

e-models

E-Maschinen-Modelle – Ansatz, Einsatz und Validierung

Die moderne Fahrzeugentwicklung lässt sich ohne den Einsatz von leistungsstarken Simulationswerkzeugen nicht mehr bewältigen. Dies trifft insbesondere auch auf die Entwicklung elektrifizierter Fahrzeuge zu: Sie zeichnen sich durch einen dynamischen Antrieb mit kurzzeitig hohen Leistungen aus, der aber vergleichsweise schnell seine Belastungsgrenze erreicht. Um in jeder Entwicklungsphase präzise Vorhersagen beispielsweise über Fahrleistung und Verbrauch treffen zu können, sind detaillierte Simulationen des elektrifizierten Antriebsstranges unverzichtbar.

Von Dr. Malte Jaensch

Von elementarer Bedeutung für die Simulation des elektrischen Antriebsstranges ist die möglichst realitätsnahe Abbildung des Verhaltens der elektrischen Maschine. Das Herzstück des E-Antriebs scheint auf den ersten Blick sehr einfach aufgebaut: Gehäuse, Rotor, Stator und zwei Lager. Bei genauer Betrachtung zeigt sich die E-Maschine jedoch als hochkomplexes elektrothermomechanisches Gebilde, dessen Modellierung entsprechend anspruchsvoll ist.

Das Gesamtfahrzeugmodell und seine wichtigsten Komponenten

Ein für die Berechnung von Fahrleistung und Verbrauch geeignetes Modell eines Elektrofahrzeuges umfasst eine große Anzahl eigenständiger Modellblöcke. Diese bilden die Funktionen der entsprechenden Komponenten im Fahrzeug vereinfacht ab. Die wichtigsten Modellblöcke und ihre Interaktion sind in Abbildung 1 näher erläutert.

Das **Fahrermodell** erfüllt die Funktion eines Reglers, indem es die Soll-Geschwindigkeit aus einem vorgegebenen **Geschwindigkeitsprofil** mit der vom **Fahrzeugdynamikmodell** gemeldeten Ist-Geschwindigkeit vergleicht und versucht, über Gas- und Bremspedal beide in Übereinstimmung zu bringen.

Ein **Steuergerät** übersetzt die Stellung von Gaspedal und Bremspedal in eine positive oder negative Drehmomentanforderung, die an den Umrichter übergeben wird. Das **Umrichtermodell** beaufschlagt die elektrische Maschine nun mit einem dem Drehmomentwunsch entsprechenden AC-Strom. Das **E-Maschinen-Modell** berechnet die in Folge an den Anschlüssen anliegende AC-Spannung und gibt diese an das Umrichtermodell zurück. DC-Strom und DC-Spannung werden vom **Batteriemodell** bestimmt, wobei – analog dem E-Maschinen-Modell – der Strom als Eingang und die Spannung als Ausgang des Modells angenommen werden.

Der vom Umrichtermodell vorgegebene AC-Strom wird im E-Maschinen-Modell in Drehmoment gewandelt und nachfolgend als Eingangsgröße dem **mechanischen Antriebsstrangmodell** zugeführt. Die in diesem Modell abgebildeten mechanischen Komponenten wie Kupplung, Getriebe und Differenzial erhöhen oder verringern das Drehmoment und leiten es ausgangsseitig an das Fahrzeugdynamikmodell weiter. Mittels dieses Modells werden die Reaktionen des Fahrzeuges berechnet, ausgedrückt zum Beispiel als Beschleunigung, Geschwindigkeit, Reifenschlupf oder Achslastverteilung. Viele der modellierten Komponenten benötigen im realen Fahrzeug eine Flüssigkeitskühlung. Die entsprechenden

Modellblöcke verfügen daher über thermische Untermodelle, welche die Kühlmitteltemperatur als Eingangsparameter verwenden. Darauf basierend und in Abhängigkeit von den jeweiligen modellblockspezifischen Verlusten wird die veränderte Temperatur berechnet.

Modellierung der elektrischen Maschine

Die Modellbildung der elektrischen Maschine berücksichtigt vier Modellblöcke: das elektromagnetische, das thermische und das mechanische sowie das Verlustmodell (siehe Abbildung 2 auf Seite 18).

