

# Simulationsumgebung zur Projektierung elektrischer Antriebe in Nutzfahrzeugen

*Bei der Projektierung von elektrischen Antriebssystemen für Nutzfahrzeuge liegen besondere Herausforderungen in der Vielseitigkeit der Einsatzbedingungen. Häufig sollen auf Basis einer konstruierten aber noch nicht in Serie gefertigten Elektromaschine und dem zugehörigen Umrichter Aussagen zu den erreichbaren Fahrleistungen und zum Verbrauch elektrischer Energie gemacht werden. Mit dieser Zielsetzung wurde eine Simulationsumgebung entwickelt, die eine Streckenfahrtrberechnung im Zeitbereich enthält und darin integriert in diskreten Zeitschritten die auftretenden Motorströme und mit den Wirkungsgraden von Motor und Umrichter die Verluste und die Temperaturen berechnet. Schwerpunkt dieses Aufsatzes ist die analytische Berechnung der kritischen Wicklungstemperatur der Elektromaschine. Das Simulationstool kommt mit wenigen Hauptdaten aus und ist dadurch auch geeignet, während des Fahrbetriebs die Temperaturen laufend mitzurechnen. Es liefert als Ergebnis neben den Daten für Verlustleistungen auch die Aussage, ob Elektromaschine und Wechselrichter für die geforderte Aufgabe ausreichend dimensioniert sind.*

---

## 1. Herausforderungen bei der Antriebsprojektierung

Wenn Nutzfahrzeuge mit elektrischen Antrieben ausgerüstet werden, müssen häufig besondere Anforderungen erfüllt werden, die gegenüber Pkw stark abweichen können und insgesamt vielfältiger sind: Hinsichtlich der Fahrzeugmasse ergibt sich bei Nutzfahrzeugen

eine sehr große Bandbreite. Hinzu können erhebliche Masseunterschiede zwischen leerem und beladenem Zustand, das Mitführen von Anhängern und der Betrieb von Anbaugeräten kommen. Die zu befahrenden Strecken können entweder wenig bekannt sein, sodass Annahmen getroffen werden müssen, oder aber wie bei Linienbussen oder Fahrzeugen im Werkverkehr relativ genau definiert sein.

Eine besondere Herausforderung bei der Projektierung von Nutzfahrzeug-Antrieben ist die richtige Dimensionierung von Wechselrichter und Motor. Kosten-, Gewichts- und Bau- raumvorteile sprechen für die Wahl kleinerer Aggregate. Dabei soll die kurzzeitige Überlast- barkeit gegenüber der dauerhaft möglichen Leistung gezielt genutzt werden. Jedoch müs- sen die Anforderungen an Betriebssicherheit, Leistungsfähigkeit und Lebensdauer des An- triebs auf jeden Fall erfüllt werden.

## 2. Die Simulationsumgebung

### 2.1 Ziele und Anwendungsbereiche

Bei der **ARADEx AG** wurde eine Simulations- umgebung geschaffen, mit der die Projektie- rung elektrischer Antriebe in Nutzfahrzeugen schneller und sicherer wird.

Unter Berücksichtigung der Daten des Fahr- zeugs, des Streckenprofils und der sonstigen Einsatzbedingungen kann das elektrische und thermische Verhalten des Antriebsstranges (siehe **Bild 1**) simuliert werden. Die Simulation dient mehreren Zielen:

- Berechnung des Wirkungsgrades von Motor und Wechselrichter im Fahrbetrieb
- Ermittlung des Energieverbrauchs und damit der Reichweite
- Bestimmung der im Antrieb (Motor, Wechsel- richter) auftretenden Temperaturen
- Ermittlung der Fahrleistungen bei gegebenem Streckenprofil

### 2.2 Eingabedaten für Fahrzeug, Strecke, Umgebungsbedingungen

Die aus dem Pkw-Bereich bekannten Fahrzy- klen sind im Wesentlichen durch Wertepaare von Geschwindigkeit und Zeit definiert und damit für Nutzfahrzeuge mit ihren vielfältigen Einsatzgebieten meist nicht ausreichend. Hier ist es erforderlich, das Fahren auf realen Strecken zu simulieren, die beispielsweise über ihre Geodaten, das heißt eine hinreichende Zahl von Punkten mit deren geografischer Länge, Breite und Höhe über Normal Null, und den jeweils zugeordneten Soll- oder Maximal- geschwindigkeitswerten, definiert sind. Die tatsächliche Fahrgeschwindigkeit kann erst in der Simulationsrechnung ermittelt werden, wobei verschiedene Daten berücksichtigt werden können: Neigungen der Strecke, Wind mit

Geschwindigkeit und Vorzeichen, Kenngrö- ßen der Fahrbahnbeschaffenheit, Zusatzkräfte (z. B. Räumschild) oder Leistungen von Neben- aggregaten.

