

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Fachgebiet Energiewandlungstechnik

Lösungsraumanalyse für Hauptantriebsstränge in batterieelektrischen Straßenfahrzeugen

Philipp Reupold

Vollständiger Abdruck der von der
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Hanik

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann
Technische Universität Dresden

Die Dissertation wurde am 12. November 2012 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 20. Oktober 2014 angenommen.

Zusammenfassung - Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine Methodik zur Evaluierung elektrischer Traktionsantriebe für batterieelektrische, straßengebundene Kraftfahrzeuge für den Personentransport vorgestellt. Dadurch kann die Auswahl eines Antriebssystems bereits in einer frühen Phase des Produktentstehungsprozesses unterstützt und objektiviert werden.

Zielsetzung der entwickelten Methodik ist es, optimale Antriebssysteme für unterschiedliche Fahrzeugklassen zu ermitteln. Dazu werden aus Antriebskomponenten, namentlich Energiespeicher, Stromrichter, elektrische Maschine und Getriebe, Topologien synthetisiert. Die Kombination dieser Topologien mit dem Stand der Technik entsprechenden Ausführungsformen der Komponenten ergibt komplette Antriebssysteme. Die Bewertungsmethodik ermittelt die Eignung dieser Antriebssysteme für den Einsatz in Kraftfahrzeugen. Für festgelegte Antriebsanforderungen und Randbedingungen werden mit der Methodik optimale Systeme hinsichtlich vordefinierter Bewertungskriterien bestimmt. Die Wahl der Bewertungskriterien erfolgt in einer Weise, die es ermöglicht, alle bewertungsrelevanten Systemeigenschaften überdeckungsfrei zu erfassen.

Zur Ermöglichung eines objektiven Vergleichs verschiedener Antriebssysteme werden diese anhand von Kundenanforderungen ausgelegt. Dabei werden die Komponenten- und Antriebsanforderungen aus Fahrzeuganforderungen abgeleitet. Anschließend werden die Systeme auf modularer Basis analysiert und bewertet. Neben dem reinen Komponentenvergleich wird besonderes Augenmerk auf die Interaktionen der einzelnen Komponenten untereinander sowie mit der Topologie gelegt.

Die Vergleichbarkeit verschiedenartiger physikalischer Größen miteinander wird dabei durch den Bezug aller Kriterien auf einer dimensionslosen Skala sichergestellt.

Durch die hohe Anzahl von über 12000 möglichen Antriebssystemen erfolgt die Bewertung automatisiert durch ein explizit zu diesem Zweck erstelltes Computerprogramm. Es ermöglicht einen unkomplizierten und zugleich detaillierten Vergleich verschiedener Antriebssysteme.

Es zeigt sich, dass trotz der hohen Vielfalt an denkbaren Systemen vergleichsweise einfach aufgebaute Antriebssysteme fahrzeugklassenübergreifend am geeignetsten für konkurrenzfähige Fahrzeuge sind. Für die meisten Anwendungsfälle sind Einzelachsantriebe Allradantrieben vorzuziehen. Ein Antriebssystem, bestehend aus Zentralantrieb in Kombination mit einer einfach untersetzten Synchronmaschine und einem gängigen Zweipunktwechselrichter sowie einer reinen Serienschaltung von Lithium-Ionen-Zellen als Speicher, ist für viele Anwendungsfälle hinsichtlich Effizienz, Kosten und Platzbedarf prädestiniert. Erst bei großen respektive sportlichen Fahrzeugen ist der Einsatz von Zweiganggetrieben oder Tandemantrieben erwägenswert.

Abstract - The purpose of this work is to present a method for the evaluation of traction drives within battery-electric road vehicles. This supports and objectifies the selection of a drive system in an early stage of the product development process.

The aim of the method is to identify optimum electric drive systems for different vehicle classes. Therefore so-called topologies are synthesized of drive components: energy stores, inverters, electric machines and transmissions. The combination of these topologies with state-of-the-art technologies leads to complete drive systems.

These drive systems are fed into the method. This method is able to identify the most suitable systems with respect to predefined evaluation criteria, requirements and boundary conditions. The evaluation criteria are supposed to cover all characteristics of the system without overlap.

In order to guarantee an objective comparison, the drive systems are dimensioned according to the customers' requirements. Based on the requirements for the vehicle, the requirements for the drive train and thus the requirements for the components, are derived.

Subsequently all components are rated discretely. The characteristics of the components and the interactions between them are taken into account to ensure a comprehensive evaluation of relevant system properties.

The comparability of different physical quantities is thereby guaranteed by applying all criteria to a nondimensional scale.

Due to numerous possible systems, the rating is conducted using a computer program that is created in the context of this thesis. The program permits a detailed and straightforward comparison of different drive systems.

Despite the large variety of available drive systems, the rating clearly shows that simple and well-proven systems are most suitable for electric vehicle application. A single axle drive is predestined for most applications. A drive system consisting of a central drive with a synchronous machine, single-reduction gearing, two-point inverter and Lithium-Ion cells connected in series, performs best in terms of efficiency, cost and space for most vehicles. Only for heavy cars or sports cars are more elaborate parts like two-speed transmissions or tandem drives worth considering.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangslage und Motivation	1
1.2	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	2
2	Grundlagen	4
2.1	Batterieelektrische Straßenfahrzeuge	4
2.2	Kraftfahrzeugtechnik	4
2.3	Antriebssysteme für batterieelektrische Fahrzeuge	7
2.3.1	Elektrische Maschinen	8
2.3.2	Getriebe	8
2.3.3	Wechselrichter	9
2.3.4	Energiespeicher	9
2.4	Anforderungen und Randbedingungen	10
2.4.1	Begriffsdefinition	10
2.4.2	Antriebsanforderungen	11
2.4.3	Komponentenanforderungen	11
2.4.4	Randbedingungen	16
2.5	Bewertungskriterien	17
2.6	Zusammenfassung	21
3	Bewertungsmethodik	22
3.1	Ausgangslage und Zielsetzung	22
3.2	Abgrenzung der Begriffe Methode und Methodik	23
3.3	Grundsätzlicher Aufbau der Bewertung	24
3.4	Durchführung der Bewertung	25
3.4.1	Festlegung der Anforderungen, Randbedingungen, Bewertungs- kriterien und der zu bewertenden Komponenteneigenschaften . .	27
3.4.2	Vorauswahl	28
3.4.3	Bildung möglicher Systeme durch systematische Variation im Morphologischen Kasten	28
3.4.4	Definition der Skalen und Bewertung der Komponenten	29
3.4.5	Gewichtung der Bewertungskriterien	33
3.4.6	Durchführung einer gewichteten Punktbewertung	36
3.4.7	Plausibilitätsanalyse und Sensitivitätsanalyse	39
3.5	Automatisierte Bewertung	42

3.6	Zusammenfassung	42
4	Antriebstopologien	43
4.1	Begriffsbestimmung	43
4.2	Aufspannen des Lösungsraumes	43
4.3	Eingrenzung des Lösungsraums	44
4.3.1	Antriebsart	45
4.3.2	Elektrische Maschinen	45
4.3.3	Getriebe	53
4.3.4	Wechselrichter	54
4.3.5	Energiespeicher	55
4.4	Bewertungsmodalität	57
4.5	Zusammenfassung	57
5	Antriebsstrangkomponenten	58
5.1	Elektrische Maschinen	58
5.1.1	Asynchronmaschine	58
5.1.2	Permanenterregte Synchronmaschine mit Oberflächenmagneten	62
5.1.3	Permanenterregte Synchronmaschine mit vergrabenen Magneten	63
5.1.4	Stromerregte Synchronmaschine	63
5.1.5	Geschaltete Reluktanzmaschine	65
5.1.6	Bewertungsmodalität	67
5.2	Getriebe	67
5.2.1	Direktantrieb	68
5.2.2	Einganggetriebe	69
5.2.3	Zweiganggetriebe	70
5.2.4	Bewertungsmodalität	72
5.3	Wechselrichter	72
5.3.1	Zweipunktwechselrichter	72
5.3.2	Dreipunktwechselrichter	73
5.3.3	Bewertungsmodalität	75
5.4	Energiespeicher	76
5.4.1	Zelltechnologie	78
5.4.2	Doppelschichtkondensatoren	80
5.4.3	Speichervarianten	80
5.4.4	Bewertungsmodalität	83
5.5	Zwischenkreisspannung	83
5.5.1	Folgen für die elektrische Maschine	83
5.5.2	Folgen für den Wechselrichter	84
5.5.3	Folgen für den Energiespeicher	87
5.5.4	Weitere Folgen	87
5.5.5	Fazit	87

5.6	Zusammenfassung	88
6	Ergebnisse	89
6.1	Ergebnisse der Bewertung	89
6.1.1	Fahrzeugklasse „klein“	90
6.1.2	Fahrzeugklasse „mittel“	91
6.1.3	Fahrzeugklasse „groß“	91
6.2	Diskussion der Ergebnisse	91
6.2.1	Plausibilitätsanalyse	91
6.2.2	Ergebnisgenauigkeit	94
6.2.3	Sensitivitätsanalyse	95
6.2.4	Verifikation der Ergebnisse	96
6.3	Zusammenfassung	97
7	Resümee und Ausblick	98
A	Modelle	101
A.1	Modellübersicht	101
A.2	Kostenmodell	102
B	Bewertungsprogramm	106
B.1	Zielsetzung	106
B.2	Aufbau	106
B.2.1	Eingabe	107
B.2.2	Ergebnis	107
B.2.3	Vergleich	108
B.2.4	Diagramme	108
C	Komponentenauslegung	111
C.1	Motivation	111
C.2	Elektrische Maschinen	112
C.3	Wechselrichter	115
C.4	Energiespeicher	116
	Abbildungsverzeichnis	118
	Tabellenverzeichnis	120
	Abkürzungsverzeichnis	121
	Literaturverzeichnis	124

1 Einleitung

Mobilität ist seit vielen tausend Jahren ein Grundbedürfnis der Menschheit. Ortswechsel werden durch neue Erfindungen wie das Rad oder die Kutsche im Laufe der Jahre immer einfacher und dadurch häufiger. Seit etwa einhundert Jahren dominiert auf dem Sektor der individuellen Mobilität die Verbrennungskraftmaschine, in Form des Otto- und Dieselmotors, als Antrieb von Kraftfahrzeugen. Diese hat jedoch den Nachteil, auf fossile Brennstoffe angewiesen zu sein, welche zu unerwünschtem Schadstoffausstoß führen und überdies nur in endlicher Menge auf unserem Planeten verfügbar sind.

Der Wunsch nach alternativen, umweltfreundlicheren Mobilitätslösungen führt seit Beginn des 21. Jahrhunderts zu einer Zunahme der Entwicklungsaktivitäten auf dem Gebiet der Elektromobilität. Zahlreiche namhafte Fahrzeughersteller arbeiten derzeit mit Hochdruck an der Entwicklung von batterieelektrischen Fahrzeugen. Um diese Fahrzeuge möglichst schnell auf den Markt zu bringen, greifen viele Hersteller auf verbrennungsmotorisch angetriebene Fahrzeuge zurück, welche nun zu Elektrofahrzeugen konvertiert werden.

Bei dieser Lösung, dem sogenannten „Conversion Design“, kann es aber zu keiner optimalen Auslegung des Antriebsstrangs kommen, da das Fahrzeug nicht an die Anforderungen eines elektrischen Antriebs angepasst ist. Für Abhilfe sorgt die Methode des „Purpose Design“. Hier wird bei der Konstruktion des Fahrzeugs auf die spezifischen Eigenschaften eines elektrischen Antriebs eingegangen [Nau89].

Ein besonderer Weg des „Purpose Design“, soll in dieser Arbeit betrachtet werden: Es wird davon ausgegangen, dass der Antrieb ohne Einschränkungen entworfen und das Fahrzeug dann um das Antriebssystem herum realisiert werden kann. Unter „Antriebssystem“ wird im Rahmen dieser Arbeit die Kombination von Getriebe, elektrischer Maschine, Wechselrichter und Energiespeicher verstanden.

1.1 Ausgangslage und Motivation

Während in heutigen Elektrofahrzeugen im Regelfall das kostenoptimale oder konstruktiv einfachste Antriebssystem verwendet wird, soll bei zukünftigen Fahrzeugen das Antriebssystem zum Einsatz kommen, das der Gesamtheit der Anforderungen am besten Rechnung trägt. Bei der Bestimmung optimaler Systeme ist insbesondere eine gesamthafte Betrachtung des Antriebssystems von großer Bedeutung.

Bisher auf diesem Feld veröffentlichte Untersuchungen legen im Regelfall den Schwerpunkt auf Komponentenbetrachtungen. Sowohl für Energiespeicher [Duv05], [WKOE05], [XQC09], Wechselrichter [Myr01], [Wan08] als auch für elektrische Maschinen [CCL08], [ZEHBD06], [ZH07], existieren Abhandlungen, welche auf die optimale Auslegung der Komponenten abzielen.

Untersuchungen zum Gesamtsystem sind nur in kleiner Zahl publiziert. Ein Beispiel ist der Aufsatz von Alcalá [ACG05]. Hierin wird zwar das komplette Antriebssystem beschrieben, jedoch wird das System nur als Summe seiner Komponenten verstanden – Wechselwirkungen zwischen den Systembestandteilen werden nicht beleuchtet.

Einen weiteren Schritt in Richtung Bestimmung optimaler Systeme geht Eghtessad [EF11]. Sie schlägt vor, optimale Systeme durch eine numerische Parametervariation zu identifizieren. Hier werden im Prinzip für jede Komponenteneigenschaft Zahlenwerte bestimmt und die Komponenten so variiert und miteinander kombiniert, dass das daraus resultierende System in Summe die höchste Bewertung besitzt. Dieses Vorgehen kann zum technischen Optimum führen, ist aber für den Einsatz in der Praxis nur mit Einschränkungen tauglich, da es sich nicht an den Kundenanforderungen orientiert. So ist es bei der Auslegung neuer Fahrzeugantriebe von übergeordneter Bedeutung, diese möglichst gut zu erfüllen. Somit wird der Fokus in dieser Arbeit darauf gerichtet, die zu bewertenden Systeme zielgerichtet auf die Kundenanforderungen auszulegen, sie in ihrer Gesamtheit, inklusive aller relevanten Wechselwirkungen, zu erfassen und auf technischer Ebene zu betrachten.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Es soll eine Methodik (siehe Abbildung 1.1) entwickelt werden, welche in Abhängigkeit von Anforderungen und Randbedingungen das am besten geeignete Antriebssystem für batterieelektrische Kraftfahrzeuge zu ermitteln vermag. Dabei soll sowohl der Einfluss der Topologie, also der Anordnung der Komponenten, als auch der der Techniken, der Ausführungsform der Komponenten sowie deren Auslegung eine Rolle spielen.

Die Wahl des besten Systems ist wiederum von der Wahl der Bewertungskriterien abhängig. So ist es vorstellbar, dass für dieselben Anforderungen beispielsweise sowohl ein kostenoptimales als auch ein leistungsfähigkeitsoptimales Antriebssystem existiert. Aus diesem Grund ist eine sorgsame und transparente Auswahl der Bewertungskriterien sicherzustellen.

Als erster Schritt werden die technischen und methodischen Grundlagen aufgezeigt, die für die Bewertung relevant sind. Im Anschluss werden die Topologien und Techniken bestimmt, welche nach dem derzeitigen Stand der Technik am vielversprechendsten erscheinen und somit in diese Arbeit Eingang finden. Außerdem werden alle Anforderungen und Randbedingungen festgehalten. Daran schließt sich die Kombination aller Systeme aus den in Frage kommenden Komponenten und Techniken an. Um zu gewähr-

leisten, dass ein System nicht nur als Summe seiner Komponenten verstanden wird, spielt die Beschreibung der relevanten Wechselwirkungen zwischen den Komponenten sowie zwischen den Komponenten und der Topologie eine große Rolle. Auf die Klärung des Lösungsraumes und die Bestimmung aller Eingangsparameter folgt die Erstellung einer Methodik, welche die Bewertung der Antriebssysteme objektivieren kann. Als Abschluss wird die Gültigkeit der Methodik an ausgewählten Beispielen verifiziert und die weitergehende Anwendbarkeit demonstriert.

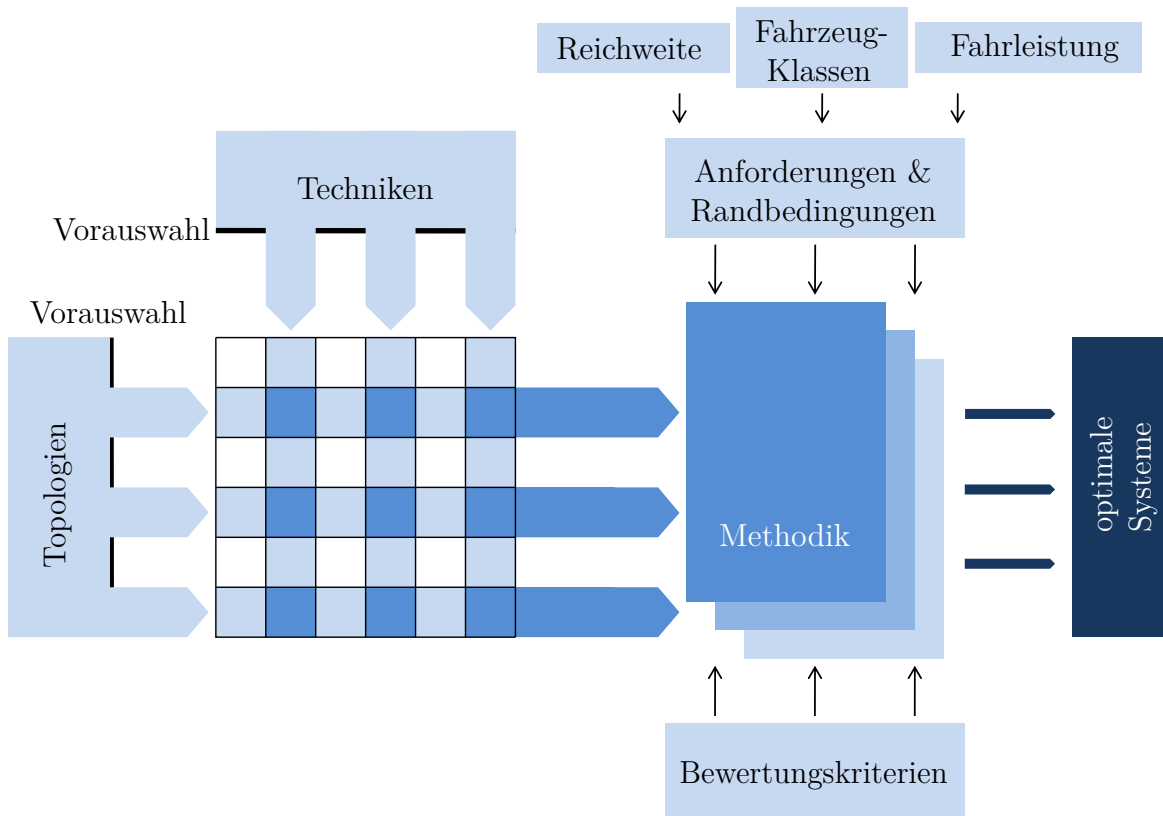


Abb. 1.1: Vorgehensweise bei der Bewertung elektrischer Antriebssysteme

2 Grundlagen

Bevor die Bewertung unterschiedlicher Antriebskonzepte begonnen werden kann, ist eine Übersicht über alle Systembestandteile erforderlich. Aus diesem Grund werden die betrachteten Komponenten und Systeme an dieser Stelle in Grundzügen beschrieben. Des Weiteren werden alle Anforderungen und Randbedingungen, welche Einfluss auf die Bewertung der Systeme haben, dokumentiert.

Dieser Überblick soll zum Verständnis der Funktionsweise eines elektrischen Antriebs beitragen, kann aber kein Fachbuch ersetzen. Für weitergehende Informationen sei daher auf die jeweils angegebene Literatur verwiesen.

2.1 Batterieelektrische Straßenfahrzeuge

Gegenstand der Betrachtungen sind Antriebe für batterieelektrische Straßenfahrzeuge, genauer gesagt Personenkraftwagen. Darunter werden in dieser Arbeit vierrädrige, zweispurige Fahrzeuge für den intra- und interurbanen Personentransport verstanden. Der wesentliche Unterschied zu verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen ist der komplett andersartige Antriebsstrang. Während bei herkömmlichen Fahrzeugen stets nur eine Kraftmaschine mit einem Getriebe vorhanden ist, sind bei elektrischen Fahrzeugen zahlreiche verschiedene Antriebssysteme denkbar. Diese bestehen im Wesentlichen aus Energiespeicher(n), Stromrichter(n) und elektrischen Maschine(n). Im Abschnitt 2.3 werden diese Komponenten vorgestellt.

2.2 Kraftfahrzeugtechnik

Bevor der Schwerpunkt der Betrachtungen auf das Antriebssystem gelegt wird, werden die für das Fahrzeugverhalten relevanten Größen beschrieben. Erst mit Kenntnis der geforderten Fahrzeugeigenschaften können die Anforderungen an den Antriebsstrang formuliert werden, aus welchen sich wiederum die Auslegung der Antriebskomponenten ergibt.

Nachfolgend werden für die Auslegung relevante, fahrphysikalische Zusammenhänge beschrieben. Dies sind im Grunde all die Parameter, die für das Verhalten des Fahrzeugs

bei Beschleunigungs- beziehungsweise Verzögerungsvorgängen sowie beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit verantwortlich sind.

Zur Bestimmung der Be- und Entlastung der Achsen im Rahmen längsdynamischer Betrachtungen ist die Kenntnis der Schwerpunktshöhe und -lage erforderlich. Daraus ergeben sich die dynamischen Achslastverteilungen an der Vorderachse

$$\frac{F_{QV}}{F_G} = \frac{l_h}{l} \cdot \cos(\alpha) - \frac{h_{Sp}}{l} \cdot \sin(\alpha) - \frac{h_{Sp}}{l} \cdot a' \quad (2.1)$$

und an der Hinterachse

$$\frac{F_{QH}}{F_G} = \frac{l_v}{l} \cdot \cos(\alpha) + \frac{h_{Sp}}{l} \cdot \sin(\alpha) + \frac{h_{Sp}}{l} \cdot a'. \quad (2.2)$$

Aus der Achslastverteilung (siehe Abbildung 2.1) kann wiederum auf Beschleunigungs- und Steigfähigkeit des Fahrzeugs geschlossen werden.

Unabhängig vom Antriebssystem gilt, dass beim Beschleunigen die Vorderachse entlastet und die Hinterachse belastet wird, was Einfluss auf die maximal übertragbaren Zugkräfte hat. Somit wird bei drehmomentstarken Fahrzeugen durch Hinterradantrieb eine höhere Beschleunigung im Vergleich zu identisch motorisierten Fahrzeugen mit Vorderradantrieb ermöglicht. Bei Fahrzeugen mit drehmomentschwachen Antrieben wird die Beschleunigung durch den Antriebsstrang limitiert; die Wahl der Antriebsachse ist hier für die Beschleunigungsfähigkeit irrelevant.

Die zur Erfüllung der Fahranforderungen nötige Fahrzeugleistung wird durch die Fahrwiderstände bestimmt. Als Fahrwiderstände werden diejenigen Kräfte bezeichnet, die der vom Antrieb erzeugten Zugkraft entgegenwirken:

Luftwiderstand (F_{Luft}), Rollreibungswiderstand (F_{Roll}), Steigungswiderstand (F_{Steig}) und Beschleunigungswiderstand (F_{Beschl}).

Das Fahrzeug muss diese geschwindigkeitsabhängigen Fahrwiderstände überwinden. Die dafür an den angetriebenen Rädern benötigte Zugkraft (F_z) berechnet sich nach [Hei07] zu

$$F_z = F_{Luft} + F_{Roll} + F_{Steig} + F_{Beschl}. \quad (2.3)$$

Aus diesem Zusammenhang lassen sich die Gleichungen für stationäre Fahrten, also Fahrten bei konstanter Geschwindigkeit und für Beschleunigungsvorgänge ermitteln. Für stationäres Fahren gilt, dass die Zugkraft ($F_{z,stat}$) gleich der durch die Fahrwiderstände verursachten, abbremsend wirkenden Kraft sein muss.

$$F_{z,stat} = F_{Luft} + F_{Roll} + F_{Steig} \quad (2.4)$$

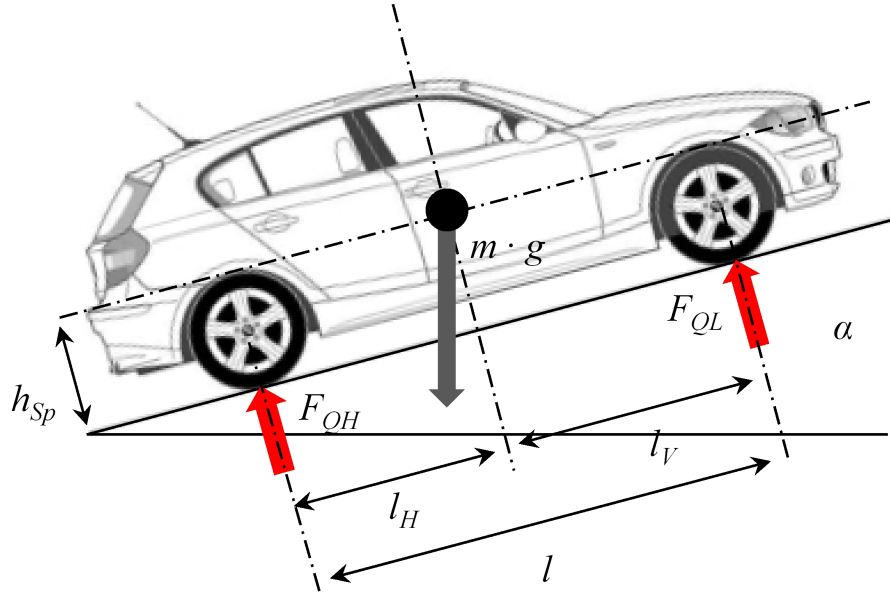


Abb. 2.1: Achslastverteilung, basierend auf [BMW Group]

Bei Beschleunigungsvorgängen muss die Zugkraft am Rad so groß sein, dass unter Berücksichtigung der advers wirkenden Fahrwiderstände die gewünschte Beschleunigung erzielt wird. Somit gilt nach [SM09]:

$$ma = F_{\text{Beschl}} - (F_{\text{Luft}} + F_{\text{Roll}} + F_{\text{Steig}}). \quad (2.5)$$

Die einzelnen Fahrwiderstände werden folgendermaßen berechnet:

Luftwiderstand

$$F_{\text{Luft}} = \frac{\rho L}{2} A_{\text{FZG}} c_w v(t)^2, \quad (2.6)$$

Rollreibungswiderstand

$$F_{\text{Roll}} = m' g c_r, \quad (2.7)$$

Steigungswiderstand

$$F_{\text{Steig}} = m' g \sin(\alpha). \quad (2.8)$$

Als m' wird in diesen Formeln die sogenannte bezogene Masse bezeichnet. In dieser Größe sind sowohl die Masse des Fahrzeuges als auch ein Zuschlag, resultierend aus den Trägheiten der bewegten Massen des Antriebes, enthalten.

2.3 Antriebssysteme für batterieelektrische Fahrzeuge

Im Fokus dieser Arbeit stehen die Antriebskomponenten Energiespeicher (ES), Wechselrichter (WR), Elektrische Maschine (EM) und das Getriebe. Aus je einer oder auch mehreren dieser Komponenten setzt sich jeder betrachtete Antriebsstrang zusammen. Dies ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

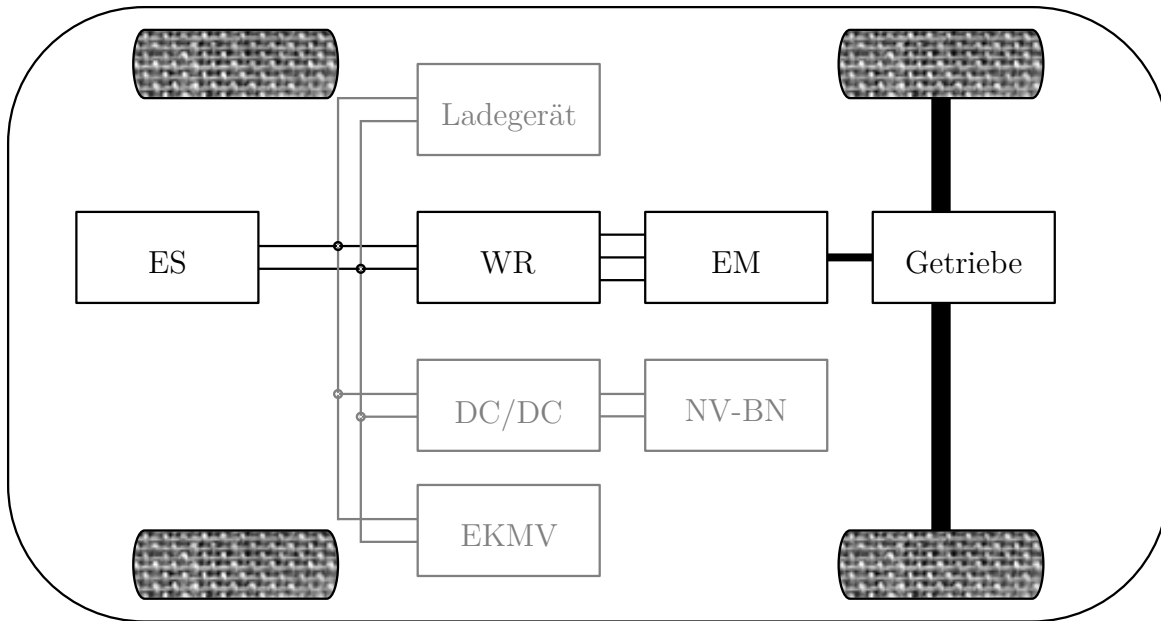


Abb. 2.2: Exemplarischer Antriebsstrang eines batterieelektrischen Straßenfahrzeugs

Schnittstellen des Antriebs und somit des betrachteten Lösungsraums auf elektrischer Ebene bestehen zu den grau dargestellten Komponenten. Diese Komponenten werden als gegeben und unabänderlich angenommen. Sie haben Einfluss auf die Auslegung des Antriebs, verhalten sich aber stets identisch und unabhängig vom Antriebsstrang. Somit sind sie nicht für die Differenzierung verschiedener Antriebsstränge relevant. Auf Grund der rein elektrischen Leistungsübertragung innerhalb des Antriebsstrangs bieten elektrische Antriebe große Freiheiten bei der Anordnung der Antriebskomponenten. Beispielsweise ist zur Realisierung eines Hinterradantriebs keine Kardanwelle mehr nötig, da die elektrischen Maschinen direkt an der anzutreibenden Achse verbaut werden können.

Die Art und Weise, auf die die Antriebskomponenten mit den Rädern des Fahrzeugs verbunden sind, wird im Rahmen dieser Arbeit als Topologie bezeichnet. Die in einem Fahrzeug verbaute Gesamtheit dieser Komponenten wird wiederum als Antriebsstrang bezeichnet. Mathematisch ausgedrückt, lässt sich folgende Gleichung aufstellen:

$$\text{Antriebssystem} = \text{Topologie} + \text{Antriebsstrang} = \text{Topologie} + \sum_i \text{Komponente}_i. \quad (2.9)$$

Nachfolgend werden die den Antriebsstrang bildenden Komponenten in Grundzügen vorgestellt. Dabei werden, wie in der gesamten Arbeit, ausschließlich speziell für den Einsatz in einem elektrischen Straßenfahrzeug konzipierte Komponenten betrachtet. Eine Analyse des Verhaltens verschiedener Varianten dieser Komponenten, im Hinblick auf die Eignung für einen Einsatz in einem batterieelektrischen Straßenfahrzeug, erfolgt in Kapitel 5.

2.3.1 Elektrische Maschinen

Die Aufgabe einer elektrischen Maschine ist die bidirektionale Wandlung von Strom und Spannung in Drehmoment und Drehzahl [Fis06]. Dies bedeutet im konkreten Anwendungsfall, dass neben dem Antreiben des Fahrzeugs auch eine Rekuperation der kinetischen Energie beim Bremsen ermöglicht wird.

Wie in 2.4 beschrieben, werden – aufgrund andersartiger Umgebungsbedingungen – an elektrische Maschinen für Fahrzeugantriebe andere Anforderungen gestellt als an elektrische Maschinen für Industrieantriebe. Zur Erfüllung dieser Anforderungen kommen verschiedene Typen elektrischer Maschinen in Frage. Insbesondere eignen sich stromrichtergespeiste Drehfeldmaschinen, welche heute fast ausnahmslos eingesetzt werden. Diese Konfiguration ermöglicht die unabhängige Vorgabe von Drehzahl und Drehmoment und führt zu einem robusten, kompakten System. Beispiele für diesen Maschinentyp sind Asynchronmaschinen und Synchronmaschinen. Die Eignung verschiedener Varianten dieser und weiterer elektrischer Maschinen für den Einsatz in einem Kraftfahrzeug wird in Kapitel 5.1 geprüft.

2.3.2 Getriebe

Getriebe werden in einem Elektrofahrzeug dazu eingesetzt, Drehzahl und Drehmoment zwischen Antriebs- und Abtriebsseite zu wandeln. Da elektrische Maschinen zur Drehrichtungsumkehr in der Lage sind, ist die Notwendigkeit einer Drehrichtungsumkehr durch das Getriebe nicht erforderlich.

Bei verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen sind aufgrund des eingeschränkten Drehzahlbereichs von Verbrennungskraftmaschinen Verstellgetriebe zwingend erforderlich. Stand der Technik sind hier fünf bis acht Gänge [NBL07].

Eine elektrische Maschine hat im Vergleich zu Benzin- und Dieselmotoren einen weitaus größeren Bereich konstanter Leistung und kann bei höheren Drehzahlen betrieben werden. Deswegen kann das Getriebe für eine elektrische Maschine – sofern überhaupt erforderlich – wesentlich einfacher ausgeführt werden. Ein Planeten- oder Stirnradgetriebe mit einem oder zwei Vorwärtsgängen ist in der Regel ausreichend. Die Bestimmung optimaler Getriebearten und die Untersuchung der optimalen Anzahl von Vorwärtsgängen ist in Kapitel 5.2 beschrieben.

2.3.3 Wechselrichter

Der Wechselrichter regelt den für den Vortrieb des Fahrzeugs nötigen Energiefluss vom Speicher zur elektrischen Maschine. Dazu wird der Gleichstrom der Batterie in Wechselstrom variabler Amplitude und Frequenz für die elektrische Maschine umgewandelt. Dies geschieht unter Verwendung von Stromrichterventilen [Sch08]. Diese ein- und ausschaltbaren Halbleiter sind in der automobilen Anwendung typischerweise als Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) ausgeführt. Dieses leistungselektronische Bauteil vereint die geringen Durchlassverluste eines Bipolartransistors mit den niedrigen Schaltverlusten eines Metal Oxide Field Effect Transistors (MOSFET).

Des Weiteren ermöglicht der in einem Straßenfahrzeug eingesetzte Wechselrichter Energie beim Bremsen zu rekuperieren. Dies wird dadurch erreicht, dass der Wechselrichter als Gleichrichter fungiert. Hierbei verhält sich der Wechselrichter bei hohen Maschinendrehzahlen respektive hohen induzierten Maschinenspannungen wie ein Tiefsetzsteller. Sinkt die Drehzahl und damit die Klemmenspannung der Maschine ab, arbeitet der Wechselrichter unter Ausnutzung der Maschineninduktivitäten als Hochsetzsteller. Diese Betriebsweise ermöglicht Rekuperation auch bei kleinen Fahrzeuggeschwindigkeiten. Für den Einsatz im Kraftfahrzeug kommen als konkrete Ausführungsform sowohl Zwei- als auch Dreipunktschaltungen grundsätzlich in Frage. In Kapitel 5.3 findet eine Untersuchung dieser Alternativen statt.

2.3.4 Energiespeicher

Der Energiespeicher dient der Bereitstellung der zum Vortrieb des Fahrzeuges nötigen Energie. Zur Energiebedarfsminimierung soll er außerdem auch in der Lage sein, die beim Verzögern rekuperierbare Energie wieder aufzunehmen. Prinzipiell kommen unterschiedliche Energiespeicherkonzepte in Frage: Mechanische, chemische oder elektrische Energiespeicher. Beispiele hierfür sind Schwungradspeicher, Akkumulatoren und Kondensatoren. Die Wahl des passenden Energiespeichers hat unter Berücksichtigung der Anforderungen an das Speichersystem zu erfolgen. Im Vordergrund steht insbesondere eine hohe Energiedichte, also eine niedrige Masse bei gegebenem Energieinhalt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Superkondensatoren als Vertreter der elektrischen Energiespeicher sowie Lithium-Ionen-Akkumulatoren als Vertreter der chemischen Energiespeicher betrachtet. Keinen Eingang in diese Arbeit finden Brennstoffzellen sowie Schwungradspeicher.

Elektrische Energiespeicher speichern Energie in einem elektrischen Feld. Bekanntestes Beispiel sind Kondensatoren. Anwendung im Fahrzeug finden sie als Doppelschichtkondensatoren, auch „Supercaps“ oder „Ultracaps“ genannt. Supercaps bestehen aus zwei elektronenleitenden Elektroden und einem dazwischenliegenden Elektrolyt-getränkten

Separator, welcher ionenleitfähig, aber für Elektronen undurchlässig ist. Aufgrund der unterschiedlich geladenen Elektroden lagern sich am Phasenübergang jeweils gegensinnig geladene Elektronen an, es entsteht die typische Doppelschicht-Struktur. Superkondensatoren zeichnen sich durch eine für Kondensatoren hohe Energiedichte aus. Dennoch liegt diese Größe nur bei ungefähr einem Prozent der Energiedichte von Lithium-Ionen-Akkumulatoren [Sau10]. Somit eignen sich Kondensatoren nur für den Einsatz als Leistungsspeicher. Dies ist ein Speicher, welcher die nötige Leistung zur Deckung von Lastspitzen bereitstellt und auch wieder aufnehmen kann. Aufgrund der geringen Energiedichte und der großen geforderten Fahrzeugreichweite ist ein ausschließlich aus Kondensatoren bestehender Energiespeicher zu groß und zu schwer für den Einsatz in einem Kraftfahrzeug. Es sind jedoch vielversprechende Speichersysteme durch die Kombination von Akkumulatoren und Kondensatoren denkbar.

Eine wesentlich höhere Energiedichte ist mit (elektro-)chemischen Speichern erzielbar. Im Gegensatz zu rein elektrostatischen Speichern, wie Kondensatoren, wird hier durch chemische Vorgänge Energie umgewandelt. Zu dieser Speicherart zählen Akkumulatoren, also wiederaufladbare Batterien. Diese existieren in verschiedenen Ausführungsformen. Nach derzeitigem Stand der Technik sind Lithium-Ionen-Zellen hinsichtlich Energie- und Leistungsdichte die vielversprechendste Variante, weswegen diese Technik in dieser Arbeit im Vordergrund steht. Lithium-Ionen-Akkumulatoren lassen sich durch die verwendeten Elektrodenmaterialien klassifizieren und charakterisieren. Hierauf wird in Abschnitt 5.4 genauer eingegangen.

2.4 Anforderungen und Randbedingungen

An dieser Stelle werden die für Auslegung und Bewertung relevanten Anforderungen an den Antriebsstrang und die daraus abzuleitenden Komponentenanforderungen formuliert. Außerdem werden die zwingend zu beachtenden Randbedingungen für die Bewertung ermittelt.

2.4.1 Begriffsdefinition

Eine Anforderung ist nach DIN EN ISO 9000 ein/-e „Erfordernis oder Erwartung, das oder die festgelegt, üblicherweise vorausgesetzt oder verpflichtend ist“.[DIN05] Anforderungen sind im konkreten Fall demnach zu erfüllende Merkmale zu entwickelnder Systeme. Die Anforderungserfüllung ist für das Antriebssystem zwingend erforderlich. Kann ein System selbst mit Modifikationen die Anforderungen nicht erfüllen, wird es von der Bewertung ausgeschlossen.

2.4.2 Antriebsanforderungen

Ausgangspunkt der Anforderungsformulierung sind Fahrzeuganforderungen. Darin abgebildet sind nicht nur alle Fahrzeugmerkmale, welche der Hersteller abbilden möchte, sondern insbesondere auch alle Erwartungen und Wünsche der Kunden. Dazu zählen beispielsweise auch die Anzahl der Sitzplätze oder die Größe des Kofferraums. Solche Aspekte sind für die Betrachtungen in dieser Arbeit irrelevant. Von Interesse sind vielmehr diejenigen Fahrzeuganforderungen, welche sich auf Fahrmanöver beziehen, wie etwa Höchstgeschwindigkeit oder Reichweite. Aus diesen Fahrzeuganforderungen lassen sich direkt die Anforderungen an das Antriebssystem ableiten, welche in Tabelle 2.1 gesammelt sind. Diese beziehen sich auf ein typisches elektrisches Straßenfahrzeug und sind absichtlich hinreichend allgemein formuliert, um für verschiedenste Fahrzeugklassen und Einsatzszenarien gültig zu sein.

Tab. 2.1: Anforderungen an das Antriebssystem

Kategorie	Anforderung an das Antriebssystem
Fahrbarkeit	Anfahrbarkeit aus dem Stillstand Steigungsfähigkeit(dauer/max) Beschleunigungsvermögen
Leistungs- und Energiedichte	Erfüllung der Fahrzeuganforderungen
Wirtschaftlichkeit	Herstellungs- und Wartungskosten Lebensdauer
Sicherheit	Crashsicherheit Ausfallsicherheit
Funktionalität	Reichweite Zugkraftverlauf Höchstgeschwindigkeit
Kundennutzen	Fahrkomfort

2.4.3 Komponentenanforderungen

Aus den Anforderungen an das Antriebssystem lassen sich konkrete Anforderungen an die einzelnen Komponenten ableiten.

Nicht alle dabei generierten Anforderungen sind auslegungsrelevant. Nur diejenigen, die dafür geeignet sind, unterschiedliche Antriebskonzepte und -komponenten zu differenzieren, sind in Tabelle 2.2 zusammengefasst. Die konkreten Werte dieser Anforderungen

Tab. 2.2: Komponentenanforderungen, abgeleitet aus Anforderungen an das Antriebssystem

Kategorie	Antriebssystem	EM	WR	ES
Fahrbarkeit	Anfahrbarkeit Steigungsfähigkeit Beschleunigung	$M_{\max}$ $M_{\text{nenn}}, M_{\max}$	$I_{\max}$ $I_{\text{nenn}}, I_{\max}$	$I_{\max}$ $I_{\text{nenn}}, I_{\max}$ $I_{\max}, P_{\max}$
Leistungs- / Energiedichte	Erfüllung der Fzg.anforderungen	—	—	Leistungs- / Energiedichte
Wirtschaftlichkeit	Herstellungs- / Wartungskosten	Wartungsfreiheit	Wartungsfreiheit	Wartungsfreiheit
Sicherheit	Crashsicherheit	Spannungsfreiheit Entregung Bremsmomente	Spannungsfreiheit Entladung des Zwischenkreises	Bauraum, Materialien
Funktionalität	Reichweite $F_z - v$	Wirkungsgrad $M_{\max}, P_{\max}$, Überlastbarkeit	Wirkungsgrad $I_{\max}, P_{\max}$	Entladewirkungsgrad $I_{\max}, P_{\max}$
Kundennutzen	Fahrkomfort	$v_{\max}$ Rastmoment Drehmomenttriple	P_{nenn} Schaltfrequenz	P_{nenn} —

sind von der gewählten Fahrzeugart und -klasse abhängig und werden deswegen an dieser Stelle nicht im Einzelnen aufgelistet.

Elektrische Maschinen

Obwohl Drehfeldmaschinen in Industrieantrieben seit Jahrzehnten im Einsatz sind, können sie nicht ohne Modifikationen als Antrieb für ein elektrisches Straßenfahrzeug eingesetzt werden. Dies ist den unterschiedlichen Anforderungen an die Maschine geschuldet. So sind für den Einsatz im Fahrzeug ein großer Feldschwäcbereich gemäß $n_{\max} \approx 3 \cdot n_{\text{eck}}$ und eine hohe Drehmomentdichte beziehungsweise eine möglichst geringe Masse von großer Bedeutung [XCC08].