Das **elektromagnetische Modell** hat zwei wichtige Aufgaben: Es berechnet die AC-Spannung als Funktion des AC-Stromes, des Vorsteuerwinkels, der Winkelgeschwindigkeit sowie der Windungs- und Magnettemperatur, weiterhin ermittelt es das Luftspaltdrehmoment als Funktion von Strom, Winkel, Verlustleistung und Magnettemperatur.

Im **Verlustmodell** werden die in der elektrischen Maschine auftretenden Verluste bestimmt. Unter anderem sind diese abhängig von Strom, Winkel, Geschwindigkeit und Temperatur. Um eine Vielzahl von verschiedenen Verlustarten abbilden zu können, setzt sich auch das Verlustmodell aus Einzelmodellen zusammen.

Das **thermische Modell** berechnet die Temperatur der modellierten Bauteile wie Wicklung, Stator, Rotor und Gehäuse

sowie die Kühlmittelausgangstemperatur. Dabei werden die Flussgeschwindigkeit und Eingangstemperatur des Kühlmediums berücksichtigt.

Das **mechanische Modell** kann ein sehr einfaches Modell sein, welches lediglich das Massenträgheitsmoment der E-Maschine in der Berechnung des Ausgangsdrehmomentes verarbeitet.

An dieser sehr vereinfachten Beschreibung der Abläufe innerhalb des Modells E-Maschine wird erkennbar, wie stark sich die einzelnen Modellblöcke gegenseitig beeinflussen. Diese (durch die reaktiven Regelungen im Umrichter zusätzlich verstärkte) hohe Interdependenz präzise abzubilden, ist eine der größten Herausforderungen für die Simulation. Entscheidend für die Qualität einer Simulation ist die Realitätsnähe ihrer Ergebnisse. Vor dem Einsatz als Teil eines Gesamtfahrzeugmodells müssen die Blöcke des E-Maschinen-Modells deshalb unbedingt auf Richtigkeit und Genauigkeit geprüft werden. Hierzu werden die Ergebnisse einer Simulation mit Prüfstandsdaten verglichen, die unter gleichen Betriebsbedingungen gemessen wurden.

Vermessung der elektrischen Maschine zur Modellvalidierung

Das vereinfachte Beispiel eines Prüfplans für elektrische Maschinen, wie er von einem OEM im Rahmen der Serienentwicklung erarbeitet würde, besteht aus sechs Prüfspuren (siehe Abbildung 3 auf Seite 19). Nach dem Vermessen der >

