

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden Grundlagen der Wärmeübertragung, des untersuchten Antriebs und der Optimierung beschrieben, die für das Verständnis nachfolgender Kapitel erforderlich sind.

2.1 Wärmeübertragung

Die Bauteiltemperaturen werden mittels thermischer Netzwerke modelliert. Dabei werden komplizierte Geometrien durch einzelne Massepunkte abgebildet. Die Erwärmung eines Massepunktes hängt von dessen Wärmekapazität, der eingebrachten Leistung und der Summe der Wärmeströme ab [4]:

$$C \cdot \frac{dT}{dt} = P_v + \sum \dot{Q} \quad \text{Gl. 2.1}$$

C	Wärmekapazität	/ J/K
T	Temperatur	/ K
t	Zeit	/ s
P_v	Verlustleistung	/ W
$\dot{Q}$	Wärmestrom	/ W

Die Verlustleistung wirkt als innere Wärmequelle. Ein Wärmestrom entsteht zwischen Massepunkt 1 und einem benachbarten Massepunkt 2, wenn eine treibende Temperaturdifferenz vorhanden ist. Die Höhe des Wärmestroms hängt dann von der Temperaturdifferenz und dem thermischen Widerstand ab (siehe Gl. 2.2). Abbildung 2.1 zeigt ein thermodynamisches System aus zwei Massepunkten.

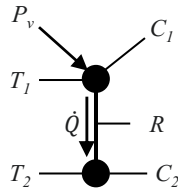


Abbildung 2.1: Prinzipdarstellung von zwei Massepunkten

$$\dot{Q} = \frac{1}{R} \cdot (T_2 - T_1) \quad \text{Gl. 2.2}$$

$\dot{Q}$	Wärmestrom	/ W
T_1	Temperatur Massepunkt 1	/ K
T_2	Temperatur Massepunkt 2	/ K
R	thermischer Widerstand	/ W/K

Der thermische Widerstand wird von drei verschiedenen Effekten bestimmt: Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung. Voruntersuchungen zeigen, dass die Wärmestrahlung bei der thermischen Simulation elektrischer Antriebe vernachlässigt werden kann [5]. Dajaku [6] bestätigt das beispielsweise. Für diese Arbeit sind folglich nur Wärmeleitung und Konvektion relevant.

$$\text{Wärmeleitung:} \quad R = \frac{l}{\lambda \cdot A_x} \quad \text{Gl. 2.3}$$

$$\text{Konvektion:} \quad R = \frac{1}{\alpha \cdot A_o} \quad \text{Gl. 2.4}$$

l	Wärmeleitungsstrecke	/ m
λ	Wärmeleitfähigkeit	/ W/(mK)
A_x	Querschnittsfläche	/ m ²
α	Wärmeübergangskoeffizient	/ W/(m ² K)
A_o	Oberfläche	/ m ²

Wärmeleitung entsteht aufgrund der Temperaturdifferenz innerhalb eines Mediums. Die Wärmeleitfähigkeit ist eine Materialkonstante. Konvektion stellt den Wärmetransport durch Teilchenbewegung dar.

Bei der Wärmeübertragung zwischen Festkörpern und strömenden Fluiden spricht man deshalb vom konvektiven Wärmeübergang. Der Wärmeübergangskoeffizient hängt von der überströmten Geometrie, den Strömungsbedingungen und der Temperatur ab. Serien- und Parallelschaltungen von thermischen Widerständen berechnen sich analog zu elektrischen Widerständen. Weiterreichende Abhandlungen zur Wärmeübertragung sind einschlägiger Literatur zu entnehmen [4], [7].

2.2 Antrieb

Der Antrieb eines batterieelektrischen Fahrzeugs wird in dieser Arbeit als das System, bestehend aus der elektrischen Maschine, der Leistungselektronik und dem Getriebe, definiert. Die Antriebskomponenten können bei batterieelektrischen Fahrzeugen vielfältig angeordnet werden: Die elektrischen Maschinen können zentral mit Getriebe und Differenzial, radnah mit Getriebe oder als Direktantrieb ausgeführt werden. Darüber hinaus können entweder nur eine oder beide Achsen angetrieben werden. Getriebe können ein- oder mehrgängig ausgeführt werden. Die Optimierung der Antriebsstrangtopologien von batterieelektrischen Fahrzeugen wurde beispielsweise von Bertram [8], Pesce [9] und Vaillant [10] untersucht.

2.2.1 Topologie / Fahrzeug

Es wird ein Zentralantrieb mit eingängigem Getriebe und Differenzial an der Hinterachse untersucht. Der vergleichsweise einfache Antrieb ermöglicht es, Einflüsse auf die Erwärmung der Antriebskomponenten zu isolieren. Tabelle 2.1 zeigt die wichtigsten Daten des Fahrzeugs.

Tabelle 2.1: Fahrzeugdaten

Topologie	2WD Zentralantrieb, Eingangsgetriebe
max. Geschwindigkeit / km/h	200
Fahrzeugmasse / kg	1250

2.2.2 Elektrische Maschine

Eine Übersicht mit Bewertung von Eigenschaften verschiedener Typen elektrischer Maschinen gibt Finken [3]. Die für die Untersuchungen verwendete elektrische Maschine ist eine permanenterregte Synchronmaschine (PSM), welche sich durch hohe Leistungs- und Drehmomentdichten bei vergleichsweise geringen Verlusten ausweist und deshalb für die Anwendung im Sportwagen attraktiv ist. Die Funktion permanenterregter Synchronmaschinen wird beispielsweise in [1] und [11] beschrieben.

2.2.2.1 Untersuchter Versuchsträger

Die untersuchte elektrische Maschine ist eine permanenterregte Synchronmaschine mit vergrabenen Magneten. Die elektrische Maschine ist auf geringe Verluste und eine hohe mechanische Leistung bei hohen Drehzahlen ausgelegt. Dazu ist im Stator eine gesehnte Wicklung mit hoher Nutzahl umgesetzt. Dadurch werden die harmonischen Wellen des magnetischen Flusses im Luftspalt reduziert – Eisenverluste können bei hohen Drehzahlen reduziert werden [3]. Der Rotor ist mit drei Magnetlagen in V-Form und zusätzlichen Flussbarrieren versehen (siehe Abbildung 2.2). Das Verhältnis von Quer- zu Längsinduktivität wird dadurch erhöht und ein Teil des Drehmoments durch Reluktanz erzeugt. Durch die hohe Reluktanzmomentnutzung ist der Wirkungsgrad im Feldschwäcbereich hoch [12], [3]. Um Wirbelströme zu reduzieren, sind 0,2 mm dicke Elektrobleche verbaut. Durch den Verguss der Wicklungen mit Epoxidharz wird die Wärmeleitung zu den Statorblechen und insbesondere zum Kühlmantel verbessert. Die elektrische Maschine verfügt über offene Windungen ohne Sternschaltung (6 Phasenausgänge) und ist für eine Zwischenkreisspannung von 800 V ausgelegt. Tabelle 2.2 zeigt die wichtigsten Daten der untersuchten elektrischen Maschine und Abbildung 2.3 die Vollastkennlinie für den motorischen Betrieb.