Aus den Fahrzeuganforderungen Beschleunigung und Höchstgeschwindigkeit ergeben sich, unter Berücksichtigung der Getriebeübersetzung (i), die Anforderungen an die elektrische Maschine hinsichtlich des Drehmomentverlaufs über der Drehzahl für Dauer- und Überlastbetrieb (siehe Abbildung 2.3).

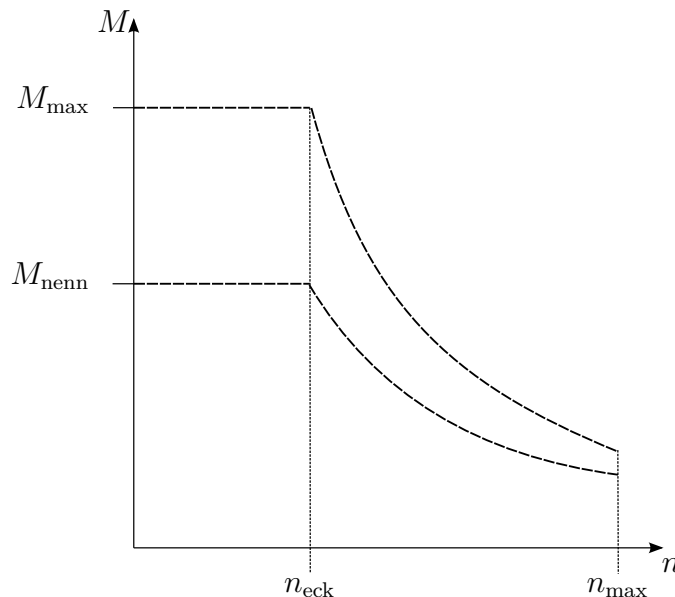


Abb. 2.3: EM Kennlinien

Die Anforderung für die optimale Lage des Bereichs besten Wirkungsgrads wiederum wird durch den für die Auslegung relevanten Fahrzyklus determiniert. Sind der Bereich optimalen Wirkungsgrads der elektrischen Maschine und der Bereich des größten Energieumsatzes des Fahrzyklus deckungsgleich, so ergibt sich ein maximaler energetischer Nutzungsgrad im Betrieb. Die Lage der Punkte größten Energieumsatzes kann unter Kenntnis der Fahrzeugdaten direkt aus dem Geschwindigkeitsverlauf des Zyklus berechnet werden. In Abbildung 2.4 ist dies am Beispiel eines Kleinwagens für den auslegungsrelevanten FTP-72 Zyklus zu sehen.

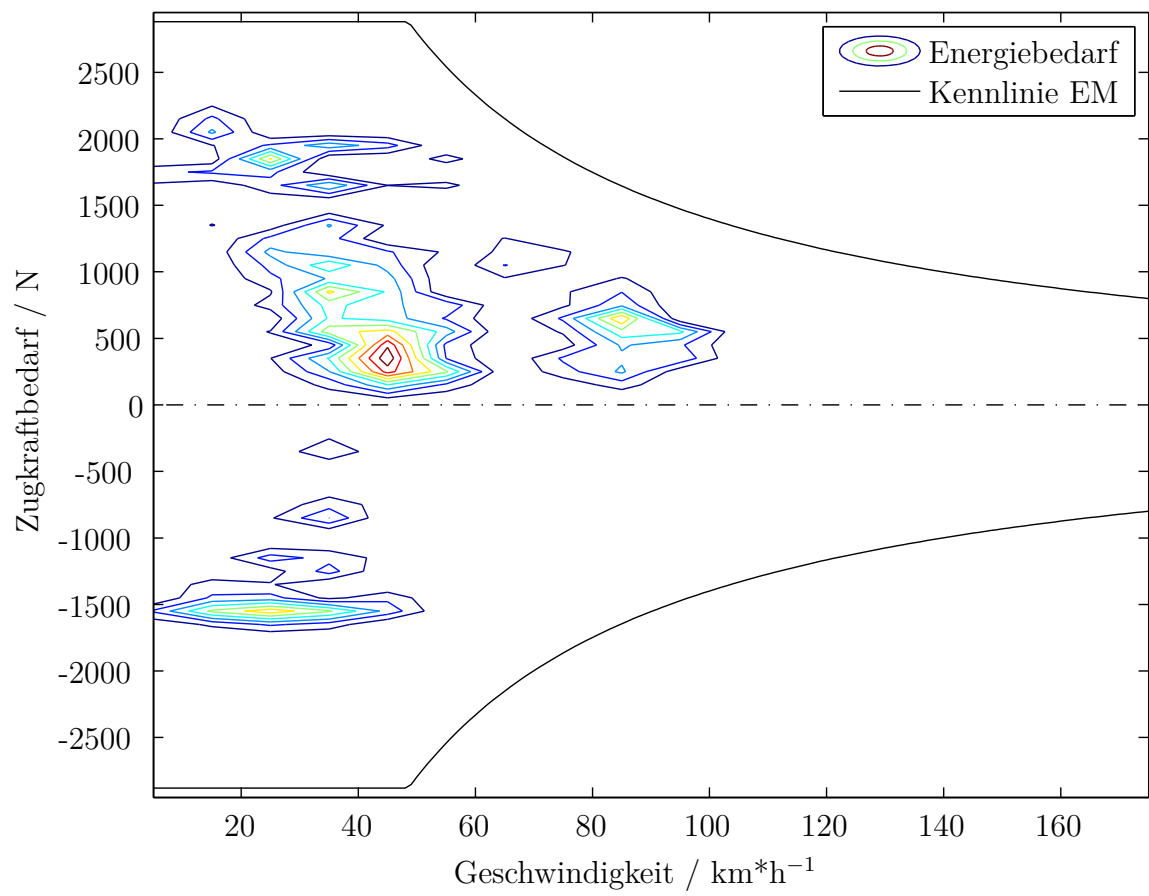


Abb. 2.4: Energiebedarf eines Kleinwagens im FTP-72 Zyklus

Getriebe

Die Aufgabe des Getriebes ist die Wandlung von Drehmoment und Drehzahl von Antriebs- zu Abtriebsseite. Daraus ergeben sich die Anforderungen an das Getriebe:

- Übersetzung i so, dass die Maschine mit ihrer maximalen Drehzahl $n_{\max}$ bei maximaler Fahrzeuggeschwindigkeit $v_{\max}$ dreht.
- Übersetzung i so, dass die Fahrzeuganforderung „Beschleunigung“ in der vorgegebenen Zeit erfüllt wird.
- Übersetzung i so, dass die geforderte maximale Steigfähigkeit des Fahrzeuges erfüllt wird.

Bei realen Auslegungen zeigt sich, dass typische Beschleunigungsanforderungen und Steigfähigkeitsanforderungen mit einer weiten Spanne von Getriebeübersetzungen erfüllbar sind. Bei einem Ein-Gang-Getriebe wird die Übersetzung somit immer in Abhängigkeit der ersten Anforderung gewählt:

$$i = n_{\text{EM,max}} \cdot 2\pi \cdot r_{\text{dyn}} \cdot \frac{1}{v}. \quad (2.10)$$

Bei Zwei-Gang-Getrieben wird der zweite Gang gemäß Formel 2.10 gewählt. Der erste Gang kann zur Beschleunigungsmaximierung so gewählt werden, dass die in diesem Gang maximal darstellbare Zugkraft an die Traktionsgrenze des Fahrzeuges heranreicht. Dies ist dann zulässig, wenn der Sprung zwischen den beiden Gangstufen nicht zu groß ausfällt. Ansonsten wird die Übersetzung des ersten Gangs so weit wie erforderlich in Richtung der Übersetzung des zweiten Gangs angepasst.

Wechselrichter

Die Anforderungen an Leistungsmodule (siehe Tabelle 2.3) für Fahrzeuge mit Hybridantrieb sind aus [SM09] detailliert bekannt. Diese sind auf batterieelektrische Fahrzeuge übertragbar. Aus diesen Anforderungen ergibt sich die Forderung nach einem neuartigen Aufbau der Halbleiter, da konventionell gefertigte Halbleiter mit einem zu hohen Ausfallrisiko behaftet sind. Grund hierfür sind die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der – bei konventioneller Fertigung – gelöteten Schichten unterschiedlichen Materials. Durch die bei Einsatz im Fahrzeug ausgeprägten Erschütterungen und Temperaturwechselbelastungen kommt es bei dieser Technik mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Rissen in den Lötsschichten, die zum Ausfall des Halbleiters führen [SM09].

Energiespeicher

An den Energiespeicher werden im Wesentlichen drei funktionale Anforderungen gestellt: Spannung, Leistung und Energieinhalt. Darüber hinaus ist ein wartungsfreier Speicher erforderlich, der im Crashfall eigensicher ist.

Tab. 2.3: Anforderungen an Leistungsmodule für den Einsatz in Fahrzeugen mit Hybridantrieb

Umgebungsbedingungen	
Umgebende Luft	-40°C bis 135°C
Kühlflüssigkeit	-40°C bis 105°C
Chip-Temperatur	-40°C bis 175°C
Vibration	10 x 9,81 m/s ²
Schock	50 x 9,81 m/s ²
Zuverlässigkeit	
Lebensdauer	15 Jahre
Lastwechsel	10000 Zyklen bei $\Delta T = 100$ K
Temperaturwechsel	1000 Zyklen bei $\Delta T = 165$ K

2.4.4 Randbedingungen

In der Physik werden als Randbedingungen die jeweils für ein System relevanten Umweltbedingungen bezeichnet [Bra01]. Bezugnehmend darauf werden in dieser Arbeit alle Einflussgrößen, die vorgegeben und nicht beeinflussbar sind, als Randbedingungen verstanden. Im Speziellen sind dies charakteristische, für die Bewertung relevante Kenngrößen des jeweils zu bewertenden Fahrzeugs.

In Tabelle 2.4 werden diese Größen zusammengefasst. In dieser Übersicht sind zudem Daten von Fahrzeugen der betrachteten Fahrzeuggrößen und -leistungen enthalten. Anhand dieser Beispielfahrzeuge werden im weiteren Verlauf der Arbeit die Unterschiede hinsichtlich optimaler Antriebssysteme in Abhängigkeit der Fahrzeugklasse herausgearbeitet.

Tab. 2.4: Aus Referenzfahrzeugen abgeleitete Randbedingungen für die Bewertung

Fahrzeugklasse	Klein		Mittel		Groß
Leistungsklasse	Klein	Mittel	Mittel	Groß	Groß
m/kg	1135	1205	1375	1460	1605
A/m^2	1,97	1,97	2,09	2,09	2,26
c_w	0,33	0,36	0,3	0,32	0,27
r_{dyn}/m			0,341		
f_R			0,0082		
$a_{\text{reku,max}}$			0,11 · g		

Es ist davon auszugehen, dass ein elektrisches Straßenfahrzeug im Hinblick auf die gegebenen Randbedingungen einem konventionell angetriebenen Fahrzeug so sehr ähnelt, dass die Übernahme dieser Fahrzeugkennzahlen zulässig ist. Unkritisch ist insbesondere die Übertragung der Parameter c_w und A auf ein elektrisches Fahrzeug. Bei der Masse bedarf es einer detaillierteren Betrachtung. Es sei an dieser Stelle auf Publikationen wie [WB06] verwiesen, die die Masse von elektrischen Kraftfahrzeugen betrachten, welche nach dem Conversion Design entstanden sind. Hier wird deutlich, dass umgebaute Fahrzeuge eine etwas erhöhte Masse im Vergleich zum Basisfahrzeug mit Verbrennungsmotor aufweisen. Durch Anwendung des Purpose Design und von Leichtbaumaterialien ist allerdings davon auszugehen, dass die Fahrzeuge wieder leichter werden. Somit lässt sich schlussfolgern, dass es, insbesondere in der frühen Phase des Fahrzeugauslegungsprozesses, in der lediglich ein grober Richtwert erforderlich ist, zulässig ist, als ungefähre Masse der elektrischen Fahrzeuge die der Referenzfahrzeuge anzunehmen. Gleichwohl wird bei der konkreten Auslegung und Bewertung der Antriebsstränge die Masse des Fahrzeugs in Abhängigkeit des verbauten Antriebs ermittelt.

2.5 Bewertungskriterien

Unter dem Begriff Bewertungskriterien werden all diejenigen Eigenschaften der zu bewertenden Komponenten und Systeme verstanden, welche für deren Differenzierung im Hinblick auf die Erfüllung der Kundenanforderungen relevant sind. Die Bewertungskriterien müssen gemäß dem MECE-Prinzip gewählt werden [Hun10]. MECE ist ein Akronym, welches für „mutually exclusive, collectively exhaustive“ steht. Frei übersetzt bedeutet MECE folglich, dass die Bewertungskriterien alle Eigenschaften der Komponenten und des Antriebssystems abdecken müssen, dabei allerdings überlappungsfrei sein müssen. Somit ist gewährleistet, dass kein Charakteristikum vernachlässigt wird, aber auch keine Eigenschaft Einfluss auf mehrere Bewertungskriterien hat und damit die Bewertung überproportional bestimmt. Des Weiteren erstreckt sich das MECE-Prinzip auch auf alle einzelnen Untersuchungen, die für ein Bewertungskriterium durchgeführt werden: Teilaspekte eines Bewertungskriteriums sind immer allumfassend und überlappungsfrei.

Die technischen Eigenschaften können gemäß des MECE-Prinzips ohne Einschränkungen mit Bewertungskriterien erfasst werden. Für eine vollständige und praxisrelevante Systembeschreibung ist es allerdings unerlässlich, neben der technischen auch noch eine wirtschaftliche Betrachtung durchzuführen. Bei der Bewertung der Kosten gelingt es allerdings nicht mehr, das MECE-Prinzip konsistent anzuwenden. Der Grund liegt in der Natur des Zusammenhangs Kosten - Funktion: Mit entsprechendem Aufwand, sprich Einsatz von Kapital, ist es im Allgemeinen möglich, verbesserte Funktion zu erlangen. Aufgrund dieses Sachverhaltes muss das Kriterium Kosten gesondert betrachtet werden. Hierzu kommt ein im Anhangskapitel A.2 beschriebenes Kostenmodell

zum Einsatz. Neben der strikten Einhaltung des MECE-Prinzips besteht bei der Wahl der Bewertungskriterien die Herausforderung, die Kriterien einerseits so allgemein wie möglich zu formulieren, so dass alle Komponenten bewertet werden können, sie andererseits allerdings so spezifisch wie nötig zu definieren, so dass alle relevanten Eigenschaften aller Komponenten erfasst werden. Aus diesem Grund müssen zwei Klassen von Kriterien definiert werden: Kriterien, welche sich auf die Antriebsart und jede Komponente beziehen, sowie Kriterien, welche sich zwar nur auf eine oder wenige Komponenten beziehen, aber zwingend nötig sind, um das Verhalten der Komponenten im System zu evaluieren. Die gewählten Bewertungskriterien werden nachfolgend erläutert. Die Reihenfolge der Kriterien stellt keine Priorisierung dar.

- **Kosten**

Das Kriterium Kosten ist als einziges nicht dem MECE-Prinzip untergeordnet, da es alle anderen Kriterien maßgeblich beeinflusst beziehungsweise von diesen beeinflusst wird. Trotzdem ist es aber für eine vollständige Bewertung im Kontext einer Serienfertigung unerlässlich. Zur Ermöglichung einer validen Kostenaussage sind Kostenmodelle der Antriebskomponenten erforderlich. Diese Kostenmodelle dienen zur Generierung einer Aussage zum Zusammenhang Funktion - Kosten. Dabei wird in der Regel der Zwischenschritt über die Masse der Komponentenbestandteile gewählt. Genaue Erläuterungen zur Ermittlung der Kosten sind dem Anhangskapitel A.2 zu entnehmen.

- **Effizienz**

Das Kriterium Effizienz ermöglicht es, eine Aussage über den Energiebedarf des Antriebsstrangs für einen spezifischen Fahrzyklus zu treffen. Im Vordergrund steht folglich nicht der Nennwirkungsgrad der einzelnen Komponente, sondern die Form des Wirkungsgradkennfelds und die relative Lage der Punkte besten Wirkungsgrads der Komponente zur Lage der Punkte des höchsten Energiebedarfs des Zyklus. Des Weiteren wird in diesem Kriterium die Masse des Antriebssystems in die Berechnung einbezogen, da diese den Energiebedarf des Fahrzeugs im Zyklus mitbestimmt.

- **Bauraum**

Für die Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit ist die konkrete Form der Antriebskomponenten nicht von Bedeutung, wohl aber das Volumen. Dieses wird über das Kriterium (benötigter) Bauraum erfasst. Je kompakter die Komponente, umso höher die Bewertung.

- **Fahrleistung**

Das Kriterium Fahrleistung bildet den Grad der Erfüllung aller Fahranforderungen an das Fahrzeug durch den jeweiligen Antrieb ab. Fahr-Anforderungen sind hierbei Endgeschwindigkeit sowie Beschleunigungs- und Steigfähigkeit. Auch an dieser Stelle ist die Masse des Antriebes zu berücksichtigen, da diese die Beschleunigungsfähigkeit des Fahrzeugs maßgeblich beeinflusst.

- **Fahrsicherheit**

Die Gewährleistung der Fahrsicherheit ist obligatorisch. Mit diesem Kriterium wird somit nicht bewertet, zu welchem Grad die Fahrsicherheit erfüllt ist, sondern vielmehr welcher Aufwand zur Sicherstellung der Fahrsicherheit erforderlich ist. Maßgeblich für die Fahrsicherheit ist beispielsweise das Verhalten des Fahrzeuges bei Fehlern im Antriebsstrang. Besonders kritisch ist hierbei das ungewollte Blockieren einzelner Räder. Einige Antriebsarten besitzen die inhärente Eigenschaft, dass dieser Fehlerfall nicht eintreten kann, bei anderen sind jedoch Maßnahmen zur Vermeidung eines solchen Szenarios unumgänglich.

- **Zuverlässigkeit**

Der Punkt Zuverlässigkeit beinhaltet die Qualität der Komponenten, aus welcher sich die „mean time between failures“ (MTBF), also die Zeitdauer, bis ein Fehlerfall eintritt, ermitteln lässt. Außerdem ist hierin auch die Robustheit der Komponenten enthalten. Als Robustheit wird die Toleranz der Komponenten gegenüber Umwelteinflüssen verstanden. Die Bewertung durch dieses Kriterium erstreckt sich dabei nicht nur auf die Art der Komponente, sondern auch auf die Antriebsart. Diese bestimmt maßgeblich, in welchem Maße der Antrieb Umwelteinflüssen ausgesetzt ist.

- **Überlastbarkeit**

Die Überlastbarkeit ist eine Eigenschaft von elektrischen Maschinen. Elektrische Energiespeicher sowie Stromrichter sind im Allgemeinen nicht überlastbar. Das Kriterium hat folglich nur auf Antriebsart und die Komponente elektrische Maschine Einfluss. Es gibt an, wie stark und für welche Dauer die Maschine überlastet, also mit höherer Leistung als im Nennbetrieb, betrieben werden kann.

- **Akustik**

Unter dem Punkt Akustik werden alle hörbaren Phänomene des Antriebs gesammelt. Bewertet wird die zu erwartende Intensität der Schall-Emissionen des Antriebs. Dabei sind komponentenspezifische Aspekte, wie beispielsweise Rastmomente, als auch systemspezifische Aspekte, wie beispielsweise Schallemissionen durch Magnetostraktion in der Maschine, welche sowohl von der Art der Maschine als auch von der Art des Wechselrichters abhängt, von Bedeutung.

- **Komplexität**

Die Komplexität bezeichnet die Komponenteneigenschaft, aus vielen Subkomponenten und Einzelteilen zu bestehen. Dieses Kriterium dient insbesondere der Differenzierung unterschiedlich aufgebauter Speichersysteme. Je komplexer ein System beziehungsweise eine Komponente ist, umso höher ist der zur Herstellung und zum Betrieb nötige Aufwand. Dieses Kriterium ist somit mit der Kostenbewertung eng verknüpft. Idealerweise sind sowohl die Komponenten als auch das Gesamtsystem so einfach wie möglich aufgebaut.

- **Flexibilität**

Unter Flexibilität ist die Eignung der Komponenten zu verstehen für verschiedene Konfigurationen und Einsatzszenarien des Antriebssystems geeignet zu sein. Dieses Kriterium ist folglich Indikator einer robusten Systemauslegung, also einer Systemauslegung, die auch bei leicht geänderten Anforderungen immer noch einen hohen Erfüllungsgrad der Anforderungen aufweist.

- **Schleppmomente**

Als Schleppmoment wird das rotatorische Widerstandsmoment bezeichnet, das eine unbestromte elektrische Maschine auf Grund ihrer Konstruktion besitzt. Das Schleppmoment ist abhängig von Art und Auslegung der Maschine und soll aus Gründen der Verlustminimierung möglichst gering sein. Ob es sich auf das Fahrzeug auswirkt, ist von der Antriebstopologie, etwa der Anwesenheit von Kupplungen, abhängig. Dieses Kriterium bezieht sich folglich nur auf die elektrische Maschine und die Antriebstopologie.

- **Einzelradsteuerung**

Bei sportlichen Fahrzeugen beziehungsweise hohen Anforderungen an die Querdynamik ist ein „Torque-Vectoring“ System, also eine Möglichkeit, Drehmomente auf die Räder frei zu verteilen, von Vorteil. Dies wird entweder durch spezielle Getriebe, oder vorteilhafter durch mindestens zwei mechanisch entkoppelte elektrische Maschinen bewerkstelligt. Das Kriterium bewertet die Möglichkeit der Einzelradsteuerung unterschiedlicher Antriebstopologien.

- **Spannungsqualität**

Als einziges Kriterium ist es nur auf Wechselrichter und Speicher anwendbar. Unter den Begriff Qualität fällt hier sowohl die Fähigkeit des Speichersystems eine konstante Zwischenkreisspannung bereitzustellen, was Vorteile in der Auslegung des Wechselrichters bietet, als auch das Ausmaß der Abweichung von der idealen Spannungsform. Dazu gehören unerwünschte Spannungsschwankungen im Zwischenkreis als auch der Oberschwingungsgehalt der Wechselspannungen am Wechselrichterausgang. Dieser wird maßgeblich vom Aufbau des Wechselrichters bestimmt.

- **Nutzbarer Energieinhalt**

Dieses Kriterium bezieht sich nur auf das Speichersystem. Es dient der Erfassung des nutzbaren Energieinhalts, also derjenigen Energiemenge, welche zum Antrieb des Fahrzeugs genutzt werden kann. Es ist sinnvoll, den nutzbaren und nicht den installierten Energieinhalt zu betrachten, da es von externen Faktoren, wie beispielsweise der Topologie des Speichersystems, abhängt, wie viel Energie dem Speicher entnommen werden kann.

2.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden die für die Bewertung elektrischer Antriebssysteme relevanten Grundlagen in bewusst knapper Form vermittelt. Für tiefergehendes Verständnis der Materie sei auf die angegebene Fachliteratur verwiesen.

Darüber hinaus werden die Eingangsdaten der Bewertungsmethodik gesammelt: Anforderungen, Randbedingungen und Bewertungskriterien. Nachdem diese nun bekannt sind, wird im nächsten Kapitel eine Methodik beschrieben, welche anhand dieser Eingangsparameter optimale elektrische Antriebssysteme zu identifizieren vermag.

3 Bewertungsmethodik

Nach der Bestimmung des Bewertungsumfangs und der Eingangsparameter in Kapitel 2, wird nun darauf aufbauend eine Methodik entworfen, die es ermöglicht, Antriebssysteme für batterieelektrische Straßenfahrzeuge zu bewerten.

Dementsprechend werden zunächst die Ausgangslage und die Zielsetzung festgelegt, da diese die Art und Weise der Methodik determinieren. Im Anschluss daran wird der Aufbau der Methodik in abstracto vorgestellt. Den Abschluss dieses Kapitels bildet eine Beschreibung der konkreten Durchführung der Bewertung.

3.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Im Rahmen dieser Arbeit sollen optimale Antriebssysteme für batterieelektrische Straßenfahrzeuge ermittelt werden.

Dabei wird es nie ein optimales System für alle Fahrzeugarten geben können. Vielmehr muss „das optimale“ System in Abhängigkeit von den vorgegebenen Randbedingungen, gewählten Bewertungskriterien und aus der jeweiligen Fahrzeugklasse resultierenden Anforderungen bestimmt werden.

Zur Gewährleistung der Konsistenz ist eine durchgehende Bewertung nach einem festgelegten Schema unerlässlich. Es sind Methoden einzusetzen, um die systematische und zielgerichtete Lösungsfindung zu unterstützen [Lin07].

Herausfordernd ist dabei insbesondere, dass sich die zahlreichen Systeme untereinander sehr stark ähneln. Ist die Bewertung nicht präzise genug, ergibt sich demnach keine zur Generierung verlässlicher Resultate hinreichend große Abstufung zwischen den Systemen. Demgegenüber steht gleichermaßen der Anspruch, ein möglichst allgemeingültiges Ergebnis zu erzielen. Je größer jedoch der Gültigkeitsbereich ist, desto unschärfer werden die möglichen Aussagen. Dieser Dualismus ist bei der Auswahl geeigneter Methoden zwingend zu beachten.

Zudem müssen Wege gefunden werden, mit denen Kriterien qualitativer Natur hinreichend genau quantifiziert werden können. Während Faktoren wie „Leistung“ oder „Reichweite“ quantifiziert vorliegen und exakt verglichen werden können, ist es bei Kriterien wie „Temperatursensitivität“ oder „Ausfallsicherheit“ schwierig, bei Kriterien wie „Kundennutzen“ nur noch unter hohem Aufwand möglich, exakte Kennzahlen für

den Erfüllungsgrad des Kriteriums zu ermitteln. Hier ist sicherzustellen, dass durch Gütefunktionen oder dergleichen aus teilweise subjektiven und nur in Textform vorliegenden Kriterien Kennzahlen generiert werden können.

Da die Bewertung der Systeme objektiv und allgemeingültig erfolgen soll, ist des Weiteren der Einfluss der Hersteller auf die Techniken auszuschließen. Aus diesem Grund sind für alle Betrachtungen skalierbare, generische Modelle, also Modelle, welche rein nach dem Stand der Technik entworfen sind und die relevanten physikalischen Wirkprinzipien abbilden, aber keine speziellen Optimierungen beinhalten, zugrunde zu legen. Die im Rahmen dieser Arbeit zum Vergleich herangezogenen elektrischen Maschinen, Wechselrichter und Energiespeicher werden demzufolge eigenhändig ausgelegt und an existierenden Komponenten verifiziert. Dies ist im Anhangskapitel C beschrieben.

Wie soeben aufgezeigt, existieren zahlreiche schwierig zu erfassende Eigenschaften, die bei der Bewertung zu berücksichtigen sind. Aufgrund der sich dadurch ergebenden Unschärfe bei der Bewertung kann das Ergebnis nur qualitativ ausfallen. Somit ist es per se nicht möglich, aus den Ergebnissen abzulesen, um welchen Faktor sich die Systeme voneinander unterscheiden. Vielmehr soll ein Vorgehen konzipiert werden, welches die bewerteten Systeme qualitativ zueinander in Relation zu setzen vermag.

3.2 Abgrenzung der Begriffe Methode und Methodik

Hesse definiert den Begriff der Methode wie folgt: „Methoden sind planmäßig angewandte, begründete Vorgehensweisen zur Erreichung von festgelegten Zielen [...] (im allgemeinen) im Rahmen festgelegter Prinzipien). Methoden können fachspezifisch sein. Zu Methoden gehören eine Notation, systematische Handlungsanweisungen und Regeln zur Überprüfung der Ergebnisse.“[HMF92] In ähnlicher Weise äußert sich auch Lindemann zu diesem Thema: „Der Begriff Methode kennzeichnet die Beschreibung eines regelbasierten und planmäßigen Vorgehens, nach dessen Vorgabe bestimmte Tätigkeiten auszuführen sind, um ein gewisses Ziel zu erreichen. [...] Oftmals stellen Methoden einen Formalismus dar, der festlegt, wie Schritte durchzuführen beziehungsweise Arbeitsergebnisse zu dokumentieren sind.“[Lin07]

Die Methode ist demnach eine bestimmte Prozedur zur Lösung eines Problems. Demgegenüber ist der Begriff der Methodik als „Kombination von Methoden“[Lin07] definiert.

Die Bewertung der Antriebssysteme kann nicht in einem einzigen Schritt vollzogen werden, sondern bedarf einer exakten Abfolge mehrerer Schritte. Demzufolge ist es mit einer Methode allein nicht möglich, das System komplett zu bewerten – eine Methodik ist unabdingbar.

3.3 Grundsätzlicher Aufbau der Bewertung

Mit der in Kapitel 2 dokumentierten Bestimmung aller Anforderungen, Randbedingungen und Bewertungskriterien sowie der Abgrenzung des Lösungsraums sind die Eingangsparameter für die Bewertung festgelegt.

Noch zu klären ist, welche Art und Weise der Durchführung zur Erzielung einer optimalen Bewertungsgüte zielführend ist. Im vorliegenden Fall besteht die Alternative, die Antriebssysteme in ihrer Gesamtheit zu betrachten, oder die Komponenten separat zu beurteilen und aus diesen Einzelbewertungen eine Gesamtbewertung zu erstellen.

Die erstgenannte Variante besticht durch die Konformität mit der Zielsetzung einer ganzheitlichen Systembewertung, da hierbei alle Systemcharakteristika automatisch berücksichtigt werden. Dies ist von übergeordneter Bedeutung, da sich ein System nicht zwingend so verhält, wie es bei einer Addition der Komponenteneigenschaften zu erwarten wäre. Vielmehr wird das Verhalten des Systems durch die Interaktionen der Komponenten bestimmt.

Der Nachteil dieser Bewertungsvariante liegt im Wesentlichen in der fehlenden Modularität. Da jedes System nur in toto betrachtet und als Ganzes bewertet werden kann, ist es in diesem Fall nicht möglich, einzelne Systembestandteile auszutauschen oder weitere hinzuzufügen. Dies ist jedoch gerade für den Einsatz der Methodik im operativen Geschäft eines Unternehmens von großer Bedeutung. Schließlich kann nur der aktuelle Stand der Technik mit der Bewertung abgedeckt werden. Es ist aber zwingend nötig, zukünftige Entwicklungen – beispielsweise das Aufkommen einer neuen Zelltechnologie – zu berücksichtigen, um zu jedem Zeitpunkt valide Resultate garantieren zu können.

Wählt man die zweitgenannte Version, ist die Modularität garantiert. Da hier die Systembewertungen aus beliebigen Komponentenbewertungen gebildet werden, ist es problemlos möglich, weitere Komponenten hinzuzufügen. Demgegenüber bleiben bei dieser Variante allerdings die charakteristischen Wechselwirkungen unberücksichtigt. Dies ist nicht akzeptabel, da gerade die Interaktionen den Mehrwert einer System gegenüber einer Komponentenbetrachtung bilden.

Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit der Ansatz gewählt, dass zwar die Komponenten separat bewertet werden, sich die Systembewertung aber nicht allein aus der Summe der Komponentenbewertungen ergibt, sondern von den Interaktionen der Komponenten geprägt ist. Dies wird dadurch erreicht, dass zuerst systemunabhängige, also rein systembestandteilspezifische Bewertungen berechnet werden. Mit der Kombination der einzelnen Komponenten zum Gesamtsystem wird dann, in Abhängigkeit des Systemaufbaus, der Einfluss der Interaktionen berücksichtigt.

Der Bewertung vorgelagert ist die genaue Definition des Lösungsraums. Es ist exakt festzuhalten, welche Umfänge Teil der Bewertung sind und welche Grenzen den Lösungsraum determinieren [DH94].

In dieser Arbeit ist die Abgrenzung bereits in Abbildung 2.2 ersichtlich. Behandelt werden alle sinnvollen Kombinationen der Komponenten, die zum Antrieb des Fahrzeuges direkt beitragen: Energiespeicher, Wechselrichter, elektrische Maschine und Getriebe. Die Schnittstellen zur Systemumgebung sind in Tabelle 3.1 dokumentiert. Diese Schnittstellen sind gleichzeitig auch die Grenzen des Lösungsraumes. Die Bewertung bezieht sich auf alle Komponenten innerhalb dieses Raumes.

Tab. 3.1: Schnittstellen des Antriebssystems mit der Systemumgebung

Komponenten	Schnittstelle
Energiespeicher	Kühlanschluss
Zwischenkreis	Ladegerätanschluss
	Anschluss des DC/DC-Wandlers für das 12 V-Bordnetz
	elektrischer Klimakompressor
	elektrische Heizung
	Kühlanschluss
Wechselrichter	Kühlanschluss
Elektrische Maschine	Kühlanschluss
Getriebe	Welle

3.4 Durchführung der Bewertung

An dieser Stelle wird der komplette Bewertungsprozess aufgezeigt. Es werden die eingesetzten Methoden und die konkreten Berechnungsschritte aufgezeigt.

Die vorgeschlagene Methodik (siehe Abbildung 3.1) setzt sich aus sieben Einzelschritten zusammen und ergibt sich aus der Kombination von neun Methoden, welche für die hier vorliegende Aufgabe speziell anzupassen sind. Dies ist notwendig, da eine Methode optimal auf die Aufgabe zugeschnitten sein muss, um bestmögliche Lösungen zu bieten [Lin07].

Die Methodik wird nun sukzessive vorgestellt.

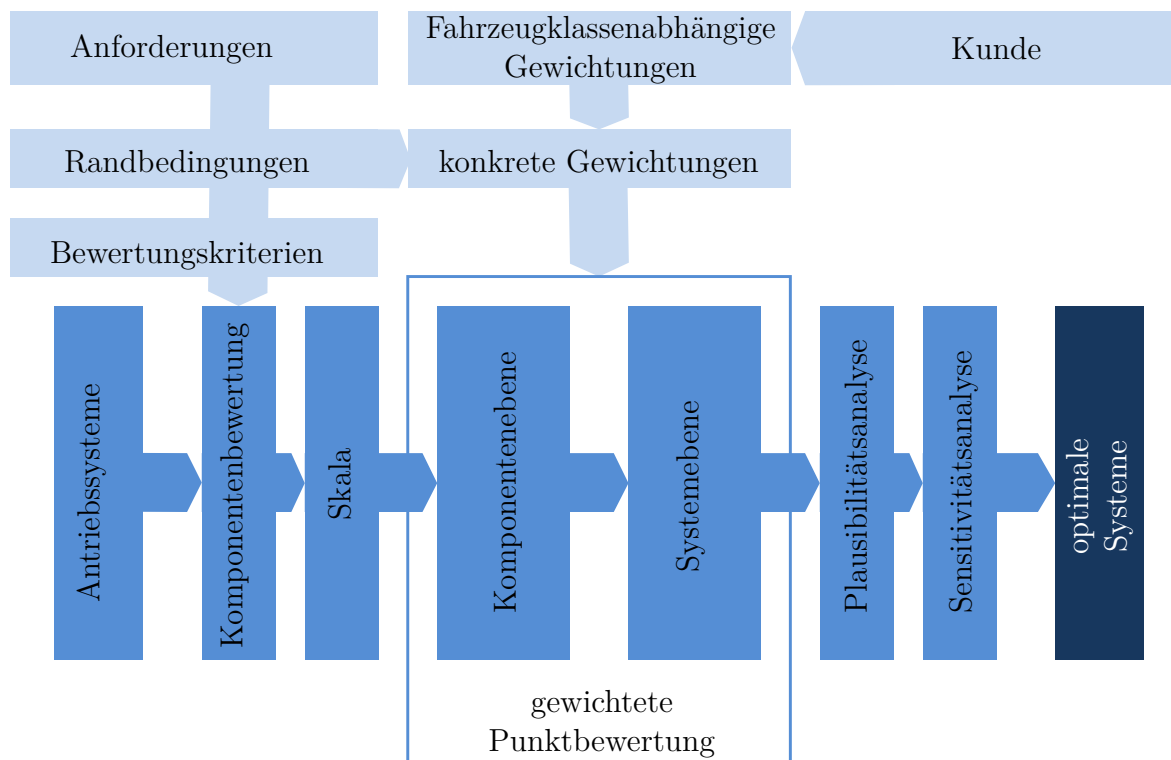


Abb. 3.1: Methodik zur Bewertung elektrischer Antriebssysteme

3.4.1 Festlegung der Anforderungen, Randbedingungen, Bewertungskriterien und der zu bewertenden Komponenteneigenschaften

Die Bewertungsmethodik soll die Bestimmung des jeweils besten Systems in Abhängigkeit von definierten Anforderungen, Randbedingungen und Bewertungskriterien ermöglichen. Es sind folglich alle Größen zu ermitteln, die Einfluss auf das Systemverhalten haben. Des Weiteren müssen vor Beginn der Bewertung diejenigen Komponenteneigenschaften bestimmt werden, die für die Charakterisierung des Verhaltens und somit für die Bewertung relevant sind. Diese Eigenschaften lassen sich aus den Anforderungen an die Komponenten ableiten und sind in Abschnitt 2.4.3 festgehalten. Die Bewertungskriterien sind so zu wählen, dass die relevanten Komponenteneigenschaften vollständig und überlappungsfrei erfasst werden.

Aus diesem Grund werden folgende Bewertungskriterien verwendet:

- Kosten
- Effizienz
- Bauraum
- Fahrleistung
- Fahrsicherheit
- Zuverlässigkeit
- Überlastbarkeit
- Akustik
- Komplexität
- Flexibilität
- Schleppmomente
- Einzelradsteuerung
- Spannungsqualität
- Nutzbarer Energieinhalt

Der Auswahlprozess dieser Kriterien und ihre jeweilige Bedeutung sind in Abschnitt 2.5 erläutert.

3.4.2 Vorauswahl

Die zu bewertenden Systeme ergeben sich aus der Kombination aller zu bewertenden Topologien und Techniken. Durch die multiplikative Verknüpfung steigt die Anzahl der zu bewertenden Systeme quadratisch bei linear steigender Anzahl der Eingangsdaten. Aufgrund der Vielzahl der denkbaren Kombinationen ergäbe sich daher eine nicht mehr handhabbare Anzahl an Systemen. Zur Bewertung eines Systems ist eine gewisse Zeitspanne im Minutenbereich erforderlich. Somit ergäben sich bei der Bewertung aller Systeme nicht mehr sinnvolle Zeiträume. Zur Limitierung der Anzahl an potentiellen Lösungen ist es somit notwendig, die offenkundig nicht sinnvollen Topologien und Techniken von der Bewertung auszuschließen.

Aus diesem Grund wird als zweiter Schritt eine Vorauswahl getroffen. Dafür werden sogenannte K.o.-Kriterien, also essentielle Eigenschaften, definiert. Erfüllt eine Topologie beziehungsweise eine Technik ein K.o.-Kriterium nicht, wird sie nicht weiter betrachtet. Es ist hierbei strikt darauf zu achten, dass keine potentiell brauchbaren Systeme in der Vorauswahl wegfallen. Aus diesem Grund ist eine exakte Selektion der K.o.-Kriterien von hoher Bedeutung [PBFG03].

Die konkrete Vorauswahl der Topologien ist in Kapitel 4, die Vorauswahl der Techniken in Kapitel 5 beschrieben.

3.4.3 Bildung möglicher Systeme durch systematische Variation im Morphologischen Kasten

Nach erfolgter Vorauswahl werden aus den verbleibenden Topologien und Techniken alle theoretisch möglichen Systeme gebildet. Hierbei wird die sogenannte systematische Variation im Morphologischen Kasten nach Zwicky angewandt.

Dies bedeutet, dass jede Topologie mit allen Kombinationen der Techniken kombiniert wird. Dadurch ergibt sich ein Überblick über alle zu betrachtenden Systeme, welcher es ermöglicht, Gemeinsamkeiten zwischen den Systemen aufzudecken. Somit können beispielsweise sehr ähnliche Systeme zu Lösungsklassen vereinigt und gemeinsam betrachtet werden, was den Bewertungsaufwand deutlich reduziert [Bir80], [Ehr03], [Zwi66].

Durch die bereits in Schritt 2 erfolgte Vorauswahl sind alle nun entstandenen Systeme prinzipiell realisierbar, eine erneute Vorauswahl ist demnach nicht mehr notwendig. Jedoch harmonieren nicht alle Kombinationen in gleicher Weise miteinander. Dieses systemische Verhalten wird im weiteren Verlauf der Bewertung berücksichtigt.

3.4.4 Definition der Skalen und Bewertung der Komponenten

Zu klären ist weiterhin, auf welcher Ebene die Bewertung erfolgen soll. Übergeordnetes Ziel dabei ist es, eine objektive und nachvollziehbare Bewertung zu garantieren.

Ideale Objektivität wird durch den Vergleich von Fakten erreicht – im vorliegenden Fall also durch die direkte Betrachtung physikalischer Größen wie Drehmoment, Leistung oder Spannung. Es ist möglich und praktikabel, verschiedene Komponenten anhand eines Bewertungskriteriums über die Betrachtung physikalischer Größen zu vergleichen. Beispielsweise ist es sinnvoll, den Energiebedarf der Systeme über Wirkungsgrad, Zeit und Leistung zu bestimmen.

Jedoch erfordert eine Gesamtbewertung die simultane Betrachtung verschiedener physikalischer Größen. Der direkte Vergleich wird hierbei erschwert. Beispielsweise ist es nicht a priori eindeutig bestimmbar, ob ein 10 kg leichteres oder ein 10 dB leiseres System zu bevorzugen ist. Deswegen ist es unumgänglich, eine Vergleichbarkeit der Systeme in allen Kriterien herbeizuführen. Dies wird durch eine Transformation aller Eigenschaftswerte auf eine identische Skala erreicht. Hierfür stehen nach [FS96] und [Sti99] verschiedene Arten von Messskalen zur Verfügung:

- **Nominalskala:** Die zu bewertenden Komponenteneigenschaften werden in voneinander unabhängige Kategorien, beispielsweise Farbe, eingeteilt. Dies ist streng genommen keine richtige Skala, da keine Abstufung, sondern nur die Übereinstimmung festgestellt werden kann.
- **Ordinalskala:** Die Eigenschaften werden in voneinander abhängige, geordnete Kategorien eingeteilt. Dies ermöglicht, im Gegensatz zur Nominalskala, qualitative Vergleiche wie „größer als“ oder „kleiner als“. Da nur die Richtung, nicht jedoch die Größe des Unterschiedes bekannt ist, sind Rechenoperationen ausgeschlossen.
- **Intervallskala:** Bei dieser Skala sind die Kategorien geordnet und gleichverteilt. Ein Beispiel ist die Temperaturskala nach Celsius. Somit werden Additionen und Subtraktionen ermöglicht. Durch die willkürliche Nullpunktwahl sind Division und Multiplikation kritisch. Beispielsweise ist eine Wicklungstemperatur von 120 °C nicht doppelt so hoch wie eine Wicklungstemperatur von 60 °C.
- **Ratioskala:** Die Ratioskala, auch Verhältnisskala genannt, ist ähnlich aufgebaut wie die Intervallskala, besitzt darüber hinaus jedoch einen echten Nullpunkt. Dies ist beispielsweise bei der Angabe der Leistung in Watt der Fall. Hierbei ist die Einheit willkürlich wählbar; die Höhe des Wertes geht mit der Höhe der Merkmalsausprägung einher. Alle Rechenoperationen sind zulässig.
- **Absolute Skalen:** Diese Art von Skalen findet dann Anwendung, wenn keine direkte Messmöglichkeit vorhanden ist. Sie ist die eindeutigste Skala, da sowohl die Kategorien als auch die Maßeinheit vorgegeben sind. Die Bestimmung des Skalenwertes erfolgt hier durch Zählen der Attribute oder durch eine Schätzung.

Ein Beispiel ist die Geburtenrate eines Landes. Weitere Rechenoperationen sind aufgrund der Absolutheit des Wertes nicht möglich.