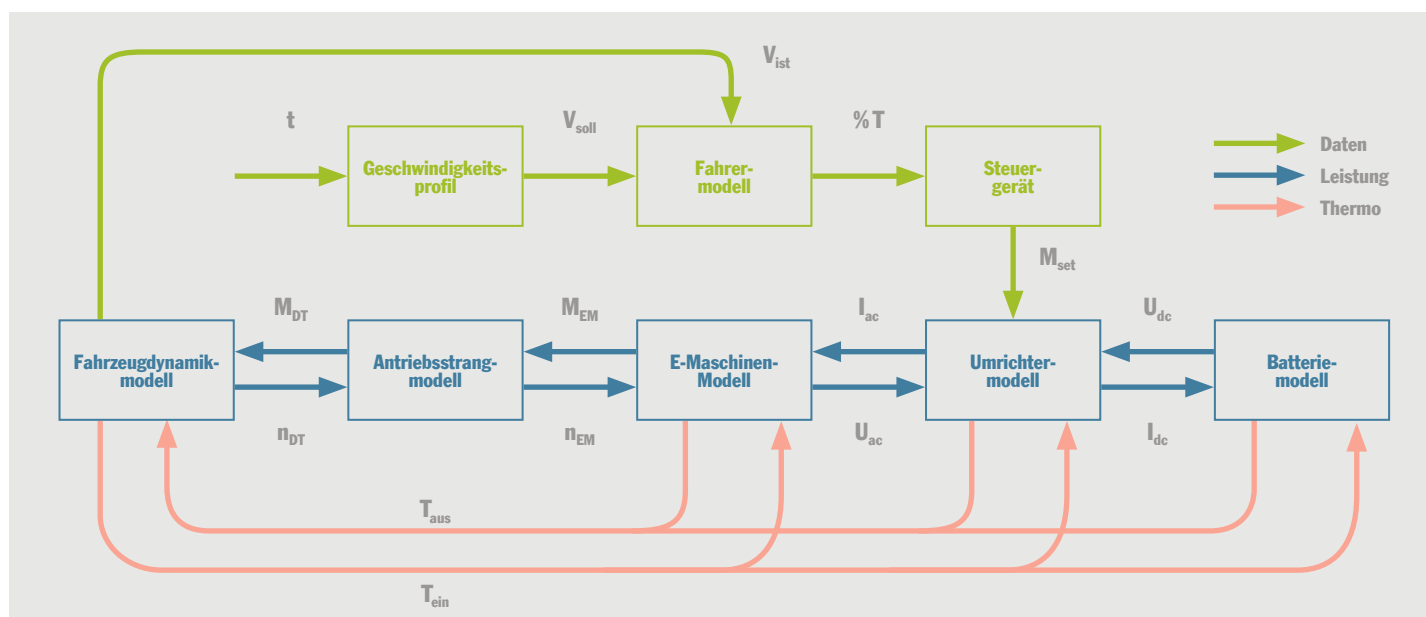


Abbildung 1: Vereinfachtes Simulationsmodell eines batterieelektrischen Fahrzeugs