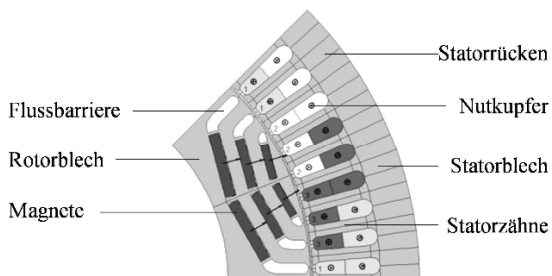


Abbildung 2.2: Blechschnitt eines Pols der elektrischen Maschine

Tabelle 2.2: Daten der elektrischen Maschine

max. Leistung bei 710 V / kW (10s)	210
max. Drehmoment / Nm (10s)	250
max. Drehzahl / 1/min	15000
Zwischenkreisspannung / V	650 – 830 V
aktive Länge / mm	185
aktiver Statordurchmesser / mm	180
Polpaare	4
Wicklung	3 Phasen; Offene Windungen
Blechmaterial	NO20
Magnetmaterial	44SH
Isolationsklasse	H

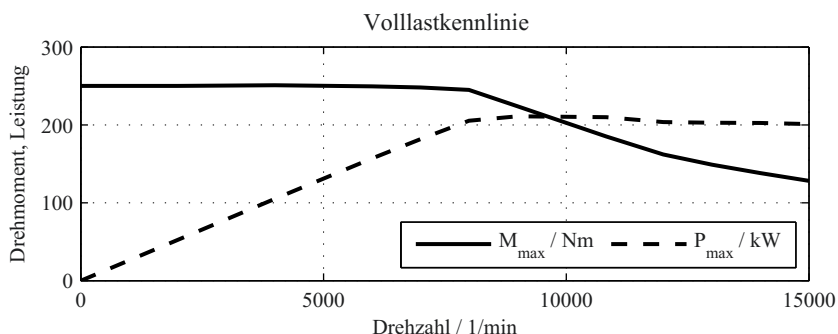


Abbildung 2.3: Volllastkennlinie der untersuchten elektrischen Maschine bei 710 V Zwischenkreisspannung

2.2.2.2 Verluste

Die Verluste in permanenterregten Synchronmaschinen wurden bereits in vielen wissenschaftlichen Arbeiten und Standardwerken umfangreich beschrieben. Grundsätzlich werden sie in Kupfer-, Eisen-, Magnet- und Reibungsverluste aufgeteilt [3]:

$$P_V = P_{V,Cu} + P_{V,Fe} + P_{V,M} + P_{V,R} \quad \text{Gl. 2.5}$$

$P_{V,Cu}$	Kupferverluste (Wicklung)	/ W
$P_{V,Fe}$	Eisenverluste (Bleche)	/ W
$P_{V,M}$	Magnetverluste	/ W
$P_{V,R}$	Reibungsverluste	/ W

Kupferverluste

Die Kupferverluste, auch Stromwärmeverluste genannt, sind proportional zum Quadrat des Stroms und zum Phasenwiderstand, welcher von der Temperatur des Kupfers abhängt [3].

$$P_{V,Cu} \sim I_{ph}^2 \cdot R_{ph}(T_{Cu}) \quad \text{Gl. 2.6}$$

I_{ph}	Phasenstrom	/ A
R_{ph}	Phasenwiderstand	/ Ω
T_{Cu}	Kupfertemperatur	/ K

Abbildung 2.4 zeigt eine übliche Regelstrategie permanenterregter Synchronmaschinen mit Reluktanzmomentnutzung in dq-Koordinaten¹. Im Grunddrehzahlbereich wird oft die MPA-Regelung (Maximales Moment pro Ampere) eingesetzt. Dabei wird das maximale Drehmoment bei minimalem Strombetrag eingestellt. Das Drehmoment hängt direkt vom Betrag des

¹ dq-Koordinaten sind rotorfeste Koordinaten, in denen die Regelung von Synchronmaschinen erfolgt. Durch Koordinatentransformationen kann daraus der 3-phasige Drehstrom berechnet werden [10]

Stromvektors ab, wodurch die Kupferverluste sich annähernd quadratisch mit dem Drehmoment erhöhen. Bei Volllast befindet sich der Stromvektor am Punkt A. Gl. 2.7 zeigt die Drehmomentgleichung in dq-Koordinaten [12].

$$M_{em} \sim \Psi_{pm} \cdot I_q + (L_q - L_d) \cdot I_d \cdot I_q \quad \text{Gl. 2.7}$$

M_{em}	Drehmoment elektrische Maschine	/ Nm
Ψ_{pm}	Permanentmagnet Fluss	/ T
$I_{d/q}$	Strom in Längs- und Querrichtung	/ A
$L_{d/q}$	Induktivität in Längs- und Querrichtung	/ H

Im Feldschwäcbereich gibt es zunächst einen meist kurzen Bereich (B), in dem der Strombetrag maximal bleibt und in mathematisch positiver Richtung entlang des Kreises maximalen Stroms läuft. Das Drehmoment fällt in diesem Bereich bei konstantem Strombetrag ab.

Bei hohen Drehzahlen und Volllast (Bereich C) wird die MMPV-Regelung (Maximales Moment Pro Volt) angewendet, bei der die Spannungsgrenze die Leistung bestimmt. Die Spannungsgrenze wird durch die grauen Ellipsen dargestellt, die mit steigender Drehzahl kleiner werden. Der Stromvektor wird so geregelt, dass das maximale Drehmoment innerhalb der Spannungsellipsen erreicht wird. Der Strombetrag wird deshalb mit steigender Drehzahl reduziert. Die Belastung der Wickelköpfe ist folglich meist in der ersten Hälfte des Drehzahlspektrums am größten und nimmt zur maximalen Drehzahl hin ab. [12]

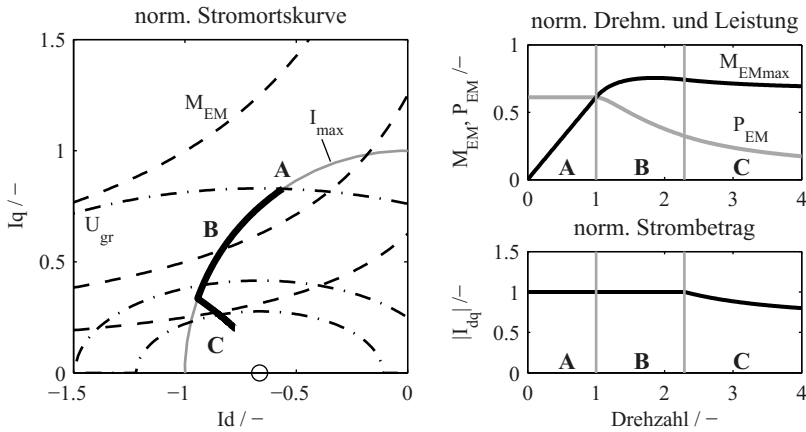


Abbildung 2.4: Regelstrategie von PSM mit Reluktanzmomentnutzung bei Vollast; M_{EM} : Linien Konstanten Drehmoments; I_{max} : maximaler Strom; U_{gr} : Spannungsgrenze

