

Thermische Modelle elektrischer Antriebsmaschinen unter dynamischen Lastanforderungen

Christian Pohlandt, Marcus Geimer

Aufgrund der sehr guten Regelbarkeit und des hervorragenden Gesamtwirkungsgrades werden zunehmend elektrische Antriebe in mobilen Arbeitsmaschinen eingesetzt. Ziel ist es, die Energieeffizienz zu steigern und den Arbeitsprozess zu optimieren. Die thermische Belastung elektrischer Maschinen spielt bei der Auslegung elektrischer Antriebssysteme unter Berücksichtigung der auftretenden Belastungen im Arbeitseinsatz eine wichtige Rolle. Der vorliegende Beitrag stellt eine Methode zur Modellierung des thermischen Verhaltens elektrischer Antriebsmaschinen vor. Mit der akausalen Modellierung wird ein elektrisches Antriebssystem unter dynamischen Lastanforderungen untersucht. Dabei werden Ursachen und Wirkzusammenhänge der Erwärmung, unterschiedliche Kühlmethoden und die Auswirkungen im Simulationsmodell berücksichtigt. Die Validierung am Prüfstand liefert aussagekräftige Ergebnisse zur umfangreichen Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten elektrischer Antriebssysteme in mobilen Arbeitsmaschinen unter realen Lastzyklen und bestätigt die Eignung der vorgestellten Simulationsmodelle.

Schlüsselwörter

Elektrische Antriebssysteme, thermische Simulationsmodelle, akausale Modellbildung

Die zunehmende Verwendung elektrischer Antriebe in mobilen Arbeitsmaschinen und ihrer Anbaugeräte führt zum Einsatz von kompakten dynamischen elektrischen Antriebssystemen. Neben den reinen Leistungsdaten der Maschine sind auch die thermischen Belastungen ausreichend genau zu analysieren und das Wärmeverhalten zu berücksichtigen. Reale Lastzyklen werden bei der Auslegung elektrischer Maschinen zunehmend stärker berücksichtigt, um eine Überdimensionierung und damit Gewicht, Bauraum sowie Mehrkosten zu vermeiden. Die Kenntnis der Erwärmungsvorgänge elektrischer Maschinen während des Betriebes mit wechselnden Lasten ist hierbei unabdingbar. Für ein sicheres Betriebsverhalten auch im Überlastfall gibt es oftmals nur unzureichende Herstellerangaben.

Die Überlastfähigkeit elektrischer Maschinen unter dynamischen Belastungen bei hohen Leistungen erweist sich bei der Ausnutzung eines elektrischen Antriebssystems als wesentlicher Vorteil. Im Gegensatz zu konventionellen Antriebssträngen sind elektrische Antriebssysteme in der Lage, kurzzeitige Überlasten zur Verfügung zu stellen. Begrenzt wird dieses Verhalten durch Maximaltemperaturen von Bauteilen im Wechselrichter und der elektrischen Maschine. Durch die Kenntnis des thermischen Systemverhaltens und eine gezielte Wärmeableitung wird das Rightsizing der elektrischen Komponenten, und damit des gesamten Antriebssystems, maßgeblich beeinflusst. Ziel ist es, die Maschine vor unzulässiger Erwärmung im Überlastfall zu schützen und gleichzeitig eine Optimierung

der gesamten Maschinenausnutzung zu erlangen, um somit den Arbeitsprozess zu verbessern. Der Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen hat in einem Forschungsprojekt eine Methode entwickelt, mit der das thermische Verhalten elektrischer Maschinen unter dynamischen Lastanforderungen bewertet werden kann. Die Grundlage hierzu bilden thermische Modelle unterschiedlichen Detaillierungsgrades, um das thermische Verhalten, gerade auch innerhalb der elektrischen Maschine, mithilfe von Simulationen abschätzen zu können. Die entwickelten Modelle sind geeignet, die auftretenden Verluste unterschiedlicher elektrischer Maschinen und Baugrößen zu berücksichtigen. Die Anwendungsmöglichkeiten sind somit vielseitig auf eine große Klasse von elektrischen Antriebsmaschinen übertragbar. Dabei haben Einbauraum, vorhandene Kühlmittel und Umgebungsbedingungen einen ebenso entscheidenden Einfluss wie die Betriebsarten und dynamischen Lastanforderungen.

Grundsätzlich werden zwei unterschiedliche Ansätze zur thermischen Modellbildung verwendet: zum einen Methoden mit verteilten Parametern wie die Strömungssimulation (CFD: Computational Fluid Dynamics) und zum anderen Methoden mit konzentrierten Parametern, auch Netzwerkmethoden genannt (Tabelle 1).

Der vorliegende Beitrag stellt eine Modellbildungs- und Simulationsmethode vor, mit der thermische Energieflüsse in elektrischen Antriebssystemen berücksichtigt werden können. Aufgrund der Koppelungsmöglichkeit von elektrischen und thermischen Systemen mit konzentrierten Parametern wird die Netzwerkmethod mit dem Ziel einer gemeinsamen Systembeschreibung angewendet.

Tabelle 1: Methoden der thermischen Modellbildung

Methoden	Vor- und Nachteile
Computational Fluid Dynamics (CFD)	+ hohe Auflösung von räumlichen Temperaturverläufen
	+ Vielzahl von Strömungsparametern kann erfasst werden
	- zeitintensive Modellierung und Berechnung
	- detaillierte Konstruktionsdaten erforderlich
Netzwerkmethod	+ schnelle analytische Berechnung
	+ Koppelung mit konzentrierten Parametermodellen
	- geringe Auflösung der räumlichen Temperaturverläufe
	- Annahmen zu Strömungsverhältnissen notwendig

Erwärmung im elektrischen Antriebssystem

Die Erwärmungen im elektrischen Antriebssystem sind auf die einzelnen Verlustquellen in der Maschine zurückzuführen. Im Gegensatz zu Industrieantrieben, welche starr am Netz betrieben werden und somit eine feste Drehzahl aufweisen, kommen für Anwendungen in mobilen Arbeitsmaschinen wechselrichtergespeiste Maschinen mit drehzahlvariablem Antrieb zum Einsatz. Fundierte Aussagen zu den Verlusten lassen sich daher nur im Systemzusammenhang untersuchen, wenn Maschine und Wechselrichter als eine Einheit angesehen werden. Als Systemgrenzen werden daher nach Abbildung 1 die Zwischenkreisleistung am Wechselrichter, die mechanische Abtriebsleistung der Maschine und die Umgebungsbedingungen des Antriebssystems definiert. Dem Leistungsfluss folgend, von der speisenden Zwischenkreisleistung über die Wechselrichterleistung an der Maschine, der übertragenen Luftspaltleistung zwischen Stator und Rotor in der Maschine zur mechanischen Abtriebsleistung

an der Ausgangswelle, treten unterschiedliche Verlustquellen auf. Im Wechselrichter sorgen Schalt- und Durchlassverluste zu einer verminderten ausgangsseitigen Wechselrichterleistung. Die Verluste in der Maschine lassen sich den Baugruppen Stator und Rotor zuordnen. Im Stator treten Stromwärmeverluste in den Wicklungen, Eisenverluste im Blechpaket und weitere Zusatzverluste auf. Im Rotor sind ebenfalls Stromwärmeverluste und Eisenverluste sowie Reibungsverluste zu verzeichnen.