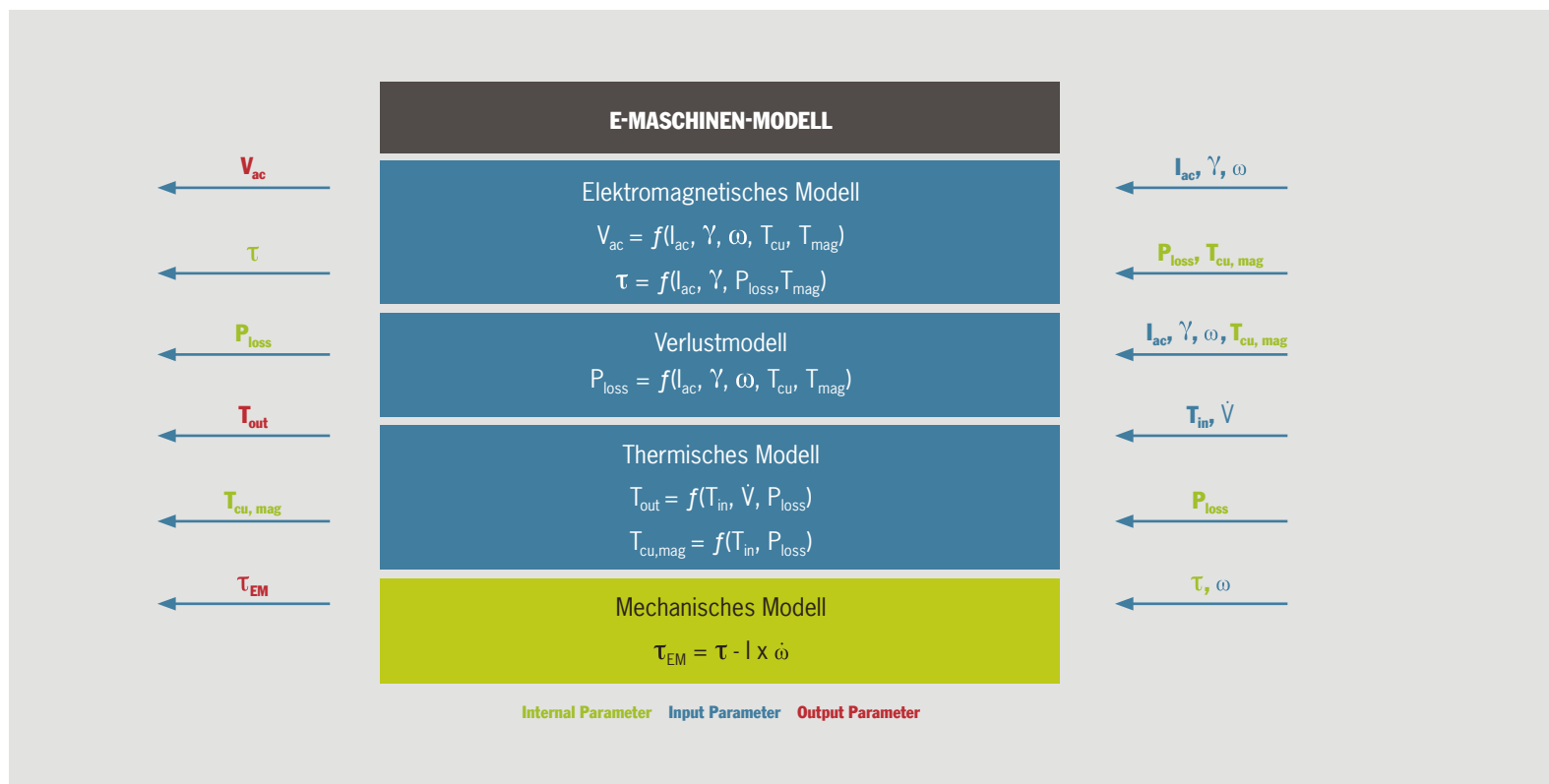


Abbildung 2: Übergeordnete Blöcke des Modells der elektrischen Maschine

grundlegenden Maschinenparameter folgt eine Reihe von Prüfprogrammen: mechanische Tests, in welchen Kräfte und Momente auf Gehäuse und Welle aufgebracht werden; Umwelttests, bei denen die Maschine durch negative Umwelteinflüsse wie Salz, Wasser und Hitze belastet wird; weiterhin drei verschiedene Dauerlaufprüfsuren sowie die Performance-Erprobung der elektrischen Maschine.

Für die Validierung der E-Maschinen-Modelle sind die Ergebnisse der Performance-Erprobung und der Prüfung der Maschinenparameter von hohem Wert, auch wenn sie für eine vollständige Validierung oftmals nicht ausreichen. Die gemessenen Daten liefern jedoch die Grundlage für die Modellvalidierung. Zeigen sich im Abgleich von gemessenen und berechneten Ergebnissen zu starke Abweichungen, werden Geometrie, Materialeigenschaften und/oder Modellkoeffizienten angepasst. Die Aussagen des Modells nähern sich so sukzessive durch Wiederholung der Schritte (Simulation – Messung – Vergleich – Anpassung) immer mehr an die realen Messdaten an.

Validierung des elektromagnetischen Modells

Um ein komplexes Untermodell zu validieren, bedarf es oftmals weiterer spezieller Tests, wie die folgenden fünf Beispiele zeigen:

Vergleich der berechneten mit der gemessenen Leerlaufspannung

Ein sehr einfacher und nützlicher Test zur Validierung des elektromagnetischen Modells ist der Vergleich der berechneten mit der gemessenen Leerlaufspannung. Die Leerlaufspannung kann bei passiver Drehung einer (Synchron-)Maschine an den elektrischen Anschlüssen gemessen werden (siehe Abbildung 4 auf Seite 20). Grundlegende Fehler im Modell wie eine falsch modellierte Geometrie oder Wicklung können so schnell erkannt und behoben werden.

Entscheidend für die Genauigkeit der Modelle ist – neben dem Können der Ingenieure – der gewählte Modellierungsansatz. Die Finite-Elemente-Methode (FEM) liefert äußerst genaue Ergebnisse, wohingegen analytische Ansätze beispielsweise die Wellenform der AC-Spannung nur näherungsweise darstellen können.

Vergleich von Drehmoment und Strom

Ein weiterer für die Validierung des elektromagnetischen Modells genutzter Test basiert auf der Abhängigkeit von Drehmoment und Strom (siehe Abbildung 5 auf Seite 20). Bei niedriger Geschwindigkeit wird der AC-Strom in Schritten erhöht und das sich jeweilig ergebende Drehmoment gemessen.

PARAMETER-TEST (BEGINN DES PRÜFPROGRAMMS)					
Betriebsfestigkeit	Umwelteinflüsse	Hochtemperatur-dauerlauf	Temperaturwechsel-dauerlauf	Feuchte-Wärme-Dauerlauf	Performance-Erprobung
axiale Belastung	Thermoschock	Hochtemperatur-dauerlauf	Temperaturwechsel-dauerlauf	Feuchte-Wärme-Dauerlauf	passive Vermessung
radiale Belastung	Salzsprühnebel				Leistungskennlinien
Torsionsbelastung	IP-Klassen-Prüfung	Vibrations-beanspruchung	Vibrations-beanspruchung	Vibrations-beanspruchung	Wirkungsgrad-Kennfelder

PARAMETER-TEST (ENDE DES PRÜFPROGRAMMS)

Abbildung 3: Typischer Prüfplan für die Serienentwicklung einer elektrischen Maschine

Sättigungseffekte im Eisen bewirken bei hohen Strömen einen abnehmenden Grenznutzen des Stromes. Ob und wie dieser Effekt bei der Modellbildung berücksichtigt wurde oder werden sollte, kann nun durch einen Vergleich von Berechnung und Messung ermittelt werden.