Eisenverluste

Die Eisenverluste bestehen aus Hysteres-, Wirbelstrom- und Zusatzverlusten.

$$P_{V,Fe} = P_{V,FeHy} + P_{V,FeWi} + P_{V,FeZu} \quad \text{Gl. 2.8}$$

$P_{V,FeHy}$	Hystereseverluste in den Blechen	/ W
$P_{V,FeWi}$	Wirbelstromverluste in den Blechen	/ W
$P_{V,FeZu}$	Zusatzverluste	/ W

Nach [3] gilt:

$$P_{V,FeHy} \sim B^2 \cdot f \quad \text{Gl. 2.9}$$

$$P_{V,FeWi} \sim B^2 \cdot f^2 \quad \text{Gl. 2.10}$$

$$P_{V,FeZu} \sim B^2 \cdot f^{1,5} \quad \text{Gl. 2.11}$$

B	Flussdichte	/ T
f	Frequenz des Wechselfeldes	/ Hz

Die Eisenverluste steigen überproportional mit der Frequenz und damit mit der Drehzahl. Laut Soong [12] fallen die Eisenverluste entlang der Vollastlinie im Feldschwächbereich ab, weil die Flussdichte der Grundwelle durch die Feldschwächung reduziert wird.

Magnetverluste

Die Magnetverluste entstehen durch Wirbelströme aufgrund von Änderungen der Flussdichte in den Magneten. Bei vergrabenen Magneten, wie in der untersuchten Maschine, sind die Magnetverluste verhältnismäßig gering, weil die Magnete durch die Rotorbleche vor Statorrückwirkungen geschützt sind [3].

Reibungsverluste

Die Reibungsverluste bestehen aus Lager- und Luftreibungsverlusten:

$$P_{V,R} = P_{V,RA} + P_{V,RB} \quad \text{Gl. 2.12}$$

$P_{V,RA}$	Luftreibungsverluste	/ W
$P_{V,RB}$	Lagerreibungsverluste	/ W

Die Luftreibung ist vom Medium im Luftspalt, den geometrischen Eigenschaften des Luftspalts und der Drehzahl abhängig. Sie ist proportional zur dritten Potenz der Drehzahl [13]. Mit zunehmender Temperatur und damit sinkender Viskosität der Luft nimmt die Luftreibung ab.

Die Verlustleistung durch Lagerreibung ist annähernd proportional zur Drehzahl und nimmt ebenfalls mit steigender Temperatur ab [14].

2.2.2.3 Verlustaufteilung

Für die Erwärmung der Maschine ist nicht die Ursache der Verluste, sondern deren Entstehungsort entscheidend. Deshalb werden die Verluste zunächst örtlich aufgeteilt und dann verschiedenen Betriebspunkten zugeordnet.

Wicklung

Die Kupferverluste in der Wicklung werden in drei Regionen aufgeteilt: Die beiden Wickelköpfe und die Nuten. Bei konstanter Stromdichte kann die Verlustverteilung anhand der Kupfermasse geschehen. Die Stromdichte über dem Nutquerschnitt ist allerdings in der Realität aufgrund von Skin- und Proximity-Effekten (Stromverdrängung) nicht konstant sondern erhöht sich zur Nutöffnung [15].

$$P_{V,Cu} = P_{V,CuW1} + P_{V,CuW2} + P_{V,CuN} \quad \text{Gl. 2.13}$$

$P_{V,CuW1/2}$ Kupferverluste Wickelkopf 1/2 / W

$P_{V,CuN}$ Kupferverluste Nuten / W

Elektrobleche

Die Aufteilung der Eisenverluste in Statorjoch, Statorzähne und Rotorbleche ist anspruchsvoll. Nach Yamazaki [16] und Magnussen [17] ist der Anteil der harmonischen Schwingungen in den Zähnen deutlich größer als im Joch, so dass sich die Eisenverluste mit steigender Drehzahl und Feldschwächung in den Zähnen konzentrieren. Eine Aufteilung der Statorisenverluste über die Blechmasse ist deshalb nicht möglich. Da sich der Rotor synchron mit dem Statorfeld bewegt, werden durch die Grundwelle keine Eisenverluste im Rotor erzeugt. Die durch Inverter und Nuten eingebrachten harmonischen Schwingungen führen zu mit der Drehzahl steigenden Eisenverlusten im Rotor [18].

$$P_{V,Fe} = P_{V,FeJ} + P_{V,FeZ} + P_{V,FeR} \quad \text{Gl. 2.14}$$

$P_{V,FeJ}$	Eisenverluste Statorjoch	/ W
$P_{V,FeZ}$	Eisenverluste Statorzähne	/ W
$P_{V,FeR}$	Eisenverluste Rotor	/ W

Abbildung 2.5 zeigt, an welchen Stellen die Verlustleistungen in der elektrischen Maschine entstehen.

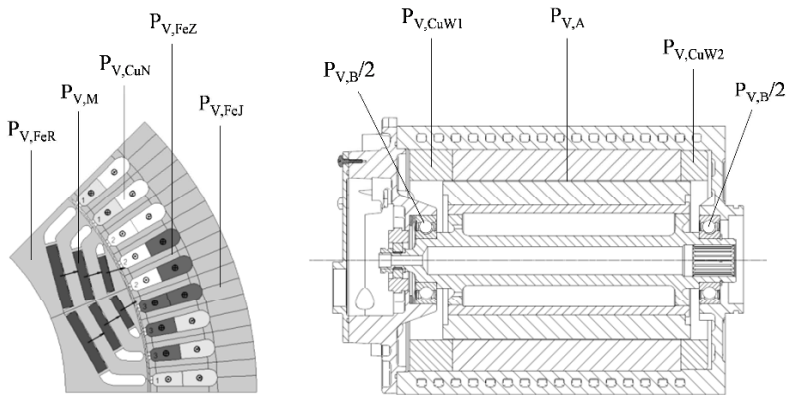


Abbildung 2.5: Entstehungsort der Verluste in Radial- und Axialschnitt

Betriebspunkte

Kupferverluste steigen tendenziell mit dem Drehmoment. Eisen- und Magnetverluste steigen hauptsächlich mit der Drehzahl, aber auch mit der Flussdichte im Eisen – also mit dem Drehmoment. Reibungsverluste steigen nur mit der Drehzahl. Abbildung 2.6 zeigt die gemessenen Verlustleistungskennfelder der untersuchten elektrischen Maschine. Wie in Kapitel 2.2.2.2 beschrieben, sinken die Kupferverluste entlang der Vollastlinie im Feldschwächbereich. Die Eisenverluste sind auffallend hoch.