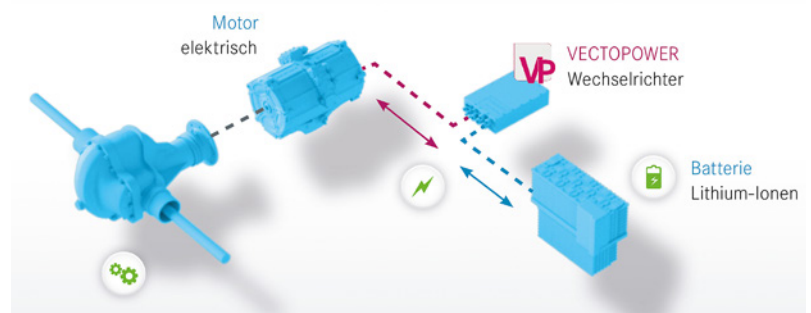
### 2.3 Streckenfahrtsimulation im Zeitbereich

Ein **Fahrermodell** mit Look-Ahead-Funk- tion wird verwendet, um Bremsvorgänge so rechtzeitig beginnen zu lassen, dass die Ge- schwindigkeitsvorgaben aus der Streckendatei eingehalten werden. In diesem Fahrermodell kann auch die Agilität der Fahrweise, das heißt der Beschleunigungs- und Verzögerungswert, begrenzt werden.

Aus der **Soll-Beschleunigung** wird im An- triebsstrangmodell, welches Getriebe, Elektro- maschine und Wechselrichter umfasst, die **erforderliche Stromstärke** berechnet, die vom Wechselrichter an den Motor zu liefern ist. Diese Berechnung folgt der Vorgehensweise des **ARADEx-Wechselrichters**, welcher zu je- dem Betriebspunkt des Motors den optimalen Strom in Stärke und Winkel berechnet und regelt, sodass die Gesamtstromstärken und damit die Verluste minimal sind. Eventuelle Beschränkungen der Stromstärke aufgrund hoher Temperatur in Motor oder Wechsel- richter sowie definierbare Stromgrenzen des Akkus werden vom Simulationstool dynamisch berücksichtigt.

Aus der angesteuerten Stromstärke in Ver- bindung mit der anliegenden Drehzahl wird das **Motordrehmoment** ermittelt. Daraus wird im **Fahrzeugmodell** die **Ist-Beschleunigung** be- rechnet. Diese wird über die Zeit integriert, sodass als Ergebnis die neue Geschwindigkeit errechnet wird.

Die Wiederholfrequenz der Berechnung kann an die Simulationsaufgabe angepasst werden.



**Bild 1:** Antriebsstrang eines elektrischen Nutzfahrzeugs: (von links nach rechts) Achs- getriebe, Elektromaschine, Wechselrichter, Batterie. (Quelle: **ARADEx AG**)

## 2.4 Wirkungsgrade und Temperaturberechnungen

**Verluste im Wechselrichter** entstehen an Dioden und IGBTs (Insulated-Gate Bipolar Transistor). Zu deren Berechnung wird hier auf Simulationswerkzeuge der Hersteller zurückgegriffen. Aus dem Kühlmitteldurchfluss und der Kühlmittel-eingangstemperatur gemäß Auslegung wird die Kühlkörpertemperatur berechnet, aus dieser und der Verlustleistung ergibt sich die Temperatur der Chips. Diese ist begrenzend für die Stromstärke, die der Wechselrichter liefern kann.

Auch für die **Elektromaschine** sind die aus den Verlusten resultierenden Temperaturen limitierend für Drehmoment und Leistung. Grundsätzlich sind Elektromaschinen für die Betriebsanforderungen in Fahrzeugen sehr gut geeignet, da sie über ihre Dauerleistungsgrenze hinaus kurzzeitig stark überlastet werden dürfen. Kritisch hinsichtlich Überhitzung sind die Lackisolierungen der Kupferleiter in den Spulen, insbesondere in den sogenannten **Wickelköpfen** (siehe **Bild 2**), also den über das Blechpaket hinausreichenden Schleifen des Wicklungsdrahtes, die bei typischen PM-Maschinen (Permanentmagnet-erregte Synchronmotoren) am schlechtesten gekühlt werden. Eine weitere Begrenzung liegt durch die Eigenschaften der Permanentmagnete im Rotor vor.

Es gilt also, durch Begrenzung der Höhe und Dauer der Strombelastung dafür zu sorgen, dass zu keiner Zeit an keinem Ort der Maschine die Temperaturgrenze überschritten wird. Dabei soll es jedoch nicht zu einer harten Abschaltung des Stromes kommen, sondern die Leistung soll in einer für den Fahrer erkennbaren Weise zu-



**Bild 2:** Wickelkopf einer Permanentmagnet-erregten Elektromaschine für Nutzfahrzeuge mit 300/600 kW Dauer-/Spitzenleistung. (Quelle: Prof. Dr. Ulrich Schrade)

rückgeregelt werden, sodass er sich in seiner Fahrweise darauf einstellen kann.