Die Herausforderung besteht nun darin, eine für alle Bewertungskriterien einheitliche Skala zu finden. Dies wird durch die Natur der Kriterien erschwert: Der Energiebedarf lässt sich beispielsweise optimal auf einer Ratioskala abbilden. Wird hingegen die Möglichkeit einer Einzelradsteuerung betrachtet, ist die Einteilung mit einer simplen Nominalskala bereits ausreichend. Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, dass für manche Kriterien ein exakter Wert angegeben werden kann, beispielsweise ein Energiebedarf von 15 kWh/100 km, bei anderen, wie den Geräuschemissionen oder der Flexibilität, aber nur Abstufungen oder gar Abschätzungen.

Es wird schnell klar, dass nur eine dimensionslose Skala zur Anwendung kommen kann, da sie sowohl kontinuierliche Eintragungen physikalischer Messwerte, als auch diskrete Eintragungen, gewonnen aus der Zählung von Attributen, zulässt. Aus diesem Grund wird eine Punktbewertung als Kern der Bewertung gewählt. Hierbei ist zu verhindern, dass es beim Übertrag einer physikalischen Größe auf einen Punktwert zu Informationsverlust kommt. Jedoch ist das hohe Abstraktionsniveau dieses Ansatzes zwingend erforderlich.

Nach Bühner [Büh04] ist bei einer Punktbewertung eine ungeradzahlige Skala vorteilhaft. Hier besteht die Gefahr, bei schwierigen Entscheidungen den mittleren Punkt auszuwählen, also keiner der beiden Alternativen den Vorzug zu geben. Allerdings ist es oftmals so, dass die mittlere Bewertung die richtige ist und es somit bei einer geradzahligen Skala zu verfälschten Ergebnissen kommt, da diese immer eine Orientierung zu einer der beiden Alternativen erzwingt.

Wichtig ist auch die Anzahl der Skaleneinträge. Drei Einträge (negativ, neutral, positiv) würden für eine Einordnung der Systeme theoretisch ausreichen, allerdings ist diese Einteilung zu grob, um alle Aspekte hinreichend genau berücksichtigen zu können. Eine mit vielen Punkten sehr fein unterteilte Skala ist jedoch ebenfalls nicht zielführend, da die Abstufung zwischen den einzelnen Systemen nicht beliebig genau ist.

In der Praxis haben sich sieben-stufige Skalen als die beste Lösung herausgestellt. Hier ist es möglich, eine hinreichend genaue Unterteilung zu gewährleisten, ohne dass die Genauigkeit der Skala über die der restlichen Bewertungsmethodik hinausgeht. Der absolute Wertebereich einer solchen Skala ist theoretisch frei wählbar. Weit verbreitete Alternativen sind die Verwendung des Bereiches von -3 bis $+3$, von 0 bis 6 oder von 1 bis 7 .

Naheliegender wäre die Verwendung der ersten Variante, mit welcher Beziehungen wie „ist besser als der Durchschnitt“ oder „ist schlechter als der Durchschnitt“ sehr gut zum Ausdruck gebracht werden können. Allerdings soll in dieser Arbeit der Fokus auf dem Grad einer Merkmalsausprägung liegen. Insofern ist eine Skala mit einheitlichem

Vorzeichen zu präferieren. Da es möglich sein soll, die Werte in vielfältiger Weise zu verarbeiten, ist die Skala von 1 bis 7 zu wählen. Eine Bewertung von 0 Punkten bei einem einzigen Merkmal würde bei Multiplikationen ein Produkt von Null ergeben und somit die Bewertungen in den anderen Kategorien obsolet werden lassen.

Die Übertragung der Erfüllung auf den konkreten Punktwert lässt sich am besten mit einer Wertfunktion vollziehen [DH94]. Der Verlauf derselben muss je nach Art des Kriteriums gewählt werden. Auch wenn hier prinzipiell beliebige Kurvenverläufe denkbar sind, so sind doch Funktionen geringer Ordnung, oftmals sogar lineare Funktionen, vorherrschend.

Durch die Wahl der Bewertungskriterien ist es nicht möglich, die Punktevergabe mit einem einheitlichen Schema durchzuführen. Stattdessen kommen zwei verschiedene Verfahren zur Anwendung: Die direkte Punktevergabe sowie die Generierung von Punkten über Wertfunktionen, also mathematischen Gleichungen.

Bei der direkten Punktevergabe, welche manuell zu erfolgen hat, ist darauf zu achten, die Punkte anhand streng objektiver Kriterien zu verteilen und keinesfalls persönliche, subjektive Ansichten zuzulassen. Dies gelingt dann, wenn die Kategorien und die Abstufungen zwischen diesen kriterienübergreifend klar definiert sind und nicht verändert werden.

Ein Bewertungskriterium, für welches die direkte Punktevergabe zu verwenden ist, ist beispielsweise die Fähigkeit einer individuellen Radansteuerung. Die minimale Merkmalsausprägung liegt vor, wenn die Möglichkeit einer individuellen Radansteuerung nicht gegeben ist. Hierfür ist folglich der minimale Wert, 1 Punkt, zu vergeben. Können alle vier Räder unabhängig voneinander angesteuert werden, sind 7 Punkte zu vergeben, die maximale Punktezahl. Dazwischen liegen die Varianten mit individueller Radansteuerung an der Vorderachse – 3 Punkte – und individueller Radansteuerung an der Hinterachse – 5 Punkte –, da ein Torque-Vectoring System an der Hinterachse größeren Einfluss auf die querdynamischen Fähigkeiten des Fahrzeugs aufweist.

Für die funktionale Punktevergabe sind Transformationsfunktionen erforderlich, welche die physikalische Realität auf den Punktebereich beziehen. Im einfachsten Fall existiert ein linearer Zusammenhang zwischen physikalischer Eigenschaft und dem Punktwert. Allerdings ist auch eine Sprungfunktion oder ein stark nichtlinearer Zusammenhang denkbar.

Die Verwendung einer Sprungfunktion ist beispielsweise bei der Betrachtung der Reichweite zielführend: Erbringt ein System die geforderte Mindestreichweite nicht, liegt eine Anforderungsverfehlung vor, welche zu einem Ausschluss aus der Bewertung führt. Eine nichtlineare Beziehung zwischen Bewertungsergebnis und Punktwert ist in Abbildung 3.2 schematisch dargestellt. Ein Beispiel für solch einen nichtlinearen Zusammenhang ist die Eignung von Radnabenantrieben. Die ins Rad integrierbare Leistung ist durch die Größe des Felgeninnenraums und die maximale spezifische Leistung einer

elektrischen Maschine limitiert. Nähert sich die zur Anforderungserfüllung erforderliche Leistung dieser Grenzleistung an, ist die Integration von Radnabenantrieben technisch sehr aufwändig, was zu einer Abwertung führen muss.

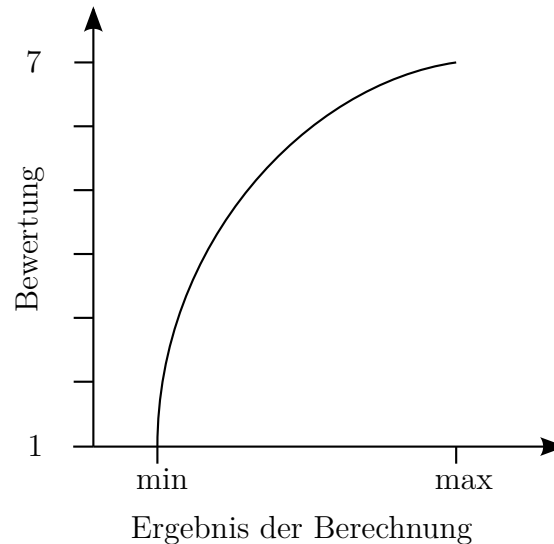


Abb. 3.2: Bewertung mittels nichtlinearer Transformationsfunktion

Das Ergebnis des „statisch“ durchgeführten vierten Schrittes ist eine Matrix, welche für Einzelachsanantriebe die Bewertungen aller Komponenten in denjenigen Kriterien beinhaltet, die von der konkreten Auslegung der Komponenten und den Interaktionen der Komponenten im System nicht maßgeblich betroffen sind. Diese, sich auf prinzipbedingte Eigenschaften beziehenden Kriterien sind:

- Einzelradsteuerung
- Fahrsicherheit
- Akustik
- Schleppmomente
- Zuverlässigkeit
- Überlastbarkeit
- Robustheit
- Flexibilität
- Spannungsqualität

Für einige wenige Punkte kann die Systembewertung aus den Beurteilungen der einzelnen Komponenten durch reine Addition bestimmt werden. Dennoch ist es unum-

gänglich, im Systemkontext einige Bewertungen anzupassen. So können beispielsweise die akustischen Eigenschaften der Komponenten nicht linear addiert werden. Vielmehr ist die Komponente mit den prägnantesten Schallemissionen im störenden hörbaren Frequenzband ausschlaggebend für die Gesamtbewertung. Ein weiteres Beispiel sind die Schleppmomente. Durch Einsatz einer Getriebetopologie mit integrierter Kupplung wirken sich die bei permanenterregten Maschinen unumgänglichen Schleppmomente nicht mehr auf die Abtriebsseite aus, was zu einer besseren Bewertung führt.

Die verbleibenden Elemente müssen „dynamisch“, mittels einer Simulation des konkret ausgelegten Antriebs bestimmt werden. Auch müssen alle Systeme mit Allradantrieb „dynamisch“ berechnet werden, da es denkbar ist, dass zwei unterschiedliche Achsantriebe eingesetzt werden, deren Systemverhalten sich im Zusammenspiel ändert. Dies ist in Schritt 6 beschrieben.

Da die Matrix der Komponentenbewertungen also nur eine eingeschränkte Aussagekraft besitzt, wird von einer Abbildung derselben abgesehen. Erst unter Berücksichtigung der Interaktionen im System kann ein valides Resultat bestimmt werden.

3.4.5 Gewichtung der Bewertungskriterien

Mit der Punktevergabe kann, wie gerade gezeigt, der Grad der Erfüllung eines Merkmals bestimmt werden. Die Bewertungskriterien sind aber von unterschiedlicher Relevanz für das Gesamtergebnis und müssen deswegen vor der Bewertung mit Gewichtungsfaktoren versehen werden. So wird es ermöglicht, eine Rangliste der Bewertungskriterien zu erstellen und somit essentiellen Kriterien mehr Bedeutung zukommen zu lassen als weniger relevanten.

Bei der Generierung der Gewichtungen ist ein objektives und transparentes Vorgehen obligatorisch, welches bei einer Wiederholung identische Resultate liefert. Eine naheliegende Art und Weise der Bestimmung der Gewichtungen wäre der paarweise Vergleich nach [Lin07]. Hier werden alle Kriterien jeweils paarweise gegenübergestellt und das jeweils Wichtigere bestimmt. Durch Aufsummierung der Einzelvergleiche und Normierung ergeben sich die Gewichtungen für alle Kriterien. Der Schwachpunkt dieses prinzipiell sinnvollen Vorgehens ist die Bestimmung des wichtigeren Kriteriums. Dieses ist oftmals nicht eindeutig bestimmbar. Gerade bei inhaltlich stark divergenten Kriterien ähnlicher Wertigkeit ergeben sich Zuordnungsprobleme.

In der Literatur wird oftmals versucht, diesem Problem mithilfe einer Expertenbefragung entgegenzuwirken [FS06]. Als Experten werden hierbei Personen bezeichnet, welche aufgrund ihres Berufes oder ihrer Ausbildung umfangreiche Kenntnisse zur Lösung der Problemstellung besitzen. Diese Definition ist allerdings vergleichsweise unscharf.

Es zeigt sich, dass die Auswahl der konsultierten Experten das Ergebnis maßgeblich beeinflusst, da auch die Expertenmeinungen wiederum stark divergieren. Auch ist die Anzahl echter Experten auf Gebieten, welche noch nicht dem Stand der Technik entsprechen, eingeschränkt. Somit wird von der Expertenbefragung Abstand genommen. Als zweckdienlicher wird angesehen, bei der Bewertung von Fahrzeugantrieben die Gewichtungen direkt an die Kundenbedürfnisse und somit an die Fahrzeugart zu koppeln. Ausgangspunkt ist hierbei, dass ein Produkt von solcherlei Gestalt zu sein hat, dass es beim Kunden auf maximale Akzeptanz stößt. Somit sind der Entwurf und der Aufbau eines Produktes so durchzuführen, dass es den Kundenbedürfnissen optimal entspricht. Aus diesem Grund kommt zur Unterstützung der Entscheidungsfindung bezüglich der Gewichtungvergabe das Kano-Modell nach Reinhard [RLH96] zum Einsatz. Es ermöglicht den Zusammenhang zwischen ausgewählten Produktmerkmalen und der Kundenzufriedenheit zu analysieren.

Zuerst werden alle vom Kunden wahrnehmbaren Merkmale der Topologien und Techniken gesammelt. Diese Merkmale werden nun in „Grundmerkmale“, „Leistungsmerkmale“ und „Begeisterungsmerkmale“ eingeteilt.

Grundmerkmale sind vom Kunden gefordert und müssen vorhanden sein. Je ausgeprägter ein Leistungsmerkmal ist, umso größer ist auch die Zufriedenheit des Kunden. Die aus Kundensicht begehrtesten Merkmale werden Begeisterungsmerkmale genannt. Mit dem Vorhandensein eines solchen Merkmales geht automatisch auch eine hohe Kundenzufriedenheit einher, die nochmals überproportional mit zunehmender Merkmalserfüllung ansteigt. Daraus lässt sich ableiten, dass Grundmerkmale unbedingt vorhanden sein müssen, Leistungsmerkmale jedoch nur soweit, dass Aufwand und Nutzen in einem günstigen Verhältnis zueinander stehen. Begeisterungsmerkmale sind optional und nur kurzfristig wirksam, haben aber eine große Wirkung.

Übertragen auf die Systembewertung lässt sich somit sagen, dass mit Begeisterungsmerkmalen verknüpfte Bewertungskriterien eine hohe Gewichtung, mit Leistungsmerkmalen verknüpfte Kriterien eine mittlere Gewichtung und Kriterien, die Grundmerkmale widerspiegeln, eine tendenziell niedrigere Gewichtung erhalten. Topologien und Techniken, welche die Grundmerkmale nicht besitzen, scheiden bereits in Schritt 2 aus der Bewertung aus.

Zielführend ist es, die Bewertungskriterien in eindeutig definierte Kategorien einzuordnen und darüber die Gewichtungen zu errechnen. Analog zur Punktevergabe der Bewertungskriterien werden auch hier sieben Kategorien, absteigend geordnet nach Wichtigkeit, definiert:

1. Das Bewertungskriterium ist abhängig von mindestens drei Anforderungen.
2. Das Bewertungskriterium ist abhängig von zwei Anforderungen.
3. Das Bewertungskriterium ist abhängig von einer Anforderung.
4. Das Bewertungskriterium ist nicht abhängig von den Anforderungen, aber elementar für die Gewährleistung der Sicherheit.
5. Das Bewertungskriterium führt zu einer ausgeprägteren Kaufabsicht des Kunden.
6. Das Bewertungskriterium kann das Interesse des Kunden am Fahrzeug steigern.
7. Das Bewertungskriterium ist für den Kunden nicht von direkter Bedeutung, die Antriebssysteme können durch dieses Kriterium allerdings eindeutig differenziert werden.

Aus dieser kriterienorientierten Gewichtungsbestimmung werden nun die Gewichtungsfaktoren (g_i) für alle Bewertungskriterien (b_i) bestimmt. Da sie, wie gerade erwähnt, mittels der Erwartungen der Kunden an das jeweils betrachtete Fahrzeug bestimmt werden, bietet es sich an, die Gewichtungen neben der reinen Anforderungserfüllung auch in Abhängigkeit der betrachteten Fahrzeugklasse zu bestimmen. Schließlich sind die Erwartungen des Kunden stark von der Fahrzeugklasse, welche sich durch Größe und Leistung des Fahrzeuges ergibt, bestimmt. So sind beispielsweise die Beschleunigungserwartungen an einen Klein- und einen Sportwagen stark differierend.

Da mit der Methodik Fahrzeuge unterschiedlicher Klassen bewertet werden sollen, wird eine zweidimensionale Ebene über Fahrzeuggröße und Antriebsleistung aufgespannt und vier Eckpunkte definiert, welche den kleinsten und schwächsten respektive den größten und stärksten Fahrzeugen im betrachteten Lösungsraum entsprechen. Für diese Eckpunkte wird jeweils die oben geschilderte Gewichtungsbestimmung durchgeführt. Es liegen nun für vier Eckpunkte die Gewichtungen für alle Kriterien vor (siehe Tabelle 3.2). In einem Bewertungsdurchlauf werden die konkreten Gewichtungen anhand von Fahrzeuggröße und Antriebsleistung des jeweils betrachteten Fahrzeuges durch Interpolation zwischen den Eckpunkten gewonnen. Mathematisch gesehen wird dazu die durch die 4 Eckpunkte begrenzte Fläche innerhalb der Ebene in ein unteres und ein oberes Dreieck zerlegt. Dies ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Mit X ist ein Beispielsystem markiert, dunkelgrau markiert ist das Dreieck, innerhalb dessen das betrachtete Fahrzeug liegt. Die Eckpunkte dieses Dreiecks dienen zur Generierung der konkreten Gewichtungsfaktoren. Dabei wird die Lage des Beispielfahrzeuges im Dreieck relativ zu den Eckpunkten bestimmt und eine vektorielle, lineare Interpolation durchgeführt. Den letzten Schritt stellt die Umrechnung aller Gewichtungsfaktoren auf einen Wert im Intervall $]0, 1[$ dar. Somit gilt für die normierte Summe aller Gewichtungsfaktoren: $\sum_i g_i = 1$.

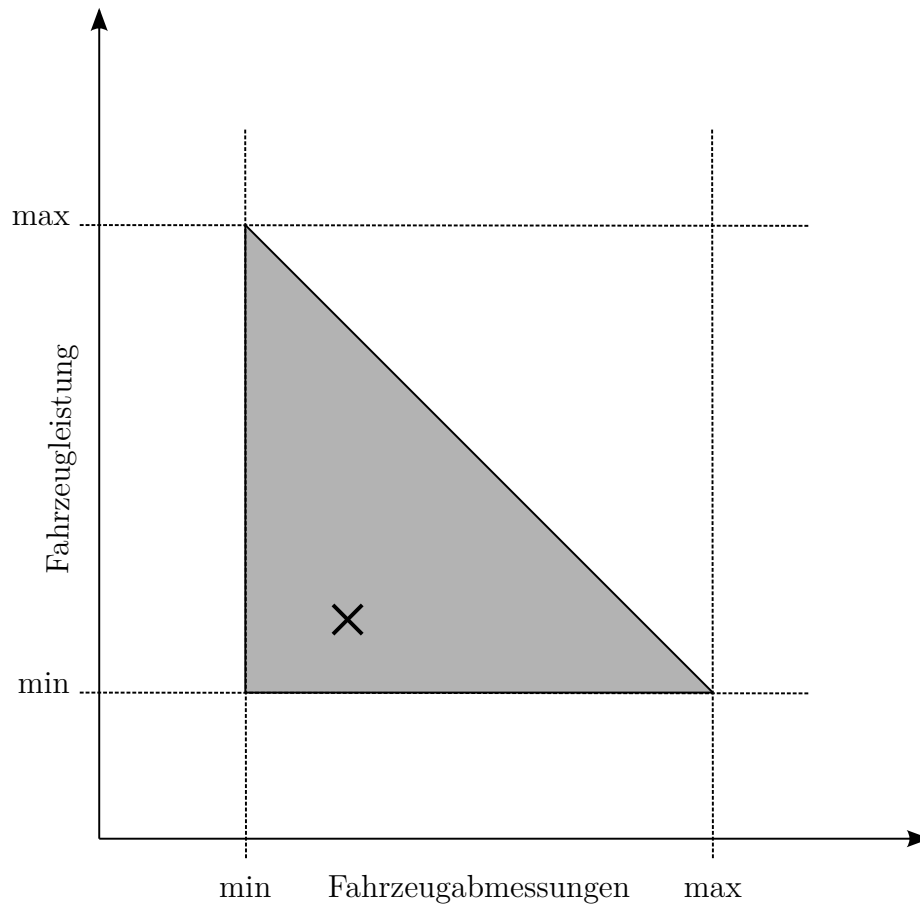


Abb. 3.3: Abhängigkeit der Gewichtungen von der Fahrzeugklasse

3.4.6 Durchführung einer gewichteten Punktbewertung

Nach der Punktevergabe für die Komponenten kann die gewichtete Punktbewertung auf Systemebene (siehe Abbildung 3.4) durchgeführt werden.

Dazu werden zunächst alle Systeme und die enthaltenen Komponenten den Anforderungen entsprechend ausgelegt. Aus den Fahrzeuganforderungen werden zuerst die Komponentenanforderungen und somit die erforderlichen Auslegungsgrößen wie Drehmoment, Leistung und Strom bestimmt. Daraus ergeben sich für jede Komponente Maße, Masse und Kosten. Dies ist im Systemkontext durchzuführen, da beispielsweise bei gegebener Fahrzeugleistung zwei elektrische Maschinen jeweils die halbe Leistung einer elektrischen Maschine erbringen müssen, zusammen aber schwerer sind als eine Maschine. Die Auslegung während des Bewertungsdurchlaufs greift hierbei auf „statisch“ erfolgte, im Anhang C beschriebene Auslegungen zu. Aus diesen bereits ausgelegten Basiskomponenten werden durch Skalierung die konkreten Daten ermittelt.

Tab. 3.2: Gewichtungseckpunkte

Kriterium	$m_{\min}, P_{\min}$	$m_{\min}, P_{\max}$	$m_{\max}, P_{\min}$	$m_{\max}, P_{\max}$
Kosten	1	1	2	3
Effizienz	2	3	1	2
Bauraum	2	3	2	3
Fahrleistung	3	2	2	1
Fahrsicherheit	4	4	4	4
Zuverlässigkeit	3	3	3	3
Überlastbarkeit	5	5	6	6
Akustik	5	5	5	5
Komplexität	5	5	6	6
Flexibilität	6	6	6	6
Schleppmomente	7	7	7	7
Einzelradsteuerung	7	5	7	5
Spannungsqualität	4	3	4	3
Nutzbarer Energieinhalt	2	3	1	2

Durch diesen Schritt können nun die Bewertungskriterien „Bauraum“ und „Kosten“ bestimmt werden. Im Falle des Kriteriums „Bauraum“ geschieht dies über hinterlegte mathematische Modelle, welche den Zusammenhang zwischen der relevanten Auslegungsgröße und dem dafür erforderlichen Volumen herstellen. Für die Evaluierung der Kosten ist ein aufwändigeres Verfahren, nachzulesen im Anhangskapitel A.2, zu wählen. Im Anschluss werden die berechneten Werte für Abmessungen und Kosten linear auf die einheitslose Skala, vorgestellt in Schritt 4, bezogen.

Mit dem nun bekannten Volumen des Antriebs kann das Antriebsgewicht und daraus das Fahrzeuggesamtgewicht berechnet werden. Dieses dient der Ermittlung der Fahrleistung und des Energieumsatzes. Bei der erstmaligen Ermittlung der benötigten Antriebsleistung aus den Fahrleistungsanforderungen sind Erfahrungswerte für die Komponentengewichte hinterlegt. Geprüft wird nun, ob die Fahrleistungsanforderungen auch mit dem Gesamtgewicht der ausgelegten Komponenten erfüllt werden können. Sollte dies nicht der Fall sein, wird iterativ eine neue Auslegung durchgeführt und die Erfüllung der Fahrleistung erneut simuliert.

Ist das Antriebsgewicht endgültig bestimmt, wird der Energieumsatz im Fahrzyklus betrachtet. Für diese Untersuchung wird die Durchfahrt eines definierten Zyklus, beispielsweise des weit verbreiteten FTP-72 Zyklus, simuliert. Benötigt werden hierfür Fahrzeugparameter wie Stirnfläche und Rollwiderstand, welche als Eingangsgrößen für die Bewertung bereits vorliegen. Die Masse des Antriebsstrangs wird für jede Topologie individuell ermittelt. Dabei werden sowohl die Anzahl und Art der Komponenten

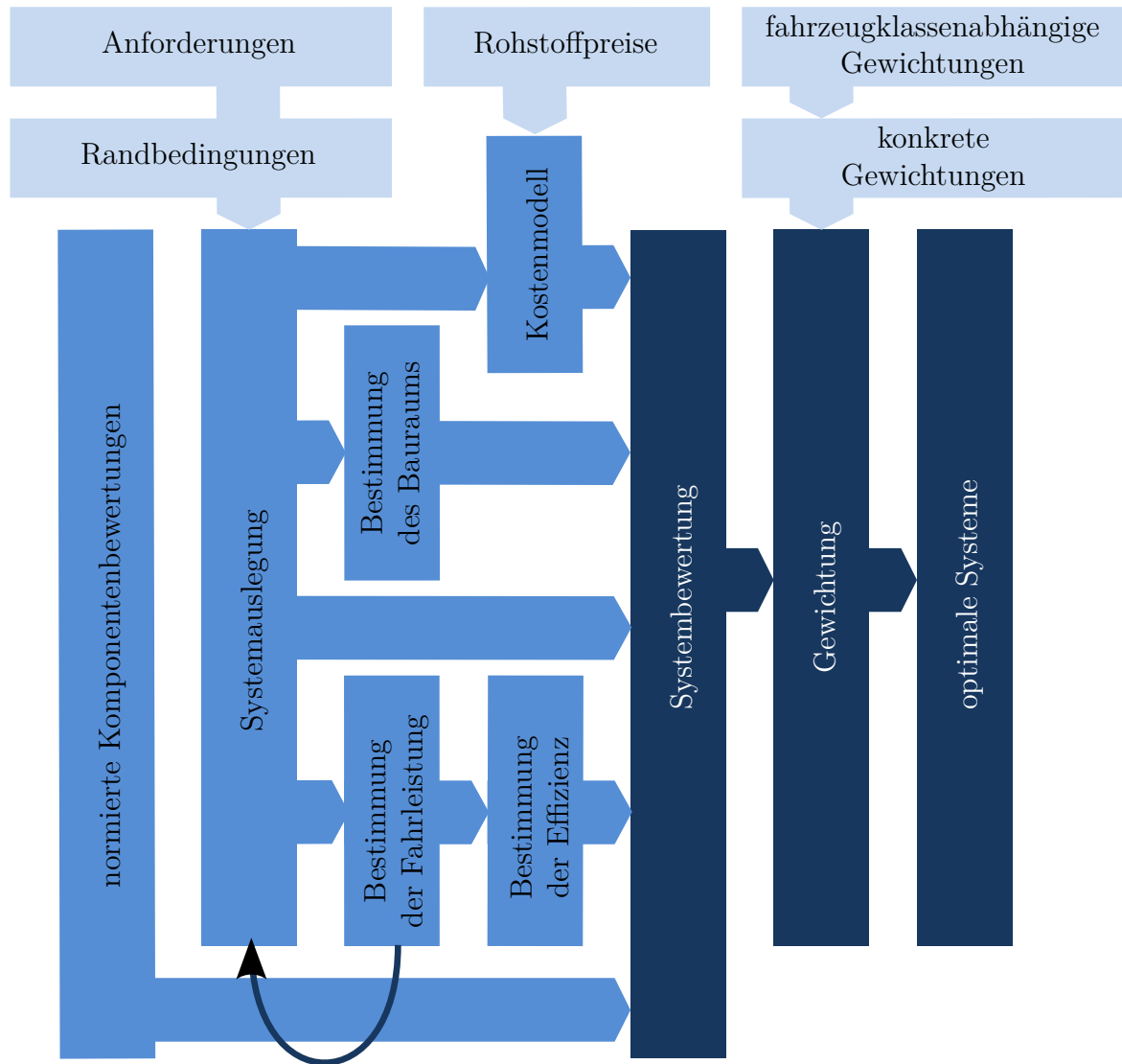


Abb. 3.4: Vorgehen bei der Durchführung der gewichteten Punktbewertung

und die sich daraus ergebende Dimensionierung als auch die Masse, welche sich durch Topologie-bedingte Zusätze wie Stirnradgetriebe oder Gelenkwellen ergibt, berücksichtigt.

Außerdem sind Aussagen über den Wirkungsgrad der Komponenten zu treffen. Anhand detaillierter Modelle statisch berechneter Wirkungsgradkennfelder für verschiedene Auslegungen werden für die konkrete Auslegung gültige Wirkungsgradkennfelder mittels Interpolation erzeugt. Zwar wäre die direkte Berechnung des Energieumsatzes aus den Modellen exakter, jedoch zu zeitintensiv für eine Bewertung einer hohen Anzahl an Systemen. Da das Resultat eine qualitativ ermittelte Rangliste der Systeme und kein absoluter Wert für den Energieumsatz sein soll, ist dieses Vorgehen zulässig.

Nachdem für alle Systeme der Energieumsatz im gewählten Zyklus ermittelt ist, werden, analog zu den Kriterien „Bauraum“ und „Kosten“, auch hier alle Ergebnisse auf die dimensionslose Skala überführt. Das System mit dem höchsten Energieumsatz bekommt die Einstufung 1, das System mit dem geringsten die Einstufung 7. Die dazwischenliegenden Einordnungen werden aus linearer Interpolation gewonnen.

Anzupassen ist weiterhin das Verhalten des Antriebs im Feldschwäcbereich - ein Unterpunkt des Bewertungskriteriums „Fahrleistung“. Wünschenswert hier ist ein möglichst großer Bereich konstanter Leistung. Dies kann entweder durch die Maschine oder ein mehrgängiges Getriebe gewährleistet werden. Das konkrete Verhalten ergibt sich aus der Kombination von Maschine mit Getriebe.

Auch die Bewertung der Notlaufeigenschaften ist abschließend noch zu betrachten, da sich diese zum einen aus dem Komponentenverhalten, zum anderen aber aus der Topologie ergeben. So ist es nicht nur interessant, welche Redundanzen in der Komponente selbst vorhanden sind, sondern auch wie viele unabhängige elektrische Maschinen und Wechselrichter in der betrachteten Topologie eingesetzt sind.

Die Bewertungen aller Systeme in allen Kriterien liegen nun vor. Der letzte Schritt besteht aus der Berechnung der Gesamtbewertung für jedes System und einer Sortierung der so gewonnenen Liste. Das System mit der höchsten Bewertung ist für den betrachteten Fall das Optimale.

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass sich aus den Punktzahlen keine quantitativen Beziehungen der Systeme untereinander ermitteln lassen, sondern nur die Reihenfolge der Systeme hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz im betrachteten Fahrzeug ausgewiesen werden kann.

Die besten Systeme für verschiedene Beispielfahrzeuge sind in Kapitel 6 dokumentiert.

3.4.7 Plausibilitätsanalyse und Sensitivitätsanalyse

Zur Erhöhung der Entscheidungssicherheit und zur kritischen Überprüfung des Ergebnisses bietet sich die Plausibilitätsanalyse nach Daenzer an [DH94].

Sie eignet sich für das Auffinden formaler Fehler bei Erstellung und Anwendung der Methodik.

Die Plausibilitätsanalyse besteht aus mehreren Schritten, in denen die Ergebnisse der Bewertung einzeln geprüft werden. Nach erfolgreicher Prüfung erfolgt der Abbruch der Analyse direkt nach dem gerade durchgeführten Schritt. Bis zu vier Schritte sind maximal möglich.

Schritt 1: Überprüfung auf formale Fehler bei der Durchführung der Bewertung

Schritt 2: Überprüfung der Vollständigkeit der berücksichtigten Merkmale

Schritt 3: Überprüfung der Modelle, auf denen die Bewertung basiert

Schritt 4: Überprüfung der Interpretation der Ergebnisse

Nach erfolgter Prüfung und fakultativer Beseitigung der Fehler sollte der Unterschied zwischen erwartetem und berechnetem Ergebnis verschwunden oder zumindest plausibilisierbar sein.

Allerdings darf die Bewertung nicht so lange angepasst werden, bis das berechnete Ergebnis dem subjektiv erwarteten Ergebnis entspricht.

In der Praxis ist eine umfangreiche Plausibilitätsanalyse nur einmal, nach Erstellung der Bewertung und erfolgter erster Bewertung, durchzuführen. Diese sollte alle Fehler in der Methodik aufdecken und eine stabile und gültige Methodik garantieren. Es ist dennoch zu empfehlen, auf jeden Bewertungsdurchgang eine kurze Plausibilitätsanalyse folgen zu lassen, da die manuelle Wahl der Eingangsparameter und die Eingabe der Fahrzeugdaten eine potentielle Fehlerquelle sind.

Als weitere Plausibilitätsangabe wird eine zusätzliche, an die Stochastik angelehnte Größe eingeführt, die Varianz. Varianz bezeichnet hier nicht die gesamte Abweichung aller Systembewertungen voneinander, sondern die summierte Abweichung der Bewertungen (b_i) in allen Kriterien (n_{Bewkrit}) eines Systems zum arithmetischen Mittelwert der jeweiligen Einzelbewertungen aller Systeme (μ_i). Diese Größe wird zur Abschätzung der „Stabilität“ eines Systems verwendet und kann die Entscheidungsfindung zusätzlich zum Ranking unterstützen. Ein kleiner Wert bedeutet, dass das betrachtete System in allen Kriterien nahe am jeweiligen Durchschnitt aller Systeme liegt, was auf ein stabiles, gängiges und risikoloses System hinweist, welches dem Stand der Technik entspricht und ohne Probleme industrialisierbar ist.

Schneidet ein System im Ranking gut ab, weist aber eine große Varianz auf, so deutet dies darauf hin, dass es in einigen Kriterien weit besser als der Durchschnitt ist, also große, diskrete Potentiale bietet. Allerdings ist dieses System auch in einigen Kriterien weit unterdurchschnittlich, wodurch es als risikobehaftet identifiziert werden kann. Solche Ergebnisse sind unabdingbar manuell zu prüfen. Bei diesen, im Regelfall vergleichsweise unkonventionellen Systemen, muss fallweise entschieden werden, ob die

Chancen so groß sind, dass der Aufwand zur Beherrschung des Risikos vertretbar ist. Die Varianz (var) berechnet sich gemäß Formel 3.1 zu:

$$var = \frac{1}{n_{\text{Bewkrit}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{Bewkrit}}} (b_i - \mu_i) \cdot g_i. \quad (3.1)$$

Die Plausibilitätsanalyse garantiert eine formal korrekte Ausführung der Bewertung. Es ist jedoch noch nicht sichergestellt, dass die Vergabe der Kennzahlen und Gewichtungen bei der Punktbewertung konsistent und objektiv ist.

Dies lässt sich mit der Sensitivitätsanalyse nach Lindemann [Lin07] überprüfen. Sie zeigt den Einfluss einer Veränderung der Kennzahlen und Gewichtungen auf und gibt Aufschluss darüber, welche Parameter sich am gravierendsten auf das Endergebnis auswirken beziehungsweise in welchem Maße das Ergebnis von den Unsicherheiten der Eingangsparameter abhängig ist [Har02].

Somit ist es möglich, Aussagen darüber zu treffen, wie empfindlich das Ergebnis auf eine Variation der Eingangsgrößen reagiert und zwischen welchen Grenzen die Bewertungskennzahlen und Gewichte der Eingangsgrößen liegen dürfen, so dass sich das Ergebnis nicht verändert.

Ziel eines stabilen Bewertungssystems ist es, nur relevante, sich nicht überdeckende Kriterien zu verwenden. Somit ist die Erwartung, dass jede hinreichend große Variation der Bewertungen respektive Gewichtungen in jeder Kategorie dazu führt, dass sich das Endergebnis verändert. Jedes Bewertungskriterium muss Einfluss auf das Ergebnis haben, keines darf das Ergebnis allein determinieren.

Diese Überprüfung ist nicht bei jedem Bewertungsdurchlauf erforderlich. Eine einmalige Überprüfung der Methodik für alle zu erwartenden Grenzfälle garantiert eine reibungslose Funktion. Die Betrachtung nicht nur eines Falles, sondern aller Grenzfälle wird nötig, da sich Bewertungen und Gewichtungen jeweils im Systemkontext individuell ergeben. Aufgrund der Vielzahl der zu verändernden Parameter scheidet eine Überprüfung „von Hand“ aus. Da die Bewertung auf Grund ihrer Komplexität ohnehin softwaregestützt erfolgt, bietet es sich an, auch die Parametervariation softwaregestützt durchzuführen. Dazu werden alle Bewertungen und alle Gewichtungen jeweils um einen definierten Prozentsatz – entsprechend den Unsicherheiten der einzelnen Werte – einzeln variiert und die Änderungen der Rangliste der Systeme überwacht. Es zeigt sich, dass das System hinreichend stabil gegen eine Parameterschwankung ist, ohne den Einfluss eines Parameters zu vernachlässigen. Die genaue Durchführung ist Abschnitt 6.2.3 zu entnehmen.

3.5 Automatisierte Bewertung

Bei der Wahl des Verfahrens zur Durchführung der Bewertung begegnet man ebenfalls den durch die Vielzahl der sich ergebenden Systeme bedingten faktischen Zwängen. So ist es zwar denkbar, alle Systembestandteile und auch alle Systeme komplett manuell zu bewerten, also von Hand für jedes System eine Punktzahl zu ermitteln. Dies ist auf Grund subjektiver Einflüsse jedoch fehleranfällig und führt auf Grund der hohen Anzahl von Systemen zu einem hohen Arbeitsaufwand. Wird für die Bewertung eines Systems die Zeit von fünf Minuten angesetzt, ergibt sich durch die Anzahl der Systeme von 12083 eine Gesamtzeit von über 1000 Stunden, was in etwa 125 Arbeitstagen entspricht. Diese Zeit ist für einen Durchlauf anzusetzen. Bei einer Änderung der Eingangsdaten muss von vorne begonnen werden. Eine Bewertung von Hand ist folglich kein sinnvoller Weg. Alle Nachteile dieses Verfahrens können mit einer computergestützten Bewertung eliminiert werden, weswegen diese Möglichkeit auch Anwendung findet. Die Vorteile dieser Lösung sind nachfolgend dargestellt:

- Verringerter Zeitbedarf
- Vergrößerte Objektivität
- Parametrisierbarkeit
- Modularisierbarkeit
- Überprüfbarkeit
- Automatisches Berücksichtigen von Interaktionen
- Energieumsatz im Zyklus berechenbar

Die Vorgehensweise bei der Implementierung der Methodik in eine Softwarelösung ist dem Anhangskapitel B zu entnehmen.

3.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird eine Methodik beschrieben, die in der frühen Phase des Produktentstehungsprozesses eine objektive Bewertung verschiedener Antriebssysteme für batterieelektrische Fahrzeuge ermöglicht. Dazu werden zuerst Eingangsparameter und Zielsetzung definiert. Im Anschluss wird die Methodik so entworfen, dass sie sich optimal für den Anwendungszweck eignet. Kern der Methodik ist eine gewichtete Punktbewertung. Das hohe Abstraktionsniveau dieser Methode ist erforderlich, um die unterschiedlichen Eigenschaften aller Systembestandteile vergleichen zu können. Nachdem nun die Theorie der Methodik bekannt ist, werden in den folgenden Kapiteln die betrachteten Topologien und Techniken vorgestellt und bewertet.

4 Antriebstopologien

Im vorhergehenden Kapitel wird eine Methodik vorgestellt, welche zur Bewertung elektrischer Traktionsantriebe geeignet ist. Nun ist zu klären, auf welche konkreten Umfänge sich die Bewertung erstreckt. Dazu werden in diesem Abschnitt Anzahl und Art der zu bewertenden Antriebe ermittelt.

An eine knappe Begriffsdefinition schließt sich die Synthese aller denkbaren Kombinationen aus elektrischen Maschinen, Getrieben, Wechselrichtern und Energiespeichern an. Der Lösungsraum spannt sich nun über eine so große Anzahl von Elementen auf, dass eine Reduktion der Anzahl an Alternativen unabdingbar ist. Die Beschreibung dieser Vorauswahl mittels konkreter Untersuchungen bildet den Abschluss des Kapitels.

4.1 Begriffsbestimmung

Der Begriff „Topologie“ leitet sich aus den griechischen Wörtern „topos“ – Ort – und „logos“ – Wort, Lehre – ab. Topologie ist also frei übersetzt die Lehre vom Ort, beziehungsweise die Kenntnis der Anordnung verschiedener Objekte.

In dieser Arbeit wird als Topologie die Art und Weise, auf die eine definierte Anzahl von elektrischen Maschinen, Getrieben, Wechselrichtern und Energiespeichern angeordnet und verschaltet ist, verstanden. Diese Systembestandteile werden übergreifend als Komponenten bezeichnet. Als System wird die Kombination der in diesem Kapitel beschriebenen Topologien mit den in Kapitel 5 präsentierten Techniken bezeichnet.

4.2 Aufspannen des Lösungsraumes

Der Lösungsraum umfasst alle Teil- und Gesamtlösungen für ein konkretes Problem. Diese Lösungen ergeben sich aus der Menge aller betrachteten Lösungselemente und den daraus resultierenden Kombinationen [PL11], [See05]. Der konkrete Lösungsraum, welcher Gegenstand der Betrachtungen ist, umfasst Antriebskomponenten, welche sich zu Antriebstopologien kombinieren lassen.

In diesem Kapitel wird, ausgehend von den elektrischen Maschinen, zuerst geklärt, wie viele der jeweiligen Komponenten maximal in einem Antriebsstrang Sinn ergeben. Im Anschluss daran wird die Anzahl der Komponenten auf der Grundlage konkret

durchgeführter Untersuchungen eingegrenzt.

Die Erweiterung des Lösungsraumes um konkrete Techniken ist in Kapitel 5 beschrieben. Vorausgesetzt wird dabei stets, dass der Antrieb in einem Personenkraftfahrzeug eingesetzt wird, welches über vier Räder verfügt.

Zur Sicherstellung der Einbeziehung aller Möglichkeiten ist die theoretisch denkbare Anzahl der elektrischen Maschinen (n_{EM}) zu Beginn als beliebig groß anzunehmen. Gleiches gilt für die maximal mögliche Anzahl aller Wechselrichter (n_{WR}). Diese muss nicht zwangsläufig mit n_{EM} korreliert sein, da es beispielsweise denkbar ist, von mehreren Wechselrichtern gespeiste Maschinen einzusetzen. Außerdem ist es bei Asynchronmaschinen möglich, mehrere dieser Maschinen über eine Sammelschiene durch einen gemeinsamen Wechselrichter zu speisen. Diese Lösung findet sich beispielsweise in Industrieanlagen oder im Schienenverkehr [Sch07].

Die Zahl der Energiespeicher (n_{ES}) wiederum ist per se nicht von n_{EM} oder n_{WR} abhängig, da einerseits mehrere Antriebe aus einem Energiespeicher versorgt werden können, andererseits auch die Verwendung mehrerer Energiespeicher in einem Antrieb technisch realisierbar ist.

Verbleibt noch die Frage der möglichen Anzahl von Getrieben (n_{GE}). Es ist keine Applikation in Fahrzeugen bekannt, welche zur Bereitstellung verschiedener Übersetzungen mehrere unabhängige und verschiedenartige Getriebe für eine Antriebsmaschine beinhaltet. Sinnvollerweise wird die Änderung der Getriebeübersetzung stattdessen durch mehrere Gänge, integriert in einem Getriebe, gelöst. Somit ist n_{GE} stets kleinergleich n_{EM} . Bei Einsatz eines Direktantriebes, also einer direkt mit der Achse/dem Rad verbundenen elektrischen Maschine, gilt $n_{GE} = 0$.

Damit können nun im ersten Schritt die unteren Grenzen der Komponentenzahlen formuliert werden:

- Elektrische Maschine: $1 \leq n_{EM}$
- Getriebe: $0 \leq n_{GE}$
- Wechselrichter: $1 \leq n_{WR}$
- Energiespeicher: $1 \leq n_{ES}$

4.3 Eingrenzung des Lösungsraums

Diese allgemeingültigen, theoretischen Überlegungen aus dem vorhergehenden Abschnitt werden nun im zweiten Schritt durch konkrete Voruntersuchungen erweitert, wodurch sich obere Grenzen der Komponentenzahlen ergeben. Dies ist erforderlich, um den Lösungsraum auf eine sinnvolle Größe zu reduzieren.