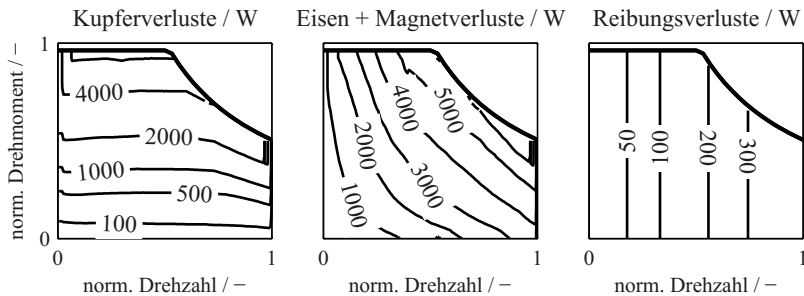


Abbildung 2.6: Gemessene Verlustleistungskennfelder der untersuchten elektrischen Maschine bei 100 °C

2.2.2.4 Einfluss der Temperatur auf die Verluste

Der elektrische Widerstand des Kupfers steigt mit der Temperatur, und damit steigen die Kupferverluste.

Durch steigende Magnettemperaturen sinken die Remanenzflussdichte und die Entmagnetisierungskennlinie ab [19]. Daraus folgen eine verringerte Flussdichte im Luftspalt und damit, bei konstantem Drehmoment, ein höherer Strom. Dies muss im Steuergerät der Leistungselektronik berücksichtigt werden und führt zu höheren Kupferverlusten.

2.2.2.5 Thermische Grenzen

Es gibt drei temperaturkritische Elemente in der untersuchten elektrischen Maschine: Das Isolationssystem der Wicklung, das Vergussmaterial und die Magnete. Bei der Isolation können entweder die Beschichtung der Drähte oder die Isolationspapiere Schaden nehmen. Die vorliegende Isolationsklasse H nach DIN EN 60085 [20] ist bis 180 °C freigegeben. Auch die Vergussmasse kann bei hohen Temperaturen spröde werden und Risse können entstehen. Die Magnete können bei hohen Temperaturen und hohem Gegenfeld dauerhaft entmagnetisiert werden [19]. Die untersuchte elektrische Maschine hat eine Grenztemperatur der Magnete von 150 °C.

Durch die hohen Eisenverluste (siehe Abbildung 2.6) kann bei einer Kühlmitteltemperatur von 70 °C oberhalb von 8000 1/min keine Dauerleistung (S1-Betrieb) mehr abgegeben werden. Für die theoretischen Untersuchungen

dieser Arbeit wird deshalb eine Rotor-Grenztemperatur von 200 °C angenommen. Abbildung 2.7 zeigt die Drehmoment- und Leistungskennlinien, die bei den jeweiligen Grenztemperaturen von Wickelkopf und Rotor möglich sind. Selbst mit erhöhter Rotor-Grenztemperatur ist die Dauerleistung dieser Maschine durch den Rotor beschränkt.

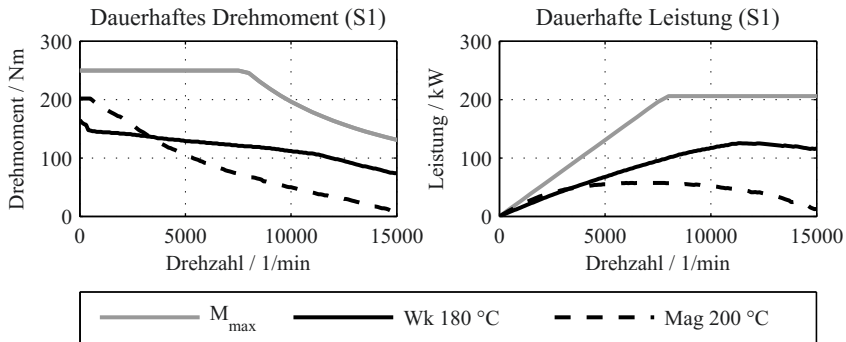


Abbildung 2.7: S1 Kennlinien für Wickelkopf und Rotor an der Grenztemperatur bei 70° Kühlmitteltemperatur

2.2.2.6 Wärmeleitung

Im Folgenden werden die vier dominierenden Wärmepfade der untersuchten elektrischen Maschine beschrieben. Abbildung 2.8 und Abbildung 2.9 skizzieren die beschriebenen Wärmepfade.

Wärmepfad 1 – Stator zum Kühlmedium

Zwischen dem Nutkupfer und den Statorzähnen gibt es einen hohen thermischen Widerstand. Die Kupferdrähte sind mit einer Isolationsschicht überzogen, die nicht nur elektrisch, sondern auch thermisch isoliert. Zwischen den Drähten in der Nut und den Elektroblechen befinden sich Isolationspapiere. Diese Isolationspapiere sind notwendig, da die Isolation der Drähte gegenüber Erdung oder anderen Phasen nicht ausreicht. Die Wicklung ist mit Epoxidharz vergossen, wodurch die Wärmeleitung zwischen den Drähten und zum Eisen verbessert wird. Die im Kupfer entstehende Wärme fließt bei entsprechender Temperaturdifferenz über die Isolation der Drähte, die Vergussmasse, die Isolationspapiere und den Kontaktwiderstand zwischen den Isolationspapieren und den Elektroblechen in die Elektrobleche.

Bei niedrigen Drehzahlen kann diese Temperaturdifferenz groß sein, da in den Elektroblechen kaum Eisenverluste anfallen. Kommen diese hinzu, verringert sich der Wärmestrom vom Kupfer in die Elektrobleche. Die Wärmeleitung in den Elektroblechen in radialer Richtung ist deutlich besser als in axialer Richtung, was an den axial gestapelten und gegeneinander isolierten Blechen liegt. Zwischen den Elektroblechen und dem Kühlmantel liegt ein weiterer thermischer Widerstand. Dieser Kontaktwiderstand hat einen großen Einfluss auf den Wärmepfad. Aufgrund der vielen 0,2 mm dicken Bleche des Stators ist die Kontaktfläche nicht glatt. Der letzte entscheidende Wärmeübergang liegt zwischen dem Aluminium des Kühlmantels und dem Kühlmedium. Dieser hängt von Geometrie und Oberfläche des Kühlmantels, dem Volumenstrom und der Temperatur des Kühlmediums ab. Als Kühlmedium wird eine 50:50 Mischung aus Wasser und Glykol eingesetzt.