Eine ständige Messung der Temperaturen führt zu hohem Bauaufwand und ist in der Projektierungsphase überhaupt noch nicht möglich. Deshalb kommt der Simulation hier eine hohe Bedeutung zu. Die umgesetzte Leistung ist bei Fahrzeugantrieben zeitlich sehr stark veränderlich. Die Simulationsaufgabe erfordert somit die Berechnung des **instationären**, das heißt zeitabhängigen, Temperaturverhaltens.

Weil sie in der Projektierung eingesetzt werden soll, muss die hier beschriebene Methode ohne CAD-Daten der Elektromaschine auskommen. Im Bereich der Thermodynamik arbeitet sie deshalb mit analytischen Gleichungen, die aus Grundgleichungen der Wärmeleitung abgeleitet wurden. Somit sind geeignete Vereinfachungen erforderlich, um die Komplexität zu reduzieren und dennoch die wesentlichen Effekte zu berücksichtigen.

- Rotor und Rotorwelle werden als ein Körper mit homogener Temperaturverteilung betrachtet.
- An einem Durchmesser des Stators nahe am Luftspalt wird der dem Stator zuzuordnende Wärmeeintrag an einer gedachten Zylinder-Mantelfläche angenommen. Temperaturunterschiede zwischen den Kupferdrähten der Spulen und den dazwischen liegenden Zähnen aus Elektroblech, den Spulenkernen, werden vernachlässigt. Für beides zusammen werden gemittelte Werte für Temperatur, Wärmeleitung und Wärmekapazität angenommen. Diese Annahmen werden durch ein exemplarisch untersuchtes FEM-Temperaturmodell (Finite-Elemente-Methode) eines Einzelzahn der Spule gestützt.
- Wärmestrahlung sowie Konvektion an der Außenfläche des Gehäuses sind gegenüber dem Wärmetransport über das Kühlmedium vernachlässigbar.

### 2.4.1 Stationäres Temperaturverhalten

Als Basis zur Absicherung der instationären Berechnung erfolgt die Aufstellung der Gleichungen für die Berechnung des **stationären Temperaturverhaltens**, das heißt der Beharrungstemperaturen, weil diese auf relativ einfache Weise mit Versuchsergebnissen überprüfbar sind. Grundlage der Untersuchungen ist eine PM-Maschine mit 300/600 kW Dauer-/Spitzenleistung bei Drehzahlen bis  $3.500 \text{ min}^{-1}$ .

Rotorverluste sind bei der betrachteten Bauart von Elektromaschinen gering und werden hier nicht berücksichtigt.

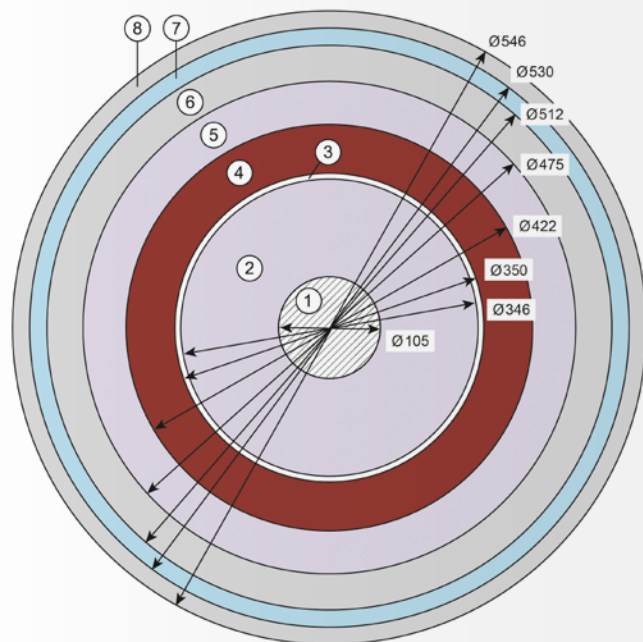
Die **Statorverluste** werden über den **elektromagnetisch aktiven Teil des Motors**, dem Blechpaket, zum Kühlmantel abgeleitet. Um mit einem ebenen Modell rechnen zu können, wird zunächst eine axial homogene Temperaturverteilung angenommen. Die Ungleichverteilung aufgrund der endseitigen Wärmeinleitung aus den Wickelköpfen wird in einem späteren Rechenschritt überlagert. Der Motor ähnelt im Bereich seiner aktiven Länge einem im Querschnitt rotationssymmetrischen, mehrschichtigen Rohr (siehe **Bild 3**).

