

1 Thematische Einleitung

Bereits 1902 entwickelte und konstruierte Ferdinand Porsche das erste Hybridfahrzeug, bei dem ein Verbrennungsmotor für die Aufladung einer Batterie sorgte und beide Systeme für den Vortrieb des Fahrzeuges genutzt werden konnten. Doch erst seit den 1990er-Jahren wurde das Konzept im Rahmen von technischer Weiterentwicklung und der immer stärker in den Fokus geratenden Klimadebatte wieder aufgegriffen und verstärkt weiterentwickelt. Das erste in Großserie produzierte Hybridfahrzeug war der Toyota Prius I im Jahre 1992, der anfangs ausschließlich auf dem japanischen Markt verfügbar war.

Elektrische Maschinen bieten aufgrund des deutlich höheren Wirkungsgrades im Vergleich zu konventionellen Verbrennungsmotoren großes Sparpotential für fossile Kraftstoffe. Sie können weiterhin den Wirkungsgrad der Verbrennungskraftmaschine durch intelligente Lastpunktverschiebung hin zu effizienteren Lastpunkten verbessern.

Hybridfahrzeuge können auch Vorteile hinsichtlich der längsdynamischen Fahrperformance bieten. Supersportwagen wie der Porsche 918 Spyder beweisen, dass sich die Anforderungen minimaler Kraftstoffverbrauch und hohe elektrische sowie hybridische Beschleunigungswerte nicht ausschließen müssen. Ein Beleg dafür ist der Rundenrekord für in Serie produzierte Sportwagen mit straßenzugelassener Bereifung auf dem Nürburgring Nordschleife von 6:57 Minuten im September 2013 bei gleichzeitigen Verbrauchswerten von 3 l/100km im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ).

Da ein Elektromotor die zugeführte elektrische Energie nicht vollständig in mechanische Energie umwandeln kann, führen die restlichen, durch den Wirkungsgrad der Maschine begründeten Wärmeverluste zu einer Temperaturerhöhung der Aktivteile. Diese Erhöhung bedingt zum einen die

Verschiebung des Maschinenbetriebs in Bereiche mit schlechteren Wirkungsgrad und beeinflusst damit das Aufwärmverhalten, zum anderen kann sie bei Überschreitung von Grenztemperaturen von Lacken, Magneten, Kunststoffen und Lagern zu einer thermischen Schädigung von Bauteilen führen. Diese gilt es durch eine Reduzierung der angeforderten Leistung zu vermeiden. Diese Leistungsreduktion bemerkt der Fahrer durch reduziertes Beschleunigungsvermögen des Fahrzeuges. Das Verhältnis der kurzzeitig verfügbaren so genannten Peak-Leistung gegenüber der dauerhaft verfügbaren so genannten Dauerleistung für eine exemplarische Synchronmaschine ist in Abbildung 1-1 dargestellt.

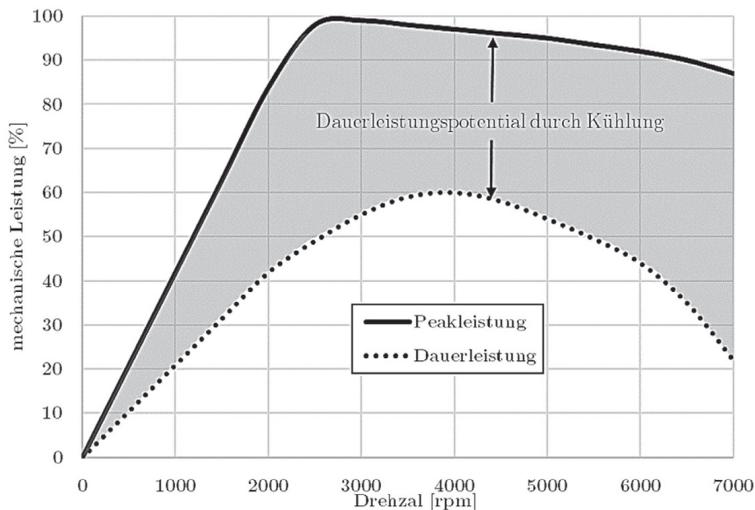


Abbildung 1-1 Verhältnis Peakleistung zu Dauerleistung einer elektrischen Maschine [Reif2012]

Durch eine zielgerichtete Kühlung der kritischen Maschinenbauteile kann das zwischen den Leistungskurven vorhandene Dauerleistungspotential erschlossen werden. Die kritischen Bauteile erreichen ihre Grenztemperatur erst bei höherer Last, was für den Fahrer direkt als erhöhte Verfügbarkeit der elektrischen Antriebsleistung bei hohen Energiedurchsätzen bemerkbar

ist. Alternativ kann dieses Potential der erhöhten Leistungsdichte genutzt werden, um die elektrische Maschine bei gleicher Absolutleistung kleiner zu dimensionieren und so Bauraum und Gewicht zu sparen. Gleichzeitig können Materialkosten eingespart werden.