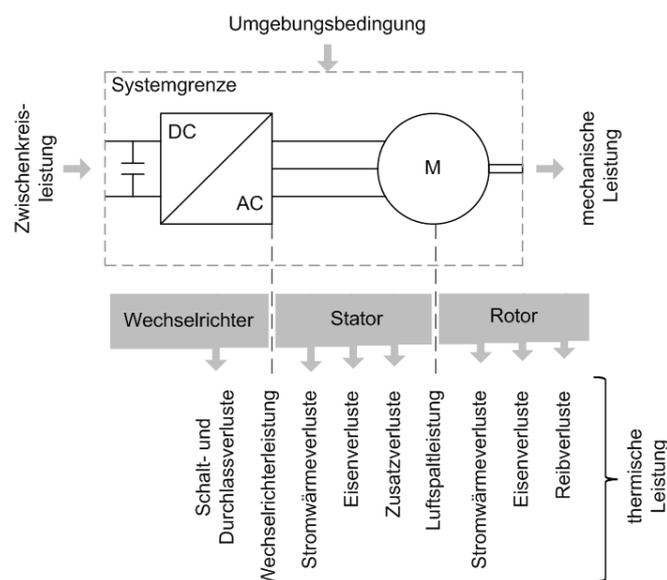


Abbildung 1: Systemgrenzen des betrachteten elektrischen Antriebssystems inklusive berücksichtigter Verluste

Etwa 70–75% der Verluste können den Stromwärmeverlusten durch den ohmschen Widerstand in den Kupferwicklungen des Stators zugeordnet werden, weitere 15–20% entfallen auf die frequenzabhängigen Eisenverluste durch die Ummagnetisierung in den Statorblechen (HAGL 2013). Die Verluste treten in Form von Wärmestromverlusten auf und werden nach den Mechanismen der Wärmeleitung und Konvektion aus der Maschine abgeführt. Durch eine gezielte Überwachung der Wicklungstemperaturen lässt sich eine verbesserte Maschinenausnutzung hinsichtlich des Betriebes im Überlastbereich erreichen. Die Erwärmung bestimmt folglich die Systemleistungsfähigkeit des gesamten Antriebsstranges. Somit ist das Thermomanagement entscheidend für die Zuverlässigkeit und Lebensdauer des Systems unter Einbezug der einzelnen Komponenten, der Einbaubedingungen und der Umgebungsbedingungen.

Die Simulation von verlustbehafteten Komponentenmodellen elektrischer Maschinen ist folglich eine Grundvoraussetzung, um thermische Modelle mit unterschiedlichen Kühlmethode aufbauen zu können. Die Modelle elektrischer Maschinen berücksichtigen die entsprechenden Verluste mittels veränderlicher elektrischer und magnetischer Widerstände. Somit lassen sich die Verluste in Abhängigkeit von Strom, Spannung, Frequenz und magnetischem Fluss darstellen (POHLANDT et al. 2014).

Akausales Modellierungskonzept zur Berücksichtigung dynamischer Lastanforderungen

Bei der Modellbildung mittels Netzwerkmethoden wird das zu modellierende System durch Maschen- und Knotengleichungen vereinfacht. Werden diese Gleichungen unter Verwendung lokaler Differential-algebraischer Gleichungssysteme (DAE) in die Diskriptorform überführt, so handelt es sich um ein akausales Modellierungskonzept (OTTER 2009). Zur Beschreibung der Zustandsgrößen werden je nach physikalischer Domäne unterschiedliche Potenzial- und Flussvariablen verwendet.

In den Verbindungspunkten haben alle Potentialvariablen u den gleichen Wert (Gleichung 1),

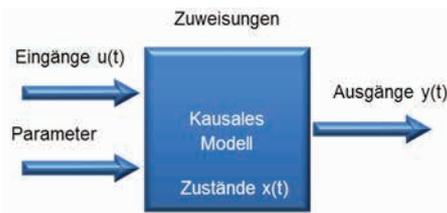
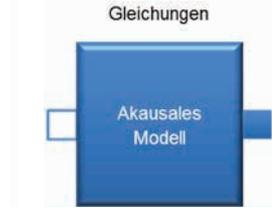
$$u_1 = u_2 = u_m \quad (\text{Gl. 1})$$

wohingegen die Summe aller Flussvariablen i gleich Null ist (Gleichung 2):

$$\sum_{n=1}^m i_n = 0 \quad (\text{Gl. 2})$$

Die einzelnen Komponentenmodelle werden über definierte Schnittstellen mit entsprechenden Koppungsgleichungen verbunden, welche die physikalischen Zusammenhänge darstellen. Es erfolgt keine explizite Festlegung der Ein- und Ausgangsvariablen, wodurch ein bidirektionaler Datenfluss entsteht. Die lokalen Variablen werden bei hierarchischer Systemintegration automatisch zu globalen Variablen mit entsprechender Zuordnung. Somit entstehen gleichungsbasierte, transparente Modelle, welche vom Anwender nachvollziehbar parametrisiert werden können. Der modulare Aufbau und die Verknüpfung der einzelnen Komponenten unterstützen den systematischen Aufbau von umfangreichen Simulationsbibliotheken. Umfassende Gleichungssysteme lassen sich mittels Transformationsalgorithmen und numerischen Integrationsverfahren effizient lösen. Die akausale Modellbildung eignet sich daher zur Simulation des thermischen Verhaltens von elektrischen Antriebsmaschinen unter dynamischen Lastanforderungen mit unterschiedlichen motorischen und generatorischen Betriebspunkten. Außerdem lassen sich die thermischen Systemzusammenhänge simulieren. Die hier vorgestellten Simulationsmodelle sind in der akausalen Simulationsumgebung Dymola mit der objektorientierten Modellierungssprache Modelica umgesetzt. In Abgrenzung zur verwendeten Methode ist bei der signalflussorientierten Modellbildung der Zusammenhang zwischen Signaleingang und Signalausgang mittels Zuweisungen fest vorgegeben. Das Modell ist also kausal mit einem unidirektionalen Datenfluss aufgebaut, der sich nicht einfach umkehren lässt. Diese feste Verknüpfung zwischen Eingangsgrößen $u(t)$ und Ausgangsgrößen $y(t)$ ist ein entscheidender Nachteil bei der kausalen Modellbildung. Das Modell eines Motors mit den Eingangsgrößen der Spannungen und Ströme und den mechanischen Ausgangsgrößen Drehzahl und Drehmoment lässt sich nicht einfach generatorisch betreiben. Ein kausales Simulationsprogramm ist beispielsweise Matlab Simulink. Die beiden auf ihre Eignung untersuchten Modellierungskonzepte sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Modellierungskonzepte von Netzwerkmethoden

	Signalfflussorientiertes Modell	Physikalisches Modell
Beschreibungsform	Zustandsraumdarstellung $\dot{x} = f(x,u,t)$ $y = g(x,u,t)$	Deskriptorform (DAE) $0 = f(\dot{x},x,y,u,t)$
Modellierungsansatz	<p>Kausal</p> 	<p>Akausal</p> 
Zusammenhang	Zuweisung Eingang = Ausgang	Gleichungen Eingang = Ausgang
Datenfluss	unidirektional	bidirektional

Kühlung elektrischer Maschinen

Um die auftretende Wärmeenergie aus der Maschine zu führen, werden eine ganze Reihe von Kühlmethoden in Anlehnung an DIN EN 60034-6 (1996) realisiert, welche sich durch die Anzahl der thermisch hintereinandergeschalteten Kühlkreisläufe, die verwendeten Kühlmittel, die Kühlmittelführung und die Realisierung der Bewegung des Kühlmittels unterscheiden. Je nach verwendetem Kühlmittel werden gasgekühlte, also luft- oder wasserstoffgekühlte, und flüssigkeitsgekühlte Maschinen mit Wasser/Glykol oder Öl unterschieden (Abbildung 2).