4.3.1 Antriebsart

Zu Beginn werden alle Möglichkeiten ermittelt, vier Räder anzutreiben. Dazu werden zuerst die verschiedenen Achsantriebsarten betrachtet. Diese Varianten (siehe Abbildung 4.1) sind der Zentral-, der Tandem- sowie der Radnabenantrieb. Jede dieser drei Antriebsarten kann als Front- oder als Heckantrieb ausgeprägt sein. Daraus resultieren folglich sechs Topologien. Durch Kombination dieser Einzelachsenantriebe ergeben sich

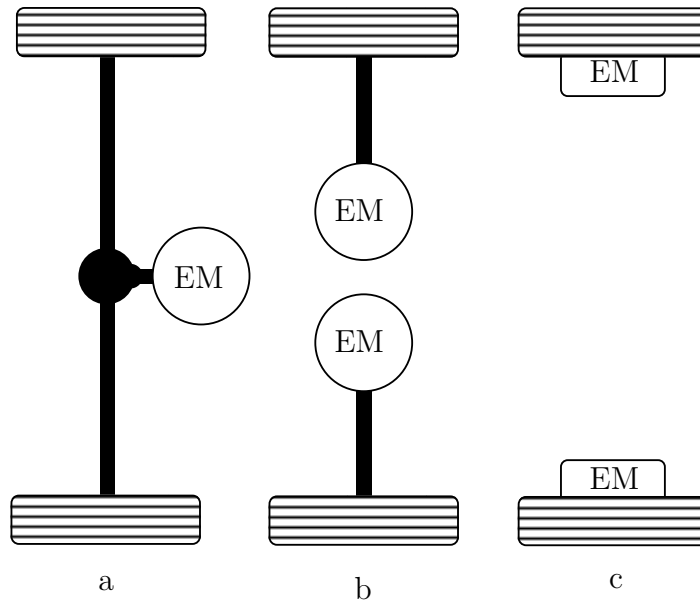


Abb. 4.1: Prinzipielle Möglichkeiten der Anbindung der elektrischen Maschinen an die Räder einer Achse. a) Zentralantrieb (C), b) Radnaher Antrieb (H), c) Radnabenantrieb (T)

$3^2 = 9$ unterschiedliche Allradantriebe, die in Tabelle 4.1 zusammengefasst sind. Neben diesen neun Allradtopologien ist noch eine weitere denkbar, die sich nicht durch Kombination bilden lässt. Es handelt sich um den Antrieb aller vier Räder mit einer elektrischen Maschine und Verteilergetriebe.

Insgesamt existieren folglich $n_{\text{heck}} + n_{\text{front}} + n_{\text{allrad,kombiniert}} + n_{\text{allrad}} = 3 + 3 + 9 + 1 = 16$ Möglichkeiten zwei oder vier Räder anzutreiben. Nachfolgend wird darauf eingegangen, wie viele Komponenten für diese Antriebsarten mindestens und maximal erforderlich sind und sinnvoll sind.

4.3.2 Elektrische Maschinen

Wie bereits erwähnt, ist die Anzahl der elektrischen Maschinen nicht per se begrenzt. Der Einsatz von mehr als vier elektrischen Maschinen ($n_{\text{EM}} > 4$) führt zu mechanisch

Tab. 4.1: Mögliche Allradantriebe mit zwei bis vier EM

VA	HA
2 EM	
C	C
3 EM	
C	T
	H
T	
H	C
4 EM	
T	T
	H
H	T
	H

gekoppelten elektrischen Maschinen an einem Rad oder einer Achse. Zur Evaluierung der Vor- und Nachteile dieses Szenarios und zur Abdeckung des Lösungsraumes für $n_{EM} > 4$ ist somit das Verhalten mechanisch starr gekoppelter elektrischer Maschinen zu untersuchen.

Interessant ist hierbei insbesondere der direkte Vergleich zweier starr gekoppelter Maschinen mit einer Maschine gleichen Drehmoments. Aus dieser Untersuchung lassen sich die zur Beurteilung der Eignung von Topologien mit $n_{EM} > 4$ notwendigen Erkenntnisse ableiten.

Vorüberlegungen:

Da sich durch eine größere Stückzahl geringere Fertigungskosten pro Stück ergeben, ist davon auszugehen, dass die beiden gekoppelten Maschinen identisch sind. Darüber hinaus wird die Annahme getroffen, dass sich die betrachteten Maschinen nur hinsichtlich ihrer aktiven Länge unterscheiden. Dieses Vorgehen ist aus Herstellersicht sinnvoll, da hierdurch der Blechschnitt unberührt bleibt und somit mit geringem Aufwand ein „Baukasten“ verschieden dimensionierter elektrischer Maschinen geschaffen werden kann. Anhand folgender Punkte werden die Auswirkungen einer Halbierung der aktiven Länge untersucht:

- Masse
- Volumen
- Kosten
- Wirkungsgrad
- Ausfallsicherheit
- Dynamik
- Rückwirkungen auf das Antriebssystem, insbesondere Wechselrichter und Getriebe

Die Resultate sollen an dieser Stelle zusammengefasst werden.

Alle mit 1 indizierten Größen beziehen sich dabei auf die Ausgangsmaschine, alle mit 2 indizierten Größen sind auf die Maschine mit halber aktiver Länge bezogen.

Bekanntermaßen ist das Drehmoment (M) einer elektrischen Maschine proportional zur aktiven Länge (l_i). Dadurch ist bei halber aktiver Länge das Maximalmoment, trotz identischer Stromaufnahme, halbiert. Es gilt im Ankerstellbereich:

$$l_{i,2} = \frac{l_{i,1}}{2}, \quad (4.1)$$

$$M_2 = \frac{M_1}{2}, \quad (4.2)$$

$$\phi_2 = \frac{\phi_1}{2}, \quad (4.3)$$

$$U_{\text{ind},2}(n) \propto w_2 n \phi_2 = w_2 n \frac{\phi_1}{2} = \frac{U_{\text{ind},1}(n)}{2}. \quad (4.4)$$

Dadurch gilt für die Eckdrehzahl:

$$n_{\text{eck},2} = 2 \cdot n_{\text{eck},1}. \quad (4.5)$$

Dies ermöglicht die Betrachtung der Wirkleistung:

$$P_{\text{max},2} = 2\pi M_2 n_{\text{eck},2} = 2\pi \frac{M_1}{2} 2n_{\text{eck},1} = P_{\text{max},1}. \quad (4.6)$$

Masse:

Die Masse der beiden aktiven Teile der halbierten Maschinen ist identisch mit der Masse des aktiven Teils der Ursprungsmaschine. Die Gesamtmasse der Lager, Lagerschilde und Wickelköpfe verdoppelt sich jedoch, da sich auch deren Anzahl verdoppelt. Somit sind zwei Maschinen immer schwerer als eine Maschine gleichen Drehmoments.

Bei einer Größenänderung sind Rotor, Stator, Welle und Gehäuse zu skalieren. Nicht alle Teile liegen zur Gänze innerhalb der aktiven Länge und sind somit nicht komplett skalierbar. Die Betrachtungen werden anhand real eingesetzter Maschinen, welche sich wie typische Vertreter ihrer Art verhalten, vollzogen. Bei den betrachteten Maschinen beträgt das Verhältnis der skalierbaren Massen zur Gesamtmasse etwa 75 %. Bei einer Halbierung von l_i ergibt sich dadurch:

$$m_2 = 0,63 \cdot m_1. \quad (4.7)$$

Volumen:

Analog zur Masse verhält sich das Volumen. Das Volumen des aktiven Teils bleibt bei zwei halbierten Maschinen konstant, jedoch erhöht sich das Gesamtvolumen um die zusätzlich nötigen Wickelköpfe, Lager und Lagerschilde. Insgesamt besitzen zwei halbierte Maschinen etwa 125 % des Volumens einer Maschine gleichen Moments. Somit gilt:

$$V_2 = 0,63 \cdot V_1. \quad (4.8)$$

Kosten:

Die Kosten erfordern eine differenziertere Betrachtung.

Es ist zum einen zu ermitteln, wie sich die Halbierung des aktiven Teils auswirkt, zum anderen, welchen Einfluss die erhöhte Stückzahl hat.

Die Fertigungskosten verhalten sich unterproportional zur Stückzahl [EKL05]. Da bei Einsatz zweier identischer Maschinen die Stückzahl doppelt so hoch ist, sinken die Fertigungskosten pro Stück. Wie im Anhangskapitel A.2 gezeigt wird, sind allerdings nur etwa 30 % der Kosten einer elektrischen Traktionsmaschine Fertigungskosten. Die von der Maschinenmasse abhängigen Anteile der Fertigungskosten sind dabei marginal. Auch die stückzahlabhängigen Anteile der Fertigungskosten sind gering. Aus diesen Gründen und in Anbetracht der für diese Betrachtungen erforderlichen Genauigkeit ist eine Aussage, welche sich rein auf die Materialeinzelkosten stützt, zulässig.

Mit dem Kostenmodell aus Abschnitt A.2 lässt sich zeigen, dass beispielsweise bei permanenterregten Maschinen die Materialeinzelkosten um etwa 40 % abnehmen, wenn die Maschine halbiert wird. Durch die hohe Volatilität der Rohstoffpreise der Seltenen Erden ist diese Aussage nur zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit gültig und muss bei zukünftigen Betrachtungen neu geklärt werden.

Stromerregte Maschinen benötigen keine kostenintensiven Magnete, im Falle der Fremderregten Synchronmaschine aber ein Erregersystem. Die Kosten für dieses Bauteil sind weitgehend unabhängig von der Maschinenlänge. Somit sind bei diesen Maschinen die skalierbaren Materialkostenanteile deutlich geringer. Hier ergibt sich eine Einsparung von etwa 20 bis 25 %.

Gleichung 4.9 fasst die gewonnenen Erkenntnisse zusammen.

$$MEK_2 = 0,6 \dots 0,8 \cdot MEK_1 \quad (4.9)$$

Wirkungsgrad:

Interessant ist die Betrachtung des Wirkungsgrads. Aus der Literatur ist bekannt, dass bei gleichzeitiger Verkleinerung einer elektrischen Maschine in allen drei Raumachsen der Wirkungsgrad abnimmt [MP09], bei rein axialer Skalierung jedoch theoretisch konstant bleibt. Diese Aussagen sind allerdings nur für den aktiven Teil der Maschine gültig. Betrachtet man die komplette Maschine, so verringert sich bei einer Verkürzung der Maschine das Verhältnis der Kupfermenge im aktiven Teil zur gesamten in der Maschine vorhandenen Kupfermenge. Dies führt zu einer Erhöhung der spezifischen Kupferverluste und somit zu einem verringerten Wirkungsgrad gegenüber der Ausgangsmaschine. Entfallen in einer typisch ausgelegten Drehstrommaschine mit verteilter Wicklung etwa 40 % der eingesetzten Kupfermenge auf die Wickelköpfe, so sind es in einer davon abgeleiteten, halbierten Maschine etwa 60 %.

Daraus resultiert in der betrachteten Leistungsklasse eine Wirkungsgradverminderung von durchschnittlich einem Prozentpunkt über das gesamte Wirkungsgradkennfeld. Dieser mit einem analytischen Simulationsprogramm berechnete Wert wird mittels einer empirischen Datenerhebung verifiziert. Betrachtet werden rein axial skalierte elektrische Maschinen verschiedenen Typs, welche allesamt in der für Straßenfahrzeuge relevanten Leistungsklasse liegen. Bei Halbierung der aktiven Länge zeigt sich, abhängig von der Kühlungsart, eine Nennwirkungsgradminderung von einem bis zwei Prozentpunkten. Dies bestätigt das Simulationsergebnis.

Der Verminderung des Nennwirkungsgrades steht gegenüber, dass bei Einsatz einer elektrischen Maschine als Traktionsantrieb nicht der Nennwirkungsgrad, sondern der Energieumsatz im Fahrzyklus entscheidend ist, welcher maßgeblich von der Form des Wirkungsgradkennfeldes abhängt. Aus diesem Grund ist die Lage der Punkte größten Energieumsatzes typischer Fahrzyklen im Wirkungsgradkennfeld vor und nach der Skalierung zu prüfen.

Bei Hybridantrieben existiert der Betriebsmodus der Lastpunktanhebung. In diesem Modus wird der Verbrennungsmotor durch ein von der elektrischen Maschine generatorisch erzeugtes Gegenmoment in einem Bereich höheren Wirkungsgrades betrieben. Ein vergleichbares Szenario ist bei batterieelektrischen Fahrzeugen vorstellbar. Voraussetzung ist die Verwendung von zwei elektrischen Maschinen, von denen eine mit einer Kupplung abgekoppelt werden kann. Ist dies der Fall, so ist es denkbar, in Betriebspunkten hohen Energieumsatzes eine Maschine abzukoppeln, so dass die verbleibende Maschine doppeltes Moment liefert. Dies ist dann sinnvoll, wenn der neue Betriebspunkt der Maschine in einem Bereich höheren Wirkungsgrades zu liegen kommt. Die Lage der Punkte größten Energieumsatzes kann mittels der Fahrzeugparameter und der Kenntnis des Zyklus softwaregestützt erfolgen. Dies wird im Anhangskapitel B erläutert und durchgeführt.

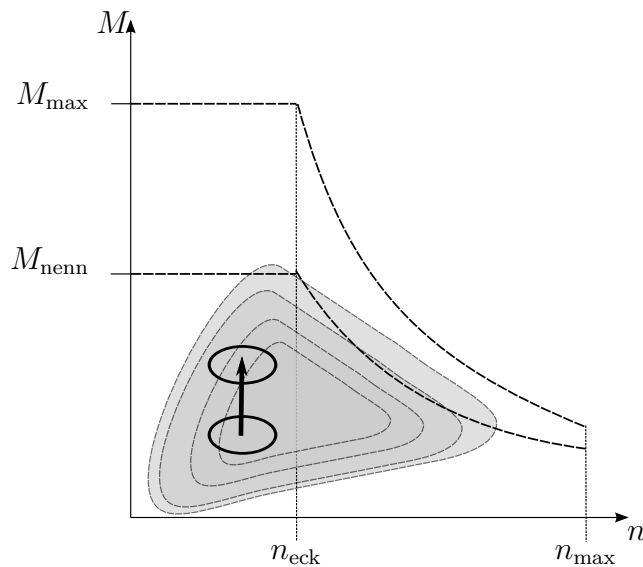


Abb. 4.2: Lage der Bereiche höchsten Energieumsatzes im FTP-72 Zyklus bei Verdoppelung des Drehmoments für ein Fahrzeug der Kompaktklasse

Aus einem Vergleich der Punkte größten Energieumsatzes relevanter Fahrzyklen für batterieelektrische Fahrzeuge mit Wirkungsgradkennfeldern diverser elektrischer Maschinen ergibt sich bei keinem Maschinentyp eine Verbesserung. Dies wird am Beispiel des typischen FTP-72 Zyklus in Abbildung 4.2 deutlich. Die untere Ellipse zeigt den Bereich größten Energieumsatzes für ein Fahrzeug der Kompaktklasse mit Zentralantrieb. Abgeleitet ist dies aus Abbildung B.1. Grau dargestellt, ist schematisch ein Wirkungsgradkennfeld einer typisch ausgelegten Synchronmaschine. Der Bereich höchsten Wirkungsgrades befindet sich in der Mitte der annähernd konzentrischen Linien. Da diese Maschine gezielt für den Einsatz in einem batterieelektrischen Stadtfahrzeug entworfen ist, stimmt der Bereich besten Wirkungsgrades mit dem Bereich des größten Energieumsatzes gut überein.

Durch die Verdopplung des Lastmoments verschieben sich die Punkte größten Energiebedarfes aus dem Wirkungsgradoptimum hinaus. Dies ist analog auch bei Asynchronmaschinen und anderen Fahrzyklen zu beobachten.

Der Grund dafür ist, dass eine elektrische Traktionsmaschine im Idealfall so ausgelegt ist, dass ihr Wirkungsgradoptimum bereits mit dem Energiebedarfsmaximum des Auslegungszyklus korreliert. Somit ist die angestrebte Senkung des Energieumsatzes durch Lastpunktanhebung bei dem Anwendungszweck entsprechend ausgelegten Maschinen nicht erreichbar. Vorteile ergeben sich lediglich bei unpassend ausgelegten Maschinen.

Für den Nennwirkungsgrad gilt bei Halbierung der aktiven Länge:

$$\eta_{2,\text{nenn}} = 0,99 \cdot \eta_{1,\text{nenn}}. \quad (4.10)$$

Ausfallsicherheit:

Auch bei der Betrachtung der Ausfallsicherheit ergibt sich ein differenziertes Bild. Sie wird durch Einsatz zweier Maschinen dahingehend verbessert, dass bei Maschinenfehlern, die nicht zu ungewollten Bremsmomenten oder anderen sicherheitskritischen Zuständen führen, die intakte Maschine weiterhin die Traktionsaufgabe ausführen kann. Jedoch resultieren die meisten Fehler in Betriebszuständen, in denen ein Drehen der Maschine nicht mehr zulässig oder möglich ist. Eine Weiterfahrt bei einer blockierten Maschine lässt sich zwar mit einer aufwändigeren Konstruktion und dem Einsatz von Trennkupplungen realisieren, jedoch ist dieser Ansatz bezüglich Volumen, Masse und Kosten nicht praktikabel. Dies kann mit dem Aufwand, verursacht durch die Kupplungen und deren Aktuatorik, begründet werden. Darüber hinaus erhöht sich die Ausfallwahrscheinlichkeit des Systems bei einer vergrößerten Komponentenanzahl. Somit ist der Einsatz zweier gekoppelter Maschinen für die Erhöhung der Ausfallsicherheit nicht zielführend.

Dynamik:

Als Dynamik der Maschine werden hier die Zeiträume bezeichnet, welche für den Auf- und Abbau von Drehmoment und Drehzahl benötigt werden.

Maßgebliche Größen sind das Drehmoment (M), die Ankerzeitkonstante (τ_a) sowie das rotatorische Trägheitsmoment (J_{rot}).

Nach Müller [MVP08] lässt sich die Ankerzeitkonstante (τ_a) nach folgender Gleichung ermitteln:

$$\tau_a = \frac{2L_d''L_q''}{R_a(L_d'' + L_q'')} \approx \frac{L_d'' + L_q''}{2R_a}. \quad (4.11)$$

Ein Anhaltswert aus der Praxis ist für Traktionsmaschinen etwa 0,1 s.

Die in der Gleichung vorkommende Induktivität in d-Richtung (L_d) ist ein Maß für die Geschwindigkeit des Flussauf- und -abbaus in der Maschine. Sie ist direkt proportional

zur Länge des aktiven Teils (l_i). Somit ergibt sich für eine halbierte Maschine auch eine halbierte Induktivität L_d . Auch die Induktivität in der q-Achse (L_q) verhält sich direkt proportional der aktiven Länge. Der ohmsche Wicklungswiderstand (R_a) hängt wegen $R_a(l_i) = R_{\text{Nüt}}(l_i) + R_{\text{Wickelkopf}}$ unterproportional mit l_i zusammen.

Für die Ankerzeitkonstante der halbierten Maschine ergibt sich:

$$\tau_{a,2} = 0,67 \cdot \tau_{a,1}. \quad (4.12)$$

Dies bedeutet, dass die halbierte Maschine zum Aufbau von 50 % des Moments der Ausgangsmaschine 67 % der ursprünglichen Zeit benötigt. Die Dynamik sinkt.

Nähert man den Rotor der elektrischen Maschine als Vollzylinder mit dem Radius (r) an, so gilt nach Demtröder [Dem08] für das rotatorische Trägheitsmoment (J_{rot}):

$$J_{\text{rot}} = \frac{1}{2} m_{\text{Rotor}} \cdot r^2. \quad (4.13)$$

Die rotierenden Massen in einer Maschine sind der Rotor, Teile der Lager sowie die Welle. Bei einer Halbierung von l_i verringern sich, je nach Konstruktion der Maschine, die rotierenden Massen um etwa 47 %. Es gilt folglich:

$$J_{\text{rot},2} = 0,53 \cdot J_{\text{rot},1}. \quad (4.14)$$

Die zwei Maschinen halber aktiver Länge besitzen folglich eine größere Trägheit als die Ausgangsmaschine. Der Antrieb büßt somit an Dynamik ein.

Für den Einsatz in einem Straßenfahrzeug ist dies allerdings von untergeordneter Bedeutung. Der Momentaufbau elektrischer Maschinen erfolgt in so kurzer Zeit, dass er unterhalb der Komfortgrenze der Fahrzeuginsassen liegt. Es sind ungefähr 0,2 s als Zeitspanne zwischen Betätigung des Fahrpedals und Beginn des Momentaufbaus anzusetzen, so dass der Fahrer keinen Ruck wahrnimmt. Diese Zeit wird von jeder untersuchten Maschinenart unterschritten.

Rückwirkungen auf das Antriebssystem:

Als letzter Aspekt werden die Rückwirkungen auf die weiteren Bestandteile des Antriebssystems – Energiespeicher, Wechselrichter und Getriebe – betrachtet.

Aufgrund der oben nachgewiesenen Nachteile hinsichtlich Wirkungsgrad und Masse ist der nutzbare Energieinhalt des Energiespeichers bei Verwendung zweier gekoppelter Maschinen höher auszulegen. Dies bedingt einen größeren, schwereren und teureren Speicher. Simulationen ergeben hier eine durchschnittlich notwendige Erhöhung des nutzbaren Energieinhalts von etwa 2 %.

Die allgemeine Fragestellung, wie viele Wechselrichter (n_{WR}) zum Betrieb von n_{EM} elektrischen Maschinen benötigt werden, wird im Abschnitt 4.3.4 erläutert. An dieser

Stelle wird nur der Spezialfall der gekoppelten Maschinen untersucht.

Da bei mechanisch starr gekoppelten Maschinen die Lage der beiden Rotoren zueinander stets identisch ist, können beide Maschinen mit identischen Strömen gespeist werden, so dass ein Wechselrichter ausreichend ist. Jedoch gilt $I_2 = I_1$, was bei Einsatz zweier Maschinen dazu führt, dass der Wechselrichter nun die doppelte Stromstärke bereitstellen muss, was einen größeren, schwereren und teureren Wechselrichter bedingt.

Aus Sicht des Getriebes ist es unerheblich, aus welchen Quellen das Drehmoment am eingangsseitigen Flansch stammt. Somit ergeben sich keine Auswirkungen auf das Getriebe.

Fazit:

Wie aus den obigen Punkten hervorgeht, können Topologien mit mechanisch starr gekoppelten Maschinen die in sie gesetzten Erwartungen bezüglich Nutzungsgrad-optimierung nicht erfüllen. Es ergeben sich bei der gesamthaften Betrachtung aller relevanten Kategorien Nachteile gegenüber einer Topologie mit nicht gekoppelten elektrischen Maschinen. Somit werden Topologien mit mechanisch gekoppelten Maschinen nicht weiter verfolgt.

Dadurch ergibt sich eine Obergrenze für die Anzahl von elektrischen Maschinen im Antriebsstrang batterieelektrischer Straßenfahrzeuge: Maximal eine Maschine pro Rad ist sinnvoll. Somit kann abschließend festgehalten werden: $1 \leq n_{EM} \leq 4$.

4.3.3 Getriebe

Auch für das Getriebe wird an dieser Stelle die Frage nach der sinnvollen Anzahl geklärt. Die Fragestellung, welche Getriebeart die beste Eignung aufweist, wird hingegen in Kapitel 5.2 beantwortet.

Die Variante $n_{GE} > n_{EM}$ kann schnell ausgeschlossen werden. Es ist kein Anwendungsgebiet im Kraftfahrzeug vorhanden, bei dem es sinnvoll ist, mehrere Getriebe wechselweise an eine elektrische Maschine zu koppeln.

Umgekehrt erscheint es auch nicht sinnvoll, mehrere elektrische Maschinen an dieselbe Eingangswelle eines Getriebes anzuflanschen. Dies entspricht wieder mechanisch gekoppelten Maschinen, welche im vorhergehenden Abschnitt von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden.

Somit ergibt sich, dass für die Anzahl an Getrieben im Regelfall $n_{GE} = n_{EM}$ gilt. Die einzige Ausnahme stellen Direktantriebe dar. Hier wird die elektrische Maschine ohne Untersetzung direkt mit der Achse verbunden.

4.3.4 Wechselrichter

Drei Fälle sind bei der Anzahl der Wechselrichter denkbar:

- $n_{WR} < n_{EM}$: Mehrere elektrische Maschinen sind an einen Wechselrichter angeschlossen.

Dieser Fall ist bei Industrieantrieben anzutreffen, bei welchen mehrere elektrische Maschinen über eine Sammelschiene gespeist werden. Kennzeichen dieser Variante ist, dass eine unabhängige Regelung nicht möglich ist. Alle Maschinen verhalten sich demnach identisch. Dies ist insbesondere bei der Verwendung von Synchronmaschinen problematisch, da bei diesen Maschinen nicht die Drehzahl, sondern die Rotorlage geregelt wird. Alle von einem Wechselrichter versorgten Maschinen müssten folglich stets dieselbe Rotorlage haben, was, außer mit einer mechanischen Kopplung, nicht darstellbar ist. Auch bei Asynchronmaschinen birgt diese Topologie Nachteile, da der große Vorteil mehrerer Maschinen – die unabhängige Regelung und so beispielsweise aktives Torque Vectoring – nicht mehr möglich ist. Somit wird dieses Szenario im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

- $n_{WR} > n_{EM}$: Eine elektrische Maschine wird von mindestens zwei separaten Wechselrichtern gespeist.

Dieser Fall ist von Maschinen hoher Leistung bekannt und darf nicht mit doppelt-gespeisten Maschinen verwechselt werden, bei denen Rotor und Stator getrennt gespeist werden.

Vorteilhaft bei der Speisung durch mehrere Wechselrichter ist die Ermöglichung eines Notbetriebes bei Ausfall eines Wechselrichters.

Nachteilig wirkt sich, insbesondere beim Einsatz in einem Straßenfahrzeug, der wesentlich größere Bauraumbedarf zweier Wechselrichter im Vergleich zu einem Wechselrichter gleicher Ausgangsleistung aus. Darüber hinaus sind die getrennten Wechselrichter schwerer und, wie in Abschnitt A.2 gezeigt wird, beinahe doppelt so teuer. Außerdem ist die Wicklungsdimensionierung und -fertigung der elektrischen Maschine durch die Aufteilung in mindestens zwei getrennte Wicklungssysteme ungleich aufwändiger. Da in einem batterieelektrischen Fahrzeug gerade das knappe Platzangebot und niedrige Kosten mit die größte Rolle bei der Entscheidung für einen Antrieb spielen, ist vom Einsatz mehrfach gespeister Maschinen abzusehen.

- $n_{WR} = n_{EM}$: Es verbleibt das Szenario, in welchem dieselbe Anzahl Wechselrichter und Maschinen verbaut werden. Dies ist zugleich die einzige praktikable und zielführende Lösung.

4.3.5 Energiespeicher

Die Frage nach der sinnvollen Anzahl an Energiespeichern (n_{ES}) muss hinsichtlich zweier Aspekte beantwortet werden. Zum einen ist zu klären, wie viele Speicher im Verhältnis zu n_{WR} respektive n_{EM} sinnvoll sind, zum anderen ist zu untersuchen, wie diese funktionell getrennten Speicher geometrisch angeordnet werden können.

Der optimale Einbauort im Fahrzeug lässt sich mit vergleichsweise geringem Aufwand ermitteln. Kritischstes und maßgebliches Kriterium hierbei ist die Crashesicherheit: Der Einbauort ist so zu wählen, dass alle Speicherzellen bei einem Unfall vor Deformation vollständig geschützt sind. Sowohl bei Heck- und Front- aber auch bei einem Seitenaufprall muss der Einbauort dieser Bedingung genügen. Aus diesem Grund muss der Speicher stets in Längsrichtung des Fahrzeuges zwischen den Achsen und in Querrichtung zwischen den Rädern angeordnet werden. Dies entspricht dem schraffierten Bereich in Abbildung 4.3.

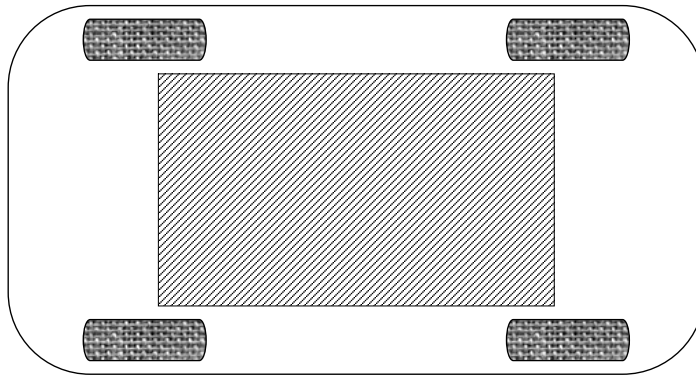


Abb. 4.3: Optimaler Einbauort für Energiespeicher bei einem Straßenfahrzeug

Durch seine hohe Masse und die Forderung nach einem möglichst tiefen Fahrzeugschwerpunkt zur Vermeidung von Wankbewegungen, ist die Anordnung des Speichers nahe dem Fahrzeugboden unumgänglich. Diese Anforderung an den Einbauort wird beispielsweise durch ein Sandwichkonzept erfüllt. Hierbei wird der Speicher zwischen der eigentlichen Fahrgastzelle und dem Fahrzeugboden montiert.

Die Beantwortung der Frage nach dem optimalen Verhältnis $\frac{n_{ES}}{n_{WR}}$ führt zur Frage nach der sinnvollen Anzahl separater, sprich galvanisch getrennter und funktionell unabhängiger Speicher. Nur durch galvanisch getrennte Speicher lässt sich $n_{ES} > n_{WR}$ realisieren.

Zuerst ist zu klären, welche Eigenschaften galvanisch getrennte Speichersysteme prinzipiell kennzeichnen und wie diese sich von nicht galvanisch getrennten Systemen unterscheiden.

Vorteile galvanisch getrennter Speicher:

- Ausfallsicherheit: Weiterfahrt mit verminderter Leistung bei Ausfall eines Speichers möglich.
- geometrische Flexibilität: Nutzung mehrerer unzusammenhängender Bauräume möglich.

Nachteile galvanisch getrennter Speicher:

- Platzbedarf: Das Verhältnis aktives Volumen zu Gesamtvolumen ist bei mehreren kleinen Speichern unvorteilhafter als bei einem großen Speicher.
- Masse: Das Verhältnis aktive Masse zu Gesamtmasse ist bei mehreren kleinen Speichern unvorteilhafter als bei einem großen Speicher.
- Kosten: Durch die höhere Komplexität und zusätzlich erforderliche Kabel, Stecker und Überwachungselektroniken sind mehrere kleine Speicher stets teurer als ein großer Speicher gleicher Energie und Leistung.

Am Beispiel eines Speichers mit Lithium-Eisen-Phosphat Zellen lässt sich zeigen, dass zwei getrennte Speicher etwa 10 % schwerer und größer sowie 5 % teurer als ein Speicher gleicher Leistung und gleichen Energieinhalts sind.

Mehrere Speicher pro Wechselrichter einzusetzen ist folglich nicht zielführend. Es verbleiben die Möglichkeiten $n_{ES} = n_{WR}$ und $n_{ES} < n_{WR}$.

Ein Speicher pro Wechselrichter ist dabei technisch genauso realisierbar, wie die Verwendung mehrerer Wechselrichter pro Speicher. Bei Anschluss mehrerer Wechselrichter an einen Speicher ist zu prüfen, welche Auswirkungen dies auf den Speicher hat. Dazu wird ein zeitlich hochaufgelöstes Simulationsmodell von Speicher und Wechselrichter verwendet. Im Speziellen ist zu prüfen, ob es durch die Überlagerung von Harmonischen, hervorgerufen durch die Schaltvorgänge der Halbleiterventile, zu unzulässigen Belastungen des Speichers kommt. Es zeigt sich, dass die hochfrequenten Harmonischen die korrekte Funktionsweise des Speichers in keiner Weise beeinträchtigen. Somit ist der Fall $n_{ES} < n_{WR}$ unproblematisch.

Im Szenario $n_{ES} = n_{WR}$ sind – außer im Sonderfall $n_{ES} = n_{WR} = 1$ – mehrere galvanisch getrennte Speicher vorhanden. Diese sind auch bei gleicher Auslegung durch die vergleichsweise hohe Streuung der Zellkapazität unterschiedlicher Zellen niemals identisch, was langfristig zu unterschiedlicher Belastung und Alterung führt. Auch durch den unterschiedlich hohen Energieumsatz an Vorder- und Hinterachse kommt es

zu unsymmetrischen Belastungen. So wird dem Speicher an der Hinterachse tendenziell mehr Energie als dem Speicher an der Vorderachse entnommen, da durch die dynamische Achslastverteilung an der Hinterachse ein höheres Beschleunigungspotenzial, an der Vorderachse ein höheres Rekuperationspotenzial vorhanden ist.

Da die Verwendung eines eigenen Speichers pro Wechselrichter in Summe zu keinen Vorteilen gegenüber dem Fall $n_{ES} < n_{WR}$ führt, lässt sich abschließend sagen, dass die Lösung $1 = n_{ES} \leq n_{WR}$ stets die optimale ist. Damit wird noch keine Aussage zur Technik des Speichers getroffen. „Ein Speicher“ kann somit auch bedeuten, dass Kondensatoren und Akkumulatoren zusammen das Speichersystem bilden. Untersuchungen zur Technologie des Speichers sind dem Abschnitt 5.4 zu entnehmen.

4.4 Bewertungsmodalität

Zwei Arten von Bewertungen sind denkbar: Die direkte Bewertung eines Systembestandteils, hier der Topologie, ohne Berücksichtigung des übrigen Antriebsstrangs sowie die Bewertung des Systembestandteils im Kontext des Gesamtsystems. Für die Topologie bedeutet dies, dass Aspekte, welche rein durch die Wahl der Topologie bestimmt werden und unabhängig von der Wahl der Antriebskomponenten sind, direkt bewertet werden können. Diese sind im Einzelnen: Kosten, Bauraum, Überlastbarkeit, Zuverlässigkeit, Einzelradsteuerung, Komplexität.

Nur mit Kenntnis des Gesamtsystems ist der Einfluss der Topologie anhand folgender Bewertungskriterien bewertbar: Effizienz, Fahrleistung, Fahrsicherheit.

4.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden Topologien eines elektrischen Antriebsstranges aus den Einzelkomponenten synthetisiert und einer ersten Vorauswahl unterzogen. Es zeigt sich, dass für sinnvolle Komponentenanzahlen $0 \leq n_{GE} \leq 4$, $1 \leq n_{EM} = n_{WR} \leq 4$ und $1 = n_{ES}$ gilt. Die mit dieser Vorgabe gebildeten Topologien werden im folgenden Kapitel um sogenannte Techniken, also konkrete Ausführungsformen der jeweiligen Antriebsstrangkomponenten, zu kompletten Systemen erweitert.

5 Antriebsstrangkomponenten

Nach Bestimmung sinnvoller Topologien im vorhergehenden Kapitel wird nun der Lösungsraum um die konkrete Ausführung der Antriebsstrangkomponenten, im Rahmen dieser Arbeit als Technik bezeichnet, erweitert.

Die derzeit funktionell und wirtschaftlich vielversprechendsten Techniken für elektrische Maschinen, Getriebe, Wechselrichter und Energiespeicher werden vorgestellt und diskutiert. Im Vordergrund stehen dabei gezielt die für den Einsatz in einem Straßenfahrzeug relevanten Eigenschaften der Komponenten und nicht die vollständige Beschreibung der prinzipiellen Funktionsweise.

5.1 Elektrische Maschinen

Durch den begrenzten Energieinhalt des Speichersystems und den limitierten Bauraum im Fahrzeug sind die Anforderungen an elektrische Maschinen für Traktionsanwendungen hoch. Die Maschinen sollen sowohl hoch ausgenutzt sein, sprich eine hohe Drehmomentdichte innehaben, als auch einen möglichst hohen Wirkungsgrad bieten. Hierbei ist weniger der Nennwirkungsgrad, als der Verlauf des Wirkungsgradkennfeldes in Abhängigkeit von Drehmoment und Drehzahl entscheidend. Im Optimalfall decken sich die Punkte größten Energiebedarfs des Zyklus und die Bereiche höchsten Wirkungsgrades der elektrischen Maschine. Deren prinzipielle Verläufe sind von der Maschinenart abhängig. Dies wird in Abbildung 5.1 deutlich.

Aufgrund ihrer prinzipiellen Eigenschaften sind Asynchronmaschinen mit Käfigläufer (ASM), Permanentterregte Synchronmaschinen (PSM/IPM), Stromerregte Synchronmaschinen (SSM) sowie Geschaltete Reluktanzmaschinen (SRM) vielversprechend für den Einsatz in batterieelektrischen Kraftfahrzeugen. Nachfolgend werden ihre für diesen Einsatzzweck relevanten Charakteristika herausgearbeitet.

5.1.1 Asynchronmaschine

Die Asynchronmaschine (siehe Abbildung 5.2) ist in ihrer Ausführungsform mit Käfigläufer eine bewährte und robuste Lösung für verschiedenste Anwendungszwecke. Bei dieser Bauweise besteht die Rotorwicklung aus mit Kurzschlussringen verbundenen

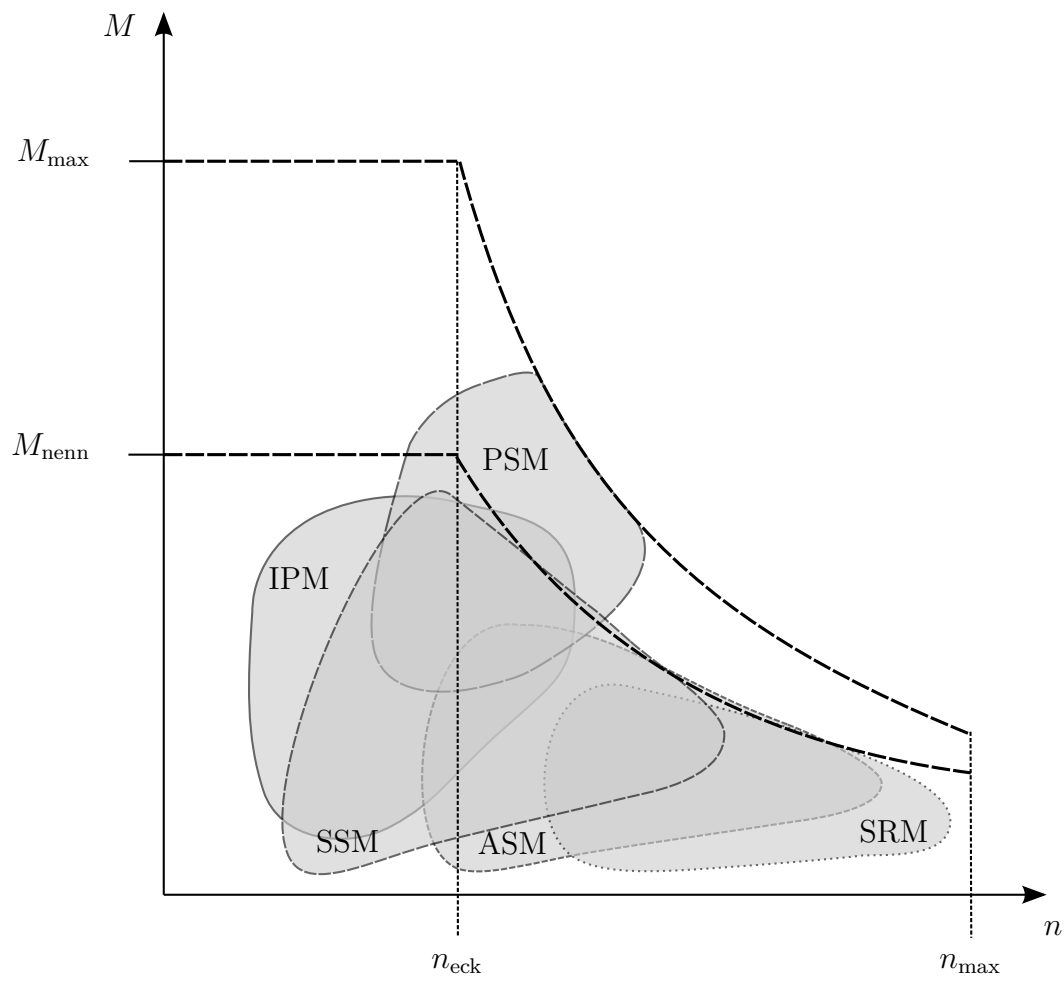


Abb. 5.1: Prinzipbedingte Bereiche besten Wirkungsgrades ($\eta > 90\%$) verschiedener elektrischer Maschinen, schematisch, basierend auf [BNMH08], [FBJ⁺10], [WLE06]

Kupfer- oder Aluminiumstäben. Im Ständer ist in der Regel eine dreisträngige Drehstromwicklung verbaut, welche ein annähernd sinusförmiges Luftspaltfeld erzeugt. Dieses Drehfeld bewegt sich bei belasteter Maschine mit einer geringen Relativgeschwindigkeit zum Rotor. Somit wird in den Rotorstäben eine Spannung induziert, welche aufgrund der Kurzschlussringe zu einem Stromfluss im Rotor führt. Aus der Wechselwirkung des dadurch entstehenden Rotormagnetfelds mit dem Statormagnetfeld stammt das Drehmoment dieser Maschine. Dieses ist umso größer, je größer die Drehzahldifferenz zwischen Rotor- und Statorfeld, der Schlupf, ist. Das maximal abgebbare Moment der Asynchronmaschine ist das Kippmoment (M_{kipp}). Übersteigt das Lastmoment das Kippmoment, wird die Maschine bis zum Stillstand abgebremst. Das Wirkungsgradkennfeld einer Asynchronmaschine wird durch den Schlupf und die dominierenden Kupferverluste geprägt. Insbesondere bei geringen Drehzahlen und hoher Last ist der Wirkungsgrad niedrig. Aufgrund der vergleichsweise niedrigen Eisenverluste wird der Bereich besten Wirkungsgrades bei hohen Drehzahlen erreicht. Vorteile der Maschine sind der bereits erwähnte robuste Aufbau, die gute Überlastfä-

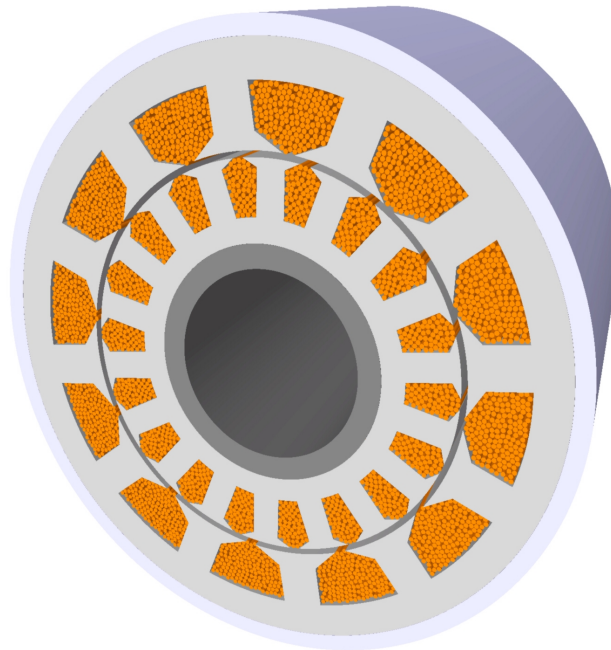


Abb. 5.2: Asynchronmaschine

higkeit im Ankerstellbereich, die geringen Material- und Fertigungskosten sowie die Möglichkeit der Regelung auf die Drehzahl und nicht den Rotorwinkel, so dass ein preiswerter Drehzahlsensor ausreichend ist. Darüber hinaus ist die hohe Betriebssicherheit der Maschine hervorzuheben: Im Fall eines Phasenkurzschlusses wird kein dauerhaftes Brems- oder Pendelmoment erzeugt. Nachteilig wirkt sich das Verhalten des maximalen Drehmoments über der Drehzahl aus:

Das Kippmoment ist im Feldschwäcbereich umgekehrt proportional dem Quadrat der Drehzahl. Bei konservativer Auslegung gilt nach Riefenstahl [Rie10] für Asynchronmaschinen der Zusammenhang: $M_{\text{nenn}} = 0,4 \cdot M_{\text{kipp}}$. Dies führt dazu, dass das Kippmoment ab einer Drehzahl von $n = 2,5 \cdot n_{\text{eck}}$ das Nennmoment unterschreitet, wodurch ab diesem Punkt die geforderte Fahrzeugdynamik nicht mehr gewährleistet ist. Aufgrund dessen muss die Asynchronmaschine hinsichtlich der Wirkleistung überdimensioniert werden.