Die in den Kupferdrähten der Wicklung auftretenden Verluste werden gemäß der anteiligen Drahtlängen bzw. Kupfermassen auf die Wickelköpfe und den Wicklungsanteil in den Nuten des Blechpakets aufgeteilt. Pro **Wickelkopf** ergibt sich eine bestimmte Verlustleistung, die auf die abgewickelte Drahtlänge des Wickelkopfes (hier 160 mm, siehe **Bild 4**) gleichmäßig verteilt ist und – so ist die Annahme – ausschließlich durch Wärmeleitung im Kupferdraht symmetrisch zu beiden Seiten in die Nuten abgeleitet wird. Für die Herleitung der Gleichung genügt deshalb die Betrachtung der halben Drahtschleife mit der positiven Längenkoordinate von  $l = 0$  bis  $l_{anb} = 80 \text{ mm}$  und der anteiligen Verlustleistung  $P_v$ . Der durchzuleitende Wärmestrom  $\dot{Q}$  nimmt demnach von der Mitte der Drahtschleife aus nach beiden Seiten mit dem Betrag der Längenkoordinate  $l$  linear zu:

$$\dot{Q}(x) = \frac{P_v}{l_{anb}} \cdot |l| \quad (\text{Gl. 1})$$

Umformung und Integration der Gleichung liefert den Temperaturverlauf im Wickelkopf. Dieser entspricht, ausgehend von Temperatur  $T_{anb}$  an den Anbindungsstellen am Übergang zur Nut, einer quadratischen Parabel, deren Scheitel bei  $l = 0$  das Temperaturmaximum in der Mitte eines Drahtes im Wickelkopf darstellt (siehe **Bild 4**).

**Innerhalb des Nutbereichs** führt die endseitige Einleitung der Wärme aus den Wickelköpfen zu einer Temperaturerhöhung gegenüber der im Schichtmodell schon berechneten Temperatur aus der insgesamt anfallenden Verlustleistung. Für den Verlauf dieser Temperaturerhöhung über der Längskoordinate  $x$  der Maschine kann bei Wärmeinleitung aus einem



**Bild 3:** Schichtmodell – vereinfachter Querschnitt durch eine zylindrisch aufgebaute PM-Maschine.  
 1. Welle, Werkstoff Stahl  
 2. Blechpaket Rotor, Werkstoff Elektroblech (Magnetmaterial vernachlässigt)  
 3. Luftspalt  
 4. Spulenbereich mit Zähnen, Werkstoffeigenschaften gemittelt aus Kupfer, Einbettmaterial und Elektroblech entsprechend ihrer Massenanteile  
 5. Wicklungsfreier Bereich des Stators, Werkstoff Elektroblech  
 6. Massiver Bereich des Kühlmantels, Werkstoff Aluminium  
 7. Bereich mit Kühlkanälen, Werkstoffeigenschaften gemittelt aus Aluminium und Kühlmedium  
 8. Aufgeschweißte Kühlkanalabdeckung, Werkstoff Aluminium  
 (Quelle: Prof. Dr. Ulrich Schrader)

Wickelkopf ein analytischer Ansatz gewählt werden, der dem einer Kühlrippe gleicht: Wärme wird über einen bestimmten Querschnitt mit einer definierten Wärmeleitfähigkeit in Längsrichtung transportiert und gleichzeitig seitlich über die Oberfläche mit einem bestimmten Wärmeübergangskoeffizienten abgeleitet. Durch die seitliche Wärmeableitung nehmen der in Längsrichtung verbleibende Wärmestrom und damit auch das die seitliche Wärmeableitung treibende Temperaturgefälle zwischen Kupferdraht und Kühlmedium ab. Durch Umformung und Integration des Ansatzes erhält man eine Differentialgleichung, die folgende Lösung für den Temperaturverlauf entlang des Drahtes in der Nut hat:

$$\Delta T(x) = \Delta T_1 \cdot \frac{\cosh(m \cdot (L - x))}{\cosh(m \cdot L)} \quad (\text{Gl. 2})$$

Darin ist  $\Delta T = T - T_U$  und  $m = \sqrt{\frac{h \cdot U}{\lambda \cdot A}}$

mit:

$T_U$	Umgebungstemperatur [°C]
$h$	Wärmeübergangskoeffizient Draht zu Kühlmedium [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
$L$	halbe Nutlänge [m]
$U$	Umfang des Drahtes [m]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit des Drahtwerkstoffes (Kupfer) [W/(K·m)]
$A$	Querschnittsfläche des Drahtes [m <sup>2</sup> ]

$\Delta T_1$  ist der Temperaturunterschied zwischen Draht und Kühlmedium am Anfang der Nut, wo der Wickelkopf angebunden ist ( $x = 0$ ). Der Wärmestrom an dieser Stelle beträgt:

$$\dot{Q}_1 = \Delta T_1 \cdot m \cdot \lambda \cdot A \cdot \tanh(m \cdot L) \quad (\text{Gl. 3})$$