Zur Erschließung dieses Dauerleistungspotentials bietet sich in erster Linie eine bessere Kühlung der elektrischen Maschine an. Hierzu werden die temperaturkritischen Bauteile über verbesserte Wärmepfade näher an die Wärmesenken angebunden. Dies kann zum Beispiel durch die Optimierung der Kühlkanalgeometrie für erhöhte Wärmeübergangswerte oder durch Verwendung von Materialien mit verbesserter thermischer Leitfähigkeit umgesetzt werden.

Zudem besteht die Möglichkeit der Ausnutzung bereits vorhandener Systempotentiale durch detaillierte thermische Modellierung und damit des Betriebs der Maschine bis in den Grenzbetrieb ohne Sicherheitsvorhalt durch Leistungsreduktion. Hierzu sind keinerlei konstruktive Änderungen an der bestehenden Maschine erforderlich. Allein die detaillierte Kenntnis über die lastpunktabhängige Bauteiltemperaturentwicklung ermöglicht es, die Systempotentiale vollständig zu erschließen und die Systemleistung erst zu reduzieren, wenn ein Bauteil aufgrund von Grenztemperaturüberschreitung tatsächlich gefährdet ist. Der Sicherheitsvorhalt kann auf ein Minimum reduziert werden.

Modelle können weiterhin genutzt werden, um bereits in einer der frühen Entwurfsphasen die geeignete Betriebsstrategie simulativ auf Gesamtfahrzeugebene zu entwickeln oder Defizite in der Kühlleistung zu identifizieren, die frühzeitig durch konstruktive Maßnahmen abgestellt werden können. Ein belastbares thermisches Modell einer elektrischen Maschine bietet die Möglichkeit, die Anforderung des Gesamtfahrzeuges zyklusspezifisch und zielgerichtet auf die zu entwickelnde elektrische Maschine herunter zu brechen.

Einen dominanten Einflussfaktor stellt dabei die Fahrzeugumgebung dar. Die Bauteiltemperaturentwicklung innerhalb der betrachteten Komponente wird maßgeblich durch die angrenzenden Aggregate und das Fahrzeugkühlsystem beeinflusst. Diese thermischen Rückkopplungen sind heute im maximalen Umfang in der Umgebung eines Parallelhybridfahrzeuges zu finden. Durch den zunehmenden Trend hin zur stärkeren Systemintegration rücken Verbrennungsmotor, Hauptgetriebe und elektrische Antriebseinheit immer mehr zusammen, wodurch sich der Wärmeaustausch weiter verstärkt. Ein Modellansatz für eine Komponente in dieser Umgebung ist daher auch für Komponenten in anderen Fahrzeugtopologien, wie zum Beispiel reinelektrischen Fahrzeugen oder seriellen Hybriden geeignet.

1.1 Motivation

Das übergeordnete Ziel der Entwicklung einer elektrischen Maschine für ein Parallelhybridfahrzeug ist die optimale Ausnutzung von verfügbaren Ressourcen bei minimalen Kosten und bei gleichzeitiger Maximierung des elektrischen Fahrerlebnisses für den Kunden.

Mit dem Fokus auf die Thermik der Maschine können daraus detailliertere Zielgrößen abgeleitet werden:

- Maximierung des Dauerleistungsvermögens durch optimale Kühlung der Maschine für maximales elektrisches Fahrerlebnis
 - Gleichzeitige Ausrichtung des Kühlbedarfs auf die Fahrzeuganforderung unter Berücksichtigung der thermischen Umgebung
 - Maximale Ausnutzung des verfügbaren Dauerleistungsvermögens mit Fokus auf die Betriebspunkte, an denen die Thermik der elektrischen Maschine die Grenze der Gesamtfahrzeugperformance darstellt
-

- Minimaler Änderungsaufwand in der konstruktiven Gestaltung der Maschine zur Kostenreduktion in Entwicklung und Produktion der Maschine
 - Minimaler Einsatz von Rohstoffen, Einsparung von Fertigungszeit in der Produktion durch Identifizierung der sensitivsten Stellhebel zur Maximierung der zielgerichteten Kühlung
- Minimierung Bauraumbedarf und minimales Gewicht für Kühlmaßnahmen
- Minimierung des hydraulischen Leistungsbedarfs des Kühlkanals für maximale Effizienz des Gesamtfahrzeug-Kühlkreislaufes durch minimale Pumpleistung

Die Maximierung des Dauerleistungsvermögens kann durch zwei Herangehensweisen für die Komponentenentwicklung und die Systementwicklung über die thermische Modellierung unterstützt werden.