Berechnungen für verschiedene Fahrzeugklassen zeigen, dass die Kippleistung einer Asynchronmaschine etwa 40 bis 60 % über der Maximalleistung einer Synchronmaschine zu liegen hat, damit vergleichbare Fahrzeugbeschleunigungszeiten und Endgeschwindigkeiten erreicht werden können. Dies ist für ein Fahrzeug der Kompaktklasse in Abbildung 5.3 dargestellt. Für diese Betrachtung gilt die Annahme, dass der Überlastfaktor beider Maschinen 2 beträgt und $M_{\text{nenn}} = 0,4 \cdot M_{\text{kipp}}$ gilt. Die benötigte Leistung am Rad wird für beide Maschinen so gewählt, dass die Beschleunigungszeit von 0 auf 150 km h^{-1} unabhängig von der eingesetzten elektrischen Maschine ist.

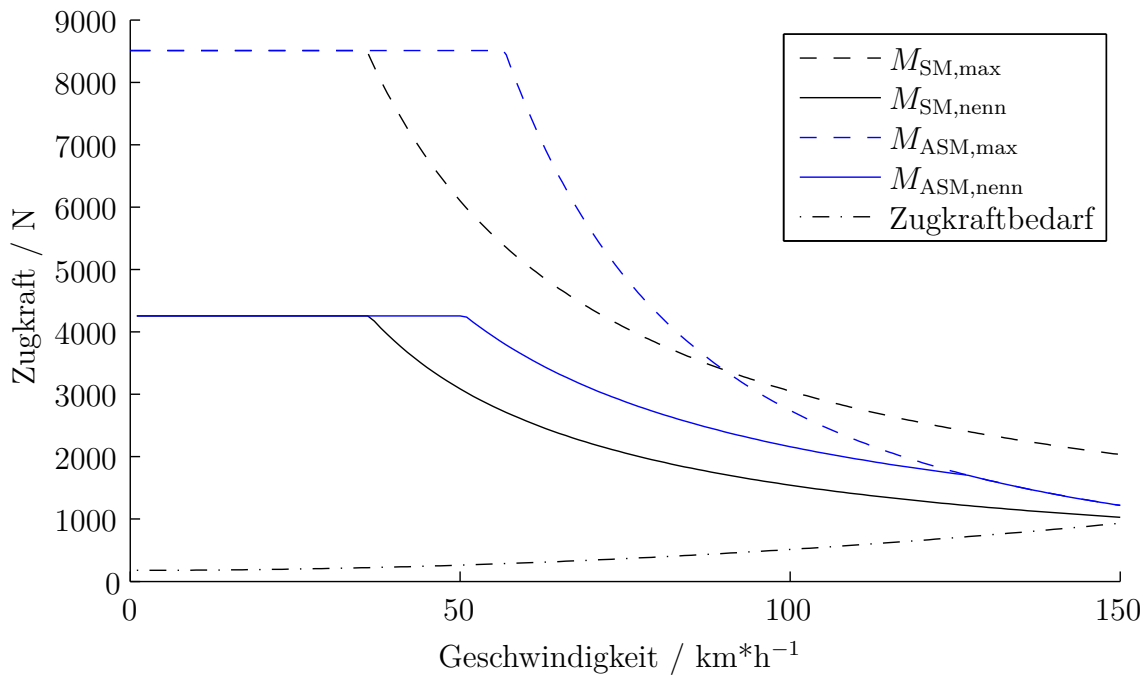


Abb. 5.3: Zugkraftverlauf bei ASM und SM

Die erforderliche moderate Anhebung der Maximalleistung ist bei elektrischen Maschinen annähernd bauraumneutral durchführbar, jedoch steigen die Maximalströme, wodurch auch der Wechselrichter hinsichtlich der maximalen Stromtragfähigkeit um 40 bis 60 % überdimensioniert werden muss.

Hinzu kommt noch eine weitere Überdimensionierung des Wechselrichters wegen des

vergleichsweise hohen Blindleistungsbedarfs der Asynchronmaschine [Sch09]. Während eine stromerregte Synchronmaschine einen Leistungsfaktor von „1“ problemlos erreichen kann, also keine extern zugeführte Blindleistung benötigt, ist für die Magnetisierung einer Asynchronmaschine stets Blindleistung zuzuführen [Nür52]. Auch wenn die Blindleistung per definitionem keine Verlustleistung, sondern nur eine zwischen Zwischenkreiskondensator und Maschinenwicklung pendelnde Leistung ist, so fließt sie dennoch über den Wechselrichter, welcher entsprechend höhere Ströme führen muss. Typische Werte für den Leistungsfaktor bei Asynchronmaschinen in der betrachteten Leistungsklasse sind $0,8 \leq \cos \varphi \leq 0,9$. Diese Werte sind die Maximalwerte des $\cos \varphi$. Bei niedrigen Drehzahlen und Lasten werden diese deutlich unterschritten, dimensionierend für den Wechselrichter sind jedoch die Werte für die maximalen Ströme. Bei Betriebspunkten mit maximalem Strombedarf ist der Leistungsfaktor in der Nähe seines Maximalwertes. Im Vergleich zu einer stromerregten Synchronmaschine ergibt sich somit eine Überdimensionierung des Wechselrichters aufgrund des erhöhten Blindleistungsbedarfs von etwa 20 %.

Zusammengenommen ist der Wechselrichter folglich um etwa 50 % überzudimensionieren mit entsprechenden Folgen für Masse, Volumen und Kosten.

5.1.2 Permanenterregte Synchronmaschine mit Oberflächenmagneten

Die Permanenterregte Synchronmaschine mit Oberflächenmagneten ist gegenwärtig in vielen Hybridfahrzeugen zu finden. Grund ist die hohe Drehmomentdichte und ihre somit sehr kompakte Bauweise, die beispielsweise die Integration der Maschine in das Wandlergehäuse ermöglicht. Durch die am Rotorumfang montierten Magnete ergibt sich ein Betriebsverhalten, welches geprägt ist von einem hohen Wirkungsgrad, einer geringen Überlastbarkeit sowie einem schwach ausgeprägten Feldschwäcbereich mit $n_{\max} \approx 2n_{\text{eck}}$ [WLE06]. Die letztgenannten Eigenschaften resultieren insbesondere aus dem direkten Einwirken des Luftspaltfeldes auf die Magnete. Diese sind konstruktionsbedingt nicht gegen Entmagnetisierung geschützt, weswegen zu hohe (Gegen-)Felder im Luftspalt zu vermeiden sind.

Kritisch zu sehen sind außerdem die vergleichsweise hohen Kurzschlussströme und die daraus resultierenden hohen Bremsmomente. Die Maschine ist folglich im Störfall nicht eigensicher. Die Sicherheit ist durch ein geeignet gestaltetes Antriebssystem zu gewährleisten.

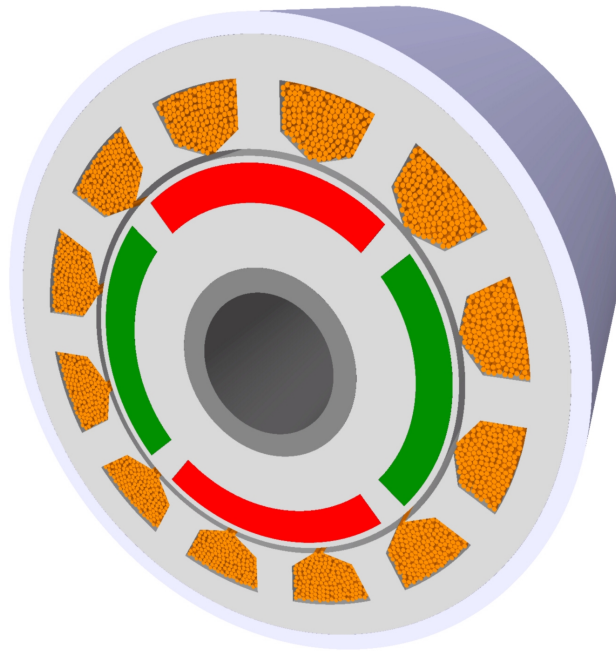


Abb. 5.4: Permanentenerregte Synchronmaschine mit Oberflächenmagneten

5.1.3 Permanentenerregte Synchronmaschine mit vergrabenen Magneten

Ein ähnliches Verhalten zeigt auch die Permanentenerregte Synchronmaschine mit vergrabenen Magneten. Sie verfügt, wie in Abbildung 5.5 zu sehen ist, jedoch über im Rotor eingebettete Magnete, woraus sich Unterschiede im Verhalten zur Maschine mit Oberflächenmagneten ergeben. Die Magnete sind mechanisch besser befestigt, was höhere Drehzahlen ermöglicht. Außerdem sind sie besser vor Entmagnetisierung geschützt, weswegen ein vergrößerter Feldschwächbereich, typischerweise $n_{\max} \approx 3 \cdot n_{\text{eck}}$, ermöglicht wird. Zusammen mit einem akzeptablen Leistungsfaktor und einer günstigen Lage des Bereichs höchsten Wirkungsgrades ergeben sich bei dieser Maschine viele Vorteile für den Einsatz als Traktionsantrieb.

5.1.4 Stromerregte Synchronmaschine

Die Stromerregte Synchronmaschine (siehe Abbildung 5.6) ist aus dem Kraftwerksbereich bekannt. Der Stator dieser Maschine kann mit dem Stator einer PSM oder IPM identisch sein, jedoch unterscheiden sich die Maschinen bezüglich des Rotoraufbaus. Während bei PSM und IPM das Rotorfeld mit Magneten erzeugt wird, trägt der Rotor der SSM zur Erregung der Maschine eine Gleichstromwicklung. Der Erregerstrom

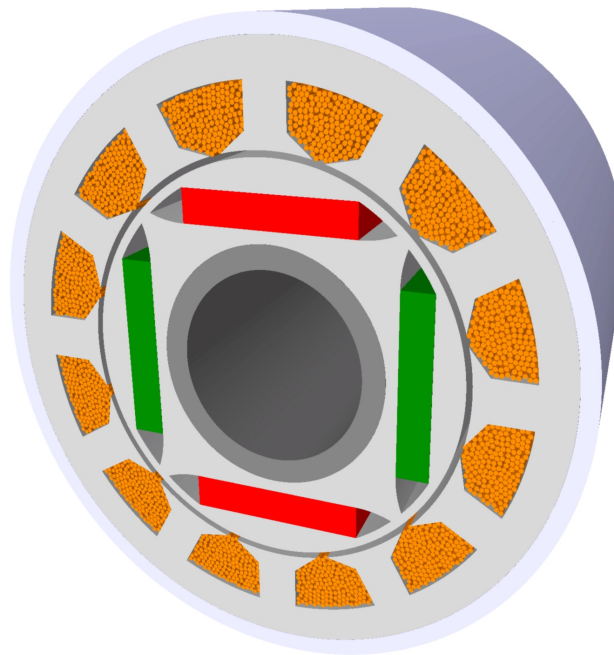


Abb. 5.5: Permanenterrgte Synchronmaschine mit vergrabenen Magneten

muss dem Rotor über Schleifringe oder ein induktives Übertragungssystem zugeführt werden. Bezogen auf den aktiven Teil besitzen permanenterrgte und stromerrgte Synchronmaschinen ähnliche Drehmomentdichten. Jedoch führt das Erregersystem der SSM zu erhöhtem Bauraumbedarf und zusätzlichen Erregerverlusten. Außerdem ist eine leistungselektronische Schaltung zur Erzeugung der variablen Erregergleichspannung aus dem Gleichspannungszwischenkreis vorzusehen.

Allerdings bietet die elektrische Erregung den großen Vorteil der Regelbarkeit. Durch diesen zusätzlichen Freiheitsgrad kann sowohl der Betrieb mit maximalem Moment oder der Betrieb mit maximalem Wirkungsgrad realisiert werden. Bei realisierten Maschinen liegen die Trajektorien dieser unterschiedlichen Betriebsarten eng beieinander.

Ein besonderes Merkmal der stromerrgten Maschine ist die ideale Feldschwächbarkeit. Während bei Maschinen mit Permanentmagneten der Feldschwächbereich durch Einprägen eines Gegenfeldes dargestellt werden muss, kann bei stromerrgten Maschinen zusätzlich der Erregerstrom reduziert werden. Somit ist die maximale Drehzahl nur noch rein mechanisch, durch die Umfangsgeschwindigkeit des Rotors und die Drehzahlfestigkeit der Lager, begrenzt.

Durch den Verzicht auf Magnete können im Rotor kurzzeitig höhere Feldstärken toleriert werden, was der Maschine eine ausgezeichnete Überlastfähigkeit beschert.

Stromerrgte Synchronmaschinen für elektrische Straßenfahrzeuge werden in der Regel als Schenkelpolmaschinen ausgeführt. Durch den unsymmetrischen Rotoraufbau

ergeben sich unterschiedliche Reaktanzen in d- und q-Achse, $X_d \neq X_q$, was gemäß

$$M = -\frac{mU_1}{2\pi n_1} \left[\frac{U_p}{X_d} \cdot \sin \vartheta + \frac{U_1}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\vartheta \right] \quad (5.1)$$

zu einer erregungsunabhängigen momentbildenden Komponente führt, dem Reluktanzmoment [Fis06]. Es entsteht durch das inhärente Bestreben der Maschine, den magnetischen Widerstand längs einer Feldlinie zu minimieren, was zu einer Kraftwirkung auf Eisen im magnetischen Feld führt.

Zusammenfassend gilt, dass die SSM ideale Eigenschaften für einen Traktionsantrieb aufweist, jedoch eine geringere Drehmomentdichte als die ebenfalls sehr gut geeignete IPM bietet. Die Entscheidung zwischen IPM und SSM ist nicht zuletzt vom zur Verfügung stehenden Bauraum und von der Entwicklung der Magnetpreise abhängig.

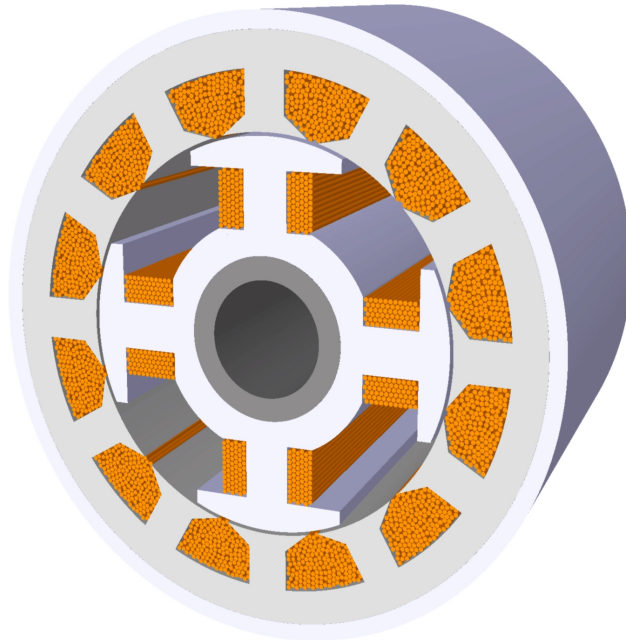


Abb. 5.6: Stromerregte Synchronmaschine

5.1.5 Geschaltete Reluktanzmaschine

Im Gegensatz zu den zuvor betrachteten E-Maschinen, entsteht bei einer Reluktanzmaschine (siehe Abbildung 5.7) das Drehmoment nicht aus der Verkopplung zweier Magnetfelder, sondern allein aufgrund der Reluktanz. Dies ist die Bezeichnung für den magnetischen Widerstand [KMR08], [SK06]. Magnetische Feldlinien sind bestrebt, einen Zustand minimaler Energie einzunehmen, indem sie ihren Umfang minimieren.

Diese „Feldlinienkontraktion“ führt zu einer Kraft, der Reluktanzkraft.

Nachfolgend wird die Bauart der geschalteten Reluktanzmaschine betrachtet. Diese ist bei abgeschalteter Erregung eigensicher. Des Weiteren kann durch den Statorwicklungsaufbau – Formspulen mit unverknüpften Strängen – ein Phasenkurzschluss ausgeschlossen werden [XCC08]. Der größte Vorteil dieser Maschine ist der magnet- und wicklungslose Rotor. Durch diese Bauform ist er robust, kostengünstig und mit geringem Aufwand zu fertigen. Allerdings führt diese Bauweise zu hohen Rastmomenten und einer hohen Drehmomentwelligkeit. Dies ist fahrdynamisch aufgrund der hohen Massenträgheit des Fahrzeuges weniger relevant, wirkt sich allerdings auf die Geräuschentwicklung negativ aus. Auch ist durch das Wirkprinzip die Drehmomentdichte stark limitiert.

Im System betrachtet ist weiterhin nachteilig, dass kein weitverbreiteter dreiphasiger Pulswechselrichter zur Speisung der Maschine Verwendung finden kann. Stattdessen sind drei H-Brücken einzusetzen. Auch wenn dies technisch unproblematisch ist, ist es aus Sicht eines Fahrzeugherstellers nachteilig, da eine Abweichung von gängigen Bauformen stets kleinere Stückzahlen und höhere Kosten bedingt. Zudem ist der Wechselrichter aufgrund des hohen Blindleistungsbedarfs der Maschine größer zu dimensionieren.

In Summe sind die Nachteile dieser Maschine so groß, dass sie im Vergleich zu den anderen betrachteten Maschinen als deutlich schlechter geeignet eingestuft werden kann. Somit wird sie aus dem weiteren Vergleich ausgeschlossen.

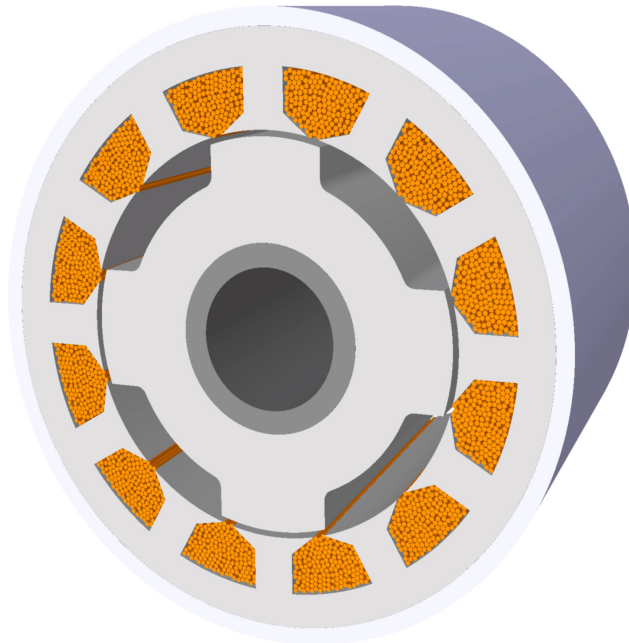


Abb. 5.7: Reluktanzmaschine

5.1.6 Bewertungsmodalität

Mit der im Kapitel 3 vorgestellten Methodik werden, analog zur Topologiebewertung in Kapitel 4, auch die einzelnen Komponenten anhand der Bewertungskriterien bewertet. Die prinzipbedingten Eigenschaften der elektrischen Maschinen ermöglichen es, sie in folgenden Punkten direkt zu bewerten:

Akustik, bauartbedingte Überlastbarkeit, Schleppmomente, Zuverlässigkeit, Komplexität und Spannungsqualität (generatorischer Betrieb).

Die Schleppmomente einer elektrischen Maschine können im Systemverbund irrelevant werden, wenn eine Topologie mit Kupplung verwendet wird. Dies ist bei der Betrachtung des Gesamtsystems zu beachten. Auch die Überlastbarkeit ist mit Kenntnis der konkreten Auslegung nochmals exakter bewertbar.

Ausschließlich bei Kenntnis des Gesamtsystems kommen folgende Kriterien in Betracht: Kosten, Effizienz, Bauraum, Fahrsicherheit und Fahrleistung.

5.2 Getriebe

Die Bewertung der unterschiedlichen Getriebearten kann nur in Kombination mit der angeschlossenen elektrischen Maschine erfolgen, da sich die Auslegungen der beiden Komponenten stark beeinflussen. So bedingen sich die Getriebeübersetzung (i) und der Drehzahlbereich der Maschine:

$$n_{\text{EM,max}} = n_{\text{Rad,max}} \cdot i = \frac{v \cdot i}{2\pi \cdot r_{\text{dyn}}}. \quad (5.2)$$

Auch bei einer Betrachtung des aus einem Fahrzyklus resultierenden optimalen Wirkungsgradkennfeldes einer elektrischen Maschine wird deutlich, dass die Lage des Bereichs optimalen Wirkungsgrades von der Getriebeübersetzung abhängig ist. Aus diesen Gründen kann es keine separate Auslegung und Optimierung von Maschine oder Getriebe geben. Vielmehr müssen bei der Bestimmung des optimalen Getriebes das Verhalten der angeschlossenen elektrischen Maschine, die Getriebeart und die Ganganzahl in Kombination berücksichtigt werden.

An Getriebearten sind für den vergleichsweise einfachen Anwendungsfall in batterieelektrischen Straßenfahrzeugen prinzipiell Stirnradgetriebe, Planetenradgetriebe und Kegelradgetriebe denkbar. Neben dem konstruktiven Aufbau können diese Getriebe, wie in Tabelle 5.1 zu sehen, durch ihren Wirkungsgrad klassifiziert werden.

Darüber hinaus ist bei der Getriebeauswahl die erzielbare Übersetzung von großer Bedeutung. Aus Gleichung 5.2 folgt mit $n_{\text{EM,max}} \approx 10000 \dots 18000 \text{ 1/min}$ und $r_{\text{dyn}} \approx 0,33 \text{ m}$, dass bei batterieelektrischen Fahrzeugen, welche in etwa auf eine Höchstgeschwindigkeit von 150 km/h ausgelegt werden, die Übersetzung des Getriebes im Bereich $i = 8 \dots 10$ liegen muss.

Tab. 5.1: Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Art des Getriebes nach [NBL07]

Getriebeart	Wirkungsgrad/%
Stirnradgetriebe, pro Stufe	99 - 99,8
Planetenradgetriebe	98
Kegelradgetriebe	90 - 93

Eine Übersetzung dieser Größenordnung ist mit Planetenradgetrieben problemlos darstellbar. Kegelrad- und Stirnradgetriebe können mit einer Getriebestufe eine Übersetzung von bis zu $i = 4 - 5$ erreichen. Daher sind bei diesen Getrieben zwei Stufen notwendig.

Sowohl für ein zweistufiges Stirnradgetriebe als auch für ein Planetenradgetriebe ergibt sich ein nominaler Wirkungsgrad von etwa 98 %. Beide Varianten sind prinzipiell für den Einsatz im Fahrzeug geeignet. Kegelradgetriebe sind aufgrund ihres vergleichsweise niedrigen Wirkungsgrades zu vermeiden. Bei Allradtopologien kann ihr Einsatz jedoch aus konstruktiver Sicht sinnvoll sein.

Bei der Wahl der zur Anforderungserfüllung erforderlichen Ganganzahl ist zwingend zu berücksichtigen, dass elektrische Maschinen einen wesentlich größeren Drehzahlbereich konstanter Leistung als Verbrennungskraftmaschinen aufweisen. Dadurch sind weniger Gangstufen als in konventionell angetriebenen Fahrzeugen nötig. Die möglichen Getriebearten und die daraus resultierenden Anforderungen an die elektrische Maschine werden im Folgenden vorgestellt und bewertet.

5.2.1 Direktantrieb

Bei Entfall des Getriebes gilt $n_{EM} = n_{Rad}$. Raddrehzahlen von maximal 1200 1/min und hohe Drehmomentenanforderungen bedingen den Einsatz von langsamdrehenden Maschinen hoher Drehmomentdichte, sogenannten Torquemotoren. Da Volumen und Masse elektrischer Maschinen primär vom erzeugten Drehmoment abhängig sind, werden diese Maschinen insbesondere durch hohe Masse und großes Volumen geprägt [Kle09].

Die Statorströme sind proportional zum Drehmoment. Torquemotoren benötigen in der Regel Strangströme im Bereich vieler hundert bis über tausend Ampère. Durch diese sehr großen Ströme ergeben sich in den Statorwicklungen hohe Kupferverluste, welche wiederum zu einem deutlich geringeren Wirkungsgrad verglichen mit Getriebemotoren führen. Des Weiteren steigen die Kupferverluste, da zur Erzielung hoher Drehmomentdichten hochpolige Maschinen zu verwenden sind, deren Konstruktion einen hohen Kupfereinsatz bedingt.

Die hohen Wirkungsgradeinbußen lassen sich auch durch den Wegfall des Getriebes nicht kompensieren.

Der Einsatz einer elektrischen Maschine als Direktantrieb erfordert eine hochpolige Ausführung und eine hohe Drehmomentdichte der Maschine. Somit eignen sich stromerregte Maschinen nur bedingt als Direktantrieb. Sinnvoller ist die Wahl permanenterregter Synchronmaschinen, da diese die höchsten Drehmomentdichten erzielen. Aufgrund der hohen Momente ist die Magnetmasse dieser Maschinen vergleichsweise hoch, was sich stark auf die Kosten auswirkt.

Werden zwei Maschinen gleicher Leistung verglichen, so ist der Torquemotor stets größer, schwerer, teurer und verlustbehafteter als eine schneller drehende elektrische Maschine mit Getriebe. Diese Nachteile übertragen sich auf den zugehörigen Wechselrichter, da dieser die hohen Ströme stellen können muss. Vorteilhaft wirkt sich der Entfall des Getriebes auf die Systemkomplexität und somit das Ausfallrisiko aus. Außerdem sind Direktantriebe durch den Entfall des Getriebes spielfrei. Die sich daraus ergebenden guten Regelungseigenschaften und die hohe Dynamik dieser Antriebe sind für Positionierantriebe, nicht jedoch für Traktionsmaschinen relevant.

5.2.2 Einganggetriebe

Bei Industrieantrieben ist der sogenannte Getriebemotor – eine elektrische Maschine mit angeflanschem Getriebe einfacher Untersetzung – seit langem weit verbreitet. Der große Vorteil dieser Anordnung ist, dass elektrische Maschinen mit höheren Maximaldrehzahlen eingesetzt werden können. Gemäß $P_{\text{mech}} = \omega M$ folgt daraus, dass bei gleicher Leistung das abzugebende Drehmoment reduziert ist. Somit verringert sich gegenüber einem Direktantrieb die Größe der Maschine. Es zeigt sich, dass die Volumenreduktion, bedingt durch die höhere Drehzahl, den Platzbedarf eines 1-Gang-Getriebes übersteigt. Gleiches gilt für die Masse der Anordnung.

Auch der Wirkungsgrad ist von der Nenndrehzahl der Maschine abhängig. So steigt bei gleicher Leistung mit sinkender Drehzahl die Baugröße der Maschine [MP06]. Sind zugleich Ausnutzung und Verlustdichten konstant, so ergeben sich für Maschinen kleinerer Drehzahl absolut betrachtet größere Verluste [MP06]. Schnelldrehende Maschinen besitzen also einen höheren Wirkungsgrad als langsamdrehende Maschinen gleicher Leistung. Gegenüberstellungen existierender Torquemotoren und Maschinen mit Maximaldrehzahlen von 10000 bis 15000 1/min lassen bei gleicher Maschinenleistung Wirkungsgradvorteile von bis zu 5 Prozentpunkten für die schnelllaufenden Maschinen erkennen. Diese Wirkungsgradverbesserung überkompensiert die zusätzlichen Verluste eines Einganggetriebes, welche nach Tabelle 5.1 im Bereich von 2 % liegen.

Es lässt sich der Schluss ziehen, dass der Einsatz eines Einganggetriebes dem Direktantrieb vorzuziehen ist. Nachfolgend wird untersucht, ob eine Erhöhung der Ganganzahl zu weiteren Verbesserungen führt.

5.2.3 Zweiganggetriebe

Prinzipiell könnte die Anzahl der Gangstufen in ähnlicher Höhe wie bei verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen liegen. Hier sind derzeit manuelle Sechsganggetriebe und achtgängige Automatikgetriebe Stand der Technik. Durch den wesentlich größeren Bereich konstanter Leistung elektrischer Maschinen, verglichen mit Otto- und Dieselmotoren, ist jedoch eine deutliche Reduktion der Gangstufenanzahl möglich. Durch Simulationen der Beschleunigung, des Wirkungsgrades im Zyklus und Berechnungen zu Maschinen- und Getriebemasse und -volumen zeigt sich, dass mehr als zwei Gänge für keine Applikation Vorteile bringen. Diese Getriebe mit mindestens drei Gangstufen sind aufwändiger zu konstruieren und größer als Getriebe mit weniger Gängen, ohne dabei Systemwirkungsgradvorteile in den relevanten Fahrzyklen erzielen zu können. Somit verbleiben nur 2-Gang-Getriebe als einzig sinnvolle Variante von Mehrganggetrieben.

Durch die unterschiedlichen Übersetzungen der beiden Gänge können mehr Betriebspunkte im Bereich besten Wirkungsgrades der elektrischen Maschine gefahren werden. Zu beachten ist dabei, dass eine Anpassung des Maschinenkennfeldes an den Verbrauchszyklus durch den zweiten Gang nur bei bereits existenten Maschinen angebracht und sinnvoll ist. Es ist davon auszugehen, dass eine auf dem Markt frei verfügbare elektrische Maschine nicht für die konkret angedachte Applikation zugeschnitten ist – hier den Kundenzyklus eines Fahrzeugherstellers. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit durch mehrere Gänge den Bereich besten Wirkungsgrades der Maschine und den Bereich höchsten Energieumsatzes des Zyklus in Einklang zu bringen und somit den Energieumsatz im Zyklus zu senken. Jedoch ist es sinnvoller, die Fahrzeug- und Maschinenauslegung zu koordinieren, um somit direkt zu einer aus Sicht des Wirkungsgrads optimalen Maschine zu gelangen.

Die zusätzliche Übersetzungsstufe eines Zweiganggetriebes bedingt ein weiteres, lastfrei mitlaufendes Zahnradpaar. Dieses verringert den Getriebewirkungsgrad im Durchschnitt um 0,3 bis 0,4 Prozentpunkte. Außerdem wird das Getriebe durch dieses Zahnradpaar größer und schwerer. Untersuchungen zeigen eine Zunahme der Masse im Bereich von ungefähr 6 kg bei einem Getriebe mit einem maximalen Eingangsmoment von 300 Nm. Das maximale Moment der elektrischen Maschine – nicht jedoch die Leistung – kann durch den Einsatz eines zweiten Ganges reduziert werden, da es durch den zusätzlichen Gang mit höherer Untersetzung möglich ist, die geforderte Anfahrzugkraft mit geringerem Maschinenmoment bereitzustellen. Dadurch verringert sich das erforderliche maximale Maschinenmoment um bis zu 40 %, wodurch die elektrische Maschine, abhängig von der Auslegung, in etwa 10 kg leichter wird. Der Einsatz eines Zweiganggetriebes führt somit in Summe zu leichten Vorteilen in Bezug auf die Gesamtmasse.

In die Betrachtung des Wirkungsgrads fließt auch der Energiebedarf der elektrischen Schaltaktuatorik ein. Hierbei ist es zur Gewährleistung des vom Kunden erwarteten

Komfort trotz hoher Kosten unerlässlich, eine zugkraftunterbrechungsfreie Schaltung einzusetzen. Pro Schaltvorgang werden bei einer automatisierten Schaltung erfahrungsgemäß etwa 100 Ws benötigt. Bei der Berechnung des Energiebedarfs der Systeme mit Zweiganggetriebe wird hierzu eine Betriebsstrategie entwickelt, welche jeweils den wirkungsgradoptimalen Gang wählt. Zur Vermeidung zu häufiger Gangwechsel wird eine Schalthysterese hinterlegt.

Ein weiterer Wirkungsgradnachteil ergibt sich durch die verkleinerte Maschine. Bei einer Maschine mit 40-prozentiger Längenreduktion des Aktivteils beträgt dieser Wert etwa 0,8 Prozentpunkte. Trotzdem ist diese Maschinenverkürzung angebracht. Wird das Zweiganggetriebe an eine Maschine angeflanscht, welche für den Betrieb mit einer einfachen Untersetzung ausgelegt ist, ergeben sich zu große Nachteile bezüglich Masse und Kosten, als dass dieser Weg gangbar ist.

Bei einer gesamthaften Betrachtung der Kosten wird deutlich, dass bei Einsatz eines Zweiganggetriebes im Vergleich zu einem Einganggetriebe eine kostengünstigere elektrische Maschine einem teureren Getriebe gegenübersteht. Insbesondere die zugkraftunterbrechungsfrei schaltende Schaltaktuatorik verteuert das System signifikant. Die Einsparungen bei der elektrischen Maschine gehen auf verringerte Materialkosten durch verringerten Materialeinsatz aufgrund des geringeren Maximalmoments zurück. Bei bis zu 40 % verkürzter aktiver Länge verringert sich der Materialeinsatz typischerweise um etwa 25 bis 30 %. Bei einer permanenterregten Maschine können sich somit – abhängig von den Magnetpreisen – nahezu ausgeglichene Kostenbilanzen ergeben. Bei stromerregten Maschinen sind die Kosteneinsparungen an Kupfer und Eisen stets geringer als der Aufpreis für den zweiten Gang.

Dies führt zur Schlussfolgerung, dass die Sinnhaftigkeit des Einsatzes eines Zweiganggetriebes stets im Systemkontext zu prüfen ist.

Je kleiner die Drehzahlspitzung der elektrischen Maschine, umso eher ist ein Zweiganggetriebe zielführend. Dies ist bei Einsatz einer ASM oder PSM der Fall. Bei Verwendung einer IPM oder SSM ist ein Einganggetriebe in den meisten Szenarien zu bevorzugen. Der Einsatz eines Zweiganggetriebes wird außerdem umso empfehlenswerter, je höher die Endgeschwindigkeit des Fahrzeugs und damit die Drehzahlspitzung der elektrischen Maschine sein soll. Auch die Masse des Fahrzeugs spielt eine entscheidende Rolle. Je schwerer das Fahrzeug ist, desto eher ist der Einsatz eines Zweiganggetriebes in Erwägung zu ziehen.

Ein zweiter Gang ist überdies für eine Verbesserung der Fahrleistung bestehender Systeme sinnvoll. Dies gilt insbesondere dann, wenn eine nicht angepasste elektrische Maschine, beziehungsweise eine elektrische Maschine kleiner Drehzahlspitzung verwendet wird, oder ein bestehendes System hinsichtlich Beschleunigungsfähigkeit optimiert werden soll. Da im Rahmen dieser Arbeit die Antriebssysteme von Grund auf hinsichtlich optimaler Eignung entworfen werden, entfällt dieser Vorteil bei den

vorliegenden Betrachtungen, dennoch ist er aus Sicht eines Fahrzeugherstellers von Relevanz.

5.2.4 Bewertungsmodalität

Die unterschiedlichen Getriebevarianten können hinsichtlich folgender Kriterien direkt unterschieden werden:

Effizienz, Fahrsicherheit, Akustik, Zuverlässigkeit, Komplexität und Flexibilität.

Für diese Kriterien ist eine Betrachtung des Gesamtsystems unerlässlich:

Kosten, Fahrleistung, Bauraum und Schleppmomente.

5.3 Wechselrichter

Der Wechselrichter formt die Gleichspannung des Zwischenkreises zu einer meist mehrphasigen Wechselspannung zur Speisung der elektrischen Maschine um. Dies geschieht mittels ein- und ausschaltbarer Halbleiter. In der betrachteten Leistungsklasse hat sich in den letzten Jahren der Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) etablieren können. Dieser vereint die geringen Schaltverluste eines MOSFET und die geringen Durchlassverluste eines Bipolartransistors in einem Bauteil.

Es ist eine Vielzahl an Wechselrichtertopologien vorhanden. Bei der Auswahl geeigneter Wechselrichtertopologien für Automotive-Anwendungen steht eine hohe Leistungsdichte bei angemessenen Kosten im Vordergrund. Die betrachteten Varianten und ihre Charakteristika werden im Folgenden vorgestellt.

5.3.1 Zweipunktwechselrichter

Der Zweipunktwechselrichter ist die gängigste Ausführungsform. Der Name beruht auf der Art der ausgangsseitigen Spannungsgenerierung, da zur Bildung dieser Wechselspannung nur zwei alternierend zu schaltende Spannungsniveaus zur Verfügung stehen: $\pm U_d/2$

Ein dreiphasiger Zweipunktwechselrichter lässt sich beispielsweise mit drei Vollbrücken, oder durch eine B6-Schaltung, also eine Brückenschaltung mit sechs Halbleiterventilen (siehe Abbildung 5.8), realisieren.

Dieser Aufbau ist aufwandsminimal, kompakt und seit vielen Jahren bewährt. Aus diesem Grund sind komplette Module, welche in einem Gehäuse alle sechs Schalter und Inversdioden nebst Temperatursensor beinhalten, weit verbreitet. Diese Module sind in Ausführungen erhältlich, welche für den Einsatz im Automobil zertifiziert sind. Nachteilig ist beim Zweipunktwechselrichter die vergleichsweise hohe Welligkeit des

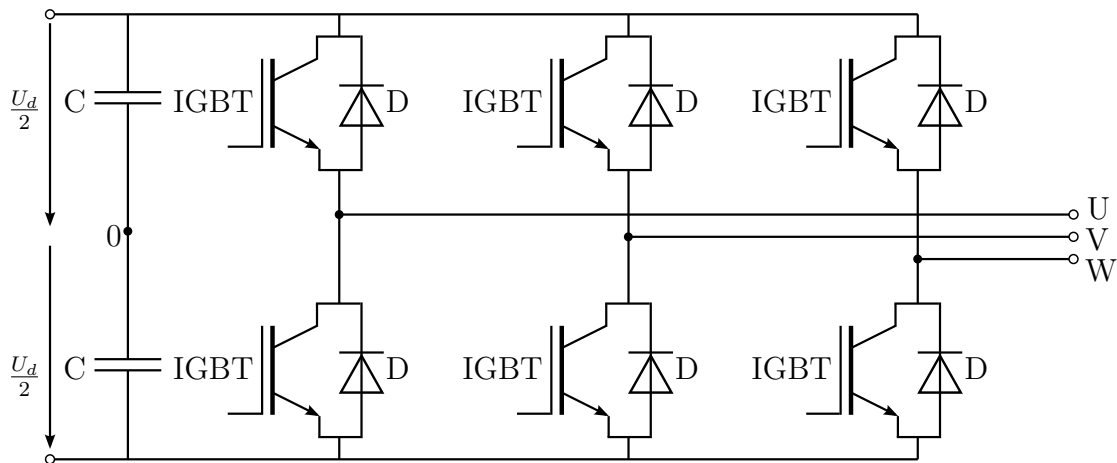


Abb. 5.8: Zweipunktwechselrichter

Ausgangsstroms, welche aus der geringen Zahl von verfügbaren Spannungsstufen resultiert. Des Weiteren ist zum derzeitigen Stand die Zwischenkreisspannung aufgrund der Verfügbarkeit von für Anwendungen im Automobil geeigneten Halbleitern mit hoher Sperrspannung limitiert.

5.3.2 Dreipunktwechselrichter

Durch Reihenschaltung von Halbleitern sind höhere Zwischenkreisspannungen möglich. Diese Schaltungen führen zu Mehrpunktwechselrichtern, wobei nur der sogenannte Dreipunktwechselrichter praxisrelevant ist. Beginnend mit einem Vierpunktwechselrichter ist die Eigenschaft, dass die Bauteile für eine im Vergleich zur Zwischenkreisspannung geringere Spannung ausulegen sind, nicht mehr vorhanden, da die Dioden wieder für die gesamte Sperrspannung ausulegen sind [Sch08].

Dreipunktwechselrichter sind explizit für Anwendungsfälle konzipiert, bei welchen die benötigten Spannungen die Sperrspannung der verfügbaren Halbleiterventile überschreiten würden. Durch den vermehrten Einsatz von Schaltern ergibt sich nun die namensgebende Eigenschaft, drei Spannungsstufen zur Generierung der Ausgangsspannung verwenden zu können: $+U_d/2$, 0 , $-U_d/2$.

Dadurch kann eine Sinusform von Spannung und Strom exakter angenähert werden, was im Vergleich zum Zweipunktwechselrichter zu einer deutlichen Verringerung von Harmonischen führt. Eine geeignete Messgröße zum Veranschaulichen des Oberschwingungsgehalts des Stroms ist die sogenannte Total Harmonic Distortion (THD).

Sie berechnet sich nach [Sch08] zu:

$$THD = \frac{\sqrt{I^2 - I_{(1)}^2}}{I_{(1)}} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{(k)}^2}}{I_{(1)}}. \quad (5.3)$$

Laut Lipo sind Werte von 4,64% THD für einen Zweipunktwechselrichter und 1,94 % für einen Dreipunktwechselrichter üblich [LH03]. Weitere Quellen und eine Simulation bestätigen diese Werte.

Abbildung 5.9 zeigt einen Vergleich der Ausgangsströme eines Zwei- und eines Dreipunktwechselrichters gleicher Bauart bei identischem Ansteuerungsverfahren, gleicher Last und einer Schaltfrequenz von 10 kHz.

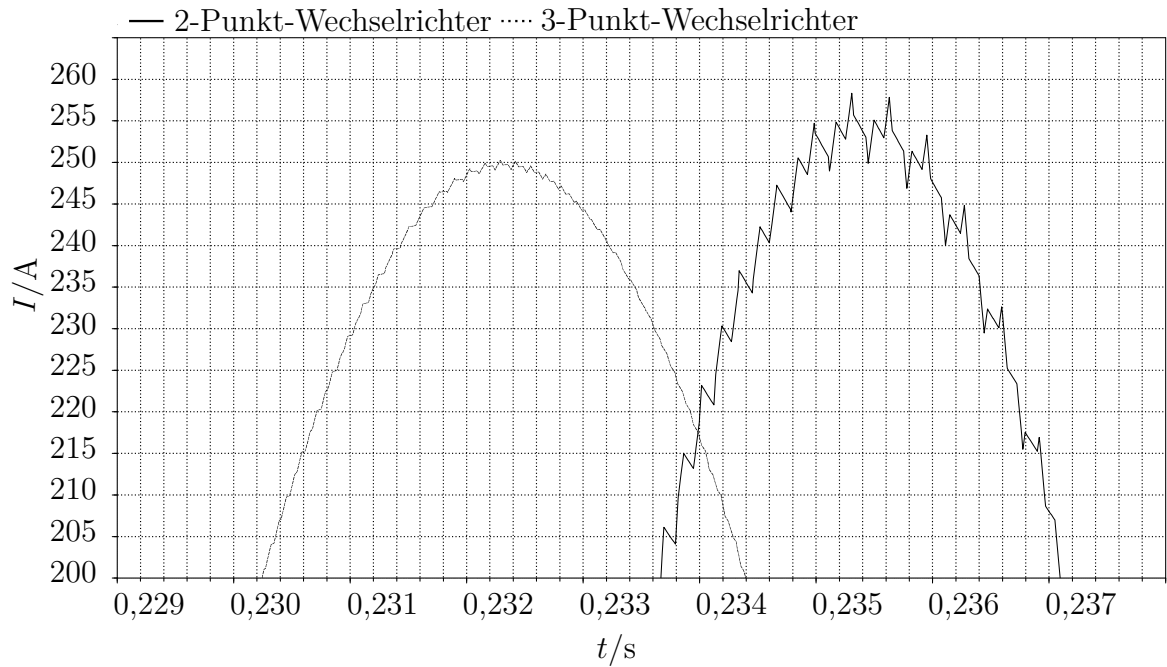


Abb. 5.9: Vergleich der Ausgangsströme eines Zwei- und eines Dreipunktwechselrichters

Die linke Kurve zeigt eine Halbwelle des Ausgangsstroms eines Dreipunktwechselrichters. Die geringere Welligkeit im Vergleich zum Zweipunktwechselrichter ist deutlich zu erkennen.