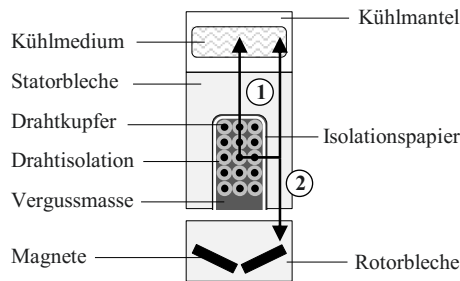


Abbildung 2.8: Skizze (Radialschnitt) der Wärmepfade 1 und 2 der el. Maschine

Wärmepfad 2 – Zwischen Stator und Rotor

Bei hohen Lasten ist die Statortemperatur zunächst meist höher als die Rotortemperatur. Wie in Kapitel 2.2.2.3 beschrieben, liegen die größten Verluste des Kupfers in den Nuten im Bereich der Nutöffnung an. Auch die Eisenverluste des Stators konzentrieren sich bei höheren Drehzahlen an den Statorzähnen. Die Wärme fließt deshalb bei hohen Belastungen meist vom Stator über den Luftspalt in die Rotorbleche. Der thermische Widerstand des Luftspaltes sinkt mit der Drehzahl. Nach Hinrich [21] entstehen bei hohen Drehzahlen allerdings erhebliche Reibungsverluste im Luftspalt, die dem Wärmestrom über den Luftspalt entgegen wirken können. Bei langen Belastungen und hohen Verlusten im Rotor kann sich der Rotor soweit erhitzen, dass sich der Wärmestrom umgekehrt. Auch bei niedrigen Lasten und hohen

Drehzahlen ist ein Wärmestrom von Rotor zu Stator wahrscheinlich, weil dann hohe Eisen- und geringe Kupferverluste entstehen.

Wärmepfad 3 – Wickelkopf zum Kühlmedium

Der Wickelkopf ist bei permanentenerregten Synchronmaschinen mit verteilter Wicklung meist die heißeste Stelle. Der Wickelkopf hat eine deutlich größere Querschnittsfläche als die Nuten. Im Inneren des Wickelkopfes entsteht bei hohen Lasten viel Wärme. Der thermische Widerstand im Wickelkopf quer zu den Drähten hin zum Kühlmantel ist groß. Neben den Drahtisolationen gibt es auch im Wickelkopf Isolationspapiere zwischen den Phasen und zum Gehäuse. Das Vergussmaterial verbessert die Wärmeleitung und den Wärmeübergang zum Kühlmantel deutlich. Da der Wickelkopf das heißeste Bauteil ist, ist Wärmepfad 3 von besonderer Bedeutung für die Dauerleistung der Maschine.

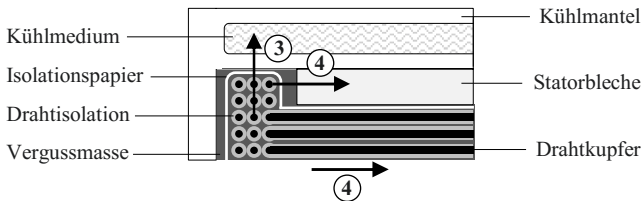


Abbildung 2.9: Skizze (Axialschnitt) der Wärmepfade 3 und 4 der el. Maschine

Wärmepfad 4 – Wickelkopf zum Stator

Bei niedrigen Drehzahlen und hohen Drehmomenten erwärmt sich das Kupfer, insbesondere der Wickelkopf, deutlich schneller als die Elektrobleche des Stators. Es kann also zu einem nennenswerten Wärmestrom vom Wickelkopf in den Stator kommen.

Hierzu gibt es zwei mögliche Wärmepfade: Der erste geht direkt entlang der Kupferdrähte in die Nuten, der andere über die Vergussmasse axial in die Elektrobleche.

Die thermischen Widerstände sind im Voraus schwer zu bestimmen. Durch analytische Berechnungsvorschriften und numerische CFD und FEM Simulationen lassen sich Annäherungen ermitteln, die aber aufgrund von Vereinfachungen und Fertigungstoleranzen teilweise von der Realität abweichen. Voruntersuchungen zeigen, dass selbst bei sehr gewissenhafter analytischer und numerischer Berechnung große Abweichungen der berechneten zu den realen Werten entstehen können [22].

2.2.3 Leistungselektronik

Die eingesetzte Leistungselektronik ist so ausgelegt, dass sie selbst bei Vollast der elektrischen Maschine nicht temperaturkritisch wird. Derating tritt folglich nicht ein. Dass eine solche Auslegung für elektrisch angetriebene Sportwagen vorteilhaft ist, wird in Kapitel 5.1 hergeleitet. Eine Beschreibung der Funktion der Leistungselektronik für Fahrzeugantriebe gibt u.a. [23].

2.2.3.1 Untersucher Versuchsträger

Die untersuchte Leistungselektronik ist als Dreifache-H-Brücke mit Standardmodulen ausgeführt. Die Leistungshalbleiter sind in der 1200 V Klasse ausgeführt. Die Kühlung erfolgt durch eine Kühlplatte mit Pin-Fin-Kühlung. Tabelle 2.3 fasst die wichtigsten Daten zusammen.

Tabelle 2.3: Daten der Leistungselektronik

Scheinleistung / kVA bei 710 V	270
max. Phasenstrom / A	180
Schaltfrequenz / Hz	10000

2.2.3.2 Verluste

Eine Leistungselektronik hat zwölf Schalter mit mehreren parallel geschalteten IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) und Dioden. In den IGBT und Dioden entstehen Umschalt- und Durchlassverluste.

Umschaltverluste

Die Umschaltverluste teilen sich in Ein- und Ausschaltverluste auf, wobei die Einschaltverluste bei den Dioden zu vernachlässigen sind. Die Umschaltverluste der IGBT berechnen sich nach Eckardt [24] mit Gl. 2.15, wobei hier gegenüber [25] Vereinfachungen getroffen werden, wie beispielsweise die Vernachlässigung des Temperatureinflusses. $E_{S,IGBT}$, $\hat{I}_0$ und U_0 werden aus dem Datenblatt des Modulherstellers entnommen, z.B. [26].