Bezüglich der Kühlmittelführung werden Röhrenkühlung, Kreislaufkühlung, Innenkühlung und Oberflächenkühlung unterschieden (Abbildung 3). In Fahrzeuganwendungen mit kleinem bis mittlerem Leistungsbedarf werden beispielsweise oberflächengekühlte Maschinen mit einer Fremdkühlung und geschlossenem Primärkühlkreislauf verwendet. Dies ermöglicht eine vollständige Kapselung des Maschineninneren und verhindert einen Staub- und Schmutzeintrag. Um den Wärmeübergang zwischen Gehäuse und Umgebungsluft zu optimieren, werden gerippte Gehäuse verwendet. Die Fremdkühlung wird durch einen separaten, nicht auf der Maschinenwelle montierten Lüfter oder die Relativbewegung des Fahrzeugs ermöglicht.



Abbildung 2: Kühlmittelarten elektrischer Maschinen

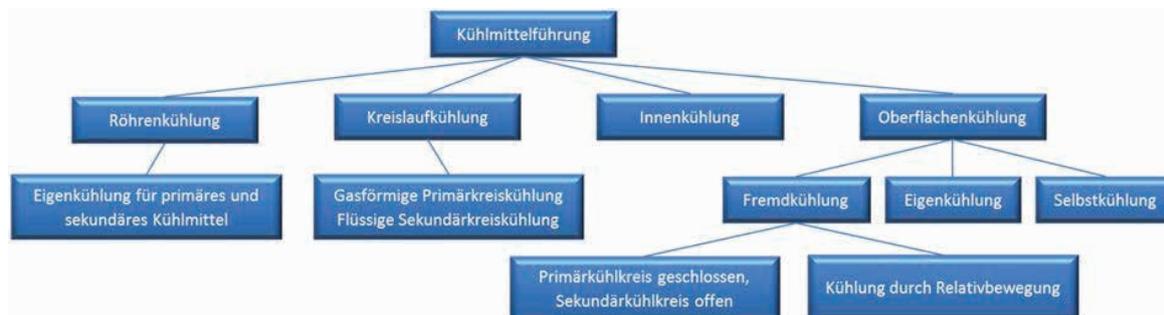


Abbildung 3: Kühlmittelführung elektrischer Maschinen

Werden hingegen höhere Leistungen benötigt, so kommen flüssigkeitsgekühlte Maschinen zum Einsatz. Dieser Unterschied verwendeter Kühlmittelarten wird aus dem Zusammenhang zwischen Kühlmittelvolumenstrom $\frac{dV}{dt}$ und erlaubter Temperaturzunahme $\Delta\theta$ bezogen auf die Verlustleistung in Gleichung 3 veranschaulicht (MÜLLER und PONICK 2005).

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{\rho c} \frac{P_V}{\Delta\theta} \tag{Gl. 3}$$

ρ : Dichte der verwendeten Kühlmittelart

c : spezifische Wärmekapazität

Der Vorteil einer flüssigkeitsgekühlten Maschine mit einer Wasser-Glykol-Mischung besteht darin, dass aufgrund der hohen spezifischen Wärmekapazität c des Wasser-Glykol-Gemisches nur geringe Kühlmittelmengen erforderlich sind (Tabelle 3). Diese lassen sich mit niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten durch kleine Querschnitte nah an die Wärmequelle heranführen, um eine hohe Wirksamkeit der Kühlmethode zu erlangen.

Tabelle 3: Vergleich des benötigten Kühlmittelvolumenstroms von Luft zu Wasser/Glykol

Kühlmittel	Volumenstrom
Luft	$0,83 \cdot \frac{P_V}{\Delta\theta}$
Wasser/Glykol	$0,4 \cdot 10^{-3} \frac{P_V}{\Delta\theta}$

Thermische Modellierungsmethode

Die thermische Modellierung basiert auf den realen physikalischen Zusammenhängen in der Maschine. Das Temperaturfeld wird durch ein diskretes Wärmequellennetz abgebildet, dessen Knotenpunkte mit Wärmewiderständen verbunden sind (LEHRMANN 2006). Der Wärmeleitpfad kann weitere Wärmekapazitäten und Wärmequellen enthalten. Die Wärmewiderstände lassen sich oft unter vereinfachten Annahmen aus der Geometrie der elektrischen Maschine und den Wärmeleitfähigkeiten

der verwendeten Materialien sowie den Wärmeübergangsverhältnissen an den Trennflächen zum Kühlmittel bestimmen. Ausgehend vom Wärmeleitwert λ (Gleichung 4) lässt sich der thermische Widerstand R_{th} (Gleichung 5) für ein Material mit homogener thermischer Leitfähigkeit σ in Analogie zu einem elektrischen Widerstand mit elektrischer Leitfähigkeit σ definieren, welcher den Zusammenhang zwischen der Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ und dem Wärmestrom \dot{Q} (Gleichung 6) ausdrückt (Tabelle 4).

Tabelle 4: Analogiebetrachtung zur thermischen Modellbildung

Thermisch	Elektrisch
Temperaturdifferenz	Spannungsdifferenz
Wärmewiderstand	Widerstand
Wärmestrom	Strom
Wärmeleitfähigkeit	Leitfähigkeit
Wärmekapazität	Kapazität

Der Wärmeleitwert λ lässt sich über die Verlustleistung P_V und Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ beschreiben (Gleichung 4):

$$\lambda = \frac{1}{\Delta\vartheta} P_V \tag{Gl. 4}$$

Der thermische Widerstand R_{th} beschreibt sich nach Gleichung 5:

$$R_{th} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{P_V} \Delta\vartheta \tag{Gl. 5}$$

Im stationären Zustand entspricht die Verlustleistung P_V gleich dem Wärmestrom \dot{Q} . Daher lässt sich in Analogie zum elektrischen Widerstand R_{el} der thermische Widerstand R_{th} beschreiben (Gleichung 6):

$$R_{th} = \frac{\Delta\vartheta}{|\dot{Q}|} \xleftrightarrow{\text{Analogie}} R_{el} = \frac{\Delta U}{|I|} \tag{Gl. 6}$$

Ebenfalls kann für eine thermische Kapazität C_ϑ ein entsprechendes Analogon unter Verwendung der Materialeigenschaften beschrieben werden (Gleichung 7):

$$C_\vartheta = \frac{T_\vartheta}{R_{th}} = T_\vartheta \lambda \tag{Gl. 7}$$

Im trivialsten Fall lässt sich die elektrische Maschine als homogenes 1-Körper-Modell mit einer Wärmekapazität C_ϑ und einem Wärmeleitwert λ zur Umgebung auffassen, das sich durch die Verlustleistung P_V der Maschine erwärmt.