Da dieser Wärmestrom aus dem Wickelkopf bereits berechnet wurde, kann durch Umstellen der Gleichung der Temperaturunterschied zwischen Draht und Kühlmedium am Eintritt in das Blechpaket berechnet werden:

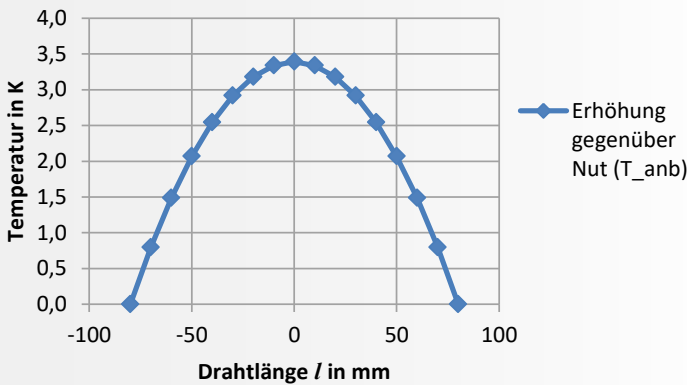
$$\Delta T_1 = \Delta T(x = 0) = \frac{\dot{Q}_1}{m \cdot \lambda \cdot A \cdot \tanh(m \cdot L)} \quad (\text{Gl. 4})$$

Das Ende einer Kühlrippe ist dadurch gekennzeichnet, dass dort Wärmeleitung in Längsrichtung nicht mehr möglich ist. In unserem Fall des Kupferleiters in der Nut muss dies bei symmetrischem Aufbau der Maschine in der Mitte des Blechpakets, also bei der halben aktiven Länge, der Fall sein, weil dort von der Gegenseite her ein gleich großer Wärmestrom auftreten müsste, sodass die Summe null ist. Wir bezeichnen diesen Ort mit  $x = L$  und erhalten:

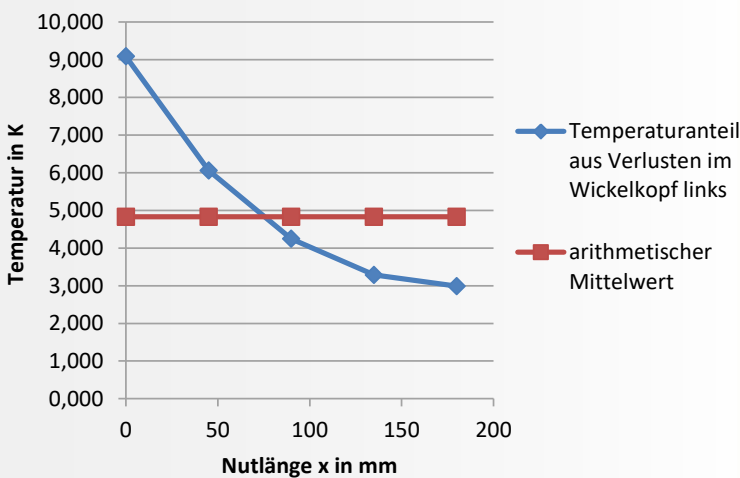
$$\Delta T_2 = \Delta T(x = L) = \Delta T_1 \cdot \frac{1}{\cosh(m \cdot L)}$$

**Bild 5** zeigt für die Längenkoordinaten  $x = 0$  bis  $x = L = 180$  mm (Mitte der aktiven Länge) den Graphen dazu für die aus einer Wickelkopfhälfte eingeleitete Wärme (blaue Linie). Aus Symmetriegründen ist für die andere Hälfte der aktiven Länge ein spiegelbildlicher Verlauf zu erwarten.

Um im Schichtmodell korrekte Temperaturwerte zu erhalten, musste der Wärmestrom aus den Wickelköpfen dort bereits mitberücksichtigt werden. Es geht jetzt darum, die Temperaturerhöhung zu ermitteln, die sich durch die seitliche Einleitung dieser Wärme aus den Wickelköpfen an deren Anbindungsstelle ergibt. Diese liest man als Differenz der Temperatur am Nutanfang (blaue Linie, Länge  $x = 0$ ) zum arithmetischen Mittelwert (rote Linie) ab: 4,3 K. Aufgrund der bei Wärmeleitung geltenden Linearität des Wärmestroms zur Temperaturdifferenz ist der abgeleitete Wärmestrom proportional zur Fläche unter den Linien und somit für beide Linien gleich. Der arithmetische Mittelwert entspricht somit der Temperatur aus dem Schichtmodell für den wärmsten Kupferleiter in der Nut, im Beispiel 42 °C. Am Nutende ist eine Temperatur  $T_{\text{anb}} = 46,3$  °C zu erwarten.