Auch die Spannungssteigung $\left(\frac{dU}{dt}\right)$ wird bei Einsatz eines Dreipunktwechselrichters verringert, was insbesondere in puncto Wicklungsisolierung der angeschlossenen elektrischen Maschine sowie elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV) zu Vorteilen führt.

Zur Realisierung eines Dreipunktwechselrichters existieren mehrere Möglichkeiten. Am bekanntesten sind der Flying Capacitor Multilevel Converter und der Diode Clamped

Multilevel Converter, welche sich aus der oben gezeigten B6-Schaltung ableiten. Darüber hinaus sind Vollbrückentopologien wie der Cascaded H-bridge Multilevel Converter und der Multilevel H-bridge Converter weit verbreitet [Ras10].

Der **Cascaded H-bridge Multilevel Converter** besteht aus in Reihe geschalteten Vollbrückenmodulen. Durch die Verwendung identischer, standardisierter Module und die daraus resultierende hohe Modulstückzahl ergeben sich Kostenvorteile auf Modulebene. Außerdem können bei dieser Topologie drei Spannungsstufen mit weniger Bauteilen als bei anderen Multilevel Convertern realisiert werden. Allerdings wird für jedes Modul eine eigene, galvanisch getrennte Spannungsquelle benötigt [JSF96]. Somit wären bei einem Straßenfahrzeug mindestens sechs unabhängige Energiespeicher nötig. Dies ist nicht praktikabel, weswegen der Cascaded H-bridge Multilevel Converter in der Vorauswahl von der weiteren Bewertung ausgeschlossen wird.

Der **Flying Capacitor Multilevel Converter** zeichnet sich durch eine glatte, stabile Ausgangsspannung, inhärente Spannungsstabilisierung und die Kontrollierbarkeit der Blindleistungsflüsse aus. Demgegenüber stehen der erhöhte Steuerungsaufwand und die hohe Anzahl an zusätzlich benötigten Kapazitäten. Der Flying Capacitor Multilevel Converter ist voluminöser und teurer als andere Dreipunktwechselrichter, da ein dreiphasiger Wechselrichter insgesamt fünf Kapazitäten benötigt [JSF96].

Der **Diode Clamped Multilevel Converter** (siehe Abbildung 5.10) zeigt ähnliches Verhalten wie der Flying Capacitor Multilevel Converter, kompensiert jedoch dessen hauptsächlichen Nachteil durch die Verwendung von Dioden anstelle der Kondensatoren. Dadurch baut er wesentlich kompakter und ist mit geringerem Aufwand zu fertigen. Er ist folglich stets dem Dreipunktwechselrichter mit Kondensatoren vorzuziehen.

Zusammenfassend gilt, dass Dreipunktwechselrichter für hohe Zwischenkreisspannungen relevant sind. Die derzeitigen automotivetauglichen Leistungshalbleiter sind für Sperrspannungen von 600 V ausgelegt. Auch wenn bereits IGBTs mit einer maximalen Sperrspannung von bis zu 6,5 kV in Industriewechselrichtern im Einsatz sind, sind diese bislang noch nicht für die durch hohe Rüttel- und Schüttelbelastungen geprägte Anwendung im Automobil geeignet und zertifiziert. Aus diesem Grund kann mit Dreipunktwechselrichtern eine deutliche Erhöhung der Zwischenkreisspannung ermöglicht werden. Die Auswirkungen der Zwischenkreisspannungserhöhung auf die Auslegung der Antriebskomponenten werden am Ende dieses Kapitels untersucht.

5.3.3 Bewertungsmodalität

Die direkte Gegenüberstellung von Zwei- und Dreipunktwechselrichtern erfolgt anhand folgender Kriterien: Fahrsicherheit, Akustik, Zuverlässigkeit, Komplexität, Flexibilität und Spannungsqualität.

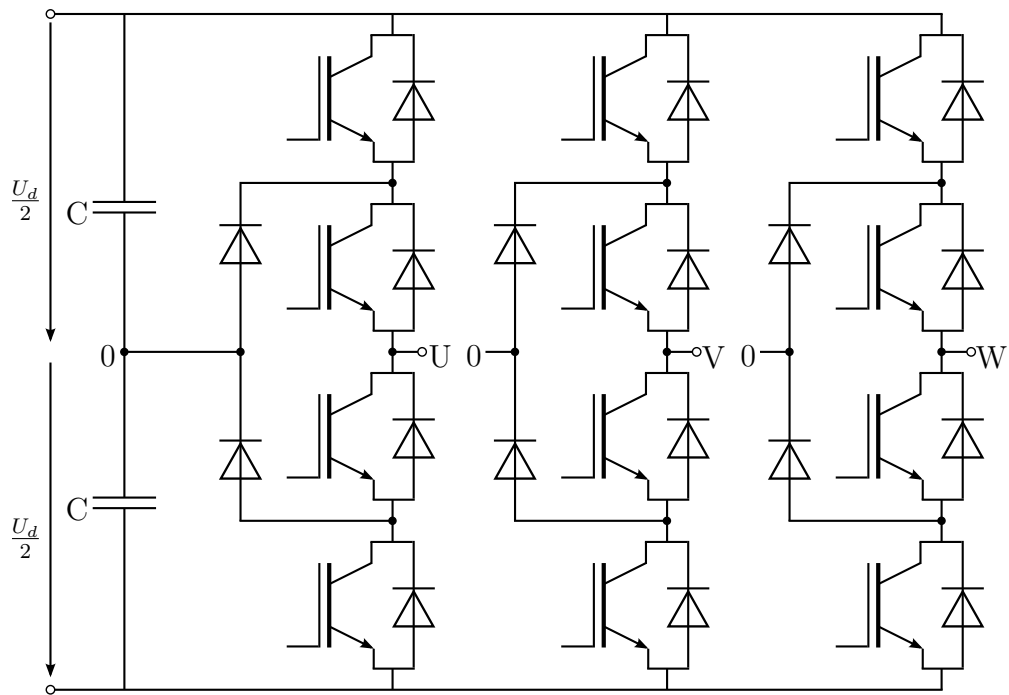


Abb. 5.10: Dreipunktwechselrichter, Diode Clamped

Die konkrete Auslegung sowie die Einbindung ins Gesamtsystem ist für folgende Kriterien zu berücksichtigen: Kosten, Effizienz und benötigter Bauraum.

5.4 Energiespeicher

Zielsetzung dieses Abschnitts ist es aus Systemsicht geeignete Energiespeicher zu identifizieren. Der Lösungsraum ist dabei a priori auf Lithium-Ionen-Speicher und Kondensatoren begrenzt, da diese Techniken derzeit die vielversprechendsten Eigenschaften für die automobilen Anwendung bieten.

Gemäß Anhangskapitel C sind die relevanten Auslegungsgrößen für Speichersysteme Energieinhalt, Leistung und Spannung. Aus Fahrzeugsicht ist die wesentliche Anforderung an eine Zelle eine hohe Energie- und Leistungsdichte. Aus Systemsicht hingegen ist vor allem die Gewährleistung einer stabilen, von äußeren Einflüssen möglichst unabhängigen Klemmenspannung über einen weiten SoC-Bereich von großer Bedeutung. Die Leistungsdichte ist bei aktuellen Kondensatoren und Lithium-Ionen-Zellen hoch genug, um die Anforderungen für einen Automobylantrieb problemlos zu erfüllen. Somit sind die Energiedichte und der Verlauf der Ausgangsspannung die für die Differenzierung und Bewertung kritischen Größen.

Die Energiedichte kann sowohl als gravimetrische als auch als volumetrische Größe ausgedrückt werden. Sie wird in Wh/kg beziehungsweise Wh/dm³ angegeben und gibt Auskunft darüber, welcher Energieinhalt pro Massen- oder Volumeneinheit im Speicher enthalten ist. Ein hoher Wert ist speziell für Elektrofahrzeuge von großer Bedeutung, da hohe Fahrzeugreichweiten bei kleiner Masse und geringem Platzbedarf des Speichers realisiert werden sollen. Derzeit bewegen sich die Energiedichten von serienreifen Zellen in der Größenordnung von bis zu 140 Wh/kg beziehungsweise 350 Wh/dm³ [Sau10].

Diese Werte sind nur als Anhaltswerte zu verstehen und stark von Aufbau und Einsatzzweck der Zelle abhängig. Gemein ist allen Zellen eine signifikant geringere Energiedichte im Vergleich zu Motorenbenzin, welches einen Heizwert von über 11 kWh/kg aufweist. Des Weiteren ist es essenziell, die im Speicher befindliche Energie möglichst gut zu nutzen. Dies bedeutet nicht nur, dass der Wirkungsgrad von Wechselrichter und elektrischer Maschine möglichst hoch sein muss, sondern auch, dass die Energie aus dem Speicher möglichst vollständig entladen werden kann.

Prinzipiell gilt, dass nur ein Teil der physikalisch in der Zelle enthaltenen Energie verwendet werden kann. Dieser Anteil wird als nutzbare Energie bezeichnet. Begrenzt wird diese Energiemenge durch die sinkende Spannung bei Entladung sowie durch die angestrebte Maximierung der Lebensdauer der Zelle. Je geringer die pro Zyklus entnommene Energie, desto höher die Lebensdauer der Zelle. Es ist jedoch sicherzustellen, dass die nutzbare Energie auch wirklich entnommen werden kann. Dies ist beispielsweise dann nicht möglich, wenn die Klemmenspannung der Zelle während des Entladevorgangs zu weit absinkt. Zur Untersuchung dieses Sachverhalts werden nachfolgend die Entladecharakteristika verschiedener Zelltechnologien gegenüber gestellt. Diese Analyse der Ausgangsspannung ist aus Systemsicht von hoher Bedeutung, da die Interaktion zwischen dem Speicher und dem übrigen Antriebssystem über die Spannungsschnittstelle stattfindet. Die Ausgangsspannung hat erheblichen Einfluss auf die Auslegung von Wechselrichter und elektrischer Maschine. Nähere Informationen hierzu sind dem Anhangskapitel C zu entnehmen.

5.4.1 Zelltechnologie

Die Identifikation einer optimalen Zellchemie ist nicht Bestandteil der Aufgabenstellung. Dennoch werden an dieser Stelle einige Überlegungen zu einer aus Systemsicht optimalen Zelltechnologie dokumentiert, da der Verlauf der Ausgangsspannung insbesondere durch die Zelltechnologie der Lithium-Ionen-Zellen bestimmt wird.

Der Begriff Lithium-Ionen-Zellen ist dabei ein Überbegriff für Zellen mit verschiedensten Materialpaarungen. Charakterisiert werden die Zellen dabei durch das verwendete Kathoden- und Anodenmaterial. Weit verbreitete Materialkombinationen für die Kathode sind:

- LiFePO_4
- LiMn_2O_4
- $\text{Li}(\text{Ni},\text{Co})\text{O}_2$
- LiCoO_2
- $\text{Li}(\text{Ni},\text{Co},\text{Mn})\text{O}_2$

Die Anode besteht zumeist aus Graphit. Die maximale Zellspannung wird durch die Wahl der Materialpaarung vorgegeben und resultiert aus den Elektrodenpotentialen der verwendeten Materialien. Der Verlauf der Spannung ist maßgeblich vom Innenwiderstand der Zelle abhängig. Je flacher der Verlauf ist, desto unabhängiger ist die Zwischenkreisspannung vom Zustand der Zelle und desto unproblematischer ist die Auslegung von Wechselrichter und elektrischer Maschine.

Im Idealfall ist die Ausgangsspannung unabhängig vom Zustand der Zelle, also konstant. Eine konstante Zwischenkreisspannung kann auch durch Gleichspannungswandler realisiert werden, siehe Abschnitt 5.4.3.

Beispielhafte Verläufe der open-circuit-Spannungen über dem Ladezustand dieser Zelltechnologien werden in Abbildung 5.11 gegenübergestellt.

Zelltechnologien wie LiFePO_4 zeigen einen sehr flachen Verlauf der Ausgangsspannung über der Entladung. Dies erschwert der Zellüberwachungselektronik den Ladezustand in Abhängigkeit der Spannung zu bestimmen. Dennoch ist dieses Verhalten aus Systemsicht wünschenswert.

Eine eindeutige Empfehlung für eine Zelltechnologie kann an dieser Stelle nicht getroffen werden. Das konkrete Zellverhalten zeigt eine große Abhängigkeit vom Aufbau der Zelle, vom Herstellprozess und somit auch vom Hersteller. Insbesondere durch den Zusatz von Additiven wird das prinzipbedingte Verhalten einer Zellchemie maßgeblich beeinflusst. Diese Inhaltsstoffe werden von den Herstellern in der Regel nicht bekanntgegeben. Somit ist ein detaillierter, objektiver Vergleich der Technologien auf Basis der von Herstellern veröffentlichten Daten nicht möglich.

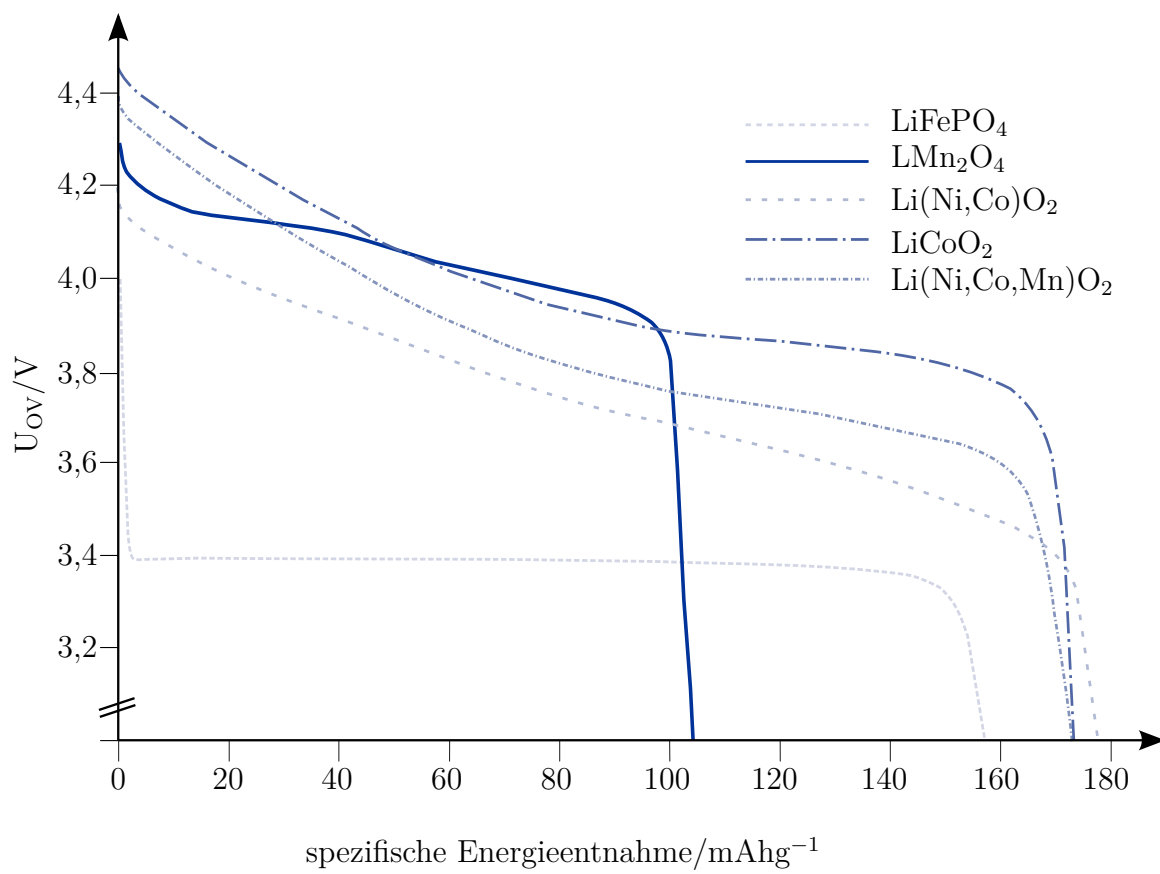


Abb. 5.11: Entladekurven verschiedener Lithium-Ionen-Zellen

5.4.2 Doppelschichtkondensatoren

Doppelschichtkondensatoren zeichnen sich durch eine hohe gravimetrische Leistungsdichte von über 1 kW/kg aus. Allerdings ist ihre volumetrische Energiedichte mit etwa 6-9 Wh/l gegenüber Lithium-Ionen-Zellen stark limitiert. Auch die gravimetrische Energiedichte ist mit etwa 4-6 Wh/kg eingeschränkt [And05], [MB08]. Ihre Vorteile sind im Folgenden zusammengefasst [And05]:

- Hoher Lade- und Entladewirkungsgrad
- Hohe Lade- und Entladerate
- Hohe Zyklenfestigkeit (>300000 Zyklen möglich)
- Geringe Temperaturabhängigkeit der Leistung
- Einsatz kostengünstiger Materialien

Diesen Vorteilen stehen folgende Nachteile gegenüber [And05]:

- Geringe volumetrische Energiedichte
- Hohe Kosten für Energie pro Volumen
- Starke Ladungsabhängigkeit der Spannung
- Hohe Selbstentladerate

Aus diesen Gründen eignen sich Doppelschichtkondensatoren nicht als alleiniger Energiespeicher für elektrische Straßenfahrzeuge. Durch ihre geringe kalendarische und zyklische Alterung sind Sie jedoch als Leistungsspeicher verwendbar.

5.4.3 Speichervarianten

Prinzipiell existieren verschiedenste Möglichkeiten Lithium-Ionen-Zellen mit Kondensatoren und Gleichspannungswandlern zu Speichersystemen zu kombinieren [XQC09]. Entscheidend dabei sind wiederum eine hohe Energiedichte, ausreichende Leistungsfähigkeit und eine möglichst konstante Spannung am Ausgang.

Die Ausgangsspannung von Lithium-Ionen-Zellen ist von vielen Parametern abhängig und stark schwankend. Zur Realisierung einer konstanten Zwischenkreisspannung bietet sich folglich der Einsatz von Gleichspannungswandlern an. Diese ermöglichen eine konstante und hohe Zwischenkreisspannung, was die Auslegung des Speichers vereinfacht. Nicht mehr drei Kriterien (Energieinhalt, Leistung, Spannung) müssen beachtet werden, sondern nur mehr zwei: Energieinhalt und Leistung. Die Spannungslage der Zellen ist durch den Wandler von der Zwischenkreisspannung entkoppelt.

Als Ergebnis einer Vorauswahl erscheinen die nachfolgend beschriebenen Systeme am geeignetsten.

- **Serienschaltung von E-Zellen**

Dies ist die einfachste Form des Speicheraufbaus. Es werden soviele Zellen n_{Zelle} in Reihe geschaltet, dass die Bedingung $U_{\text{ZK}} = U_{\text{Zelle}} \cdot n_{\text{Zelle}}$ erfüllt ist. Da dadurch auch die Leistung und die Energie festgelegt sind, muss bei der Zellauswahl darauf geachtet werden, Zellen zu verwenden, deren P/E-Verhältnis dem Verhältnis der Leistungs- und Energieanforderungen möglichst gut entspricht.

- **Energiezellen mit Gleichspannungswandler in Parallelschaltung mit Supercaps mit Gleichspannungswandler**

Diese Speichervariante ist eine Erweiterung der Vorhergehenden um Supercaps. Die Kondensatoren dienen der Abpufferung von Leistungsspitzen, die Energiezellen der Bereitstellung der nötigen Energie.

Dies ist nur mit einem Wandler zur Spannungsangleichung möglich. Andernfalls kann der Fall eintreten, dass die Energiezellen die Deckung der Leistungsspitzen übernehmen, was den Einsatz von Supercaps obsolet werden lässt. Begründet ist dies durch den Innenwiderstand und die Spannungsfestigkeit der Supercaps. Diese beträgt bei gängigen automotive-tauglichen Modulen etwa 2,5 V, ist also geringer als die Zellspannung der meisten Lithium-Ionen-Zellen. Aus diesem Grund sind zur Bereitstellung der selben Spannungshöhe mehr Supercapzellen in Reihe zu schalten als Lithium-Ionen-Zellen. Da der Innenwiderstand von Supercaps ähnlich dem von Lithium-Ionen-Zellen ist, hat folglich der Supercap-Strang einen höheren Innenwiderstand und eignet sich damit nicht zur Deckung der Leistungsspitzen. Somit ist der Einsatz von Supercaps nur mit nachgeschaltetem Gleichspannungswandler sinnvoll.

Der Vorteil dieser Speichervariante liegt in der Entkopplung der Ausgangsspannung vom Zustand der Zelle, so dass die Zwischenkreisspannung durch die Wandler auf einen konstant hohen Wert geregelt werden. Auch werden die Spitzenströme nicht mehr den Akkumulatoren entnommen, was zu einer höheren zyklischen Lebensdauer dieser Komponente beiträgt. Ist das Ladegerät direkt im Zwischenkreis angeschlossen, kann es aufgrund des Vorhandenseins zweier bidirektionaler Wandler als einfache Diodenbrücke ausgeführt werden.

Nachteilig sind der hohe Aufwand für die beiden Wandler und die hohe Masse beziehungsweise der hohe Bauraumbedarf dieser Variante.

- **Energiezellen mit Gleichspannungswandler in Parallelschaltung mit Leistungszellen**

Bei dieser Variante werden Zellen hoher Energiedichte mit Zellen hoher Leistungsdichte kombiniert. Dabei werden die Leistungszellen direkt in den Zwischenkreis integriert und dienen der Bereitstellung der nötigen Spitzenleistungen. Nachgela-

den wird dieser Pufferspeicher über Zellen hoher Energiedichte. Diese sind über einen Gleichspannungswandler mit dem Zwischenkreis verbunden.

Ein Nachteil ist, dass trotz Einsatz eines Wandlers die Zwischenkreisspannung vom Ladezustand der Leistungszellen abhängt. Es besteht jedoch die Möglichkeit, diese Zellen permanent aus den Energiezellen nachzuladen, so dass der sinkenden Zwischenkreisspannung entgegengewirkt werden kann. Da die Leistungsbereitstellung direkt aus dem Zwischenkreis erfolgt, kann der Gleichspannungswandler für wesentlich kleinere Ströme ausgelegt werden, was zu einem deutlich kompakteren und günstigeren Wandler führt.

- **Leistungszellen mit Gleichspannungswandler in Parallelschaltung mit Energiezellen**

Die direkt mit dem Zwischenkreis verbundenen Energiezellen werden mittels eines Wandlers mit Leistungszellen kombiniert. Hierdurch wird eine Bereitstellung der Leistungsspitzen durch die Leistungszellen, unabhängig von ihrem Ladezustand, ermöglicht. Der Wandler ist dadurch für die höchsten Ströme zu dimensionieren. Trotz Präsenz eines Wandlers ist die Zwischenkreisspannung nicht konstant, sondern wird vom Ladezustand der Energiezellen bestimmt.

- **Energiezellen mit Gleichspannungswandler in Parallelschaltung mit Leistungszellen mit Gleichspannungswandler**

Diese Speichervariante ähnelt der zweiten Variante, beinhaltet aber Leistungszellen anstelle der Kondensatoren. Im Vergleich zur zweiten Variante werden dadurch geringere Innenwiderstandswerte zusammen mit höherem Energiegehalt des Leistungsspeichers realisiert. Es können dadurch Leistungsspitzen über längere Zeiträume gepuffert werden. Durch den Einsatz zweier Wandler ergibt sich auch bei dieser Variante eine freie Aufteilung der Leistungen auf beide Speicher; auch ein Umladen zwischen den Speichern ist möglich. Zudem kann ein im Zwischenkreis angeschlossenes Ladegerät als einfache Diodenbrücke ausgeführt werden. Allerdings führt der Einsatz zahlreicher Komponenten auch zu einer hohen Masse, einem großer Bauraumbedarf und hohen Kosten.

Die in diesem Abschnitt betrachteten Speichervarianten sind prinzipiell alle für den Einsatz in einem Fahrzeug tauglich. Gleichwohl zeigt sich, dass bereits die einfachste Variante – die Serienschaltung von Energiezellen – hinreichend gut für die meisten Einsatzzwecke geeignet ist. Sie führt zum kostengünstigsten und kompaktesten Speichersystem. Die belastungs- und ladezustandsabhängige Ausgangsspannung ist beherrschbar.

Erst mit zunehmender Fahrzeuggröße ist der Einsatz komplexerer Speichersysteme in Erwägung zu ziehen. Bei diesen Fahrzeugen ist hinreichend viel Bauraum zur Integration des Speichersystems vorhanden. Außerdem können die hohen Kosten des Speichersystems bei per se teuren Fahrzeugen leichter toleriert werden.

5.4.4 Bewertungsmodalität

Bei Aspekten, die sich ausschließlich auf den Speicher beziehen und keiner Interaktion mit dem übrigen Antriebssystem unterliegen, erfolgt eine direkte Bewertung. Diese sind: Akustik, Zuverlässigkeit, Komplexität, Flexibilität, nutzbarer Energieinhalt und Spannungsqualität.

In Abhängigkeit der konkreten Auslegung des Systems werden folgende Kriterien bewertet: Kosten, Effizienz und Bauraum.

5.5 Zwischenkreisspannung

Die Zwischenkreisspannung ist keine Komponente, beeinflusst aber die Auslegung und das Verhalten der Antriebskomponenten so maßgeblich, dass sich eine genauere Untersuchung der optimalen Zwischenkreisspannungslage anbietet.

Bei den meisten aktuellen elektrischen Antrieben, wird die Zwischenkreisspannung durch die Sperrspannung der zur Verfügung stehenden Halbleiterventile des Wechselrichters begrenzt. Für die umfangreichen Anforderungen an automotivetaugliche Bauteile sind bislang vor allem Bauteile zertifiziert, welche für eine maximale Sperrspannung von 600 V ausgelegt sind. 1200 V-fähige Bauteile sind derzeit noch nicht ausreichend verfügbar.

Allerdings bieten Dreipunktwechselrichter die Möglichkeit, eine Sperrspannung von 1200 V auch ohne Einsatz von 1200 V-fähigen Bauteilen zu erreichen, wodurch die maximale Zwischenkreisspannung von derzeit etwa 420 V auf über 800 V erhöht werden kann. Zu klären sind die Auswirkungen und die Sinnhaftigkeit einer Erhöhung der Zwischenkreisspannung. Zu diesem Zweck ist die Reaktion aller von der Spannungserhöhung betroffenen Komponenten zu analysieren. Dazu wird im Folgenden aus Gründen der Zweckmäßigkeit angenommen, dass die Zwischenkreisspannung verdoppelt wird.

5.5.1 Folgen für die elektrische Maschine

Es ist davon auszugehen, dass der Wechselrichter so angesteuert wird, dass nicht nur seine Eingangsspannung, sondern auch die Ausgangsspannung erhöht ist. Somit wirkt sich die erhöhte Zwischenkreisspannung auch auf die elektrische Maschine aus. Die Prämissen bei der Maschinenauslegung sind konstante Leistung und unveränderter Blechschnitt bei doppelter eingangsseitiger Spannung. Da hierdurch die eingangsseitigen Ströme gesenkt werden, ist, um das Drehmoment nicht zu beeinflussen, eine Wicklungsanpassung unumgänglich. Diese geschieht über eine Variation der Leiter pro Nut.

Das Drehmoment einer elektrischen Maschine ist der Durchflutungshauptwelle ($\theta_p(t)$), gebildet aus den Durchflutungen des Stators und des Rotors, direkt proportional [MP09]. Die Durchflutungshauptwelle ist wiederum gemäß

$$\hat{\theta}_p(t) = \frac{D}{2p} \hat{A}_p(t) \quad (5.4)$$

dem Strombelag (A) direkt proportional. Dieser berechnet sich unter vereinfachenden Annahmen nach [MP09] zu

$$A = \frac{z_a}{\pi D} i_{zw} = \frac{z_a}{\pi D} \frac{i}{2a}. \quad (5.5)$$

Relevant für die hier notwendigen Betrachtungen ist das Produkt der Leiteranzahl pro Nut (z_a) mit dem Zweigstrom (i_{zw}), welcher in jedem Leiter fließt. Wird die Anzahl der Leiter entsprechend dem sinkenden Strom erhöht, ist dieses Produkt konstant und unabhängig von der Spannung, so dass gilt:

$$z_a \cdot i_{zw} \neq f(U). \quad (5.6)$$

Somit ist der Strom pro Nut unabhängig von der angelegten Spannung. Es lässt sich schlussfolgern, dass das Maschinenverhalten von der erhöhten Spannung nicht beeinflusst wird. Lediglich Windungszahl und Isolationsklasse sind entsprechend anzupassen.

5.5.2 Folgen für den Wechselrichter

Eine erhöhte Spannung bedingt die Verwendung von 1200 V-IGBTs oder die Verwendung von Dreipunktwechselrichtern. Diese werden bereits in Abschnitt 5.3.2 betrachtet. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle die Verwendung von 1200 V-IGBT-Modulen genauer untersucht. Diese IGBTs haben die doppelte maximale Sperrspannung verglichen mit 600 V-IGBT-Modulen. Zum derzeitigen Stand (2012), existieren nur wenige automotivetaugliche Module der 1200 V Technologie. Wichtiges Unterscheidungskriterium aus Systemsicht ist die Höhe der Verluste unterschiedlicher Module.

Nach [WNTR10] treten in leistungselektronischen Schaltungen folgende Verlustarten auf:

- Statische Verluste
 - Durchlassverluste
 - Blockierverluste
- Schaltverluste
- Ansteuerverluste

Dominierend sind die in den Leistungshalbleitern auftretenden Durchlassverluste (P_{fw}) und Schaltverluste (P_{sw}), welche genauer untersucht werden.

Die Durchlassverluste sind abhängig vom Laststrom, der Sperrschichttemperatur und dem Tastverhältnis, also der Einschaltdauer des Halbleiterbauelements im Verhältnis zur Periodendauer.

Schaltverluste sind die primäre Verlustquelle in den meisten IGBTs. Sie sind in Einschaltverluste (P_{on}) und Ausschaltverlust (P_{off}) zu unterteilen, welche vom Laststrom, der Zwischenkreisspannung, der Sperrschichttemperatur und der Schaltfrequenz abhängen. Für die Gesamtverlustleistung eines IGBTs ergibt sich:

$$\begin{aligned}
P_{ges,IGBT} &= P_{fw,IGBT} + P_{sw,IGBT} \\
\text{mit} \\
P_{fw,IGBT} &= \frac{1}{2} \left(\frac{V_{CE0}}{\pi} \cdot \hat{i}_{IGBT} + \frac{r_{CE}}{4} \cdot \hat{i}_{IGBT}^2 \right) + m \cdot \cos\varphi \left(\frac{V_{CE0}}{8} \cdot \hat{i}_{IGBT} + \frac{r_{CE}}{3\pi} \cdot \hat{i}_{IGBT}^2 \right) \\
\text{und} \\
P_{sw,IGBT} &= \frac{1}{\pi} \cdot f_s \cdot \left[E_{on,IGBT} \left(\hat{i}_{IGBT} \right) + E_{off,IGBT} \left(\hat{i}_{IGBT} \right) \right].
\end{aligned} \tag{5.7}$$

Analog ergibt sich für die Gesamtverlustleistung der Freilaufdioden:

$$\begin{aligned}
P_{ges,Diode} &= P_{fw,Diode} + P_{off,Diode} \\
\text{mit} \\
P_{fw,Diode} &= \frac{1}{2} \left(\frac{V_{F0}}{\pi} \cdot \hat{i}_{Diode} + \frac{r_F}{4} \cdot \hat{i}_{Diode}^2 \right) - m \cdot \cos\varphi \left(\frac{V_{F0}}{8} \cdot \hat{i}_{Diode} + \frac{r_F}{3\pi} \cdot \hat{i}_{Diode}^2 \right) \\
\text{und} \\
P_{off,Diode} &= \frac{1}{\pi} \cdot f_s \cdot E_{off,Diode} \left(\hat{i}_{Diode} \right).
\end{aligned} \tag{5.8}$$

Anhand von Modulen mehrerer Hersteller werden die Verlustleistungen von 600 V und 1200 V-IGBT Modulen gegenübergestellt. Dabei werden die Module so ausgewählt, dass sie die gleiche Leistung schalten können. Die 600 V-Module besitzen folglich die doppelte Stromtragfähigkeit der 1200 V-Module. Bei der Berechnung wird ein Modulations- und ein Leistungsfaktor von jeweils 0,8 zugrunde gelegt. Geachtet wird weiterhin darauf, dass die Module möglichst baugleich sind, also aus derselben Produktfamilie stammen und nach Möglichkeit mit identischer IGBT-Technologie arbeiten. Die Ergebnisse der Analyse sind exemplarisch für zwei Hersteller in Abbildung 5.12 und Abbildung 5.13 zu sehen.

Die durchgezogene Linie bezieht sich in beiden Diagrammen auf ein Modul mit einer Sperrspannung von 1200 V, die gestrichelte Linie ist für ein Modul mit einer Sperrspannung von 600 V gültig.

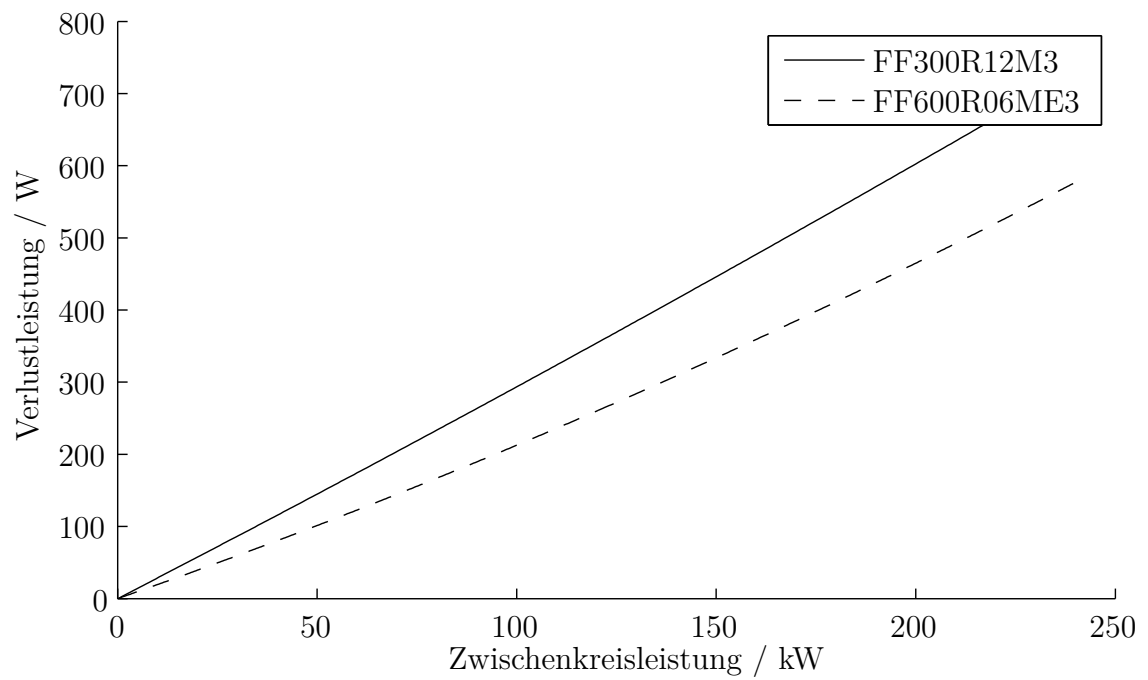


Abb. 5.12: Gesamtverluste von Modulen des Herstellers Infineon

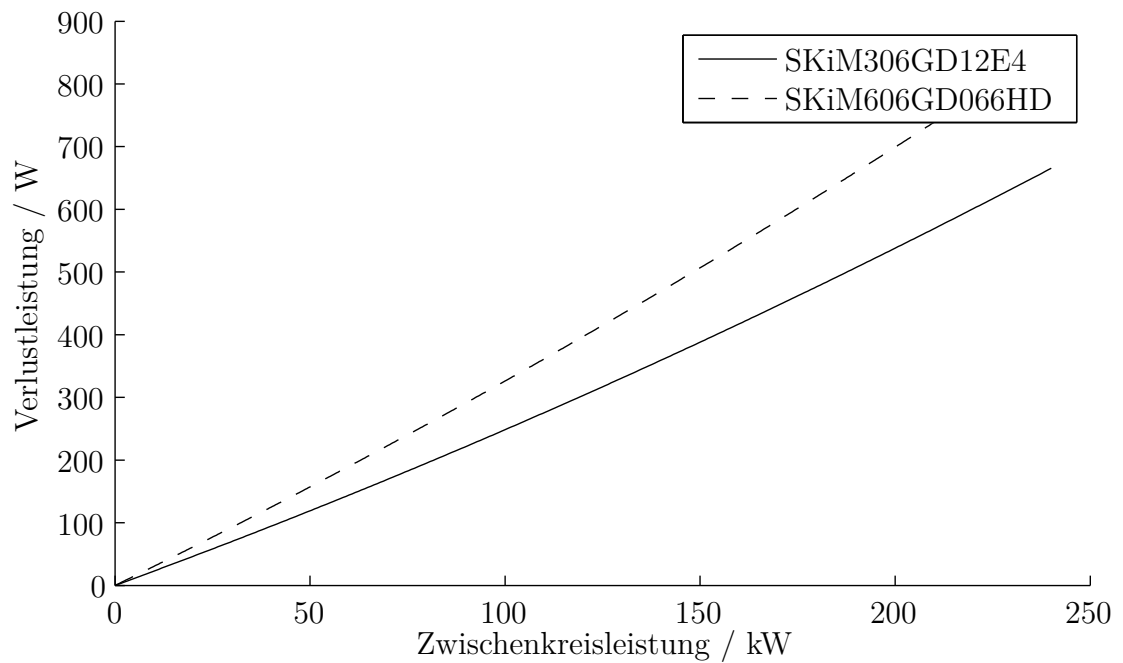


Abb. 5.13: Gesamtverluste von Modulen des Herstellers Semikron

Es zeigt sich, dass die konkrete Auslegung des Herstellers entscheidend ist, welche Spannungsklasse zu geringeren Verlusten führt. Bei dieser Betrachtung kann somit keine allgemeingültige Aussage getroffen werden.

5.5.3 Folgen für den Energiespeicher

Betrachtet man Speichersysteme ohne Gleichspannungswandler, so ist für die Verdopplung der Ausgangsspannung auch die doppelte Anzahl an Zellen in Reihe zu schalten. Dies führt zu einem erhöhten Aufwand seitens der Zellbalancierung und der Verbindungstechnik. Da bei doppelter Zellanzahl die Zellkapazität halbiert werden kann, ergibt sich ein ungünstigeres Verhältnis von aktiver Masse zur Gesamtmasse der Zellen beziehungsweise zur Gesamtmasse des Speichers. Bei in Summe gleichem Energieinhalt des Speichers führt dies zu einem größeren, schwereren und teureren Speicher.

5.5.4 Weitere Folgen

Die Stromtragfähigkeit von Kabeln ist vom verwendeten Material, nicht von der Spannung abhängig. Bei konstanter Leistung ergibt sich gemäß der bekannten Formel $P = U \cdot I$, dass aus einer steigenden Spannung ein verminderter Strom resultiert. Der Querschnitt des leitenden Materials, meist Kupfer oder Aluminium, kann folglich proportional zur Stromstärke verringert werden. Dennoch sinkt der Gesamtkabelquerschnitt nur unterproportional, da die Isolierung für eine höhere Durchschlagfestigkeit und somit dicker auszulegen ist.

Betrachtet man die weiteren Komponenten des elektrischen Systems, fällt auf, dass auch der DC/AC-Wandler für den elektrischen Kältemittelverdichter sowie der DC/DC-Wandler für das Niederspannungsbordnetz auf die höhere Zwischenkreisspannung auszulegen sind. Auch hier sind folglich aufwändigere Schaltungstopologien oder der Einsatz von automotivezertifizierten MOSFETs vorzusehen.

5.5.5 Fazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Vorteile einer Spannungsverdopplung derzeit kleiner als erwartet sind. Erst mit der Marktreife automotivetauglicher 1200 V Bauelemente und somit der Möglichkeit des Einsatzes des günstigeren Zweipunktwechselrichters kann die Spannungserhöhung in Summe vorteilhaft sein.

5.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden alle Techniken für Speicher, Wechselrichter und elektrische Maschinen vorgestellt, welche sich für die Bildung elektrischer Antriebe als sinnvoll erweisen. Die Eigenschaften dieser Techniken werden in Bezug auf die Anforderungen an einen Fahrzeugantrieb untersucht, geeignete Techniken werden herausgearbeitet. Diese werden mit den Topologien aus Kapitel 4 zu Antriebssystemen kombiniert und mit der in Kapitel 3 vorgestellten Methodik bewertet. Die Ergebnisse dieser Bewertung werden im folgenden Kapitel anhand von Beispielfahrzeugen aufgezeigt und diskutiert.

6 Ergebnisse

Nach der Beschreibung der Durchführung aller Analysen und Berechnungen in den vorhergehenden Kapiteln erfolgt nun die Präsentation der Ergebnisse. Dazu werden exemplarisch die am besten geeigneten Systeme dreier Fahrzeugklassen genannt. Im Anschluss daran werden diese Ergebnisse hinsichtlich ihrer Plausibilität und Güte diskutiert.

6.1 Ergebnisse der Bewertung

Prinzipiell eignet sich die Methodik zur Bewertung batterieelektrischer Straßenfahrzeuge beliebiger Fahrzeugklassen. Zur Veranschaulichung werden im Folgenden drei Fahrzeugklassen mit jeweils unterschiedlichen Anforderungen ausgewählt. Diese sind repräsentativ für derzeit erhältliche Elektrofahrzeuge. Für jede dieser Klassen werden anhand der an sie gestellten Anforderungen und Fahrzeugrandbedingungen – vergleiche Abschnitt 2.4 – alle in Frage kommenden Fahrzeugantriebssysteme ausgelegt und an die Bewertungsmethodik übergeben. Das Endergebnis der Bewertung ist eine Punktzahl für jedes Antriebssystem.

Hieraus wird eine geordnete Liste aller betrachteten Systeme erstellt. Die gerundeten Ergebnisse der zehn jeweils am besten geeigneten Systeme werden nachfolgend präsentiert. Dabei kommen Tabellen zum Einsatz, welche sowohl Auskunft über die Zusammensetzung der Systeme geben als auch die Bewertung beinhalten.

Jedes System setzt sich aus einem Antrieb an der Vorderachse und/oder einem Antrieb an der Hinterachse zusammen, welche mit einem gemeinsamen Energiespeicher (ES) verbunden sind. Diese Achsantriebe werden wiederum anhand der Antriebsart (AA) und der eingesetzten Komponententypen Getriebe, elektrische Maschine (EM) und Wechselrichter (WR) unterschieden.

Zur Ermöglichung einer detaillierten Diskussion werden exemplarisch für eine Fahrzeugklasse außerdem die am wenigsten geeigneten Systeme gezeigt.

6.1.1 Fahrzeugklasse „klein“

Ein Fahrzeug der Fahrzeugklasse „klein“ entspricht einem Kleinwagen aus dem B-Segment.