Messung der Schleppverluste

Das Verlustmodell besteht aus mehreren verschiedenen Einzelverlustmodellen, welche – in Summe – maßgebend für das Verhalten der elektrischen Maschine sind. Die beim Betrieb auftretenden Verluste verknüpfen den elektromagnetischen mit dem thermischen Zustand der Maschine. Daher sind Verluste Gegenstand vieler Optimierungsansätze.

Die Schleppverluste der Maschine setzen sich aus den mechanischen Verlusten und den Eisenverlusten zusammen, die durch das stetige Ummagnetisieren des Statoreisens durch das sich drehende Rotormagnetfeld entstehen (siehe Abbildung 6 auf Seite 20). Schleppverluste können in mechanische und elektromagnetische Verluste zerlegt werden, indem die Magnete entfernt oder ersetzt werden und somit nur mechanische Verluste auftreten. Zur Messung von Schleppverlusten wird die Maschine passiv durch einen Geschwindigkeitsbereich geschleppt und dabei das jeweils benötigte Drehmoment bestimmt.

Berechnung der Kupfer- und Eisenverluste

Neben den mechanischen und Eisenverlusten spielen die ohmschen Verluste in der Kupferwicklung eine bedeutende Rolle. Die Berechnung dieser Kupferverluste ist in den meisten Fällen recht einfach, sofern Widerstand und Temperatur bekannt sind. Zudem können so bei einer Erprobung Eisenverluste aus einem gemessenen Gesamtverlust abgeleitet werden (siehe Abbildung 7 auf Seite 21). Eisenverluste selbst setzen sich ihrerseits aus Wirbelstrom- und Hystereseverlusten zusammen. Diese können anhand ihrer unterschiedlichen Frequenzabhängigkeit identifiziert und somit als Basis der Validierung der entsprechenden Untermodelle genutzt werden.

Validierung des thermischen Modells

Als letztes Beispiel wird gezeigt, wie ein einfacher Test genutzt werden kann, um Kapazitäten und Widerstände des thermischen Modells einzustellen. Bei fester Drehzahl wird das maximale Drehmoment angefordert. Die Temperatur steigt bis zu einem Grenzwert, bei dem der Inverter den Strom reduziert, um Überhitzung zu vermeiden („Derating“). Nach etwa 30 Minuten hat die Maschine dann einen Beharrungszustand erreicht (siehe Abbildung 8 auf Seite 21). Bei Spitzenleistung (S6) sammelt sich die Verlustleistung in den ersten >

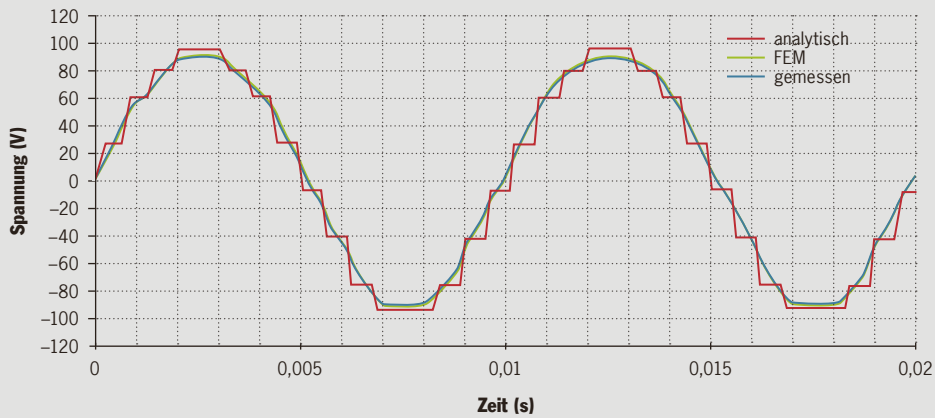


Abbildung 4: Vergleich berechneter und gemessener Leerlaufspannungen

Input:
Geschwindigkeit

Output:
Spannung

Validierte Eigenschaften/Modelle:
 > Geometrie Stator und Rotor
 > Wickelschema
 > Materialeigenschaften