**Bild 4:** Temperaturverlauf in einem Draht des Wickelkopfs von Nut zu Nut. (Quelle: Prof. Dr. Ulrich Schrade)



**Bild 5:** Temperaturanteil aus der Einleitung der Verlustwärme von den Wickelköpfen, aufgetragen für den Nutbereich (aktive Länge). (Quelle: Prof. Dr. Ulrich Schrade)



Um die maximale Temperatur im Wickelkopf zu erhalten, muss nun noch die zuvor berechnete Temperaturspanne von 3,3 K innerhalb des Wickelkopfs addiert werden und man erhält  $T_{\max} = 49,6 \text{ °C}$  (siehe **Bild 6**, blauer Punkt am tatsächlichen Wicklungsbeginn bei Radius  $r = 180 \text{ mm}$ ). Zum äußeren Radius  $r = 211 \text{ mm}$  der Spule hin wird eine Abnahme der Wickelkopftemperatur entsprechend der Temperatur in der Nut erwartet.

### 2.4.2 Instationäres Temperaturverhalten

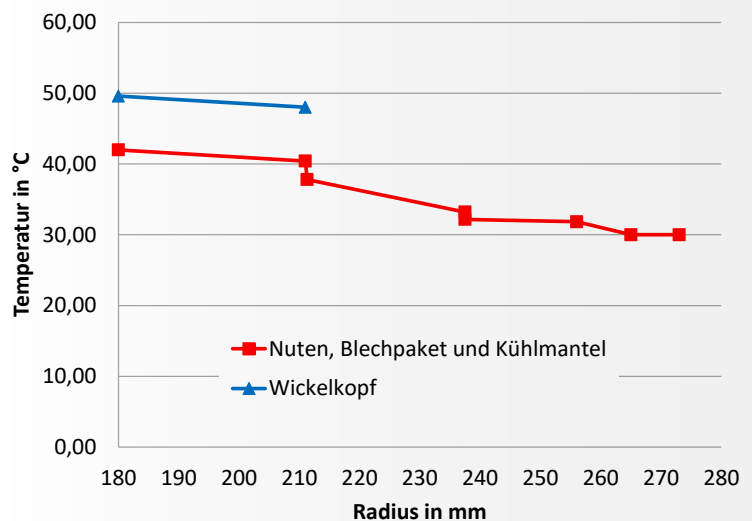
Die Berechnung des stationären Temperaturverhaltens ist nur als Vorstufe zur Lösung der eigentlichen Aufgabe zu sehen. Diese lautet: Berechnung des zeitabhängigen, also instationären Temperaturverhaltens als Funktion der in der Elektromaschine auftretenden Verlustleistungen. Die instationäre Berechnung erfordert neben den Größen für Wärmeübergänge durch Leitung, Konvektion und Strahlung (soweit diese nicht vernachlässigbar ist) auch die Berücksichtigung von Wärmekapazitäten.

#### 2.4.2.1 Analogien zu elektrischen Bauelementen

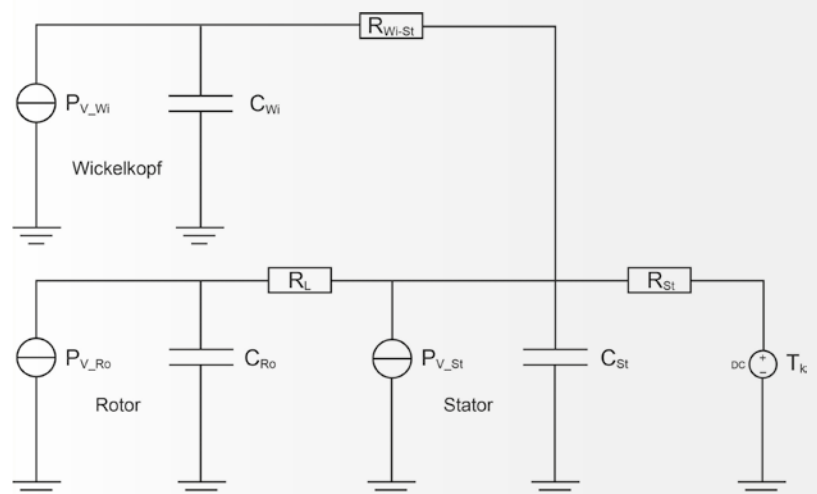
Unter bestimmten Voraussetzungen verhält sich ein System aus Körpern, die eine Wärmekapazität haben und sich berühren, sodass Wärmeleitung auftritt, ähnlich wie ein elektrisches System aus Kondensatoren und Widerständen. Eine der Voraussetzungen ist, dass die Wärmeleitfähigkeit innerhalb der wärmespeichernden Körper jeweils sehr gut ist im Vergleich zu den Übergangswiderständen zu den angrenzenden Körpern.