Tab. 6.1: Top 10 Systeme für die Fahrzeugklasse „klein“

Vorderachse				Hinterachse				ES	Bew
AA	Getriebe	EM	WR	AA	Getriebe	EM	WR		
C	1	SSM	2P	-	-	-	-	E-Zellen	63
-	-	-	-	C	1	SSM	2P	E-Zellen	62
C	1	IPM	2P	-	-	-	-	E-Zellen	62
C	1	SSM	3P	-	-	-	-	E-Zellen	61
-	-	-	-	C	1	IPM	2P	E-Zellen	61
-	-	-	-	C	1	SSM	3P	E-Zellen	61
C	1	ASM	2P	-	-	-	-	E-Zellen	61
-	-	-	-	C	1	ASM	2P	E-Zellen	60
C	1	IPM	3P	-	-	-	-	E-Zellen	60
-	-	-	-	C	1	SSM	2P	E+DC SC+DC	60

Tab. 6.2: Schlechteste Systeme für die Fahrzeugklasse „klein“

Vorderachse				Hinterachse				ES	Bew
AA	Getriebe	EM	WR	AA	Getriebe	EM	WR		
H	D	PSM	3P	H	1	PSM	2P	E+DC P+DC	23
H	1	PSM	3P	H	D	PSM	3P	E+DC P+DC	23
H	D	PSM	3P	H	1	PSM	3P	E+DC P+DC	23

6.1.2 Fahrzeugklasse „mittel“

Ein Fahrzeug der Fahrzeugklasse „mittel“ entspricht einem Kompaktwagen aus dem C-Segment.

Tab. 6.3: Top 10 Systeme für die Fahrzeugklasse „mittel“

Vorderachse				Hinterachse				ES	Bew
AA	Getriebe	EM	WR	AA	Getriebe	EM	WR		
-	-	-	-	C	1	SSM	2P	E-Zellen	62
-	-	-	-	C	1	ASM	2P	E-Zellen	62
C	1	SSM	2P	-	-	-	-	E-Zellen	62
C	1	ASM	2P	-	-	-	-	E-Zellen	62
-	-	-	-	C	1	IPM	2P	E-Zellen	61
C	1	IPM	2P	-	-	-	-	E-Zellen	61
-	-	-	-	C	1	SSM	3P	E-Zellen	60
-	-	-	-	C	1	ASM	3P	E-Zellen	60
C	1	SSM	3P	-	-	-	-	E-Zellen	60
-	-	-	-	C	1	ASM	2P	E+DC SC+DC	60

6.1.3 Fahrzeugklasse „groß“

Ein Fahrzeug der Fahrzeugklasse „groß“ entspricht einem Wagen der oberen Mittelklasse aus dem E-Segment.

6.2 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse zu diskutieren bedeutet sowohl die Sinnhaftigkeit der Ergebnisse kritisch zu hinterfragen, als auch die Aussagegüte der ermittelten Ranglisten hinsichtlich Genauigkeit und Stabilität zu überprüfen.

6.2.1 Plausibilitätsanalyse

Die Ergebnisse erscheinen für alle Fahrzeugklassen stimmig. Es ist plausibel, dass technisch stabile und vergleichsweise günstige Systeme gut abschneiden. Außerdem sind durchwegs Systeme mit hohem Gesamtwirkungsgrad auf den vorderen Plätzen zu finden. Angesichts des äußerst kostspieligen Speichers ist auch dies nachvollziehbar.

Tab. 6.4: Top 10 Systeme für die Fahrzeugklasse „groß“

Vorderachse				Hinterachse				ES	Bew
AA	Getriebe	EM	WR	AA	Getriebe	EM	WR		
-	-	-	-	C	1	SSM	2P	E-Zellen	59
-	-	-	-	C	1	ASM	2P	E-Zellen	59
-	-	-	-	C	1	ASM	2P	E+DC SC+DC	58
-	-	-	-	C	1	SSM	2P	E+DC SC+DC	58
-	-	-	-	C	1	IPM	2P	E-Zellen	57
-	-	-	-	C	1	SSM	3P	E-Zellen	57
-	-	-	-	C	1	ASM	3P	E-Zellen	57
-	-	-	-	C	1	ASM	3P	E+DC SC+DC	57
-	-	-	-	C	1	IPM	2P	E+DC SC+DC	57
-	-	-	-	C	1	SSM	3P	E+DC SC+DC	57

Nachfolgend werden die Ergebnisse hinsichtlich aller Systembestandteile betrachtet.

Antriebsart: Auf den vorderen Plätzen befinden sich ausschließlich Zentralantriebe als Einzelachsanantriebe. Diese sind demnach in allen Szenarien ausreichend zur Gewährleistung der geforderten Fahrleistungen. Während bei den kleineren Fahrzeugen sowohl Vorderachsanantriebe als auch Hinterachsanantriebe eingesetzt werden können, sind aufgrund der hohen Beschleunigungsanforderungen der Fahrzeugklasse „groß“ allein Hinterachsanantriebe zielführend.

Einzelachs-Zentralantriebe sind vergleichsweise einfach aufgebaut, robust und kostengünstig.

Allradantriebe hingegen sind aufwendig und kostenintensiv, da mehrere Maschinen und Wechselrichter einzusetzen sind. Aus diesem Grund sind auch Zentralantriebe, bei ansonsten gleichem Systemaufbau, stets Tandemantrieben vorzuziehen. Tandemantriebe schneiden auch deswegen schlecht ab, da sie kaum Vorteile gegenüber Zentralantrieben besitzen. Die von ihnen ermöglichte separate Ansteuerung der Räder ist zur Erfüllung der Fahranforderungen von Stadtfahrzeugen nicht erforderlich.

Darüber hinaus liegen Tandemantriebe bezüglich Platzbedarf, Masse und Kosten auf dem Niveau eines Allradantriebes mit zwei zentralen Einzelachsanantrieben, ohne dessen Vorteile bezüglich Traktion zu besitzen.

Radnabenantriebe wiederum sind zum derzeitigen Stand der Technik nicht ausgereift genug, um eine konkurrenzfähige Alternative darzustellen.

Elektrische Maschinen: Gut geeignete elektrische Maschinen sind die IPM und die SSM, da sie die beiden zentralen Fahrzeuganforderungen – hoher Wirkungsgrad und großer Feldschwäcbereich – am besten erfüllen. Die ASM ist aufgrund ihrer vergleichsweise niedrigen Kosten interessant, liegt aber bezüglich der Drehmomentdichte hinter IPM und SSM.

Durch den erhöhten Bauraumbedarf – auch des zugehörigen Wechselrichters – eignet sie sich vor allem dann, wenn genug Raum im Fahrzeug vorhanden ist, wie dies bei größeren Fahrzeugen der Fall ist. Anzumerken ist außerdem, dass die ASM in Kombination mit einem Zweiganggetriebe vielversprechende Resultate zeigt. Grund ist die prinzipbedingte ungünstige Lage des Bereichs besten Wirkungsgrades bei hohen Drehzahlen. Durch eine alternative Übersetzung können die Punkte des größten Energieumsatzes im Zyklus und die Punkte höchsten Wirkungsgrades der ASM zur Überdeckung gebracht werden.

Am schlechtesten schneidet durchweg die PSM ab. Durch ihren kleinen Feldschwächbereich ist sie zur Erfüllung der Fahranforderungen stark überzudimensionieren, was in einem nicht mehr konkurrenzfähigen Antriebssystem resultiert. Auch der Einsatz eines Zweiganggetriebes führt zu keinen befriedigenden Ergebnissen.

Getriebe: Erwartungsgemäß dominieren Einganggetriebe. Dies ist durch die Vorgehensweise bei der Komponentenauslegung begründbar. Da alle elektrischen Maschinen gezielt auf minimalen Energieumsatz in den Bewertungszyklen ausgelegt werden, kann mit einem Zweiganggetriebe nur noch eine marginale Verbesserung erreicht werden. Würden nicht speziell ausgelegte Maschinen in die Betrachtung mit einfließen, so würde der Einsatz von Zweiganggetrieben mehr Sinn ergeben.

Direktantriebe schneiden generell am schlechtesten ab. Dies ist bedingt durch ihre hohe Masse und ihren geringen Wirkungsgrad.

Wechselrichter: Zweipunktwechselrichter sind generell Dreipunktwechselrichtern vorzuziehen. Auch dies ist plausibel, da bei der gegebenen Zwischenkreisspannung von maximal 400 V ein Zweipunktwechselrichter zur Anforderungserfüllung vollumfänglich ausreichend ist. Erst ab höheren Spannungen sind Dreipunktwechselrichter verstärkt in Erwägung zu ziehen. Gleichwohl ist in den Ergebnistabellen erkennbar, dass Systeme mit Dreipunktwechselrichter vordere Plätze belegen. Es ist weiterhin zu sehen, dass jedes System mit Dreipunktwechselrichter hinter einem ansonsten identischen System mit Zweipunktwechselrichter platziert ist. Der Zweipunktwechselrichter ist also stets zu präferieren. Das gute Abschneiden der Systeme mit Dreipunktwechselrichter ist der numerischen Bewertung geschuldet. Da diese Systeme nur minimal schlechter als Systeme mit Zweipunktwechselrichter sind, sind sie numerisch betrachtet in Summe besser als Systeme mit komplett abweichendem Aufbau.

Energiespeicher: Gerade bei dieser kostenintensiven Komponente und dem hohem Preisdruck auf Seiten des Fahrzeugherstellers ist zu erwarten, dass möglichst einfache Speichertopologien, wie die reine Serienschaltung von E-Zellen, auf den vorderen Rängen zu finden sind. Dies ist über alle Fahrzeugklassen hinweg der Fall. Von den komplexeren Speichertopologien ist das System mit zwei Gleichspannungswandlern und Supercaps auf den vorderen Plätzen zu finden. Diese Variante bietet die beste Funktionalität aller Speichertopologien. Ist der Mehrpreis tragbar, was insbesondere bei größeren Fahrzeugen der Fall ist, so ist ihr Einsatz erwägenswert. Bei ansonsten gleichem Aufbau ist allerdings stets das Antriebssystem mit in Serie geschalteten Energiezellen zu präferieren. Das Auftauchen der komplexen Speichertopologie unter

den geeignetsten Systemen beruht auf den gleichen numerischen Gesetzmäßigkeiten wie beim Dreipunktwechselrichter und ist durch den Anwender stets zu berücksichtigen.

Die ungeeignetsten Systeme sind für alle Fahrzeugklassen durchwegs Systeme mit Allradantrieb, Radnabenmotoren und/oder Direktantrieb sowie komplexen Energiespeichertopologien. Dies ist bedingt durch die hohen Kosten des Speichersystems sowie den niedrigen Wirkungsgrad und die hohe Masse der Direktantriebe, beziehungsweise der technisch aufwändigen Integration der elektrischen Maschinen in die Felge. Außerdem ist der Trend festzustellen, dass die Verwendung von Synchronmaschinen mit an der Rotoroberfläche angebrachten Magneten zu einem schlechten Abschneiden des Systems führt. Dies lässt sich auf die hohen Kosten und den zu kleinen Feldschwäcbereich dieser Maschinenart zurückführen.

Generell kann die Aussage getroffen werden, dass komplexe Allradtopologien mit mehreren Maschinen zur Anforderungserfüllung bei alltagstauglichen Straßenfahrzeugen nicht erforderlich sind. Solche komplexen Topologien ergeben nur bei Fahrzeugen mit hohen Querdynamikanforderungen, wie beispielsweise Rennfahrzeugen, Sinn. Komplexe Topologien sind demnach nur für Sonderanwendungen vorteilhaft. Die Bedarfe der Volumenhersteller sind bereits durch vergleichsweise einfach aufgebaute Systeme problemlos erfüllbar.

6.2.2 Ergebnisgenauigkeit

Die Methodik basiert auf dem Prinzip einer gewichteten Punktevergabe. Somit ist das Ergebnis rein numerischer Natur. Jedem System wird durch die Bewertung final genau ein Punktwert zugeordnet. Je höher dieser Wert, umso geeigneter ist das System zur Erfüllung der Systemanforderungen.

Bei der Auswertung der Ergebnisse ist zu beachten, dass durch die Art des Ergebnistyps Scheingenauigkeiten entstehen. Unabhängig von der Methodik gilt, dass die Ergebnisgenauigkeit durch die Genauigkeit der Eingangsgrößen determiniert wird. Da im konkreten Fall die ungenauesten Eingangsgrößen ganzzahlige Zahlen sind, kann das Ergebnis folglich nicht exakter ausfallen, weswegen alle Resultate gerundet dargestellt werden. Trotz gleicher Punktbewertung mehrerer Systeme ergibt sich in den oben abgebildeten Listen dennoch dadurch eine Ordnung, dass die Methodik intern mit höherer Genauigkeit arbeitet.

Gleichwohl ist die Absolutheit dieser Ordnung stets zu überprüfen. Ausgangspunkt dieser Arbeit ist der Wunsch, bereits in einer frühen Phase der Fahrzeugentwicklung, also bei hoher Ungenauigkeit der Eingangsparameter, Tendenzen bezüglich der prinzipiellen Eignung verschiedener Antriebsvarianten ermitteln zu können. Dieser Sachverhalt ist bei der Auswertung der Ergebnisse zwingend zu berücksichtigen.

Durch die numerische Betrachtung von Systembestandteilen, welche in einigen Fällen

nicht miteinander im Zusammenhang stehen, können sich Rangfolgen ergeben, welche zwar theoretisch richtig sind, in der Praxis dennoch hinterfragt werden sollten. So ist es beispielsweise nicht immer allgemeingültig beantwortbar, ob, ausgehend von einem vorhandenen System, ein Wechsel bei der elektrischen Maschine oder ein Wechsel beim Speichersystem vorteilhafter für das Gesamtsystem ist, da beide Komponenten nur schwach miteinander interagieren.

Generell ist eine numerische Differenzierung zweier Systeme in Höhe von einem oder zwei Punkten nicht hinreichend hoch, um eine zuverlässige Aussage darüber treffen zu können, welches dieser Systeme besser geeignet ist. Vielmehr ist die Ergebnisliste als erste, grobe Sortierung aller Systeme zu verstehen. Es ist davon auszugehen, dass sich das am besten geeignete System innerhalb der vorderen Plätze befindet. Dennoch ist in konkreten Fahrzeugentwicklungsprojekten für die endgültige Systemauswahl jedes dieser Systeme nochmals eingehend zu prüfen. Dies ist allein schon deswegen erforderlich, da nicht alle praxisrelevanten Randbedingungen, wie beispielsweise firmenstrategische Aspekte, in einer objektiven Methodik abgebildet werden können.

6.2.3 Sensitivitätsanalyse

Wie bereits in Kapitel 3 geschildert, ist einmalig eine umfangreiche Sensitivitätsanalyse durchzuführen. Dies stellt sicher, dass wesentliche Erkenntnisse auch bei Schwankungen und Ungenauigkeiten in den Eingangsdaten valide sind. Außerdem kann so geprüft werden, ob die Bewertungskriterien und Gewichtungen sinnvoll gewählt sind. Sinnvoll bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Bewertungskriterien überdeckungsfrei gewählt sind, alle Bewertungskriterien Einfluss auf das Ergebnis haben und kein Kriterium allein das Endergebnis bestimmt.

Die Analyse wird durch Variation der Eingangsdaten und Überwachung der daraus resultierenden Änderungen in der Ergebnisliste durchgeführt.

Die Variation der Eingangsdaten erstreckt sich dabei sowohl auf die Bewertungen als auch auf die Gewichtungen. Variiert werden die Eingangsgrößen dabei sowohl einzeln als auch in Kombination. Da dieser Vorgang für eine manuelle Durchführung zu komplex ist, wird die Sensitivitätsanalyse softwaregestützt durchgeführt.

Konkret werden einzelne oder mehrere Bewertungen und Gewichtungen um bis zu $\pm 20\%$ variiert. Dadurch sind die Fälle ungenauer Eingangsdaten abgedeckt. Außerdem werden einzelne Bewertungskriterien testweise nicht betrachtet. Dies dient zur Sicherstellung des Einflusses der Kriterien auf das Endergebnis.

Mit diesen modifizierten Eingangsdaten werden die Systeme jeweils bewertet und mit dem ursprünglichen Ergebnis verglichen. Das Resultat dieser Betrachtung ist eine Auflistung, um wie viele Plätze sich die einzelnen Systeme in der Ergebnisliste verändern.

Es zeigt sich, dass kein Parameter das Ergebnis allein dominiert, sondern alle Einfluss auf das Ergebnis haben.

Von besonderem Interesse sind die Verschiebungen in der Ergebnisliste bei Variation der Eingangsdaten. Das Bewertungsergebnis ähnlicher Systeme reagiert bei Variationen der Eingangsdaten in ähnlicher Weise, was ein Beleg für eine technisch sinnvolle Programmierung ist.

Bei einer Variation einer oder weniger Bewertungen um wenige Prozentpunkte behält das Endergebnis seine Stabilität. Bei stärkeren Variationen eines Kriteriums ergeben sich Änderungen in der Reihenfolge von wenigen Plätzen.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass das Endergebnis bei Ungenauigkeiten in den Eingangsdaten weitgehend stabil ist. Die Erkenntnisse führen allerdings zu dem Schluss, dass aufgrund dieser Ungenauigkeiten, eine exakte Differenzierung in der Ergebnisliste nicht darstellbar ist. Die Ergebnisliste dient folglich zum Aufzeigen von Tendenzen.

6.2.4 Verifikation der Ergebnisse

In den vorangegangenen Schritten wird die Methodik auf etwaige systematische beziehungsweise technische Fehler geprüft. Darüber hinaus ist jedoch auch das Bewertungsergebnis an sich zu prüfen.

Dies ist wissenschaftlich nicht komplett durchgängig durchführbar, da es dazu einer zweiten Methodik bedürfte, welche mit exakt denselben Eingangsparametern und derselben Zielsetzung wie die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik operiert.

Es kann jedoch überprüft werden, ob die Systeme, welche im Rahmen dieser Arbeit als „optimal“ identifiziert werden, auch in realen Fahrzeugen eingesetzt werden. Dies ist keine ideale Verifikation, da nicht sichergestellt werden kann, dass Fahrzeughersteller stets aus Kundensicht optimale Systeme verwenden. Der Auswahlprozess ist in der Realität weitaus komplexer und umfangreicher. So werden in dieser Arbeit beispielsweise firmenstrategische Aspekte genauso wenig abgebildet wie der Einfluss von Baukastenlösungen, also die Nutzung von Systemen, welche unter Umständen für ein Fahrzeug nicht optimal sind, aber dafür einen guten Kompromiss für die Nutzung in mehreren Fahrzeugen darstellen.

Es ist dennoch anzunehmen, dass Fahrzeughersteller nur dann wettbewerbsfähig sind, wenn sie ausgereifte und auf den Kunden zugeschnittene Produkte anbieten. Dazu zählt auch der Einsatz sinnhafter Fahrzeugantriebssysteme. Weiterhin ist davon auszugehen, dass die durchdachtesten Konzepte die höchsten Absatzzahlen aufweisen.

Im Jahre 2011 wurden laut der offiziellen Zulassungsstatistik des Kraftfahrt-Bundesamts in Deutschland 2154 batterieelektrische Personenkraftwagen neu zugelassen [KB11]. Die zulassungstärksten Fahrzeuge sind der Mitsubishi I-MIEV mit 683 zugelassenen Exemplaren, der Smart ForTwo Electric Drive mit 287 Fahrzeugen, der Peugeot iOn mit 208 Stück und der mit dem I-MIEV und dem iOn baugleiche Citroën C-Zero mit 201 Stück.

Die Fahrzeugparameter dieser Fahrzeuge wie Masse und Frontfläche sind durch die Hersteller veröffentlicht. Somit kann die Bewertungsmethodik verwendet werden, um optimale Antriebe für diese Fahrzeuge zu identifizieren und mit den tatsächlich eingesetzten Antrieben zu vergleichen.

Diesen Fahrzeugen gemein ist die Verwendung eines Einachsantriebs mittels Zentralantrieb, Einganggetriebe und einer permanenterregten Synchronmaschine sowie die Verwendung von Lithium-Ionen-Zellen. Über die Art der eingesetzten Wechselrichter liegen keine Informationen vor.

Durch die Bewertungsmethodik werden als optimale Systeme für diese Fahrzeugklasse Zentralantriebe an einer Achse mittels Eingangetriebe und einer elektrischen Maschine ermittelt, vergleiche Tabelle 6.1. Dies stimmt mit den Antrieben der absatzstärksten Elektrofahrzeuge auf dem deutschen Markt überein und kann als Indiz für eine funktionsfähige Methodik gewertet werden.

6.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden für drei unterschiedliche Fahrzeugklassen optimale Systeme präsentiert und diskutiert. Es zeigt sich, dass mehrere Antriebssysteme zur Anforderungserfüllung prinzipiell geeignet sind. In den meisten Fällen sind bereits vergleichsweise einfache Systeme ausreichend. Hochkomplexe Systeme sind oftmals überdimensioniert und teuer beziehungsweise zu fehleranfällig.

Darüber hinaus kann durch Plausibilitätsanalysen, Sensitivitätsanalysen und Vergleiche mit der aktuellen Zulassungsstatistik eine hohe Validität der Methodik festgestellt werden. Dennoch kann die Entscheidung für oder gegen ein Antriebssystem nicht allein von einer Methodik getroffen werden, sondern bedarf stets der kritischen Betrachtung des Anwenders. Dies wird im folgenden Schlusskapitel nochmals thematisiert.

7 Resümee und Ausblick

Ziel dieser Arbeit ist die Identifizierung idealer Antriebe batterieelektrischer Personenkraftfahrzeuge hinsichtlich feststehender Randbedingungen und Anforderungen. Dazu werden dem Stand der Technik entsprechende Antriebssysteme, bestehend aus elektrischen Maschinen, Getrieben, Wechselrichtern und Energiespeichern, gebildet und hinsichtlich Kundenanforderungen ausgelegt. Zur Bewertung der Eignung dieser Antriebssysteme wird eine neuartige Bewertungsmethodik entworfen. Diese ermöglicht es, für jede Kombination der 13 definierten Bewertungskriterien optimale Systeme zu identifizieren. Die Kriterien sind dabei so gewählt, dass sie alle relevanten Aspekte des Antriebssystems überschneidungsfrei erfassen.

Der Aufbau der Methodik ermöglicht die Berücksichtigung aller relevanten Interaktionen der Komponenten untereinander sowie der Interaktionen der Techniken mit der Topologie. Dadurch wird das resultierende systemische Verhalten jedes Antriebes erfasst. Dies stellt eine Erweiterung bis dato bekannter Bewertungsschemata dar.

Zudem ist es durch eine ausgeprägte Modularität des Bewertungsschemas möglich, auf künftige technologische Entwicklungen durch Integration neuer Technologien zu reagieren. Somit wird auch ein Vergleich potentiell geeigneter mit bereits industrialisierten Technologien ermöglicht.

Die Objektivität des Vergleichs wird durch die Herausarbeitung der prinzipbedingten Charakteristika der Komponenten und der Minimierung herstellerspezifischer Einflüsse sichergestellt. Dies beinhaltet die Erstellung und Verwendung generischer Komponentenmodelle. Gleichwohl ermöglicht die Methodik auf Grund ihrer Fähigkeit zur Integration spezifischer Komponentendaten auch den gezielten Vergleich konkreter Komponenten.

Das Resultat der Bewertung ist eine nach Eignung geordnete Liste aller betrachteten Antriebssysteme für das jeweils zu untersuchende Fahrzeug. Speziell für Fahrzeuge im intraurbanen Einsatz, dem Hauptanwendungsgebiet batterieelektrischer Mobilität, zeigt sich, dass vergleichsweise einfach aufgebaute Systeme zur Anforderungserfüllung ideal geeignet sind. So sind Einzelachsantriebe mit einfach untersetzten Synchronmaschinen, gespeist aus einem Speichersystem, bestehend aus einer Serienschaltung von Energiezellen, in den meisten Fällen die bevorzugte Lösung. Erst bei zunehmender Fahrzeugmasse und bei hohen Anforderungen an die Querdynamik ist der Einsatz von komplexeren Antrieben mit erweiterter Funktionalität in Betracht zu ziehen.

Die Anwendbarkeit der Methodik in der Praxis wird durch ein im Rahmen der Arbeit erstelltes Computerprogramm gewährleistet. Mit Hilfe dieses einfach zu bedienenden Programms kann die Methodik künftig Entwicklungsingenieure bereits in einer frühen Phase des Fahrzeugentwicklungsprozesses bei der Beurteilung neuer Fahrzeuge durch Objektivierung des Vergleichs verschiedener Antriebssysteme unterstützen.

Als nächster Schritt ist die Integration eines Optimierungsverfahrens in das Programm vorstellbar. Hierdurch wird eine weitere Expansion des Lösungsraums beherrschbar. Zusätzliche Elemente im Lösungsraum ergeben sich beispielsweise durch eine Variation der Systemleistung ausgehend von der zur Anforderungserfüllung optimalen Leistung. Es ist denkbar, trotz einer geringfügigen Anforderungsverfehlung ein technisch besser geeignetes System identifizieren zu können.

Außerdem ist eine Untersuchung der idealen Aufteilung der Achsleistungen bei Allradantrieben denkbar. Die Resultate dieser Arbeit zeigen klar, dass ein Einzelachsantrieb in den meisten Anwendungsszenarien für alle betrachteten Fahrzeugklassen optimal ist. Aus diesem Grund wird eine vertiefte Betrachtung der Allradantriebe nicht weiter verfolgt, die Antriebsleistungen werden stets gleichmäßig auf beide Achsen aufgeteilt. Für sehr schwere oder sportliche Fahrzeuge ist der Allradantrieb allerdings eine vielversprechende Alternative. Hier ist noch weiteres Optimierungspotenzial durch unterschiedliche Systemleistungen an Vorder- respektive Hinterachse denkbar.

Zur weiteren Steigerung der Aussagekraft der Methodik ist es empfehlenswert, die im Zuge dieser Arbeit entstandenen generischen Auslegungen und Modelle der Antriebskomponenten weiter zu konkretisieren. Die Wirkungsgrade können mit den bestehenden Modellen für einzelne Betriebspunkte bestimmt werden. Ausgehend hiervon wird bei der Bewertung der jeweilige Komponentenwirkungsgrad durch Interpolation zwischen vorausberechneten Betriebspunkten und Auslegungen generiert. Durch die Berechnung kompletter Wirkungsgradkennfelder bei verschiedenen Leistungsstufen können die Interpolationsräume verkleinert und somit die Genauigkeit gesteigert werden.

Die Methodik kann nur den bei ihrer Erstellung gültigen Stand der Technik erfassen. Zur Erhaltung der Aussagekraft der Methodik ist es somit zwingend erforderlich, neue Erkenntnisse kontinuierlich in die Bewertung mit aufzunehmen.

Dies ist insbesondere für das Kostenmodell relevant. Das Modell deckt die Materialkosten der Antriebskomponenten mit großer Genauigkeit ab. Allerdings sind die Rohstoffpreise vor jeder Bewertung auf Aktualität zu prüfen, da diese starken Schwankungen unterworfen sind und große Auswirkungen auf die Auswahl des optimalen Systems besitzen. Eine exaktere Aussage bezüglich der Kosten ist durch die Erweiterung des Kostenmodells um Fertigungsszenarien realisierbar.

Zu bedenken ist auch, dass bei der Antriebsauswahl in der Praxis, sprich beim Einsatz der Methodik bei einem Automobilhersteller, nicht nur objektive Kriterien eine Rolle spielen. Zum Auffinden des aus Firmensicht optimalen Antriebes müssen vielmehr auch die Firmenstrategie oder das Streben nach einheitlichen Plattformen berücksichtigt werden. Das global optimale System für mehrere Fahrzeuge unterschiedlicher Fahrzeugklassen muss nicht zwingend hinsichtlich jedes spezifischen Fahrzeugs eines der optimalen Systeme darstellen.

Aus alledem ergibt sich die Schlussfolgerung, dass mit der Erstellung einer neuartigen Bewertungsmethodik und der Implementierung dieser in ein Computerprogramm die Bewertung verschiedenartiger Antriebe weiter objektiviert wird. Jedoch kann eine computergestützte Sortierung der Systeme das kritische Hinterfragen der Ergebnisse durch den Entwicklungsingenieur nicht ersetzen. Vielmehr ist der richtige Einsatzzweck der Methodik die Begleitung des Entscheidungsfindungsprozesses des Anwenders. Menschliche Fachkenntnisse und insbesondere auf langjähriger Erfahrung fußendes Beurteilungsvermögen lassen sich auch in absehbarer Zeit nicht vollständig durch formale Algorithmen ersetzen.

A Modelle

Die Bewertungsrechnung greift auf zahlreiche Modelle zurück. Ein Modell ist dabei als Konstrukt zur Abstraktion der Realität zu verstehen. Bei der Modellauswahl ist darauf zu achten, dass es zur Erfüllung seiner Aufgabe optimal geeignet ist. Es ist hinreichend komplex zu gestalten, um alle gewünschten Informationen unter Berücksichtigung der relevanten Umgebungseinflüsse zu liefern. Zugleich ist es so einfach wie möglich zu halten, damit die Handhabbarkeit jederzeit gewährleistet ist. Dieser Begriff umfasst sowohl die Beschaffung der erforderlichen Daten, die Komplexität der Anwendung als auch die benötigte Rechenzeit.

A.1 Modellübersicht

Übergeordnetes Ziel des Modelleinsatzes ist es, mit dem Programm zur Anwendung der Bewertungsmethodik, welches in Anhang B vorgestellt wird, in kurzer Rechenzeit exakte Aussagen treffen zu können.

Aufgrund der hohen Zahl von zu bewertenden Antriebssystemen muss die Bewertungszeit pro System so niedrig wie möglich sein. Somit können keine zeitvarianten Berechnungen zur Generierung der Bewertungen verwendet werden. Aus diesem Grund werden alle Rechnungen, welche zeitvariant sind oder einer hohen Detailgenauigkeit bedürfen, bereits im Voraus anhand von Modellen gelöst. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden in numerischer Form festgehalten und fungieren als Eingangsparameter der Bewertungsrechnung.

Zur Anwendung kommen Modelle verschiedenster Beschaffenheit. Die Palette erstreckt sich von vergleichsweise einfachen mathematischen Modellen in Gleichungsform bis hin zu Modellen für zeitlich hochaufgelöste Betrachtungen wie beispielsweise die Berechnung der Spannungsspitzen im Zwischenkreis in Abhängigkeit der Schalthandlungen der IGBTs im Wechselrichter.

Oberstes Ziel ist, für jeden Zweck die passende Modellierungstiefe und somit auch die passende Modellart zu wählen.

Folgende Szenarien werden durch Modelle berechnet:

- Bestimmung der Komponenteneigenschaften bei Skalierung der Komponenten
- Bestimmung des Fahrzeugverhaltens bei Durchfahrt eines Zyklus

- Bestimmung der Klemmenspannung des Energiespeichers bei unterschiedlichen Speichertopologien und Speicherzuständen
- Bestimmung der Wechselrichterverluste in Abhängigkeit von Spannungslage und Wechselrichtertopologie
- Bestimmung des Maschinenverhaltens im Systemkontext
- Bestimmung der Interaktionen der Komponenten
- Bestimmung der Kosten der Komponenten

Die Modelle gliedern sich dabei in folgende Typen:

- stationär gültige mathematische Modelle
- instationär gültige mathematische Modelle
- physikalische Modelle

Eine Ausnahme stellt das Modell zur Bestimmung der Kosten des Antriebes dar. Dieses wird nachfolgend vorgestellt.

A.2 Kostenmodell

Die Wahl der Bewertungskriterien erfolgt nach dem MECE Prinzip: Die Kriterien sollen alle Eigenschaften des Antriebs überlappungsfrei erfassen. Bei der Bewertung der Kosten ist dieses Prinzip jedoch nicht stringent anwendbar. Der Grund ist, dass bei fast jeder Systemeigenschaft durch höhere Kosten – Material- oder Entwicklungskosten – eine Verbesserung erreicht werden kann. Dennoch ist die Betrachtung der Kosten unumgänglich. Auch das technisch ausgereifteste System hat am Markt keine Chancen, wenn es in puncto Kosten den Erwartungen des Kunden nicht entspricht.

Aus diesem Grund ist ein Kostenmodell erforderlich, welches die Differenzierung der verschiedenen Antriebssysteme hinsichtlich der Kosten ermöglicht.

Existierende Kostenmodelle, wie in [Neu08] oder [PS03], basieren meist auf Regressionsanalysen zur Betrachtung des Gesamtsystems. Dabei wird in der Regel die Leistung des Systems als kostendeterminierende Größe angesehen. Dies ist nur bedingt richtig. Die Materialkosten elektrischer Maschinen sind beispielsweise zum Volumen der Maschine und somit zum Drehmoment proportional, nicht jedoch zur Leistung. Des Weiteren können die bereits bestehenden Modelle keine Aussagen zu Kostenänderungen bei einer Änderung der Systemarchitektur abbilden, was für die Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit aber essenziell ist. Aus diesem Grund wird ein neuartiges Kostenmodell entworfen.

Das Ziel ist, bereits in einer frühen Phase des Produktentstehungsprozesses von Automobilen, sprich bei limitierter Informationslage, valide Aussagen zur Kostenstruktur elektrischer Antriebssysteme treffen zu können.

Betrachtet werden die drei Hauptbestandteile des Antriebs: Energiespeicher, Leistungselektronik und elektrische Maschinen. Der Fokus liegt dabei nicht auf der Erzielung absoluter Aussagen. Vielmehr sollen Skalierungen und Modifizierungen einzelner Komponenten und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem aus Kostensicht greifbar gemacht werden. Aus diesem Grund wird eine sogenannte Delta-Betrachtung durchgeführt. Das Ergebnis dieser Betrachtung ist die prozentuale Kostenänderung aller Systembestandteile, die sich bei der Skalierung beziehungsweise Modifizierung einer Komponente, ausgehend von einer bekannten Basiskonfiguration, ergibt.

Die Kostenstruktur der Komponenten ist stark zergliedert. Aus diesem Grund ist es erforderlich mit einer ABC-Analyse die maßgeblichen Kostentreiber zu identifizieren und den Fokus auf diese zu legen [Jun06]. Auf diese Weise wird mit gegebenem Aufwand ein Maximum an Genauigkeit erzielt. Diese Analyse wird für alle betrachteten Komponenten durchgeführt.

Es zeigt sich, dass bei allen Komponenten die Materialkosten den größten Anteil an den Gesamtkosten haben. Die Komponentenkosten werden dabei nicht bis auf die kleinstmögliche Größe – das Ursprungsmaterial, wie beispielsweise „Dysprosium“ – heruntergebrochen, sondern bis auf Bauteilebene - beispielsweise „NdFeB-Magnet“. Dies geschieht vor dem Hintergrund der zu erwartenden Wertschöpfungstiefe in der Automobilindustrie.

Zur Bestimmung der Kosten dieser Bestandteile und der Komponentenkosten bei einer Skalierung wird der Zwischenschritt über die Masse vollzogen. Es werden folglich Zusammenhänge zwischen den physikalischen Auslegungsgrößen und den Komponentenmassen hergestellt. Ausgehend von den Mengen der eingesetzten Materialien können mit Kenntnis tagesaktueller Rohstoffpreise die Materialpreise ausgewiesen werden. Die relevanten physikalischen Größen der einzelnen Komponenten sind in Tabelle A.1 zusammengefasst.

Tab. A.1: Kostenrelevante Skalierungsgrößen der Hauptkomponenten

Komponente	Skalierungsgröße
EM	Drehmoment
LE	Stromtragfähigkeit
ES	Energieinhalt

Die einzusetzende Materialmenge verhält sich proportional zu den angegebenen Skalierungsgrößen. Dieser Zusammenhang wird quantitativ aus physikalischen Überlegungen und empirischen Untersuchungen ermittelt. Bei letzteren werden zahlreiche auf dem Markt erhältliche Komponenten analysiert und verglichen. Die Zusammenhänge sind für wichtige Komponenten nachfolgend zusammengefasst.

Für die Masse in kg permanenterregter Synchronmaschinen gilt:

$$m_{\text{IPM}} = 1,33 \cdot M^{\frac{3}{4}}. \quad (\text{A.1})$$

Für die Masse in kg von Asynchronmaschinen und elektrisch erregten Synchronmaschinen gilt:

$$m_{\text{ASM}} = 2,25 \cdot M^{\frac{3}{4}}. \quad (\text{A.2})$$

Für die Masse in kg zylindrischer Lithium-Ionen-Zellen mit Li-Fe-Po-Technologie gilt:

$$m_{\text{zelle}} = 5,33 \cdot C \frac{U_{\text{zelle,nom}}}{1000} + 0,24. \quad (\text{A.3})$$

Aus diesen Komponentenmassen können nun für Lithium-Ionen-Zellen und elektrische Maschinen die Bauteilmassen bestimmt werden. Hierzu ist die Kenntnis der Massenverteilung der Bauteile erforderlich. Diese wird mittels empirischer Analysen von verfügbaren Komponenten ermittelt.

Eine beispielhafte Massenverteilung ist in Tabelle A.2 zu sehen.

Tab. A.2: Typische Massenverteilung der Bestandteile einer Lithium-Ionen-Zelle nach [WM12]

Bauteil	Anteil an der Gesamtmasse /%
Anode	14,88
Kathode	26,64
Elektrolyt	6,81
Kupfer	17,55
Aluminium	7,38
Separator	4,04
Gehäuse	21,41
Sonstiges	1,29

Die ermittelten Massenverteilungen sind gültig für jeweils einen konkreten Komponententyp von automotivetauglichen Komponenten.

Aus der Gesamtmasse kann mit diesen Massenverteilungen auf die jeweiligen Massen der Bauteile geschlossen werden. Diese werden nun mit den jeweiligen Materialpreisen

multipliziert. Durch Summation der Ergebnisse ergeben sich die Materialkosten der Komponente.

Diese Betrachtungen gelten für Materialien, welche auf dem ausgeglichenen Markt gehandelt werden. Bei IGBT-Modulen für Wechselrichter ist dies nicht der Fall. Diese werden auf einem Verkäufermarkt gehandelt, welcher nur von wenigen Anbietern beherrscht wird. Somit ist zu prüfen, ob die Preise für IGBTs von den tatsächlichen Materialkosten abhängig sind, oder sich aus der Marktsituation ergeben [WD10]. In diesem Fall ist es erforderlich, die Kostenermittlung nicht anhand der oben beschriebenen Vorgehensweise über die Kopplung von physikalischen Größen mit Bauteilmassen durchzuführen, sondern direkt die Preise am Markt zu erfassen.

Die Fertigungskosten besitzen nur einen vergleichsweise kleinen Anteil an den Gesamtkosten. Sie können im Rahmen der vorliegenden vergleichenden Delta-Betrachtungen vernachlässigt werden, da davon auszugehen ist, dass die Fertigungskosten bei hinreichend kleiner Skalierung annähernd konstant bleiben. Außerdem können sämtliche weiteren Kosten, wie Entwicklungskosten, vernachlässigt werden, da sie bei originärer und skaliertem Komponente in gleicher Höhe anfallen. Diese Aussage ist dann gültig, wenn die Skalierung um den betrachteten Arbeitspunkt herum hinreichend klein ist und durch die Skalierung keine Technologiegrenzen überwunden werden müssen. Dies ist bei den durchgeführten Betrachtungen stets der Fall.

Somit kann die Berechnungsweise der Kosten nochmals zusammengefasst werden: Die Komponentenauslegung bestimmt die zu verwendenden Materialmengen. Die Art der Materialien ergibt sich aus der Art der betrachteten Komponente. Aus den Materialpreisen der eingesetzten Materialien und den jeweiligen Materialmengen ergeben sich die direkten Materialkosten.

Da Zuschläge sowie Fertigungskosten nicht betrachtet werden, können die Herstellkosten gleich den direkten Materialkosten gesetzt werden.

Bei Skalierung beziehungsweise Modifizierung einer Komponente ändern sich die Materialmengen beziehungsweise auch die Materialarten. Aus den prozentualen Änderungen können mit der oben geschilderten Methode über eine Änderung der Materialkosten wieder die Komponentenkosten bestimmt werden.

Weitere Informationen und Beispiele zum Kostenmodell sind in [SRR12] publiziert.

B Bewertungsprogramm

Eine Methodik ist per se abstrakt und nicht direkt anwendbar. Zur Ermöglichung des Einsatzes der Methodik sind Hilfsmittel erforderlich. Diese erlauben es die Methodik auf ein konkretes Problem zu beziehen und valide Aussagen zu generieren.

Die in dieser Arbeit beschriebene Bewertungsmethodik zum Auffinden optimaler Antriebe manifestiert sich in einem Computerprogramm. Dieses wird nachfolgend vorgestellt.

B.1 Zielsetzung

Die entwickelte Bewertungsmethodik soll in einer frühen Phase des Fahrzeugentwicklungsprozesses bei einem Automobilhersteller zum Einsatz kommen. Zur Gewährleistung der benutzerunabhängigen Anwendbarkeit der Methodik ist ein leicht bedienbares Programm mit grafischer Benutzeroberfläche geeignet. Dieses soll der Identifikation vielversprechender Antriebssysteme bei eingeschränkter Informationslage dienen. Dies bedeutet, dass mit Hilfe des Programms aus den prinzipiell möglichen Systemen eine Vorauswahl getroffen werden soll, die im Anschluss genauer zu untersuchen ist.

Wichtig bei der Gestaltung des Programms ist der modulare Aufbau. Hierdurch wird gewährleistet, dass neue Erkenntnisse jederzeit implementiert werden können. Beispielsweise wird dadurch die Integration neuer Technologien elektrischer Maschinen ermöglicht.

B.2 Aufbau

Das Bewertungsprogramm besitzt eine grafische Benutzeroberfläche, welche die Ein- und Ausgabe von Informationen wesentlich vereinfacht. Es gliedert sich in vier Bereiche:

- Eingabe
- Ergebnis
- Vergleich
- Diagramme

B.2.1 Eingabe

Der erste Reiter ermöglicht es, alle Anforderungen, Bewertungskriterien sowie den Umfang der zu bewertenden Systeme auszuwählen.

Den ersten Schritt stellt die Wahl der Fahrzeugklasse sowie der Antriebsanforderungen dar. Diese sind – immer gepaart – in Dateiform vorhanden. Dies bedeutet, dass zu jedem Fahrzeugtyp auch die entsprechenden Anforderungen bereits vorliegen. Diese umfassen beispielsweise Endgeschwindigkeit und gewünschtes Beschleunigungsvermögen. Mit der Wahl des Fahrzeugtyps werden automatisch die Fahrzeugrandbedingungen wie Frontfläche und Masse, allerdings ohne die des Antriebs, determiniert.

Weiterhin kann der gewünschte Fahrzyklus selektiert werden, mittels dessen die Energieumsätze des Antriebs bestimmt werden. Zur Wahl stehen sowohl öffentlich verfügbare Zyklen wie der FTP-72 als auch Hersteller-spezifische Zyklen.

Den größten Anteil am Reiter „Eingabe“ hat die Auswahl der zu berücksichtigenden Komponenten. Als Standard sind alle in der Datenbank enthaltenen Komponenten selektiert. Es können auch gezielt Komponenten deselektiert werden, die nicht betrachtet werden sollen, oder nur wenige Komponenten ausgewählt werden, um einen direkten Vergleich zwischen diesen Alternativen zu erhalten.

Den letzten Part der Eingabe bildet die Wahl der Bewertungskriterien. Beim Aufruf des Reiters sind alle Bewertungskriterien aktiv. Dies bedeutet, dass die Systeme allumfassend bewertet werden. Es ist jedoch möglich, beliebige Kombinationen dieser Kriterien auszuwählen.

B.2.2 Ergebnis

Nach der Berechnung der Bewertungen kann das Ergebnis eingesehen werden. Die für diese Berechnung benötigte Zeit bewegt sich in Abhängigkeit des verwendeten Rechners im Bereich von 5-15 Minuten. Die Berechnungsalgorithmen sind gezielt von derlei Gestalt, dass eine hohe Genauigkeit bei vertretbarer Rechenzeit gegeben ist. Dies wird dadurch gewährleistet, dass zeitlich hochaufgelöste Vorgänge bereits im Voraus „offline“ bestimmt werden und im Tool hinterlegt sind.

Der Reiter „Ergebnis“ liefert eine geordnete Liste aller Systeme, beginnend mit dem für das betrachtete Fahrzeug optimalen System. Angezeigt werden sowohl die berechneten Punktzahlen in allen Bewertungskategorien als auch die Fahrzeugklassen-abhängigen Gewichtungen. Dies dient primär der Nachvollziehbarkeit des Gesamtergebnisses. Darüberhinaus lassen sich so Ansatzpunkte zur gezielten Optimierung existenter Systeme identifizieren.