Innerhalb der Komponentenentwicklung kann mit Hilfe eines abgestimmten thermischen Modells untersucht werden, welche Dauerleistungspotentiale sich durch die Optimierung einzelner Subkomponenten ergeben. So können die effizientesten Stellhebel für die Komponentenanpassung identifiziert werden. Als Beispiel ist hier die Optimierung des Kühlkanals und damit des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Wasser und Hüllgeometrie genannt. Selbst bei idealem Wärmeübergang liegt die Grenze der Wärmeübertragung für viele elektrische Maschinen in dem thermischen Widerstand innerhalb der Kupferwicklung und des Isolationssystems des Statorblechs. Es lohnt sich also, hier eher Potentiale für eine bessere Entwärmung zu suchen.

Durch Modelle ist eine entsprechende Bewertung schnell und kostensparend bereits in frühen Projektphasen durchführbar. Gleichzeitig können für die bestehende Maschine die Grenztemperaturen der Einzelbauteile voll ausgereizt werden. Die Leistungsbegrenzung erfolgt erst, wenn die thermische Schädigung einer Subkomponente unmittelbar bevorsteht und

damit wesentlich später als mit ungenauen Modellen und dem daraus folgenden höheren Sicherheitsfaktor für das Derating.

Für die Systementwicklung bietet die thermische Modellierung der Maschine die Möglichkeit, bereits frühzeitig im Entwicklungsprozess die leistungsbegrenzenden Komponenten für alle denkbaren Fahrzyklen zu identifizieren. So lohnt sich in vielen Fällen die Optimierung der Komponenten der elektrischen Maschine alleine auf einen diskreten Dauerleistungspunkt nicht, da hier bereits eine Begrenzung über die verfügbare Energie der Batterie oder die Kühlleistung des Fahrzeugkühlers vorliegt.

Wie in Abbildung 1-2 gezeigt, stellt die Grenztemperatur der elektrischen Maschine nur eine mögliche Begrenzung der Verfügbarkeit des elektrischen Fahrens dar.

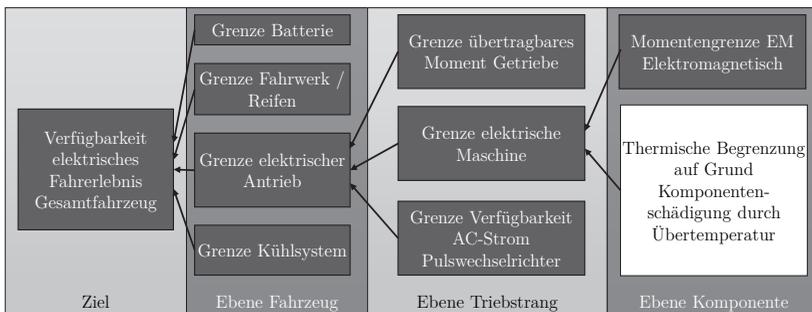


Abbildung 1-2 Begrenzungsmechanismen für Fahrleistung im elektrifizierten Fahrzeug

Die Komponente kann zielgerichtet für diejenigen Lastpunkte ausgelegt werden, für die sich eine Erhöhung des Dauerleistungsvermögens der elektrischen Maschine in einer tatsächlichen Erhöhung der Verfügbarkeit des elektrischen Fahrerlebnisses für den Fahrer äußert. Daraus folgt, dass die restlichen Betriebsbereiche, die durch andere Komponenten des Fahrzeugs begrenzt werden, nicht weiter oder nur im reduzierten Umfang zu betrachten sind.

Eine entscheidende Einschränkung stellt die Datenverfügbarkeit der erforderlichen Eingangsdaten dar. Es wird davon ausgegangen, dass in der frühen Projektphase ein bestehendes System mit einem Minimum an erforderlichen Daten und Untersuchungsaufwand zu beschreiben ist. In späteren Projektphasen sind hochgenaue Modelle erforderlich, um das bestätigte Konzept der Maschine weiter bezüglich des verfügbaren Dauerleistungspotentials zielgerichtet auf das Gesamtsystem auszurichten. Es ist daher erforderlich, sich auch mit dem umgebenden Fahrzeugentwicklungsprozess auseinanderzusetzen.

Es ist daher eine Methode erforderlich, die es unter den Randbedingungen eines übergeordneten Entwicklungsprozesses ermöglicht, ein thermisches Modell der elektrischen Antriebseinheit zu erstellen, mit dem Dauerleistungspotentiale auf Komponenten- und Systemebene mit minimalem Aufwand erschlossen, bewertet und konzipiert werden können.