Bei der Berechnung des thermischen Verhaltens der Elektromaschine, ergeben sich Wärmestromquellen aus den elektrischen Verlustleistungen. Da auch während eines Aufwärmvorgangs Wärme durch das Material hindurchfließt, ist der Wärmestrom, der in eine thermische Masse hineinfließt, die Summe aus der abfließenden Wärme und der für eine Temperaturänderung bei gegebener Wärmekapazität der Masse erforderlichen Wärme.

Ein elektrisches Modell, das diesen Vorgang nachbildet, besteht für jede thermische Masse aus einer Stromquelle, einem Kondensator als Speicher und einem parallel geschalteten Ohm'schen Widerstand, über den Strom zum nächsten Bauteil oder direkt zur „Erde“ abfließt.



**Bild 6:** Radialer Temperaturverlauf vom tatsächlichen Wicklungsbeginn am Luftspalt ( $r = 180 \text{ mm}$ ) bis zum Kühlmantel außen ( $r = 273 \text{ mm}$ ). (Quelle: Prof. Dr. Ulrich Schrade)



**Bild 7:** Thermisches Modell einer PM-Maschine mit drei Wärmekapazitäten. (Quelle: Prof. Dr. Ulrich Schrade)

#### 2.4.2.2 Erstellung eines thermischen Modells mit drei Massen

Übertragen auf die zu berechnende Art von PM-Maschinen wird ein Modell erstellt, das drei thermische Massen aufweist (siehe **Bild 7**): 1. Rotor, 2. Wickelköpfe, 3. Rest des Stators ohne die Wickelköpfe: Nutbereiche, Blechpaket und Kühlmantel.

Die Zusammenfassung des in den Nuten befindlichen Kupfers, des Isolier- und Tränklacks dazwischen, des Blechpakets sowie des Aluminiumgehäuses mit seinen Kühlkanälen

zu einer thermischen Masse (Stator-Masse) ist eine Vereinfachung, die noch zulässig erscheint, weil das Temperaturgefälle innerhalb dieser Bauteile, verglichen mit dem Temperaturunterschied zu den Wickelköpfen, relativ flach ist (siehe Bild 6). Die Wärmekapazität des Stators  $C_{St}$  ergibt sich als Summe der Wärmekapazitäten der enthaltenen Materialien, jeweils multipliziert mit den anteiligen Massen. Ihre Temperatur  $T_{St}$  bezieht sich auf den arithmetischen Mittelwert über der aktiven Länge für den wärmsten Kupferleiter in der Nut, wie er im Schichtmodell berechnet wird. Der thermische Widerstand  $R_{St}$  wird aus der Temperaturdifferenz  $T_{St} - T_K$  zum Kühlwasser und dem Wärmestrom  $\dot{Q}$  aus der gesamten Verlustleistung von Wickelköpfen und Stator ermittelt:

$$R_{St} = \frac{T_{St} - T_K}{\dot{Q}} \quad (Gl. 5)$$

Die Verlustleistung im Stator  $P_{V_{St}}$  enthält Anteile aus Eisen- und Kupferverlusten. Die Wickelköpfe mit der Verlustleistung  $P_{V_{Wi}}$  (nur anteilige Kupferverluste) und der Wärmekapazität  $C_{Wi}$  sind über den thermischen Widerstand  $R_{Wi_{St}}$  angebunden, bei dessen Ermittlung sowohl die Temperaturerhöhung am Nutanfang bzw. Nutende, wo die Wickelköpfe angebunden sind als auch der Temperaturunterschied

von dort zum wärmsten Punkt in der Mitte der einzelnen Drahtschleifen der Wickelköpfe berücksichtigt sind.

Um auch die Verluste im Rotor zu erfassen und seine Temperatur  $T_{Ro}$  berechnen zu können, enthält das Modell die zugehörige Verlustleistungsquelle  $P_{V_{Ro}}$  und eine Masse mit der Wärmekapazität  $C_{Ro}$ . Der Luftspalt wird als Wärmeleitungswiderstand  $R_L$  modelliert.

### 2.4.2.3 Differentialgleichungen für drei thermische Massen

Die von einer Masse aufgenommene (bei negativem Vorzeichen abgegebene) Wärmeleistung  $P$  ist gleich dem Produkt aus Wärmekapazität  $C$  und zeitlicher Temperaturänderung  $\frac{dT}{dt}$ :

$$P = C \cdot \frac{dT}{dt} \quad (Gl. 6)$$

Das Produkt aus Wärmeleitungswiderstand  $R$  und durchfließender Wärmeleistung  $P$  ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T_R$ :

$$\Delta T_R = R \cdot P \quad (Gl. 7)$$

Der gesuchte Temperatur-Vektor  $\vec{y}$  enthält die Temperaturen von Wickelkopf, Stator und Rotor. Die Eingangsgrößen der Berechnung im Vektor  $\vec{u}$  sind die Verlustleistungen der Wickelköpfe  $P_{V_{Wi}}$  im Stator  $P_{V_{St}}$  im Rotor  $P_{V_{Ro}}$  und die Kühlwassertemperatur  $T_K$ .