Die Differenzialgleichung für das 1-Körper-Modell lautet (Gleichung 8):

$$P_{VGesamt} dt = (P_{VStator} + P_{VRotor})dt = \lambda(\vartheta - \vartheta_A)dt + C_\vartheta d\vartheta \tag{Gl. 8}$$

Mit diesem Ansatz lassen sich umfangreiche thermische Netzwerke in Analogie zu diskreten elektrischen Netzwerken aufbauen (Abbildung 4), um die transienten Temperaturverteilungen unter dynamischen Lastanforderungen zu untersuchen. Unter Anwendung der in Tabelle 4 getroffenen Bauteilanalogien und der in Abbildung 4 exemplarisch aufgezeigten identischen Systeme können auch die beiden Differenzialgleichungen (Gleichung 9 und 10) angegeben werden:

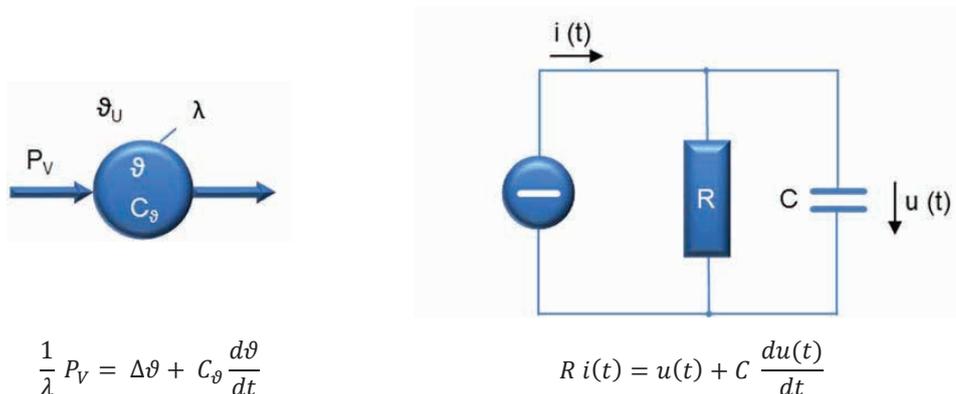


Abbildung 4: Analogie eines Wärmequellennetzes mit einer elektrischen Netzwerk Betrachtung

$$\frac{1}{\lambda} P_V = \Delta\vartheta + C_\vartheta \frac{d\vartheta}{dt} \tag{Gl. 9}$$

$$R i(t) = u(t) + C \frac{du(t)}{dt} \tag{Gl. 10}$$

Die einzelnen Verlustleistungen P_V in Gleichung 8 lassen sich nach DIN IEC/TS 60349-3 (2011) aus dem Wirkungsgrad η der Maschine ermitteln (Gleichung 11):

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = 1 - \frac{\sum P_V}{P_{ab} + \sum P_V} \tag{Gl. 11}$$

Prinzipiell folgt die Erwärmung $\Delta\vartheta$ des 1-Körper-Modells einer Exponentialfunktion und erreicht nach endlicher Belastungsdauer t_B eine Endtemperatur $\Delta\vartheta_{End}$, bei der sich ein Wärmestrom identisch der Verlustleistung ergibt (FISCHER 2011). Es herrscht eine stationäre Wärmeströmung mit eingestellter Endtemperatur, welche als Beharrungstemperatur bezeichnet wird. Bei einem konstanten Kühlmittelvolumenstrom $\frac{dV}{dt} = \text{konstant}$ gilt dann für die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ (Gleichung 12):

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{End} \left(1 - e^{-t_B/T_\vartheta} \right) \tag{Gl. 12}$$

t_B : Belastungsdauer

T_ϑ : Erwärmungszeitkonstante

mit der Endtemperatur $\Delta\vartheta_{\text{End}}$ gegenüber dem Kühlmittel (Gleichung 13)

$$\Delta\vartheta_{\text{End}} = \frac{P_V}{\alpha O} \quad (\text{Gl. 13})$$

P_V : Leistungsverlust
 α : Wärmeübergangszahl
 O : Oberfläche

und einer Zeitkonstanten T_ϑ von Gleichung 14:

$$T_\vartheta = \frac{c m}{\alpha O} \quad (\text{Gl. 14})$$

c : spezifische Wärmekapazität
 m : Masse

Ein Erwärmungsverlauf, bei dem die Endtemperatur mit der Beharrungstemperatur übereinstimmt, tritt jedoch nur ein, wenn die Maschine in einem konstanten Belastungszustand über einen ausreichend langen Zeitraum betrieben wird. Unter diesen Betriebsbedingungen wird von Dauerbetrieb S1 gesprochen. Dabei darf die Endtemperatur im Beharrungszustand die für das Isolationssystem der Wicklungen zulässige Grenztemperatur nicht überschreiten. Es ist offensichtlich, dass die Maschine für eine gewisse Zeitdauer höher belastet werden kann, ohne dass die Wicklungstemperatur den zulässigen Höchstwert überschreitet. Im Anschluss muss die Maschine jedoch pausieren, um abzukühlen. Derartige Betriebsfälle treten häufig auf und sind in idealisierter Form als Betriebsarten S2 bis S10 nach DIN EN 60034-1 (2011) genormt. Die Betriebsarten ab S2 setzen sich dabei aus unterschiedlichen Belastungszyklen mit periodischem Charakter zusammen. Nach einer entsprechenden Belastungsdauer folgt eine Stillstandszeit mit stromloser Wicklung. Beim Kurzzeitbetrieb (Betriebsart S2) folgt auf eine Belastungsdauer mit konstanter Belastung, innerhalb derer die Beharrungstemperatur nicht erreicht wird, eine ausreichend lange Pause, um die Maschine wieder abzukühlen. Die Kennzeichnung erfolgt dabei immer mit Angabe der Belastungsdauer, z. B. S2 30 min für eine Belastungsdauer von 30 Minuten.

Wird vereinfacht angenommen, dass die Wicklungstemperatur nur von den Stromwärmeverlusten abhängig ist, so lässt sich aus der Dauerleistung P_N die Kurzzeitleistung P_{S2} berechnen (HAGL 2013):

$$P_{S2} = P_N \sqrt{\frac{1}{1 - e^{-t_B/T_\vartheta}}} \quad (\text{Gl. 15})$$

P_N : Nennleistung
 t_B : Belastungsdauer
 T_ϑ : Erwärmungszeitkonstante

Es ist also direkt ersichtlich, dass die thermische Modellbildung für dynamische Lastanforderungen ein wesentliches Kriterium bei der Leistungsbeurteilung und Auslegung eines elektrischen Antriebssystems darstellt.