1.2 Struktur und Ziel der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in vier Hauptteile, deren Zusammenhang in Abbildung 1-3 gezeigt wird. Im ersten Teil wird in das Thema eingeleitet, um einen Überblick zur Motivation für die Aufgabenstellung und den aktuellen Stand der Technik als Absprungbasis zu geben. Es wird der im Zuge dieser Arbeit erarbeitete Entwicklungsprozess zur Erstellung von thermischen Komponentenmodellen aufgezeigt.

Im zweiten Teil, dem grundlegenden Modellaufbau, werden die in der Arbeit verwendeten Methodiken erläutert und die später erforderlichen Grundlagen gelegt. Es wird auf die verschiedenen Möglichkeiten zur Erstellung von thermischen Modellen für elektrische Maschinen eingegangen. Dafür erforderlich sind Kenntnisse über die Wärmeübergangs- und Entstehungsmechanismen sowie über die Methoden zur messtechnischen Validierung im Versuch.

Im dritten Teil der Arbeit wird die konkrete Anwendung der beschriebenen Methodiken auf die Modellerstellung in der Gesamtfahrzeugumgebung beschrieben. Es wird das Anwendungsgebiet gezeigt und dargelegt, wie die Disziplinen des Versuchs an Fahrzeug und Prüfstand mit der Simulation im thermischen Netzwerk und der 3D-Simulation in Übereinstimmung gebracht werden. Dafür wird zusätzlich auf die automatisierte Modelloptimierung eingegangen. Diese bietet die Möglichkeit, Bedatungsparameter des Modells anzupassen. Für Daten, deren konkreter Wert nicht exakt, sondern mit Unsicherheiten bestimmt werden kann, ist so eine Feinbedatung möglich, dass im Ergebnis Simulation und Messung in Übereinstimmung gebracht werden können.

Nach einer Zusammenfassung der Erkenntnisse wird die Arbeit mit einer kritischen Würdigung und einer Wertung der Ergebnisse geschlossen.

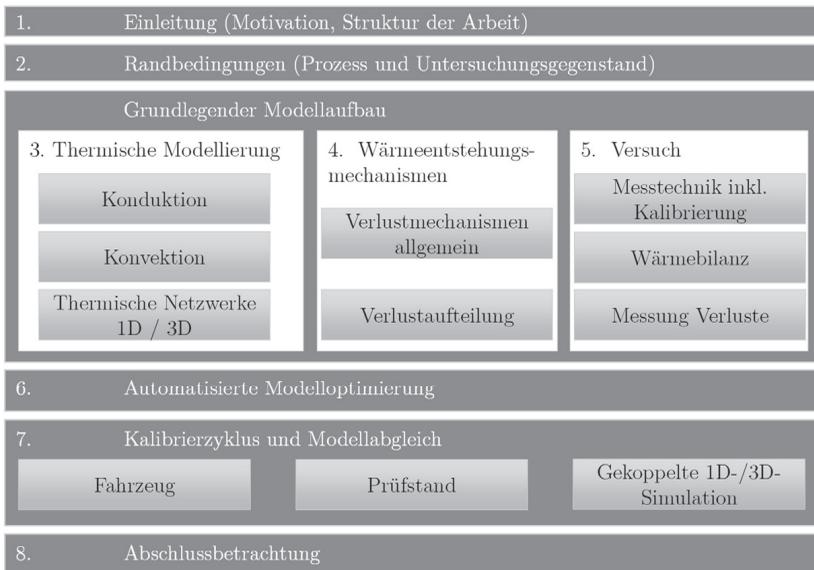


Abbildung 1-3 Strukturierung der Arbeit

Durch die in dieser Arbeit dargelegten Grundlagen und die Anwendung auf ein konkretes Beispiel ist es dem Leser möglich, die Erkenntnisse auf die eigene Anwendung zu projizieren und eigene thermische Modelle für elektrische Maschinen mit minimiertem zeitlichen Aufwand und hoher Ergebnisgüte aufzusetzen. Es wird deutlich, welche Eingangsdaten zur Erstellung repräsentativer thermischer Modelle mit hoher Ergebnisgüte erforderlich sind und welche Detailierung für den jeweiligen Verwendungszweck des Modells erforderlich ist. Zudem wird deutlich, in welcher Phase der Entwicklung die Aktivitäten zur Modellerstellung einzuplanen sind und welche Ergebnisgüte bei Berücksichtigung oder auch Vernachlässigung einzelner Effekte zu erwarten sind. Auf diese Weise kann ein effizienter Modellerstellungsprozess mit minimalem Modellierungsaufwand, zielgerichteter Komponentenerprobung zur Modellvalidierung und folglich minimalem Kostenaufwand für Prüfstandzeit und Erprobungsträger bei maximaler Ergebnisgüte gewährleistet werden.