Die Umschaltverluste hängen von der Schaltfrequenz und nicht von der Grundwellenfrequenz, also nicht von der Drehzahl der elektrischen Maschine ab. Die Berechnung der Umschaltverluste der Diode verläuft ähnlich mit derselben Proportionalität zur Schaltfrequenz [25].

$$P_{Sw,IGBT} = \frac{f_{Sw} \cdot E_{S,IGBT} \cdot \hat{I} \cdot U_{ZK}}{\pi \cdot \hat{I}_{ref} \cdot U_{ref}} \quad \text{Gl. 2.15}$$

$P_{Sw,IGBT}$	Umschaltverluste IGBT	/ W
f_{Sw}	Schaltfrequenz	/ Hz
$E_{S,IGBT}$	Schaltverlustenergie einer Periode	/ J
$\hat{I}$	Scheitelwert des Stroms	/ A
U_{ZK}	Zwischenkreisspannung	/ V
$\hat{I}_{ref}$	Referenzbedingung Strom	/ A
U_{ref}	Referenzbedingung Spannung	/ V

Durchlassverluste

Die Durchlassverluste sind in Gl. 2.16 ebenfalls am Beispiel der IGBT für sinusförmige Pulsweitenmodulation dargestellt. Die Berechnung basiert auf einem gemittelten Strom. Die Berechnung der Verluste an der Diode verläuft ähnlich, mit derselben Abhängigkeit vom Durchlassstrom. [25]

$$P_{DC,IGBT} = V_{CE0} \cdot \hat{i} \cdot \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{m \cdot \cos\varphi}{8} \right) + r_1 \cdot \hat{i}^2 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{m \cdot \cos\varphi}{3\pi} \right) \quad \text{Gl. 2.16}$$

$P_{DC,IGBT}$	Durchlassverluste IGBT	/ W
V_{CE0}	Sättigungsspannung	/ V
m	Modulationsgrad	/ –
$\cos\varphi$	Wirkfaktor	/ –
r_1	differentieller Widerstand	/ Ω

Betriebspunkte

Abbildung 2.10 zeigt die Gesamtverluste für IGBT und Diode bei konstanter Spannung und Temperatur. Die Verluste steigen mit dem Drehmoment und leicht mit der Drehzahl. Entlang der Vollastlinie sinken sie. Die Verluste am IGBT sind höher als an der Diode.

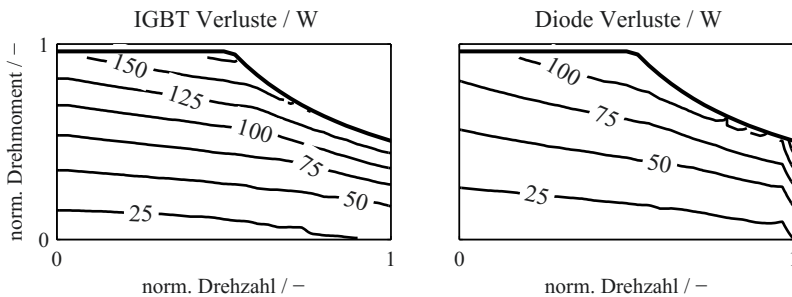


Abbildung 2.10: Simulierte Gesamtverluste IGBT und Diode

2.2.3.3 Thermische Grenzen

Derating der Leistungselektronik ist komplex. Um eine rasche Alterung zu verhindern, müssen neben einer zu hohen absoluten Temperatur auch zu hohe Temperaturhübe innerhalb einer PWM-Periode und zu hohe Temperaturdifferenzen in den Bauteilen eines Moduls unterbunden werden.

Durch hohe Temperaturdifferenzen in den Bauteilen eines Leistungshalbleitermoduls oder durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten entstehen thermo-mechanischen Spannungen. Diese Spannungen können beispielsweise zum Ablösen oder Reißen der Bonddrähte, zur Delamination der Lotverbindung oder zu Rissen in der Keramikschicht (Substrat) führen. Auch das Wärmeleitmaterial zwischen Substrat und Kühlkörper kann beschädigt werden. Beschädigungen der Bonddrähte führen zu steigenden Durchlassverlusten, während Beschädigungen der Verbindungen und Substrate zu einem erhöhten thermischen Widerstand führen. Jede Art der Schädigung führt zu einer höheren Bauteiltemperatur, so dass sich der Effekt selbst verstärkt. [27]

Da die untersuchte Leistungselektronik unkritisch ausgelegt ist, wird in dieser Arbeit lediglich die Grenztemperatur von 125°C überwacht und die Temperaturdifferenzen werden vernachlässigt.

2.2.3.4 Wärmeleitung

Abbildung 2.11 zeigt den Aufbau eines Standardmoduls. Die Leistungshalbleiter sind auf das DCB (Direct Copper Bonding) Substrat aufgelötet. Das DCB besteht aus einer elektrisch isolierenden Schicht aus Keramik (Al_2O_3), die beidseitig mit Kupfer bedeckt ist. Das Substrat ist direkt auf die Kühlplatte aus Aluminium mit Pin-Fins aufgelötet. Gekühlt wird mit 50:50 Wasser-Glykol-Gemisch.

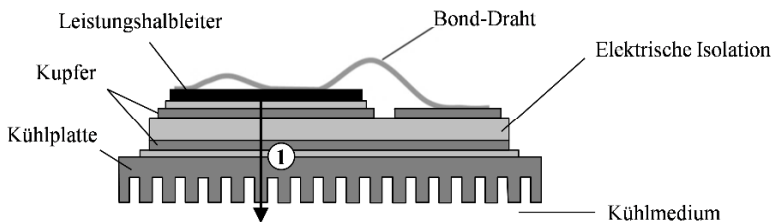


Abbildung 2.11: Prinzipieller Aufbau eines Leistungshalbleitermoduls und Wärmeleitpfad 1, nach [27]

Wärmepfad 1 – Leistungshalbleiter zum Kühlmedium

Die Leistungshalbleiter werden durch die Verlustleistung erwärmt. Durch das Temperaturgefälle zum Kühlmedium entsteht ein Wärmestrom über das Substrat in den Kühlkörper und von dort in das Kühlmedium. Abbildung 2.11 veranschaulicht Wärmepfad 1.

Wärmepfad 2 – Leistungshalbleiter untereinander

Die nahe beieinanderliegenden IGBT und Dioden beeinflussen sich gegenseitig so, dass ein Teil des Wärmestroms zwischen den beiden Halbleitern fließen kann. Laut Raciti [28] müssen auch die Wärmeströme der einzelnen Leistungshalbleitermodule untereinander beachtet werden. Durch die Parameteranpassung bei der Erstellung des thermischen Modells wird der geringe Einfluss des zweiten Wärmepfades kompensiert, so dass eine Modellierung des dominanten Wärmepfades 1 für diese Arbeit ausreicht.

Die thermischen Widerstände zwischen den einzelnen Komponenten eines Leistungsmoduls sind schwer zu ermitteln, da innerhalb des Moduls nur sehr schwierig exakte Temperaturen gemessen werden können. Die Temperaturen der Halbleiter können mittels thermischer Berechnungen und Temperatursensoren in der Nähe der Leistungshalbleiter (Beobachter) abgeschätzt werden [29].

2.2.4 Getriebe

Das Getriebe des untersuchten Antriebs ist ein zweistufiges eingängiges Stirnradgetriebe mit Differenzial. Die Verluste im Getriebe sind Verzahnungsverluste, Lagerreibungsverluste, Planschverluste und Dichtungsverluste [14]. Das Getriebe hat einen sehr hohen Wirkungsgrad von meist über 97 %. Durch einen Öl-Wasser-Wärmeübertrager ist das Getriebe thermisch unkritisch.

