktuelle Problematik einer großen Fülle an voneinander abweichenden Anforderungen an die Komponenten alternativer Antriebstechniken. Ein unbekanntes Szenario hinsichtlich Zeitpunkt und Volumen erschwert den Markteinstieg. Dennoch ist die Entwicklung zum rein elektrischen Fahren unumgänglich. Im Beitrag wird eine Antriebsstrangtopologiematrix aufgespannt, die Einzelradantriebe mit und ohne Getriebe, sowie Zentral- oder Transaxleantriebe über reine Elektrofahrzeuge, Axle-Split-Hybriden und P4-Konfigurationen (Hybrid-Through-The-Road) gleichermaßen berücksichtigt. Unter Beachtung technischer, funktionaler und kommerzieller Aspekte spricht Getrag den Radnabenantrieben nur wenig Bedeutung zu. Einzelradantriebe und Torque-Vectoring werden dennoch in anderen Konfigurationen realisiert.

7. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Erfolgte Veröffentlichungen:

Eghtessad, M., et al. 22.-23. Juni 2010. Kundenorientierte Dimensionierung von elektrifizierten Antrieben. Friedrichshafen : Tagungsbeitrag Internationaler VDI-Kongress "Getriebe in Fahrzeugen 2010", 22.-23. Juni 2010. VDI Berichte Band 2081, S. 103-114.

Eghtessad, M., Kassel, T. und Küçükay, F. 29. November - 02. Dezember 2010. Anforderungsermittlung für elektrifizierte Antriebsstränge. Berlin : Tagungsbeitrag 9. Internationales CTI-Symposium Innovative Fahrzeug-Getriebe, Hybrid- und Elektroantriebe, 29. November - 02. Dezember 2010.

Küçükay, F., Kassel, T., Eghtessad, M. und Kollmer, H. 19.-21. Januar 2011. Requirement Engineering using the 3D method. Pune (Indien) : Tagungsbeitrag Konferenz SIAT, 19.-21. Januar 2011. SAE Nr.:2011-26-0012.

Eghtessad, M. und Küçükay, F. 15.-16. Februar 2011. Customer-Oriented Dimensioning of Electrified Drivetrains. Braunschweig : Tagungsband Symposium "Hybrid and Electric Vehicles", 15.-16. Februar 2011.

Eghtessad, M., Meier, T. und Strauch, M. 17. März 2011. Identifikation optimaler Antriebsstrangkonfigurationen für Elektrofahrzeuge. Frankfurt : FVA Sachstandsbericht Projekt Nr. 641, 17. März 2011.

Eghtessad, M., Meier, T. und Strauch, M. 26. Oktober 2011. Identifikation optimaler Antriebsstrangkonfigurationen für Elektrofahrzeuge. Braunschweig: FVA Sachstandsbericht Projekt Nr. 641, 26. Oktober 2011.

Geplante Veröffentlichungen:

Eghtessad, M. und Meier, T. 23./24. November 2011. Identifikation optimaler Antriebsstrangkonfigurationen für Elektrofahrzeuge. Würzburg: FVA Forschungsreport für die FVA Informationstagung Projekt Nr. 641, 23./24. November 2011.

Eghtessad, M. und Meier, T. 05. bis 08. Dezember 2011. Identifikation optimaler Antriebsstrang-Konfigurationen für Elektrofahrzeuge. Berlin : Tagungsbeitrag "10. Internationales CTI-Symposium Innovative Fahrzeuggetriebe, Hybrid- und Elektroantriebe", 05. bis 08. Dezember 2011.

Eghtessad, M., Meier, T. und Strauch, M. Anfang 2012. Identifikation optimaler Antriebsstrangkonfigurationen für Elektrofahrzeuge. Frankfurt: FVA Heft Projekt Nr. 641

ANLAGE A: LITERATURVERZEICHNIS

1. **Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen.** *Daten der "Verkehrserhebung Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2002"*. Berlin : s.n., 2003.
2. **Eghtessad, M. und Küçükay, F.** Customer-Oriented Dimensioning of Electrified Drivetrains. Braunschweig : Tagungsband Symposium "Hybrid and Electric Vehicles", 15.-16. Februar 2011.
3. **Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen.** *Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2002, Schlussbericht Band 2*. Berlin : Insitut für Verkehr und Stadtbaugesellschaft (Federführung), Technische Universität Braunschweig, 2003. Projekt-Nr. 70.0682/2001.
4. **VDE, Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.** *Elektrofahrzeuge; Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf; Gesamttext*. Frankfurt : VDE. ISBN 978-3-925512-22-3 .
5. **LSA, GVBI.** Garagenverordnung (GaVo). *Vom 14. September 2006 (S. 495; 22. September)*.
6. **Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.** Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt). Köln : s.n., 2006.
7. **Neudorfer, Dr.** *Seminarvortrag: Praxisorientierte Projektierung elektrischer Antriebe*. Darmstadt : s.n., 2009.
8. **Naunheimer, Harald.** *Fahrzeuggetriebe*. Friedrichshafen : Springer-Verlag, 2007.
9. **Kassel, Tobias.** Optimale Ganganzahl und Schaltkollektive für Fahrzeuggetriebe. Braunschweig : Shaker-Verlag, 2009. Bd. Dissertation.
10. **Pohlheim, Hartmut.** *Evolutionäre Algorithmen*. Heidelberg : Springer, 2000. ISBN 3-540-66413-0.