Prüfablauf:
 > passiv mit fester Drehzahl drehen
 > Spannungswelle messen
 > Vergleich mit Berechnung

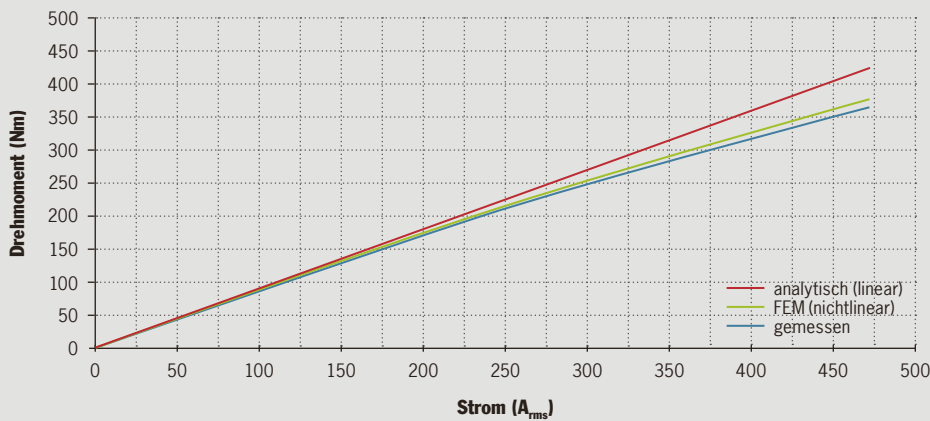


Abbildung 5: Abhängigkeit von Drehmoment und Strom

Input:
Strom

Output:
Drehmoment

Validierte Eigenschaften/Modelle:
 > Drehmomenterzeugung
 > Flussverteilung
 > Materialeigenschaften

Prüfablauf:
 > gegen Last drehen
 > Strom erhöhen bei konstanter Geschwindigkeit
 > Drehmoment messen
 > Vergleich mit Berechnung

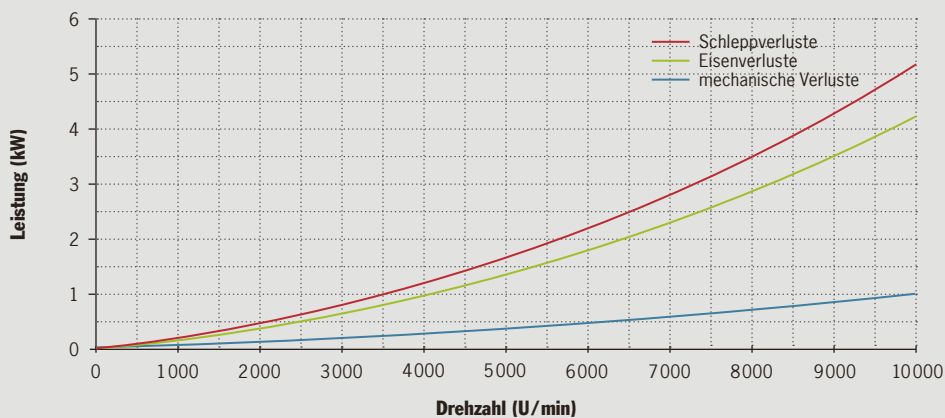


Abbildung 6: Schleppverluste über Drehzahl

Input:
Geschwindigkeit

Output:
Verlustleistung

Validierte Eigenschaften/Modelle:
 > mechanische Verluste
 > Eisenverlustmodell

Prüfablauf:
 > Schleppen über Drehzahl
 > benötigte Leistung messen
 > Vergleich mit Berechnung
 > Test im Rotor mit und ohne Magnete