Tabelle 2.4: Daten des Getriebes

Topologie	Zweistufig, feste Übersetzung, Differenzial
Übersetzungsverhältnis	9,14

2.2.5 Batterie

Die Batterie ist eine virtuelle, für diese Arbeit entworfene, Lithium-Ionen Batterie mit Pouchzellen und einem Energieinhalt von 35 kWh. Die Zellspannung und inneren Widerstände orientieren sich an vorhandenen Zellen. Die virtuelle Batterie ist auf 800 V Nennspannung ausgelegt. Thermische Effekte der Batterie werden nicht erfasst. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass kein Batterie-Derating notwendig ist.

Tabelle 2.5: Daten der Batterie

Zellen	Lithium-Ionen Pouchzellen
Nennspannung	800 V
Schaltung	208s2p
Energieinhalt	35 kWh

2.3 Optimierung

Einige Problemstellungen dieser Arbeit erfordern die Ermittlung einer optimalen Lösung bei vielen Eingangsgrößen und Kombinationsmöglichkeiten. Eine Rastersuche, das heißt das Berechnen aller möglichen Kombinationen der Eingangsgrößen, ist nicht in vertretbarer Rechenzeit und Genauigkeit durchführbar. Aus diesem Grund werden Optimierungsverfahren eingesetzt.

Das Ziel der Optimierung ist es, unter einer Auswahl an möglichen Eingangsgrößen die Kombination zu finden, die innerhalb erlaubter Grenzen zur besten Lösung führt. Anders ausgedrückt: Gesucht ist ein Parametertupel $\underline{p}$, das die Zielfunktion f minimiert [30]:

$$\underline{y}^* = \min_{\underline{p}} \{y = f(\underline{p}); \underline{p} = (p_1, \dots, p_n)\} \quad \text{Gl. 2.17}$$

Die Parameter des Parametertupels werden als Optimierungsparameter bezeichnet. Die Zielfunktion f berechnet in Abhängigkeit der Optimierungsparameter die Zielgrößen y . Es kann eine oder, bei der multikriteriellen Optimierung, auch mehrere Zielgrößen geben. Zielgrößen sind beispielsweise die Rundenzeit oder die Fahrbarkeit. In dieser Arbeit ist die Zielfunktion das in Kapitel 3.1 beschriebene Fahrzeugmodell. Damit das Ergebnis zulässig ist, müssen oft Nebenbedingungen eingehalten werden. Diese können entweder Gleichheits- oder Ungleichheitsnebenbedingungen sein. Ein Beispiel einer Ungleichheitsnebenbedingung wäre das Einhalten bestimmter Temperaturgrenzen.

2.3.1 Auswahl der Optimierungsverfahren

Eine gute Abhandlung der Optimierungsverfahren gibt Tellermann [30]. Er unterscheidet zunächst analytische und numerische Zielfunktionen. Die Zielfunktion in dieser Untersuchung ist das Fahrzeugmodell, das nicht durch eine geschlossene analytische Gleichung dargestellt werden kann. Optimierungsverfahren, die auf geschlossene analytische Gleichungen ausgelegt sind, können folglich nicht verwendet werden. Ein numerisches Verfahren ist deshalb erforderlich.

Die numerischen Verfahren lassen sich in deterministische und stochastische Verfahren gliedern. Zu den deterministischen Verfahren gehören beispielsweise das Simplex- und das Jacob-Verfahren [31]. Die deterministischen Verfahren haben gemeinsam, dass sie sich nicht uneingeschränkt für die globale Optimierung eignen, weil sie dazu neigen, zu lokalen Minima zu konvergieren. Ein Sonderfall deterministischer Optimierungsverfahren ist die dynamische Programmierung, die in Kapitel 2.3.3 beschrieben wird. Sundström [32], Ebbesen [33], Sciarretta und Guzzella [34] und Weitere verwenden die dynamische Programmierung für die Optimierung der Betriebsstrategie von Hybridfahrzeugen (siehe Kapitel 6.1.1).

Bei stochastischen Verfahren werden die Optimierungsparameter entweder komplett zufällig erzeugt (Monte-Carlo-Methode) oder durch zielorientierte Methoden eine Konvergenz zum globalen Minimum beschleunigt. Für die Anwendung von Optimierungen von Fahrzeugauslegungen haben sich in der Technik an der Natur orientierte Optimierungsalgorithmen durchgesetzt. Ebbesen [33] und Wu [35] setzen die PSO (Particle-Swarm-Optimization)

ein, um Antriebsstrangkomponenten zu optimieren. Vaillant [10] verwendet dazu den von Deb [36] entwickelten NSGAI (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II). Manheller [37] setzt den NSGAI ein, um eine regelbasierte Betriebsstrategie (siehe Kapitel 6.1.1) zu optimieren.

In dieser Arbeit wird an drei Stellen ein Optimierungsalgorithmus eingesetzt: Für die Anpassung (Parameteranpassung) des thermischen Modells der elektrischen Maschine an Messdaten wird der NSGAI eingesetzt (siehe Kapitel 3.1.1), welcher für die multikriterielle Optimierung mit vielen Optimierungsparametern gute Ergebnisse liefert. Für die Optimierung der regelbasierten Betriebsstrategien wird aus demselben Grund ebenfalls der NSGAI eingesetzt (siehe Kapitel 6.1.1). Für die Erzeugung einer global optimalen Betriebsstrategie mit Streckenkenntnis wird die dynamische Programmierung verwendet. Der NSGAI und die dynamische Programmierung werden deshalb kurz vorgestellt.

2.3.2 NSGAI

Der NSGAI von Deb [36] ist eine Weiterentwicklung des erstmals von Holland [38] vorgestellten genetischen Algorithmus. Der NSGAI ist ein multikriterieller Algorithmus und beruht auf dem Prinzip der natürlichen Auslese.

Anfangs wird eine Anfangspopulation von N Individuen zufällig erzeugt. Diese Individuen entsprechen jeweils einem Satz an Optimierungsparametern. Für jedes Individuum werden die Zielgrößen mit der Zielfunktion berechnet.

Die Individuen werden dann anhand ihrer Fitness sortiert. Die Fitness wird durch den Rang und die crowding distance definiert. Der Rang wird über das Prinzip der Dominanz ermittelt. Dazu werden die Zielgrößen aller Individuen verglichen und gezählt, wie viele andere Individuen bezogen auf eine Zielgröße besser oder schlechter sind. Aus diesen beiden Zahlen (Anzahl Bessere und Schlechtere) wird dann der Rang berechnet. Die crowding distance gibt an, ob sich ein Individuum in einem stark bevölkerten Bereich des Lösungsraums befindet. Um eine möglichst weite Verteilung der Lösungen im Lösungsraum zu erreichen, werden Individuen mit einer größeren crowding distance (d.h. weniger eng besiedelt) bevorzugt. Die Fitness ergibt sich nun zunächst aus dem Rang und bei gleichem Rang aus der crowding distance.