ANLAGE C: BERICHTSBLATT

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN --	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Identifikation optimaler Antriebsstrangkonfigurationen für Elektrofahrzeuge		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Eghtessad, Marjam (IfF, TU BS) Meier, Torben (IMS, TU DA)	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2011	
	6. Veröffentlichungsdatum --	
	7. Form der Publikation --	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) TU Braunschweig, Institut für Fahrzeugtechnik, Hans-Sommer-Straße 4, 38106 Braunschweig TU Darmstadt, Institut für Mechatronische Systeme im Maschinenbau, Petersenstraße 30, 64287 Darmstadt TU Darmstadt, Institut für Elektrische Energiewandlung, Landgraf-Georg-Str. 4, 64283 Darmstadt	9. Ber. Nr. Durchführende Institution --	
	10. Förderkennzeichen 19 U 9035	
	11. Seitenzahl 57	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 10	
	14. Tabellen 22	
	15. Abbildungen 22	
16. Zusätzliche Angaben --		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Siehe Schlussbericht Kapitel 7		
18. Kurzfassung Die Entwicklung moderner Fahrzeuge und insbesondere der elektrifizierten Antriebe ist gekennzeichnet durch eine hohe Komplexität und Variantenvielfalt bei steigenden Kundenerwartungen. Im Hinblick auf eine an diese Randbedingungen optimierte Auslegung der Antriebe stehen gesetzliche Anforderungen sowie Lastenheft- und Kundenanforderungen an das Fahrzeug im Vordergrund. Für die Schaffung eines optimalen Fahrzeugkonzepts ist in der Regel nicht die Optimierung der einzelnen Komponenten bezüglich der eben genannten Anforderungen zielführend – die ganzheitliche Betrachtung des Fahrzeugsystems erfordert einen komponentenübergreifenden Ansatz. In diesem Zusammenhang kommt die so genannte EVID-Methode (Electric Vehicle Identification - Identifikation optimaler Antriebsstrangkonfiguration für Elektrofahrzeuge) zum Einsatz. Das Ziel der EVID-Methode ist es, je eine optimale Antriebsstrangkonfiguration für eine Auswahl von in ihrem Einsatzprofil differierenden Fahrzeugkonzepten (wie z.B. Stadtfahrzeug oder Verteilerfahrzeug im Stadt und Überlandverkehr) zu ermitteln. Bei Variation der Grundparameter (Auslegungsgrößen der Komponenten wie z.B. Ganganzahl, Getriebespreizung, Systemleistung, E-Maschinen-Drehmoment, Batteriekapazität) erfolgt die Identifikation der optimalen Lösung anhand der Kennparameter, welche die Fahrleistungen, die Energiebilanz und die Kosten betreffen und mittels differierender Gewichtungen in einer Bewertungsfunktion berücksichtigt werden. Die Werte der Kennparameter werden für verschiedene Triebstrangkonfigurationen mittels eines automatisierten Algorithmus aus Berechnungsmodellen (für z.B. Kosten, Fahrzeuggewicht, Höchstgeschwindigkeit) und der Simulation zur Bestimmung der Energiebilanz generiert. Um eine rechenzeitminimierte Auswertung zu ermöglichen, werden mathematische Modelle (MM) eingesetzt, welche den Wirkzusammenhang aus Grund- und Kennparametern möglichst genau abbilden sollen. Anschließend werden die MM und die Berechnungsmodelle in einem Optimierungsalgorithmus verwendet, um das optimale Konzept, seine Komponenten und die dazugehörigen Grund- und Kennparameterwerte zu identifizieren.		
19. Schlagwörter Elektrofahrzeuge, Variantenvielfalt, anforderungsorientierte Auslegung, objektive Bewertungskriterien, Variation Komponenten-Auslegungsgrößen, optimaler Antriebsstrang		
20. Verlag --	21. Preis --	