Tatsächlich kann die elektrische Maschine jedoch nicht als 1-Körper-Modell aufgefasst werden, da die Wirkzusammenhänge einer Erwärmung deutlich komplexer sind. Die einzelnen Komponenten der Maschine erwärmen sich unter gegenseitiger Beeinflussung unterschiedlich schnell. Außerdem

ändern sich die in der elektrischen Maschine umgesetzten Verlustleistungen bei dynamischer Lastbeanspruchung. Je nach angefahrenem Betriebspunkt ändert sich zudem der Verlusteintrag der Komponente, was wiederum zu veränderten Temperaturen führt. Aufgrund der lokalen Erwärmung und daraus resultierenden Temperaturunterschieden mit unterschiedlichen Anfangstemperaturverläufen fließen Wärmeströme. Innerhalb der Maschine fließt Wärme aus Gebieten mit vergleichsweise hohen Verlusten und damit einem steilen Anfangstemperaturgradienten in Gebiete mit einem vergleichsweise niedrigen Gradienten.

Gemäß den Ausführungen zur akausalen Modellbildung ist der Datenfluss bidirektional. Das elektrische Modell des Widerstandes R_{el} liefert eine temperaturabhängige Verlustleistung $P_v(\vartheta)$ und übergibt diese als Wärmestrom \dot{Q} an das thermische Modell. In entgegengesetzter Richtung übergibt das thermische Modell eine Temperatur ϑ in Abhängigkeit des Wärmewiderstandes R_{th} an das elektrische Modell (Abbildung 5). Durch eine Unterteilung der Maschine in ihre Komponenten, welche einen Verlustanteil aufweisen, lässt sich ein beliebig engmaschiges Wärmequellennetz aufbauen.

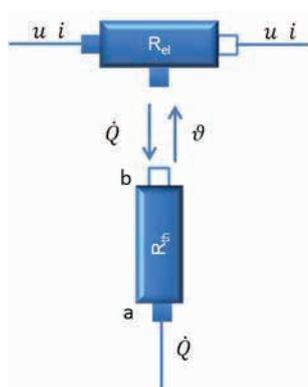


Abbildung 5: Bidirektionaler Datenfluss bei Modellierung eines thermischen und elektrischen Widerstandes

Verifikation des thermischen Simulationsmodells

Die Verifikation des thermischen Modells erfolgt durch Einbindung in ein Gesamtsimulationsmodell (Abbildung 6) und einer statischen Lastanforderung im Nennbetriebspunkt der elektrischen Maschine. Die Simulation besteht aus einem bereits validierten Modell einer verlustbehafteten Asynchronmaschine, dem thermischen Modell und einem Modell der Kühlmethode mittels Eigenventilation durch Luft. Die Ergebnisse in Abbildung 7 zeigen eine exponentielle Temperaturzunahme der Wickelkopf-temperatur, welche sich einer Beharrungstemperatur annähert (Gleichung 12). Außerdem ist die deutliche Temperaturzunahme der Gehäusetemperatur zu sehen. Die Temperaturdifferenz zwischen Gehäuse und Wickelkopf lässt auf einen Wärmestrom aus dem Maschineninneren in Richtung Umgebung schließen. Die unterschiedlichen Anfangstemperaturgradienten weisen auf die unterschiedlichen Verlustanteile hin. Die Kupferwicklung hat durch ihre proportionale Stromabhängigkeit einen deutlich höheren Verlustanteil als das Blechpaket im nahegelegenen Gehäuse der Maschine.

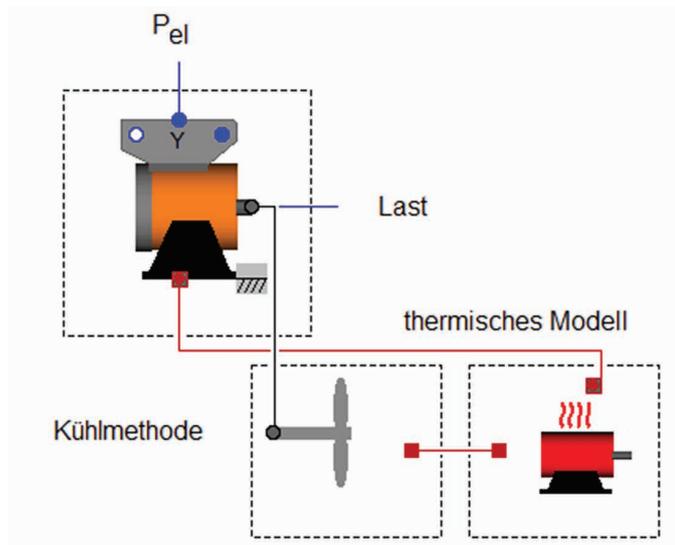


Abbildung 6: Akausales Simulationsmodell einer eigengekühlten Asynchronmaschine

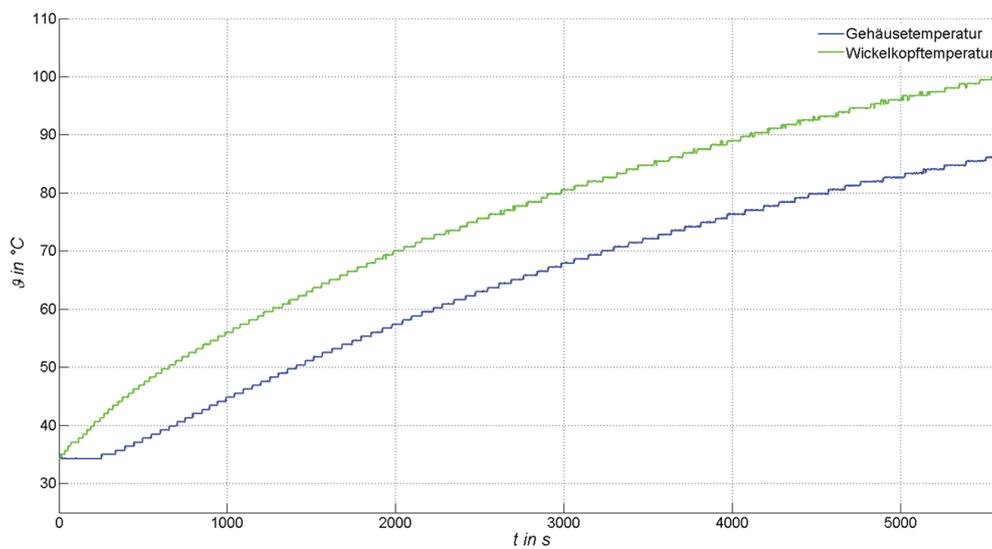


Abbildung 7: Simulierter Verlauf der Anfangstemperaturgradienten von Kupferwicklung und Gehäuse

Im Beharrungszustand (Abbildung 8) stellt sich ein stationärer Wärmestrom ein, der gleich der Summe der Verlustanteile ist. Erwartungsgemäß sind die Wicklungen von Rotor und Stator der stärksten thermischen Beanspruchung ausgesetzt. Der Temperaturgradient folgt auch hier dem Wärmeleitpfad in Richtung Gehäuse.