Eine weitere wichtige Ausgabegröße ist die Varianz. Sie ermöglicht eine qualitative Aussage über die Stabilität des Ergebnisses und die Risiken des Systems.

Diese Größe berechnet sich aus den Abweichungen der Bewertungen aller Kriterien voneinander und vom Mittelwert. Sie beschreibt für jedes System die Stabilität bezie-

hungsweise den Grad der universellen Verwendbarkeit. Eine geringe Varianz bedeutet, dass das System in allen Kriterien vergleichbare Bewertungen aufweist. Dies weist auf eine hohe technologische Maturität hin, welche einen bedenkenlosen Einsatz im Fahrzeug ermöglicht.

Systeme, die eine hohe Punktzahl in der Bewertung erlangen, aber zugleich eine hohe Varianz aufweisen, müssen stets eingehend geprüft werden. Diese Konstellation deutet darauf hin, dass das System in einigen Kriterien exzellent abschneidet, dafür bei anderen Kriterien deutlich schlechtere Ergebnisse erzielt. Es ist zwingend zu prüfen, inwiefern die kritisch bewerteten Kriterien für die konkrete Anwendung von Relevanz sind beziehungsweise in welcher Art und Weise die Schwachstellen des Systems gezielt verringert werden können.

Die gesamte Ergebnisliste kann mittels einer implementierten Schnittstelle zu einem Tabellenkalkulationsprogramm als komplett formatiertes Dokument in Tabellenform ausgegeben werden.

B.2.3 Vergleich

Der dritte Reiter ermöglicht einen Vergleich zweier konkreter Antriebssysteme. Dazu sind im linken Teil des Fensters die zu vergleichenden Systeme zu spezifizieren. In der rechten Fensterhälfte können nun die Bewertungen aller Kriterien, sowie der Rang und die Varianz eingesehen werden. Mit diesem Hilfsmittel wird der direkte Vergleich konkreter Alternativen ermöglicht. So können maßgebliche Unterschiede auf einen Blick erfasst werden. Speziell der Vergleich von bereits existenten mit zu entwickelnden, potentiell zukunftssträchtigen Systemen bietet sich an.

B.2.4 Diagramme

Der letzte Teil des Bewertungstools dient der Veranschaulichung der Anforderungen aus Fahrzeugsicht. So wird kenntlich gemacht, in welchen Bereichen der gewählte Zyklus die Bereiche größten Energieumsatzes hat. Dieses in den Abbildungen B.1 und B.2 abgebildete Kennfeld ist zwingend bei der Wahl der elektrischen Maschine zu beachten. Weiterhin werden die Auswirkungen der Wahl alternativer Antriebstopologien auf die Erfüllung der Fahranforderungen illustriert.

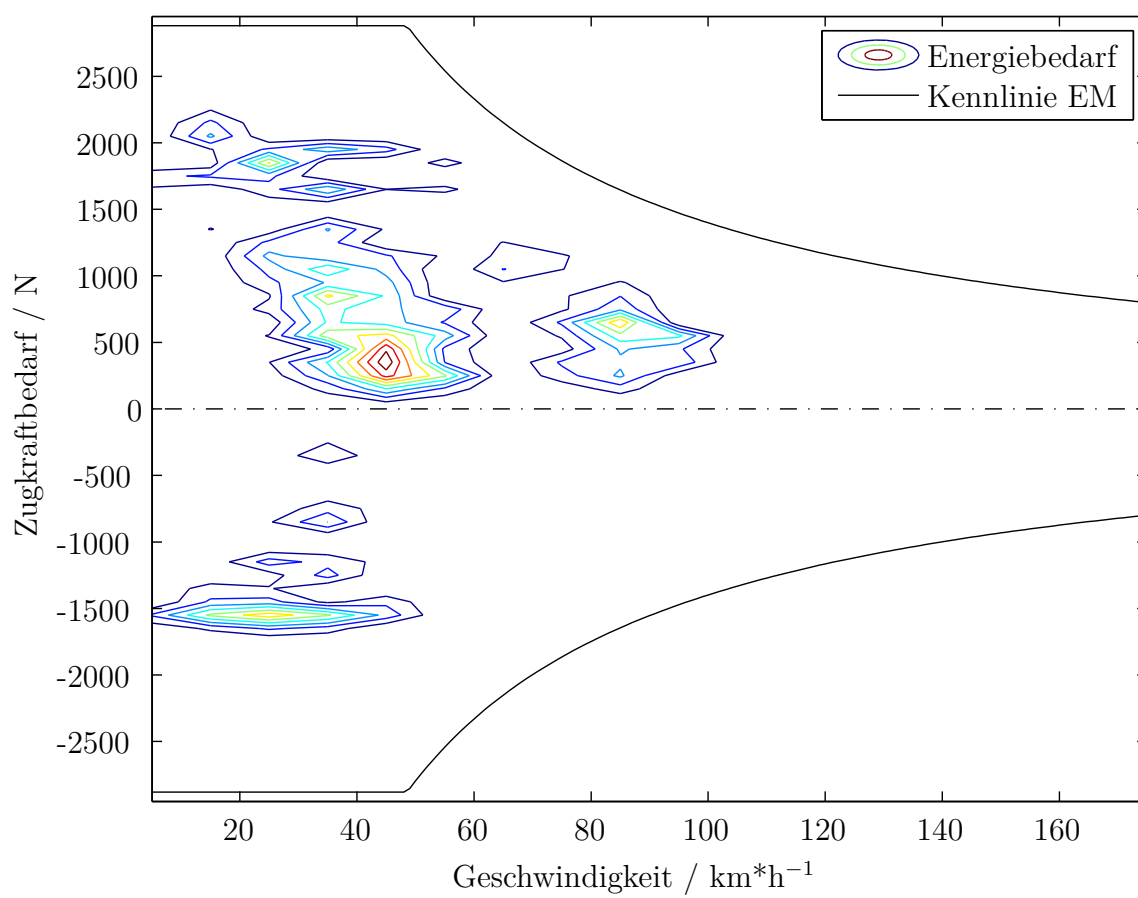


Abb. B.1: Energiebedarf eines Kleinwagens im FTP-72 Zyklus

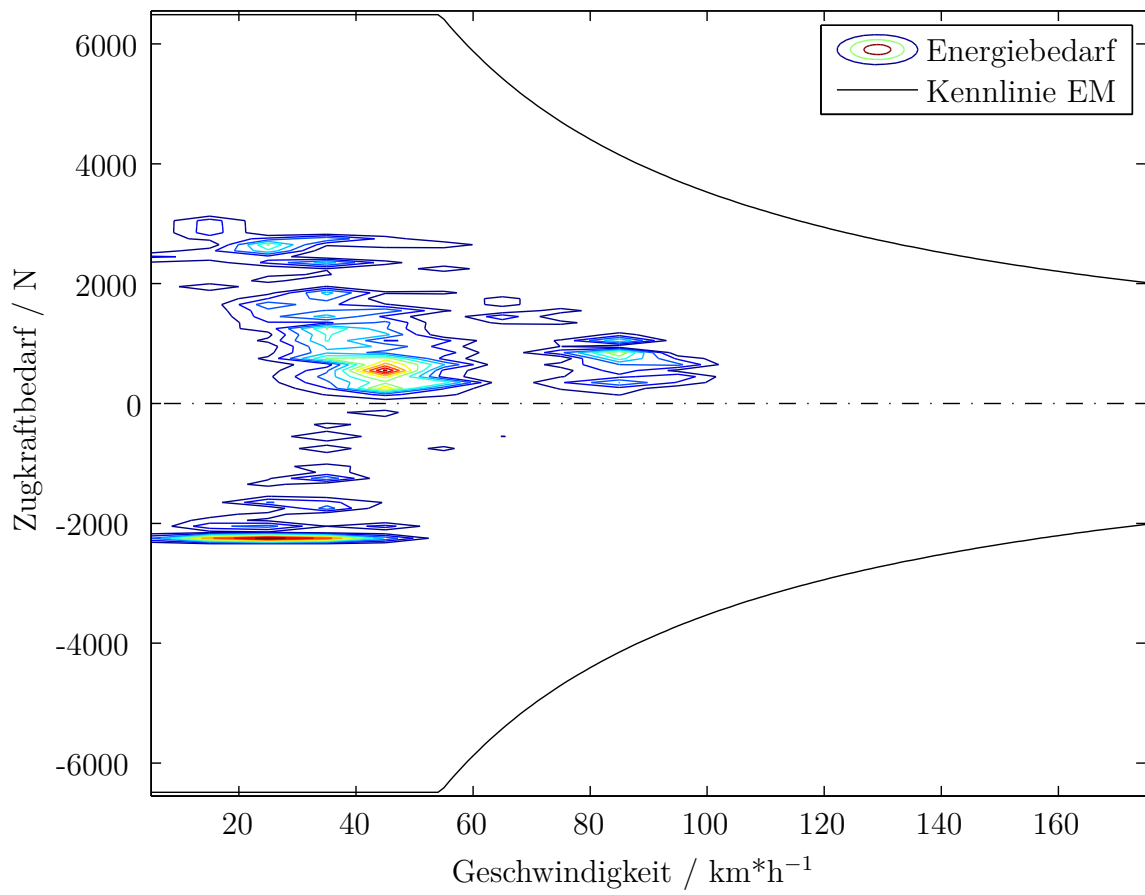


Abb. B.2: Energiebedarf eines Fahrzeuges der oberen Mittelklasse im FTP-72 Zyklus

C Komponentenauslegung

In diesem Anhangskapitel werden die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Komponentenauslegungen kurz vorgestellt und charakterisiert.

C.1 Motivation

In Kapitel 3 wird begründet, dass eine allgemeingültige Bewertung verschiedener Techniken nur dann möglich ist, wenn die inhärenten Wirkprinzipien, also das grundlegende, aus der Technologie resultierende, Komponentenverhalten betrachtet wird. Bei konkret ausgeführten, käuflich erwerbbaaren Komponenten ist neben der bekannten Physik auch eine als unbekannt anzusehende Menge Hersteller-spezifischen Wissens enthalten. Durch langjährige Erfahrung auf dem Gebiet der Komponentenauslegung kann ein Hersteller prinzipbedingte Schwächen der jeweiligen Technik erkennen und sie durch gezielte Optimierungsmaßnahmen kompensieren. Hinzu kommt, dass in der Realität jede Komponente für ein spezifisches Anwendungsszenario ausgelegt ist. Dies ist sinnhaft und auch zwingend nötig, um alle im Lastenheft des Käufers geforderten Kriterien zu erfüllen.

Dennoch kommt es aufgrund diese Tatsachen dazu, dass sich real ausgeführte Komponenten nicht mehr originär und somit objektiv vergleichbar verhalten. Es ist beispielsweise kaum möglich, zwei elektrische Maschinen verschiedener Bauart zu finden, welche für exakt dieselben Anforderungen ausgelegt sind. Dies erschwert den objektiven Vergleich und macht eine allgemeingültige Aussage unmöglich.

Eigene, naturgemäß wesentlich gröbere Auslegungen führen nicht zu der aus der jeweiligen Technologie resultierenden optimalen Komponentenauslegung. Es sollen jedoch im Rahmen dieser Arbeit keine konkreten Fahrzeuge mit Antrieben versehen werden, sondern vielmehr prinzipielle, allgemeingültige Aussagen zu den Eignungen verschiedener Techniken getroffen werden. Vor diesem Hintergrund ist das Vorgehen, die Komponenten anhand eigener Auslegungen zu charakterisieren, sinnhaft.

Da alle Komponenten, unabhängig von der zugrunde liegenden Technologie, mit gleichem Wissen und bis zur gleichen Tiefe berechnet werden, ergeben sich keine nicht-prinzipbedingten Verhaltensänderungen.

C.2 Elektrische Maschinen

Eine Auslegung wird für alle betrachteten Maschinentypen durchgeführt: SSM (Vollpol- und Schenkelpolausführung), PSM, IPM, ASM. Da die SRM schon in einer frühen Phase der Betrachtungen ausgeschlossen werden kann, existiert für diese Maschine nur eine grobe Auslegung.

Ziel ist es, skalierbare Maschinenmodelle zu erzeugen, welche zur Ausweisung der Relation Drehmoment - Masse und zur Bestimmung eines betriebspunktabhängigen Wirkungsgrades verwendet werden können.

Die Auslegung lässt sich in vier Schritte einteilen und wird im Folgenden knapp skizziert. Details zur Auslegung von elektrischen Maschinen lassen sich der einschlägigen Fachliteratur wie [MVP08] entnehmen.

Schritt 1: Analytische Maschinenberechnung

Bevor die Maschinen ausgelegt werden können, ist die Antriebsart festzulegen [Wei08]. Die Wahl fällt auf die in Kapitel 5 untersuchte Kombination der elektrischen Maschine mit einem Einganggetriebe. Diese Anordnung ist für eine große Zahl elektrischer Fahrzeuge die vielversprechendste Möglichkeit.

Zur Erzielung einer Maschine mit hohem Wirkungsgrad und hoher Leistungsdichte ist die maximale Drehzahl möglichst hoch zu wählen.

Die Wahl fällt auf $n_{\max} = 12000 \text{ 1/min}$, da diese Drehzahl hoch, aber mit konventionellen Lagerungen problemlos beherrschbar ist. Daraus folgt eine Bemessungsdrehzahl von $n_{\text{eck}} = 3500 \text{ 1/min}$.

Die Hauptabmessungen – Bohrungsdurchmesser und aktive Länge – ergeben sich im Wesentlichen aus dem zur Anforderungserfüllung erforderlichen Drehmoment. Dies kann über die Bemessungsdrehzahl und über die zur Anforderungserfüllung erforderliche Leistung berechnet werden. Auch die Polteilung kann so bestimmt werden. Diese stellt eine erste Möglichkeit zur Plausibilisierung der Auslegung dar. Zu kleine Werte, die eine Fertigung der Maschine nicht zulassen würden, deuten beispielsweise auf eine ungünstige, zu korrigierende Auslegung hin.

Aus der Speicherauslegung und insbesondere der Art des Speichersystems resultieren Höhe und Verlauf der Zwischenkreisspannung. Dies sind wichtige Auslegungsgrößen für Wechselrichter und elektrische Maschine.

Ist die Zwischenkreisspannung schwankend, gilt für die Auslegung des Wechselrichters und der elektrischen Maschine, dass diese sowohl auf den Punkt höchsten Stromes, als auch höchster Spannung auszulegen sind.

Gefordert ist von der elektrischen Maschine eine bestimmte Leistung. Die maximale Leistung der Maschine hängt dabei von der maximalen Klemmenspannung ab:

$$P_{\text{el}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos \varphi. \quad (\text{C.1})$$

Die maximale Klemmenspannung der Maschine ist wiederum durch den Wechselrichter limitiert und von der Zwischenkreisspannung abhängig. Für einen Pulswechselrichter mit sechs Schaltern gilt für die verkettete Spannung nach [JW95]:

$$U_{\text{eff,max}} = m \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_d}{2}. \quad (\text{C.2})$$

Als m wird hierbei der Modulationsgrad bezeichnet. Bei maximaler Aussteuerung ergibt sich $m = 4/\pi = 1,27$. Die Maschine liefert die maximale Leistung bei der maximalen Spannung, für die sie ausgelegt ist. Dies bedeutet, dass bei höheren Zwischenkreisspannungen die Leistung nicht gesteigert werden kann, bei niedrigeren Zwischenkreisspannungen aber ein Leistungsverlust eintritt.

Die Grenzfälle der Auslegung sind: Maximale Leistung bei maximaler Zwischenkreisspannung und maximale Leistung bei minimaler Zwischenkreisspannung.

Im ersten Fall liefert die Maschine nur im Punkt maximaler Zwischenkreisspannung, also bei vollem und weitgehend unbelastetem Speicher volle Leistung. Bei geringeren Spannungen, also bei entladenem und belastetem Speicher sinkt die maximale Leistung ab. Im zweiten Fall liefert die Maschine auch bei minimaler Zwischenkreisspannung, beispielsweise bei kaltem oder leerem Speicher, die volle Leistung. Diese ist deutlich kleiner als die Leistung im ersten Fall und nicht steigerbar.

In der Praxis wird die Maschine auf ungefähr 75 % der maximalen Zwischenkreisspannung ausgelegt. Somit wird gewährleistet, dass über einen hinreichend großen Betriebsbereich eine konstant hohe Ausgangsleistung zur Verfügung steht und zugleich die Leistungsfähigkeit des Speichers ausgenutzt wird.

Mit bekannter, auslegungsrelevanter Zwischenkreisspannung von $U_{\text{ZK}} \approx 320 \dots 360 \text{ V}$ können die zu erwartenden Maschinenströme ausgewiesen werden. Mit dieser Größe kann auch die Wicklungsauslegung konkretisiert werden. Zu wählen sind Lochzahl, Nutzahl, Leiter je Nut und parallele Zweige. Hier empfiehlt sich eine Variation aller Größen und die Auswahl einer sinnvollen Kombination, welche zu einer funktionierenden Statorgeometrie und einem Statorfeld mit möglichst geringen Anteilen an Harmonischen führt.

Schritt 2: Grundlegende softwaregestützte analytische Berechnungen sowie Bestimmung der Geometrie

Nachdem grundlegende Parameter bekannt sind, kann die konkrete Geometrie softwaregestützt erstellt werden. Dies wird mit einem Programm durchgeführt, welches auch bereits erste analytische Berechnungen zur elektromagnetischen Auslegung der Maschine durchführen kann. Darüber hinaus ist es mit einem Programmbaustein dieses Programms möglich, den Wicklungsentwurf zu optimieren, beispielsweise durch Berechnung der Harmonischen im Luftspaltfeld.

Ergebnisse der analytischen Berechnungen sind die Maschinengeometrie sowie erste

Anhaltswerte für die elektromagnetische Belastung und den Drehmomentverlauf der Maschine.

Schritt 3: Optimierung und Nachrechnung mit Finiter-Elemente-Methode

Der erstellte Blechschnitt wird nun einem FE-Programm übergeben. Dieses ermöglicht die Bestimmung der Flusssichten in der Maschine. Kritische Bereiche werden ersichtlich, woraufhin der Maschinenentwurf überarbeitet werden kann.

Ergebnis der Nachrechnung sind die zu erwartenden elektrischen und mechanischen Daten der elektrischen Maschine sowie Wirkungsgrade für die berechneten, maßgeblichen Arbeitspunkte. Aus diesen kann durch Interpolation mit hoher Genauigkeit ein Wirkungsgradkennfeld erstellt werden.

Schritt 4: Verifizierung und Plausibilisierung anhand existierender Maschinen

Die durch die Auslegung gewonnen Maschinendaten werden an Daten existierender Traktionsmaschinen für elektrische Straßenfahrzeuge verifiziert. Es zeigt sich, dass die Daten der im Rahmen dieser Arbeit ausgelegten Maschinen im Mittelfeld der Vergleichsmaschinen liegen. Dies deutet auf eine robuste und plausible Auslegung hin.

Konkrete Ergebnisse der durchgeführten Maschinenauslegung sind aus Interpolationen gewonnene Wirkungsgradkennfelder, welche das prinzipielle Verhalten der Maschinen gut aufzeigen. Außerdem werden Zusammenhänge zwischen den Abmessungen und der Masse in Abhängigkeit des Drehmoments ermittelt.

Die Synchronmaschinen, deren Statoren identisch sind, besitzen eine Zweischichtwicklung in 36 Nuten bei einer Polpaarzahl von 3. Auch die Asynchronmaschine besitzt eine Zweischichtwicklung in 36 Nuten und eine Polpaarzahl von 2.

Bezogen auf den aktiven Teil ergibt sich bei den Synchronmaschinen ein Ausnutzungsfaktor von $3,16 \text{ KVAm}/\text{m}^3$, bei der Asynchronmaschine von $2,5 \text{ KWmin}/\text{m}^3$.

Für einen Nennleistungsbereich um 50 kW ergeben sich damit beispielsweise für stromerregte Synchronmaschinen die in Tabelle C.1 dokumentierten Zusammenhänge.

Tab. C.1: Skalierungsgrößen für elektrische Synchronmaschinen

bezogene Größe	Wert
Leistungsdichte, max	1,45 kW/kg
Leistungsdichte, dauer	0,61 kW/kg
Drehmomentdichte, max	3,74 Nm/kg
Drehmomentdichte pro kg Blech	6,96 Nm/kg
Drehmomentdichte pro kg Kupfer	18,57 Nm/kg

Zusammen mit den Massen für Welle und Gehäuse lässt sich so die Gesamtmasse der Maschine in Abhängigkeit des Drehmoments bestimmen. Außerdem fungieren diese Zusammenhänge als Eingangsparameter für das Kostenmodell, welches aus den Bauteilmassen die Materialkosten zu ermitteln vermag.

Diese Daten gelten für einfach untersetzte elektrische Maschinen, entworfen für den Einsatz im Automobil. Sie sind mit existierenden Maschinen für diesen Einsatzzweck abgeglichen.

C.3 Wechselrichter

Der Wechselrichter wird im Wesentlichen durch die maximale Stromtragfähigkeit und die Sperrspannung der Halbleiterventile charakterisiert. Diese Punkte stehen im Fokus der Auslegung.

Die Sperrspannung der Halbleiterventile richtet sich hierbei nach der Zwischenkreisspannung. Sie ist so hoch zu wählen, dass sie von der Zwischenkreisspannung zu keinem Zeitpunkt übertroffen wird. In der Praxis stehen an automotivetauglichen Bauteilen derzeit hauptsächlich Bauteile mit einer maximalen Sperrspannung von 600 V zur Verfügung. Vereinzelt sind Bauteile für 1200 V Sperrspannung erhältlich. Da eine Neuentwicklung für einen einzelnen Autohersteller zu kostenintensiv ist, ist bei der Auslegung des Wechselrichters darauf zu achten, eine der bereits verfügbaren Spannungsstufen zu wählen.

Da durch Wahl der Sperrspannungsklasse die maximale Spannung festgelegt ist, ergibt sich die Leistung des Wechselrichters durch die Stromtragfähigkeit der Halbleiter.

Bei automotivetauglichen kompakten, wassergekühlten Wechselrichtern sind die thermischen Zeitkonstanten so gering, dass eine Überlastfähigkeit quasi nicht gegeben ist. Somit ist die maximale Stromtragfähigkeit der Halbleiter auf den maximalen Strom im Betrieb auszulegen.

Zusätzlich ist über die Berechnung der Verlustleistungen und geeignete thermische Modelle die Erwärmung der Halbleiter zu berechnen. Sie darf zu keiner Zeit die zulässige Maximaltemperatur der Sperrschicht – in der Regel 125 °C bis 135 °C – überschreiten.

Für die Bewertungen im Rahmen dieser Arbeit werden skalierbare Auslegungen von Zweipunkt- als auch von Dreipunktwechselrichtern – Diode Clamped – erstellt. Dazu werden sowohl IGBT Module, als auch komplette Wechselrichter betrachtet.

Auf Modulebene werden skalierbare Verlustleistungskennfelder aus Datenblattangaben gängiger 600 V und 1200 V IGBT-Module erstellt. Hierzu werden dem Datenblatt spezifische Größen wie V_{CE0} , V_{F0} , r_{CE} und r_F entnommen. Auch die zur Erwärmungsrechnung erforderlichen thermischen Widerstände befinden sich im Datenblatt.

Auf Wechselrichterebene ist auch der Zusammenhang Leistung-Masse von Interesse.

Zur Generierung dieser Beziehung werden dem Stand der Technik entsprechende Wechselrichter für den Einsatz in batterieelektrischen Fahrzeugen analysiert. Bei diesen ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Masse in Kilogramm und der Leistung in Kilowatt.

$$m_{WR} = 3,5 + 0,075 \cdot P_{WR} \quad (C.3)$$

In dieser Masse nicht enthalten ist die Masse des Zwischenkreiskondensators. Dieser muss die gesamte in den Spulen der Maschine gespeicherte Energie im Fehlerfall aufnehmen können. Somit berechnet sich dessen Kapazität wie folgt:

$$C_{ZK} = \frac{3LI_{AC,max}^2}{U_{CES}^2 - U_{ZK,max}^2}. \quad (C.4)$$

Aus der Fahrzeugleistung ergibt sich der maximale Strom im Zwischenkreis und somit auch der maximale Strom am Ausgang des Wechselrichters, zu dem die Kapazität des Zwischenkreiskondensators proportional ist. Da zwischen dem Volumen und der Kapazität des Kondensators ein linearer Zusammenhang besteht, steigt das Volumen mit quadratisch steigendem Strom linear.

Für Kondensatoren der 600 V Spannungsklasse ist ein Wert von etwa 3 μF pro Gramm typisch. Die Zwischenkreiskapazität beträgt für batterieelektrische Fahrzeuge typischerweise einige hundert μF bis wenige mF.

Somit ergibt sich für die Masse der Zwischenkreiskapazität ein Wert von wenigen Kilogramm.

Der Vollständigkeit halber sei angemerkt, dass die Zwischenkreiskapazität selten durch einen Kondensator, sondern aufgrund von geometrischen Integrationsvorteilen, meist durch mehrere parallele Kondensatoren kleinerer Kapazität gebildet wird, wodurch der Gehäuseanteil steigt und das Gesamtgewicht leicht erhöht wird.

C.4 Energiespeicher

Speicherauslegung bedeutet primär, aus den Anforderungen an Spannung, Energie und Leistung die nötige Zellanzahl und daraus die Speichermasse, das Volumen und die Kosten zu bestimmen.

Dabei sind die Anforderungen an die Speichergrößen Fahrzeuganforderungen eindeutig zuzuordnen. Aus der Reichweitenanforderung ergibt sich mit Kenntnis der Komponentenwirkungsgrade der nutzbare Energieinhalt des Speichers. Die Höchstgeschwindigkeit wird durch die Zwischenkreisspannung limitiert, die Beschleunigung durch die maximale Leistungsfähigkeit, sprich den Maximalstrom, des Speichers.

Bei der Auslegung ergeben sich durch die zellimmanenten, festen Verhältnisse von Spannung zu Energie und Leistung differierende Zellanzahlen für die optimale Erfüllung jedes Kriteriums. Somit ist bei Topologien ohne Gleichspannungswandler eine

Überdimensionierung in mindestens einer Anforderung unumgänglich.

Die Speicherauslegung ist herausfordernd, da auf Zellebene zwar eine Korrelation von Energieinhalt und Masse/Volumen existiert, die konkrete Gestaltung des Gehäuses aber durch die geometrische Integration ins Fahrzeug und nicht durch die Auslegungsgrößen des Speichers bestimmt wird. Dies macht allgemeingültige Aussagen auf Speicherebene schwierig.

Auf Zellebene hingegen sind Skalierungen auf physikalischer Basis sinnhaft. Hierzu werden auf dem Markt erhältliche Speicherzellen, basierend auf Lithium-Ionen-Technologie, analysiert.

Sowohl für Leistungszellen als auch für Energiezellen – die Grenze wird bei $P/E = 10$ gezogen – können für verschiedene Zellchemien Aussagen zum Zusammenhang Energieinhalt - Masse getroffen werden.

Für das Speichergehäuse werden auf Erfahrungswerten beruhende Zusammenhänge Energieinhalt - Masse verwendet. Das dadurch entstehende „mittlere Gehäusemodell“ ist unabhängig von der konkreten geometrischen Gestaltung des Bauraumes gültig, aber nicht für eine konkrete Geometrie optimiert.

Für Speichersysteme mit Wandlern existieren außerdem Auslegungen verschiedener DC/DC-Wandler (Hoch- und Tiefsetzsteller). Resultate der Wandlerauslegung sind Masse, Volumen, Verlustleistungen in relevanten Betriebspunkten und eine Kostenabschätzung.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Vorgehensweise bei der Bewertung elektrischer Antriebssysteme	3
2.1	Achslastverteilung, basierend auf [BMW Group]	6
2.2	Exemplarischer Antriebsstrang eines batterieelektrischen Straßenfahrzeugs	7
2.3	EM Kennlinien	13
2.4	Energiebedarf eines Kleinwagens im FTP-72 Zyklus	14
3.1	Methodik zur Bewertung elektrischer Antriebssysteme	26
3.2	Bewertung mittels nichtlinearer Transformationsfunktion	32
3.3	Abhängigkeit der Gewichtungen von der Fahrzeugklasse	36
3.4	Vorgehen bei der Durchführung der gewichteten Punktbewertung	38
4.1	Prinzipielle Möglichkeiten der Anbindung der elektrischen Maschinen an die Räder einer Achse. a) Zentralantrieb (C), b) Radnaher Antrieb (H), c) Radnabenantrieb (T)	45
4.2	Lage der Bereiche höchsten Energieumsatzes im FTP-72 Zyklus bei Verdopplung des Drehmoments für ein Fahrzeug der Kompaktklasse . .	50
4.3	Optimaler Einbauort für Energiespeicher bei einem Straßenfahrzeug . .	55
5.1	Prinzipbedingte Bereiche besten Wirkungsgrades ($\eta > 90\%$) verschie- dener elektrischer Maschinen, schematisch, basierend auf [BNMH08], [FBJ ⁺ 10], [WLE06]	59
5.2	Asynchronmaschine	60
5.3	Zugkraftverlauf bei ASM und SM	61
5.4	Permanenterregte Synchronmaschine mit Oberflächenmagneten	63
5.5	Permanenterregte Synchronmaschine mit vergrabenen Magneten	64
5.6	Stromerregte Synchronmaschine	65
5.7	Reluktanzmaschine	66
5.8	Zweipunktwechselrichter	73
5.9	Vergleich der Ausgangsströme eines Zwei- und eines Dreipunktwechsel- richters	74
5.10	Dreipunktwechselrichter, Diode Clamped	76
5.11	Entladekurven verschiedener Lithium-Ionen-Zellen	79
5.12	Gesamtverluste von Modulen des Herstellers Infineon	86
5.13	Gesamtverluste von Modulen des Herstellers Semikron	86

B.1	Energiebedarf eines Kleinwagens im FTP-72 Zyklus	109
B.2	Energiebedarf eines Fahrzeuges der oberen Mittelklasse im FTP-72 Zyklus	110

Tabellenverzeichnis

2.1	Anforderungen an das Antriebssystem	11
2.2	Komponentenanforderungen, abgeleitet aus Anforderungen an das An- triebssystem	12
2.3	Anforderungen an Leistungsmodule für den Einsatz in Fahrzeugen mit Hybridantrieb	16
2.4	Aus Referenzfahrzeugen abgeleitete Randbedingungen für die Bewertung	16
3.1	Schnittstellen des Antriebssystems mit der Systemumgebung	25
3.2	Gewichtungseckpunkte	37
4.1	Mögliche Allradantriebe mit zwei bis vier EM	46
5.1	Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Art des Getriebes nach [NBL07]	68
6.1	Top 10 Systeme für die Fahrzeugklasse „klein“	90
6.2	Schlechteste Systeme für die Fahrzeugklasse „klein“	90
6.3	Top 10 Systeme für die Fahrzeugklasse „mittel“	91
6.4	Top 10 Systeme für die Fahrzeugklasse „groß“	92
A.1	Kostenrelevante Skalierungsgrößen der Hauptkomponenten	103
A.2	Typische Massenverteilung der Bestandteile einer Lithium-Ionen-Zelle nach [WM12]	104
C.1	Skalierungsgrößen für elektrische Synchronmaschinen	114

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

ASM Asynchronmaschine

DC/AC Wechselrichter

DC/DC Gleichspannungsumrichter

EKMV Elektrischer Kältemittelverdichter

EM Elektrische Maschine

EMV Elektromagnetische Verträglichkeit

ES Energiespeicher

FEM Finite-Elemente-Methode

Getr Getriebe

IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor

IPM Interior Permanent Magnet Synchronous Machine

MEK Materialeinzelkosten

MOSFET Metal Oxide Field Effect Transistor

NV-BN 14 V-Bordnetz

PSM Permanent Magnet Synchronous Machine

SoC State of Charge, Ladezustand einer Zelle

SRM Switched Reluctance Machine

SSM Stromerregte Synchronmaschine

THD Total Harmonic Distortion

WR Wechselrichter

Formelzeichen

τ Zeitkonstante

θ	Durchflutung
ϱ	Dichte
A	Fahrzeugfrontfläche
A	Strombelag
a	Anzahl paralleler Zweige
a	Beschleunigung
a'	Auf g bezogene Beschleunigung
b	Bewertung
c_r	Rollreibungsbeiwert
c_w	Luftwiderstandsbeiwert
D	Durchmesser
E	Energie
F	Kraft
g	Erdbeschleunigung
g	Gewichtung
h	Höhe
J	Massenträgheit
l	Länge
M	Drehmoment
m	Masse
m'	Masse inklusive Trägheiten
n	Drehzahl
P	Leistung
r	Radius
t	Zeit
v	Geschwindigkeit
w	Windungszahl
z_a	Anzahl von Leitern am Umfang

r Radius

Indices

a Anker

Beschl Beschleunigung

dyn dynamisch

fw Durchlass-

FZG Fahrzeug

ges gesamt

h hinten

L Luftspalt

Luft Luft

nom nominal

off Aus-

on Ein-

Roll Roll-

rot rotatorisch

Sp Schwerpunkt

stat stationär

v vorne

z Zug-

zw Zweig

Literaturverzeichnis

- [ACG05] Alcala, I., A. Claudio und G. Guerrero: *Analysis of propulsion systems in electric vehicles*. In: *Proc. 2nd International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE) and XI Conference on Electrical Engineering (CIE 2005)*, Mexico City, 2005.
- [And05] Anderman, M.: *The Ultracapacitor Opportunity Report*. Advanced Automotive Batteries, Oregon House, 2005.
- [Büh04] Bühner, M.: *Einführung in die Test- und Fragebogenkonstruktion*. Pearson Studium, München, 1. Auflage, 2004.
- [Bir80] Birkhofer, H.: *Analyse und Synthese der Funktionen technischer Produkte*. VDI-Verlag Düsseldorf, 1980.
- [BNMH08] Buecherl, D., R. Nuscheler, W. Meyer und H. G. Herzog: *Comparison of Electrical Machine Types in Hybrid Drive Trains: Induction Machine vs. Permanent Magnet Synchronous Machine*. IEEE, New York, 2008.
- [Bra01] Braun, T.: *Der komplexe Manager - Systemische Perspektiven*. Books on Demand GmbH, Norderstedt, 2001.
- [CCL08] Chau, K., C. Chan und C. Liu: *Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles*. In: *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 55, no. 6. IEEE, New York, 2008.
- [Dem08] Demtröder, W.: *Experimentalphysik 1: Mechanik und Wärme*. Springer, Berlin Heidelberg, 5. Auflage, 2008.
- [DH94] Daenzer, W.F. und F. Huber: *Systems Engineering. Methodik und Praxis*. Verlag Industrielle Organisation, Zürich, 8. Auflage, 1994.
- [DIN05] Norm DIN EN ISO 9000 2005: *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*, 2005.
- [Duv05] Duvall, M.: *Battery Evaluation for Plug-In Hybrid Electric Vehicles*. Electric Power Research Institute, Palo Alto, 2005.
- [EF11] Eghtessad, M. und Küçükay F.: *Kundenorientierte Dimensionierung von elektrifizierten Antrieben*. In: *Proc. 8. Braunschweiger Symposium Hybrid- und Elektrofahrzeuge*, Braunschweig, 2011.

- [Ehr03] Ehrlenspiel, K.: *Integrierte Produktentwicklung*. Carl Hanser, München, 2003.
- [EKL05] Ehrlenspiel, K., A. Kiewert und U. Lindemann: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren*. Springer, Berlin Heidelberg, 5. Auflage, 2005.
- [FBJ⁺10] Felden, M., P. Bütterling, P. Jeck, L. Eckstein und K. Hameyer: *Electric vehicle drive trains: From the specification sheet to the drive-train concept*. In: *Proc. 14th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC*, Ohrid, 2010.
- [Fis06] Fischer, R.: *Elektrische Maschinen*. Carl Hanser, München, 13. Auflage, 2006.
- [FS96] Fenton, N. und Pfleeger S.: *Software Metrics: A Rigorous and Practical Approach*. International Thomson Computer Press, London, 1. Auflage, 1996.
- [FS06] Fink, A. und A. Siebe: *Handbuch Zukunftsmanagement - Werkzeuge der strategischen Planung und Früherkennung*. Campus, Frankfurt/Main, 2006.
- [Har02] Harzenetter, F.: *Synthese von Systemarchitekturen aus funktionalen Anforderungen*. Herbert Utz, München, 2002.
- [Hei07] Heissing, B.: *Fahrwerkhandbuch*. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2. Auflage, 2007.
- [HMF92] Hesse, W., G. Merbeth und R. Frölich: *Handbuch der Informatik*. Oldenbourg, Oldenbourg, 5.3 Auflage, 1992.
- [Hun10] Hungenberg, H.: *Problemlösung und Kommunikation im Management*. Oldenbourg, Oldenbourg, 3. Auflage, 2010.
- [JSF96] Jih-Sheng, L. und Z.P. Fang: *Multilevel converters - a new breed of power converters*. In: *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 32, no. 3. IEEE, New York, 1996.
- [Jun06] Jung, H.: *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. Oldenbourg, Oldenbourg, 10. Auflage, 2006.
- [JW95] Jenni, F. und D. Wüest: *Steuerverfahren für selbstgeführte Stromrichter*. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich und B.G. Teubner, Stuttgart, 1995.
- [KB11] Kraftfahrt-Bundesamt: *Fahrzeugzulassungen (FZ) – Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Herstellern und Handelsnamen Jahr 2011*. 2011.

- [Kle09] Klement, J.: *Technologie der elektrischen Direktantriebe*. Expert, Renningen, 2009.
- [KMR08] Küpfmüller, K., W. Mathis und A. Reibiger: *Theoretische Elektrotechnik*. Springer, Berlin Heidelberg, 18. Auflage, 2008.
- [LH03] Lipo, T. A. und D. G. Homes: *Pulse width modulation for power converters - principles and practice*. In: *IEEE Series on Power Engineering*. Wiley and Sons Inc. Publication, Hoboken, 2003.
- [Lin07] Lindemann, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte - Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. Springer, Berlin Heidelberg, 2007.
- [MB08] Miller, J. und A. Burke: *Electrochemical Capacitors: Challenges and Opportunities for Real-World Applications*. Interface, The Electrochemical Society, Pennington, 2008.
- [MP06] Müller, G. und B. Ponick: *Grundlagen elektrischer Maschinen*. Elektrische Maschinen. WILEY-VCH, Weinheim, 9. Auflage, 2006.
- [MP09] Müller, G. und B. Ponick: *Theorie elektrischer Maschinen*. Elektrische Maschinen. WILEY-VCH, Weinheim, 4. Auflage, 2009.
- [MVP08] Müller, G., K. Vogt und B. Ponick: *Berechnung elektrischer Maschinen*. Elektrische Maschinen. WILEY-VCH, Weinheim, 6. Auflage, 2008.
- [Myr01] Myrzik, J.: *Topologische Untersuchungen zur Anwendung von tief-/hochsetzenden Stellern für Wechselrichter*. kassel university press, Kassel, 2001.
- [Nau89] Naunin, D.: *Elektrische Straßenfahrzeuge - Technik, Entwicklungsstand und Einsatzbereiche*. Expert, Renningen, 1989.
- [NBL07] Naunheimer, H., B. Bertsche und G. Lechner: *Fahrzeuggetriebe. Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion*. Springer, Berlin Heidelberg, 2007.
- [Neu08] Neudorfer, H.: *Weiterentwicklung von elektrischen Antriebssystemen für Elektro- und Hybridfahrzeuge*. OVE, Wien, 2008.
- [Nür52] Nürnberg, W.: *Die Asynchronmaschine*. Springer, Berlin Heidelberg, 1952.
- [PBFG03] Pahl, G., W. Beitz, J. Feldhusen und K.H. Große: *Konstruktionslehre*. Springer, Berlin Heidelberg, 2003.
- [PL11] Ponn, J. und U. Lindemann: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte*. Springer, Berlin Heidelberg, 2. Auflage, 2011.

- [PS03] Pill-Soo, K.: *Cost modeling of battery electric vehicle and hybrid electric vehicle based on major parts cost*. In: *Proc. The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Singapur, 2003.
- [Ras10] Rashid, M.: *Power Electronics Handbook*. Elsevier, Oxford, 3. Auflage, 2010.
- [Rie10] Riefenstahl, U.: *Elektrische Antriebssysteme*. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 3. Auflage, 2010.
- [RLH96] Reinhart, G., U. Lindemann und J. Heinzl: *Qualitätsmanagement*. Springer, Berlin Heidelberg, 1996.
- [Sau10] Sauer, D. U.: *Produktionstechnik für die Batterieproduktion*. METAV, Düsseldorf, 2010.
- [Sch07] Schröder, D.: *Elektrische Antriebe - Grundlagen*. Springer, Berlin Heidelberg, 3. Auflage, 2007.
- [Sch08] Schröder, D.: *Leistungselektronische Schaltungen*. Springer, Berlin Heidelberg, 2. Auflage, 2008.
- [Sch09] Schäfer, H.: *Praxis der elektrischen Antriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeuge*. Expert, Renningen, 2009.
- [See05] Seeger, H.: *Design technischer Produkte, Produktprogramme und -systeme*. Springer, Berlin Heidelberg, 2. Auflage, 2005.
- [SK06] Stölting, H. D. und E. Kallenbach: *Handbuch Elektrische Kleinantriebe*. Carl Hanser, München, 3. Auflage, 2006.
- [SM09] Schäfer, H. und 45 Mitautoren: *Praxis der elektrischen Antriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeuge*. Expert, Renningen, 2009.
- [SRR12] Seisenberger, S., M. Ried und P. Reupold: *Electric vehicles - A cost model of electric propulsion systems*. In: *Proc. Electric Drive Production Conference (EDPC)*, Erlangen, 2012.
- [Sti99] Stier, W.: *Empirische Forschungsmethoden*. Springer, Berlin Heidelberg, 2. Auflage, 1999.
- [Wan08] Wang, J.: *Practical design considerations of power electronics in hybrid and fuel cell vehicles*. In: *Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Harbin, 2008.
- [WB06] Wiel, M. und C. Bergelt: *Untersuchungen zu entwicklungstechnischen Potenzialen hocheffizienter Antriebe*. Fraunhofer Institut Verkehrs- und Infrastruktursysteme, Dresden, 2006.

- [WD10] Wöhe, G. und U. Döring: *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. Vahlen, München, 24. Auflage, 2010.
- [Wei08] Weidauer, J: *Elektrische Antriebstechnik*. Publicis Publishing, Erlangen, 2008.
- [WKOE05] Williamson, S., A. Khaligh, S. Oh und S. Emadi: *Impact of energy storage device selection on the overall drive train efficiency and performance of heavy-duty hybrid vehicles*. In: *Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Chicago, 2005.
- [WLE06] Williamson, S., S. Lukic und A. Emadi: *Comprehensive drive train efficiency analysis of hybrid electric and fuel cell vehicles based on motor-controller efficiency modeling*. In: *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 21, no. 3. IEEE, New York, 2006.
- [WM12] Wohlfahrt-Mehrens, M.: *Electrical energy storage systems for automotive applications*. In: *Proc. Tage des Hybrids*, Aachen, 2012.
- [WNTR10] Wintrich, A., U. Nicolai, W. Tursky und T. Reimann: *Applikationshandbuch Leistungshalbleiter*. ISLE, Ilmenau, 2010.
- [XCC08] Xue, X., K. Cheng und N. Cheung: *Selection of Electric Motor Drives for Electric Vehicles*. IEEE, New York, 2008.
- [XQC09] Xiaofei, L., Z. Qianfan und Z. Chunbo: *Design of battery and ultracapacitor multiple energy storage in hybrid electric vehicle*. In: *Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Dearborn, 2009.
- [ZEHBD06] Zeraoulia, M., M. El Hachemi Benbouzid und M. Diallo: *Electric motor drive selection issues for hev propulsion systems: A comparative study*. In: *IEEE Transactions on vehicular technology*, vol. 55, no. 6. IEEE, New York, 2006.
- [ZH07] Zhu, Z. und D. Howe: *Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles*. In: *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 4. IEEE, New York, 2007.
- [Zwi66] Zwicky, F.: *Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild*. Droemer Knauer, Berlin, 1966.