Für die Fortpflanzung wird die Hälfte der Population mit der höchsten Fitness (Eltern) ausgesucht. Dazu wird zunächst nach dem Rang und anschließend nach der crowding distance sortiert.

Die ausgewählten Individuen erzeugen dann durch Vererbung und Mutation N neue Individuen. Bei der Vererbung werden die Erbinformationen (Optimierungsparameter) gekreuzt wohingegen bei der Mutation die Erbinformation eines einzelnen Elternteils „mutiert“ wird. Die Population ist anschließend doppelt so groß wie die Anfangspopulation. Für die neuen Individuen werden die Zielgrößen berechnet und alle Individuen anschließend nach der Fitness sortiert. Die untere Hälfte wird gelöscht.

Anschließend beginnt die nächste Generation mit der Auswahl der Individuen mit der höchsten Fitness. Auf diese Weise bleiben mit jeder Generation bessere Individuen zurück.

Der NSGAI II ist ein multikriterieller Optimierungsalgorithmus. In dieser Arbeit wird der NSGAI II mit zwei Zielgrößen verwendet. Der Ergebnisraum ist folglich zweidimensional. Die optimalen Lösungen liegen auf einer zweidimensionalen Linie, die als Paretofront bezeichnet wird. Pareto-optimale Lösungen sind so definiert, dass eine Zielgröße nur besser werden kann, wenn die andere dafür schlechter wird [31].

2.3.3 Dynamische Programmierung

Die dynamische Programmierung wurde von Bellmann [39] entwickelt und ist heute Stand der Technik bei der Berechnung von Betriebs- oder Fahrstrategien mit Streckenkenntnis. Die dynamische Programmierung beruht auf dem Prinzip der Optimalität, das besagt, dass ein globales Optimum immer aus der Summe vieler optimal gelöster Teilprobleme besteht [39].

Sundström [32] beschreibt beispielsweise die grundlegende Funktionsweise am Beispiel eines Hybridfahrzeuges, das einen Verbrauchszyklus möglichst effizient durchfahren soll:

Es gibt eine Zustandsvariable $x \in \underline{X}$, die in diesem Fall der SOC (State-of-Charge) der Batterie ist. Die Stellgröße $u \in \underline{U}$ ist der torque-split-factor, also der Faktor, mit dem das Drehmoment zwischen Verbrennungsmotor und elektrischer Maschine aufgeteilt wird. Randbedingungen geben darüber hinaus den SOC zu Anfang und Ende des Zyklus an. Da das Streckenprofil, also die Geschwindigkeit, zu jedem Zeitpunkt gegeben ist, kann die Gesamtzeit in diskrete Zeitschritte eingeteilt werden.

Die Zeit wird rückwärts durchlaufen, also vom Ende des Zyklus zum Start. Streckenkenntnis ist folglich zwingend erforderlich. Für jeden Zeitschritt k werden nun alle i möglichen Zustände von x berechnet. Daraus ergibt sich ein zweidimensionales Gitter mit den Zustandsvariablen x_k^i . Für diese Zustände x_k^i wird nun für jede mögliche Stellgröße u ein Zeitschritt (diesmal zeitlich in Richtung spät) berechnet. Eine Kostenfunktion J berechnet die Kosten für diesen Zeitschritt. Die Kosten entsprechen in diesem Fall dem Energieverbrauch. Die Kosten für die günstigste Stellgröße u werden für den Zustand x_k^i hinterlegt.

Im nächsten Zeitschritt (also zeitlich Richtung früher) werden die Kosten für jeden Zustand und Stellgröße dann aus den Kosten dieses Zeitschrittes plus die Kosten aller Zeitschritte danach bis zum Ziel berechnet (cost-to-go). Das Ergebnis der Berechnung ist ein Kennfeld mit optimalen Stellgrößen.

In einer Vorwärtsrechnung (zeitlich) wird nun der Pfad mit den geringsten Gesamtkosten ausgewählt. Weitere Informationen zur dynamischen Programmierung für die Anwendung bei Hybridfahrzeugen sind beispielsweise [32], [33] oder [40] zu entnehmen.

2.4 Zusammenfassung Grundlagen

Die Erwärmung eines Massepunktes hängt von dessen thermischer Kapazität und der Differenz von ein- und ausgehender Leistung ab. Die Wärmeleitung zwischen zwei Massepunkten wird durch den thermischen Widerstand und die treibende Temperaturdifferenz bestimmt.

Die Verluste in der elektrischen Maschine unterteilen sich in Kupfer-, Eisen-, Magnet- und Reibungsverluste. Für die Erwärmung sind die Entstehungsorte der Verlustleistungen relevant. An den Wickelköpfen entstehen Kupferverluste, im Stator Kupfer- und Eisenverluste und im Rotor entstehen Eisen- und Magnetverluste.

Sowohl steigende Kupfer- als auch Magnettemperaturen führen zu höheren Kupferverlusten.

Die wichtigsten Wärmepfade in der elektrischen Maschine sind vom Stator zum Kühlmedium, vom Stator zum Rotor, von den Wickelköpfen ins Kühlmedium und vom Wickelkopf zum Stator. Die thermischen Widerstände auf diesen Wärmepfaden sind schwierig zu bestimmen. Die temperaturkritischen Elemente der elektrischen Maschine sind die Wicklungsisolation (180 °C) und die Magnete (150 °C). Aufgrund der erhöhten Eisenverluste der untersuchten elektrischen Maschine wird die Grenztemperatur der Magnete für die Untersuchungen in dieser Arbeit auf 200 °C erhöht.

In der Leistungselektronik entstehen an den Leistungshalbleitern (IGBT und Dioden) Umschalt- und Durchlassverluste. Der wichtigste Wärmepfad geht über die Leistungshalbleiter durch das Substrat zum Kühlkörper. Die thermischen Widerstände sind schwierig zu bestimmen. Kritisch sind die maximale Temperatur der Leistungshalbleiter und die Temperaturdifferenzen der verschiedenen Komponenten eines Leistungsmoduls sowie hohe Temperaturgradienten.

Bei vielen Freiheitsgraden und eingeschränkter Zeit kann ein optimales Ergebnis nur durch Optimierungsverfahren gefunden werden. Für eine Mehrzieloptimierung bei vielen Eingangsgrößen wird in dieser Arbeit der NSGAI und für die Ermittlung einer Betriebsstrategie bei Streckenkenntnis die dynamische Programmierung eingesetzt.

Derating-Strategien für elektrisch angetriebene
Sportwagen

Engelhardt, T.

2017, XXXI, 152 S. 65 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-18206-9