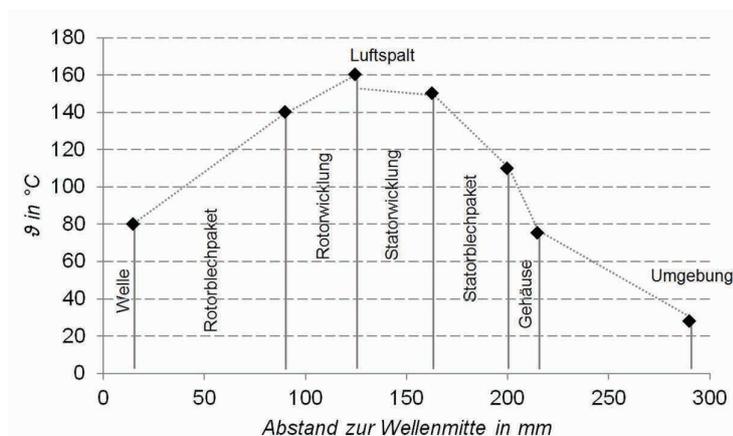


Abbildung 8: Stationäre Temperaturverteilung von der Wellenmitte aus im simulierten Beharrungszustand

Parameteridentifikation zur Validierung des Gesamtmaschinenmodells

Zur Validierung des Gesamtmaschinenmodells, das aus den verifizierten Einzelmodellen besteht, werden reale Parameter aus Prüfstandversuchen benötigt. Die Modellparameter der elektrischen Maschine, wie Statorwicklungswiderstand und Statorinduktivitäten, werden aus Versuchen zur klassischen Maschinenprüfung nach DIN EN 60349-2 (2007) ermittelt.

Die Parameter des thermischen Modells werden ebenfalls am Prüfstand bestimmt. Die Ermittlung der Wärmewiderstände erfolgt durch Temperaturmessreihen unter stationärer Lastanforderung. Dabei können die Wicklungstemperaturen mit dem Widerstandsverfahren, dem Thermometerverfahren oder mit eingebauten Temperaturmessfühlern erfasst werden. Im praktischen Versuch wurden an sieben kritischen Messstellen Temperatursensoren angebracht, um die Temperaturverläufe zu erfassen (Abbildung 9). Sowohl die Wicklungstemperaturen als auch die Temperaturen nahe den Blechpaketen und die Gehäusetemperatur wurden gemessen.

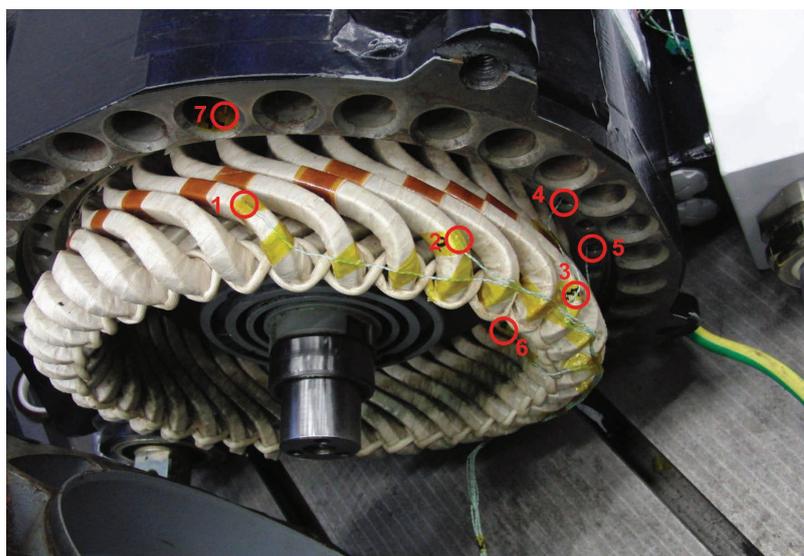


Abbildung 9: Temperaturmessstellen an der Statorwicklung zur Messung von Temperaturverläufen (Foto: C. Pohlandt)

Die unterschiedlichen Wärmekapazitäten der einzelnen Bauteile lassen sich aus den Materialparametern und den zugehörigen Massen berechnen. Herstellerangaben mit Schnittbildern der Maschine und Materiallisten ermöglichen hier eine hinreichend genaue Parameterbestimmung.

Validierung des Gesamtmaschinenmodells mittels dynamischer Lastanforderungen

Die Validierung des parametrisierten Gesamtmaschinenmodells (Abbildung 6) erfolgt auf einem Antriebssystemprüfstand (POHLANDT und HAAG 2014), in dem zwei Maschinen mechanisch miteinander gekoppelt werden (Abbildung 10 und 11). Bei den Maschinen handelt es sich um zwei luftgekühlte Asynchronmaschinen mit einem Nenndrehmoment von $M_N = 700 \text{ Nm}$ und einer Nenndrehzahl von $n_N = 1780 \text{ U/min}$. Die Methode zur Parameteridentifikation der Simulationsmodelle ist durch reale Messungen mit einem vertretbaren Aufwand durchführbar.

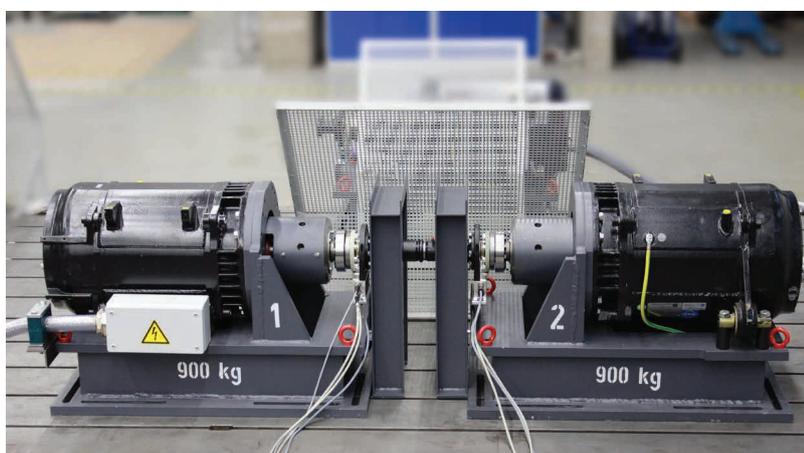


Abbildung 10: Mechanisch gekoppelte Maschinen zur Parameteridentifikation (Foto: C. Pohlandt)