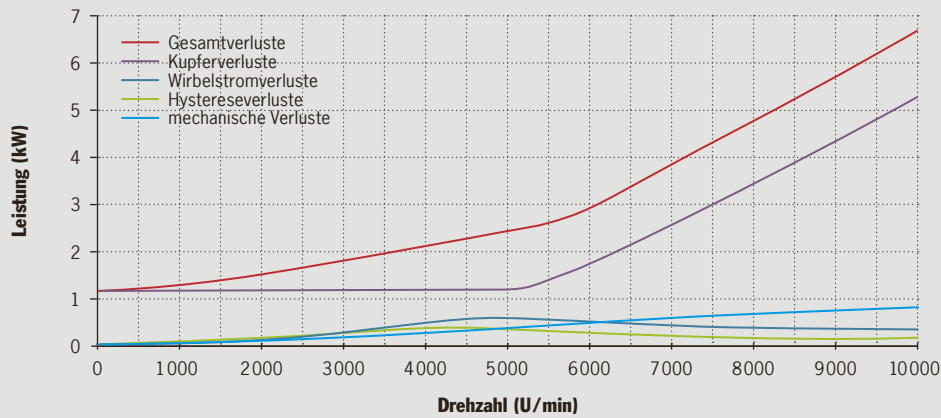


Abbildung 7: Verlustleistung bei konstantem Drehmoment

Input:
Strom

Output:
Verlustleistung

Validierte Eigenschaften/Modelle:
> individuelle Komponenten der Verlustleistung

Prüfablauf:
> Verlustleistung messen
> Kupfer- und mechanische Verluste berechnen
> Eisenverluste nach Frequenzverhalten trennen
> Vergleich mit Berechnung

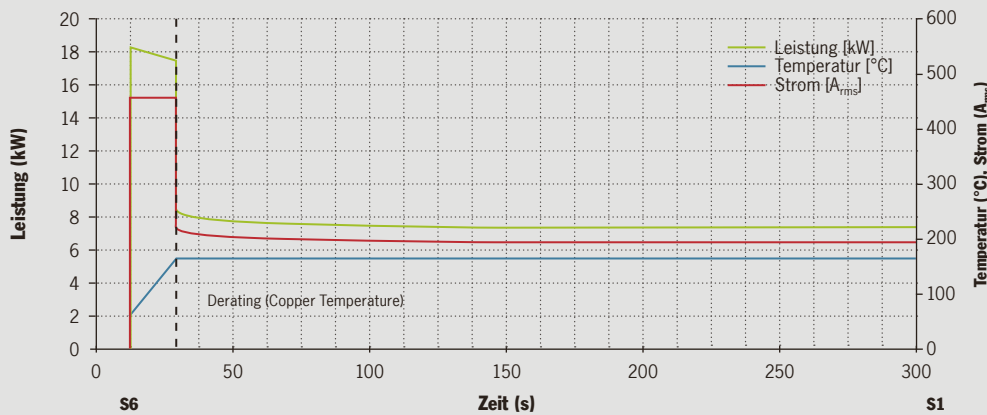


Abbildung 8: Verlauf von Leistung, Strom und Temperatur

Input:
Strom

Output:
Temperaturen

Validierte Eigenschaften/Modelle:
> Wärmekapazitäten
> thermische Widerstände

Prüfablauf:
> maximales Drehmoment messen
> Derating bei Grenztemperatur
> Beharrungszustand messen
> Vergleich mit Berechnung

Sekunden hauptsächlich in den Wärmekapazitäten der elektrischen Maschine an. Über Temperaturgradienten lassen sich so die Werte der Wärmekapazitäten ermitteln. Im Beharrungszustand hingegen spielt Wärmekapazität keine Rolle mehr. Nun bestimmen die thermischen Widerstände innerhalb der Maschine das Temperaturverhalten und damit auch die Dauerleistung (S1) der Maschine. Wärmekapazitäten und thermische Widerstände können somit getrennt gemessen werden. Die so ermittelten Werte können nun als Koeffizienten für das thermische Modell verwendet werden.

Fazit

E-Maschinen sind hochkomplexe elektrothermomechanische Gebilde. Dieser Eigenschaft muss jede Modellierung Rechnung

tragen, will sie genaue Simulationsergebnisse ermöglichen. Die für eine präzise und belastbare Berechnung zwingend erforderliche Validierung des Modells der elektrischen Maschine samt seiner diversen Untermodelle erfordert umfangreiche Erprobungen auf dem Prüfstand. Die Datenbasis liefern dabei die Prüfungen der OEMs, die im Rahmen einer Standardprüfung vorgenommen werden. Die Validierung komplexer Modelle benötigt jedoch zusätzliche Messungen.

Die Integration von Modellierung und Vermessung der elektrischen Maschine ist essenziell für eine präzise Simulation des Verhaltens eines elektrifizierten Antriebsstranges. Denn als Herzstück des elektrischen Antriebsstranges beeinflusst die elektrische Maschine das Verhalten des gesamten Fahrzeugs. ■