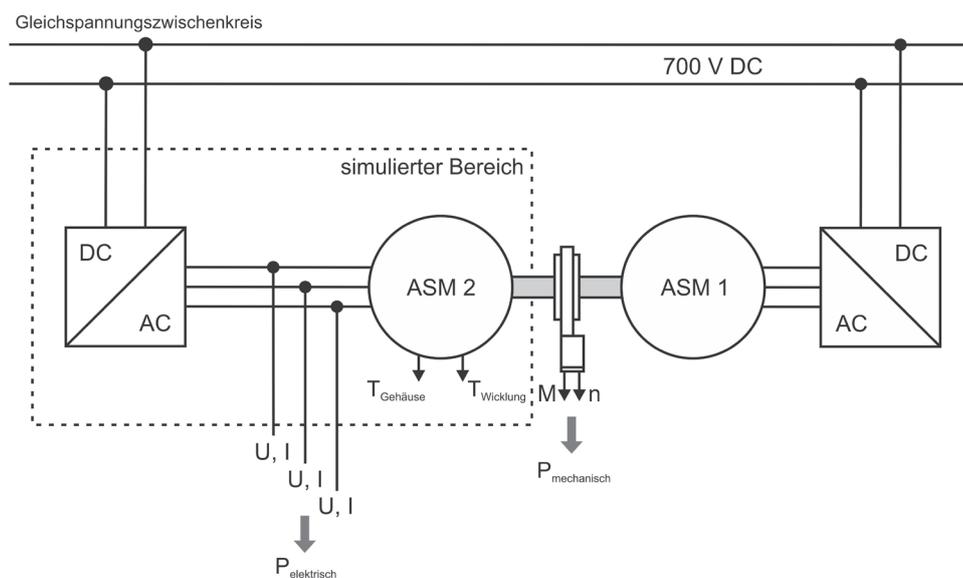


Abbildung 11: Schematischer Versuchsaufbau zur Validierung der Simulationsmodelle unter dynamischen Lastanforderungen

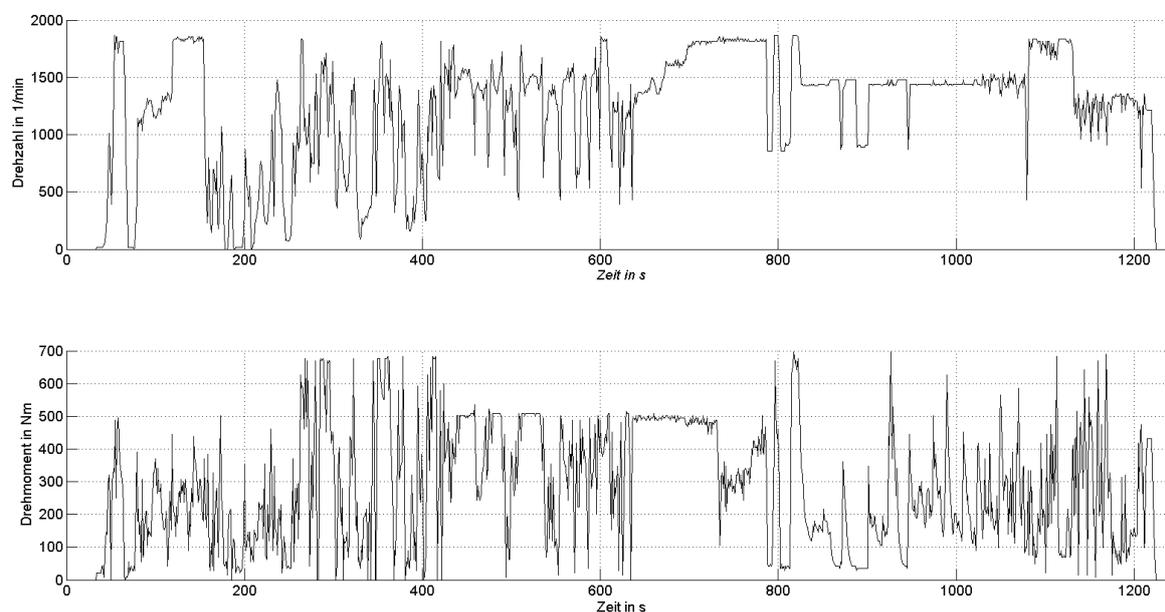


Abbildung 12: Dynamischer Lastzyklus zur Validierung der thermischen Simulationsmodelle

Zur Validierung wird der dynamische Lastzyklus NRTC (Non-Road Transient Cycle) für Off-road-Fahrzeuge (Abbildung 12) verwendet, welcher zur Ermittlung geltender Emissionsstandards mit hohen Betriebstemperaturen der Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren nach der Richtlinie 2004/26/EG (EU 2004) anerkannt ist. Der instationäre Zyklus deckt den gesamten Betriebsbereich S1 mit 5 % Überlast der elektrischen Maschine ab. Die charakteristischen Daten sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Durch die dynamischen und zyklischen Belastungen kommt es zu kurzzeitigen Erwärmungs- und Abkühlvorgängen (Abbildung 13). Durch die stromabhängigen ohmschen Verluste in den Wicklungen bei Drehmomentschwankungen sind diese Vorgänge besonders ausgeprägt. Der Versuch beginnt mit einer Maschinentemperatur, welche gleich der Umgebungstemperatur ist. Es ist ersichtlich, dass die Maschine zu keinem Zeitpunkt in den thermischen Beharrungszustand kommt. Das thermische Modell zeigt eine gute Übereinstimmung mit den am Prüfstand gemessenen Daten auf. Die Temperaturverläufe von Kupferwicklung und Statorblechpaket weisen im Vergleich zu den realen Messergebnissen akzeptable Verläufe auf. Das Simulationsmodell zeigt nach einer Zeit von $t = 1238$ s eine relative Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ in der Kupferwicklung von kleiner 5 K. Die Temperatur des Statorblechpaketes liegt bei $\Delta\vartheta = 1$ K. Damit liegen die Ergebnisse im Erwartungshorizont für die Applikation von praxisorientierten Lastzyklen.

Tabelle 5: Charakteristische Daten des dynamischen Lastzyklus

n_{average} [1/min]	n_{max} [1/min]	M_{average} [Nm]	M_{max} [Nm]	P_{average} [kW]	P_{max} [kW]
1205,18	1900,05	274,04	690	39,45	136,49

Die Abweichungen über den Zyklus lassen sich mit der Anzahl verwendeter Widerstände und Wärmekapazitäten des Wärmequellennetzes erklären. Besondere Bedeutung im Wärmequellennetz hat der Wärmewiderstand der Wicklungsisolierung, der stets relativ groß ist, sodass merkliche Tem-

peraturdifferenzen zwischen Leitermaterial und Blechpaket auftreten. Schlechte elektrische Leiter, wie Isolationsmaterialien, sind gleichzeitig auch schlechte Wärmeleiter. Des Weiteren sind in dem verwendeten Modell konzentrierte Wärmekapazitäten mit jeweils homogener Temperatur zusammengefasst worden. Durch diese vereinfachenden Annahmen kann eine Korrektur der Wärmeübergangswiderstände im Vergleich zu den analytisch berechneten Werten notwendig sein. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Simulationsmodelle zur thermischen Simulation von elektrischen Maschinen geeignet sind.

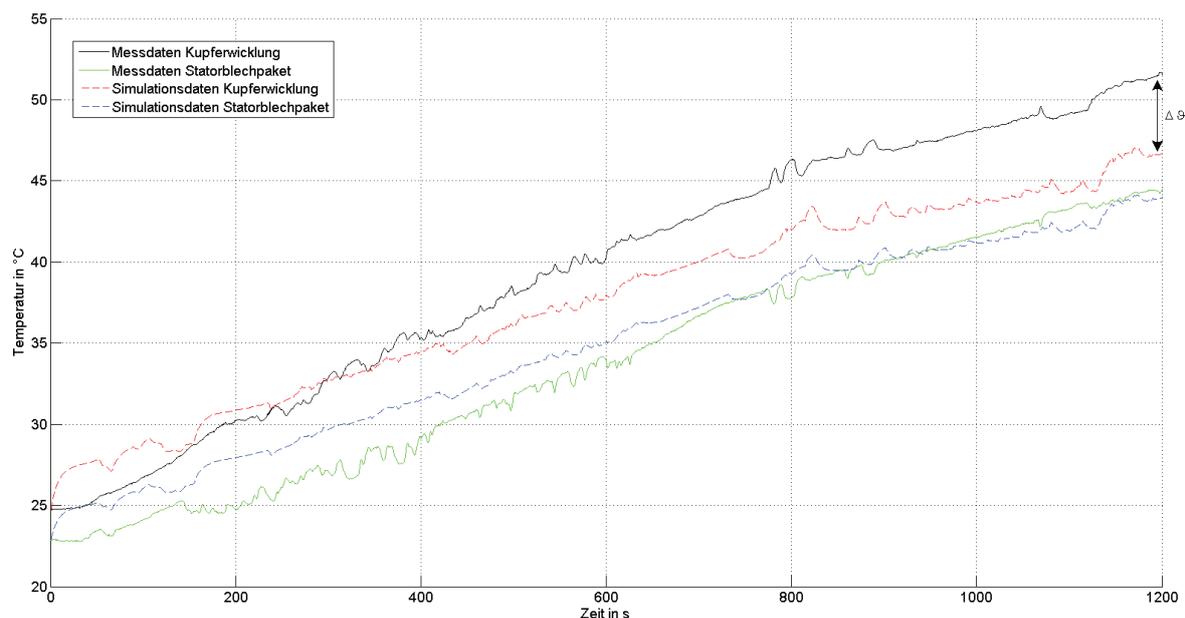


Abbildung 13: Vergleich des Temperaturverlaufes zwischen Simulation und Messung unter dynamischen Lastanforderungen

Schlussfolgerungen

Für den praktischen Einsatz spielt das Temperaturverhalten elektrischer Maschinen eine entscheidende Rolle. Durch kurzzeitige Überlastungen lässt sich eine deutlich höhere Ausnutzung der Maschine in dynamischen Lastzyklen erzielen, ohne dass es dabei zu einer Überschreitung der zulässigen Grenztemperaturen kommt. Die thermischen Simulationsmodelle erlauben es, das thermische Verhalten der elektrischen Maschine unter beliebigen praktischen Lastzyklen hervorzusagen. In einem frühen Stadium des Entwicklungsprojektes lassen sich so mögliche Schwachstellen des Antriebssystems aufzeigen und geeignete Gegenmaßnahmen ergreifen, noch bevor es zu einem Ausfall der elektrischen Maschine kommt. Gerade der akasale Modellierungsansatz zur Simulation multiphysikalischer Wirkzusammenhänge erweist sich als zielführend und versetzt den Anwender in die Lage, komplexe Antriebstopologien zu modellieren und gezielt zu analysieren. Die implementierten Simulationsmodelle besitzen eine allgemeine Schnittstellenstruktur, welche die Wiederverwendbarkeit einzelner Modelle unterstützt, und ermöglichen es so, umfangreiche Modellbibliotheken aufzubauen. Die thermischen Modelle auf Basis konzentrierter Parameter liefern adäquate Ergebnisse, um die thermische Belastung der Bauteilkomponenten vorherzusagen. Die Grenze der Modellierungstiefe liegt in der Auflösung der diskreten Wärmequellennetze. Die konsequente Erweiterung der Mo-

dellbibliothek zur Simulation verlustbehafteter elektrischer Antriebssystemkomponenten liefert die Grundlage, um anwendungsnahe wissenschaftliche Fragestellungen untersuchen zu können.

Literatur

- DIN EN 60034-1 (2011): Drehende elektrische Maschinen – Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten. Berlin, Beuth-Verlag
- DIN EN 60034-6 (1996): Drehende elektrische Maschinen – Teil 6: Einteilung der Kühlverfahren (IC-Code). Berlin, Beuth-Verlag
- DIN EN 60349-2 (2007): Elektrische Zugförderung – Drehende elektrische Maschinen für Bahn- und Straßenfahrzeuge – Teil 2: Umrichter gespeiste Wechselstrommotoren. Berlin, Beuth-Verlag
- DIN IEC/TS 60349-3 (2011): Elektrische Zugförderung – Drehende elektrische Maschinen für Bahn- und Straßenfahrzeuge – Teil 3: Bestimmung der Gesamtverluste von umrichter gespeisten Wechselstrommotoren mit dem Einzelverlustverfahren. Berlin, Beuth-Verlag
- EU (2004): Berichtigung der Richtlinie 2004/26/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. April 2004 zur Änderung der Richtlinie 97/68/EG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte (ABl. L 146 vom 30.4.2004)
- Fischer, R. (2011): Elektrische Maschinen. München/Leipzig, Hanser Fachbuchverlag
- Hagl, R. (2013): Elektrische Antriebstechnik. München/Leipzig, Hanser Fachbuchverlag
- Lehrmann, C. (2006): Temperaturvorausberechnung an oberflächengekühlten Asynchronmotoren. Bulletin SEV/VSE 24-25, S. 32–37
- Müller, G.; Ponick, B. (2005): Grundlagen elektrischer Maschinen. Weinheim, Wiley-VCH
- Otter, M. (2009): Objektorientierte Modellierung von Antriebssystemen. In: Elektrische Antriebe-Regelung von Antriebssystemen, Hg. Schröder, D., Berlin/Heidelberg, Springer Verlag, S. 894–1009
- Pohlandt, C.; Haag, S. (2014): Dynamischer Prüfstand für elektrische Antriebssysteme. ATZ offhighway (Sonderausgabe ATZ August), S. 70–80
- Pohlandt, C.; Haag, S.; Geimer, M.; Gratzfeld, P. (2014): FVA-Forschungsvorhaben Nr. 675 I eANSKO III, Frankfurt, Heft 1103

Autoren

Dipl.-Ing. Christian Pohlandt ist akademischer Mitarbeiter und **Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer** leitet den Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (MOBIMA) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST), Rintheimer Querallee 2, 76137 Karlsruhe, E-Mail: christian.pohlandt@kit.edu.

Danksagungen und Hinweise

Die Autoren bedanken sich bei der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., dem VDMA und dem Mobima e.V. die dieses Projekt ermöglicht haben. Außerdem gilt den Mitgliedern des Arbeitskreises eANSKO III ein besonderer Dank für die fachliche Begleitung des Projektes.

Das Thema wurde auf der VDI-Tagung LAND.TECHNIK 2014, Berlin, 19.–20. November 2014, vorgestellt und eine Kurzfassung im VDI-Bericht veröffentlicht (Bd. 2226, S. 125–130).