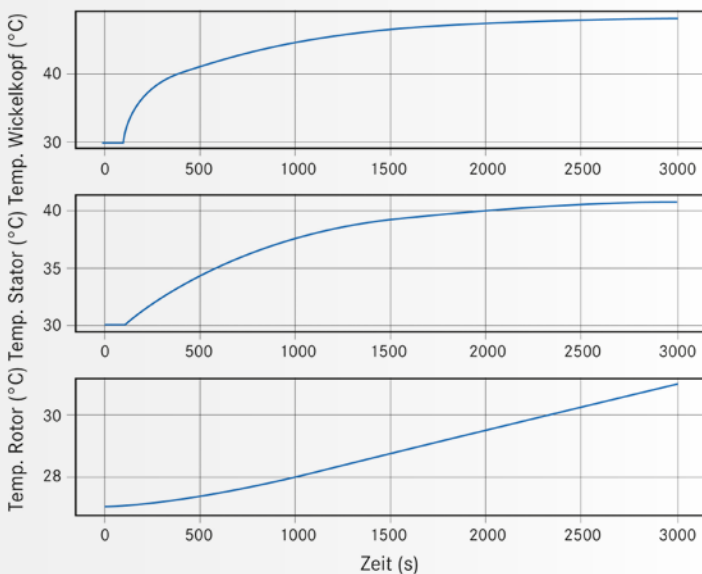
$$\vec{y} = \begin{bmatrix} T_{Wi} \\ T_{St} \\ T_{Ro} \end{bmatrix} \quad \vec{u} = \begin{bmatrix} P_{V_{Wi}} \\ P_{V_{St}} \\ P_{V_{Ro}} \\ T_K \end{bmatrix}$$

Das Modell erfordert die Berechnung des folgenden Differentialgleichungssystems:

$$\dot{\vec{y}} = A \cdot \vec{y} + B \cdot \vec{u} \quad \text{mit}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \end{bmatrix} \quad (Gl. 8)$$

Die Einflusszahlen  $a_{ij}$  und  $b_{ik}$  enthalten Terme aus den für die Maschine spezifischen Wärmekapazitäten und Wärmewiderständen, die aus dem statischen Rechenmodell abgeleitet werden – etliche sind null. Das Verfahren kann auch auf eine größere Zahl von thermischen Massen erweitert werden. Ein Modell mit vier Massen wird derzeit entwickelt.



**Bild 8:** Simulation des Erwärmungsvorgangs einer PM-Maschine. (Quelle: Prof. Dr. Ulrich Schrade)

## 2.5 Rechenergebnisse

**Bild 8** zeigt eine Simulation des Erwärmungsvorganges der Beispiel-Maschine mit folgenden Anfangstemperaturen: Rotor: 27,0 °C, Stator und Wickelkopf: 30,0 °C. Die Kühlwassertemperatur wird auf 30,0 °C konstant gehalten. Die Verlustleistung ist 100 Sekunden lang null und springt dann auf folgende Werte: Kupferverluste 2.038 W, Eisenverluste 182 W, in Summe also 2.220 W. Dieses einfache Beispiel zeigt, wie die Temperatur des Wickelkopfs schneller ansteigt und höhere Werte erreicht als die des Stators. Beide Temperaturen nähern sich den in der stationären Rechnung ermittelten Beharrungstemperaturen (siehe **Bild 6**).

Die Rotor-Temperatur steigt nur sehr langsam an, da am Rotor eine Verlustleistung von nur 22,4 W angesetzt wurde (1 % der Gesamtverluste) und weil der Luftspalt einen sehr großen thermischen Widerstand hat, sodass kaum Wärme vom Stator zum Rotor abgeleitet wird.

## 3. Zusammenfassung und Ausblick

Das Simulationstool ist so weit entwickelt, dass Temperaturberechnungen im Zeitbereich durchgeführt werden können. Die zeitlich veränderliche Verlustleistung, aufgeteilt in Eisen- und Kupferverluste, wird aus der Streckenfahrt-Simulation heraus ermittelt.

In nächster Zeit werden mehrere Motoren auf einem Lastprüfstand mit – aus der Streckenfahrt Simulation abgeleiteten – Lastkollektiven gefahren, sodass realitätsnahe Einsatzbedingungen vorliegen. Die Messung der relevanten Wicklungstemperaturen bei diesen Versuchen wird Daten für die Kalibrierung des Simulationstools liefern.

Dabei soll auch untersucht werden, ob ein Modell mit vier thermischen Massen genauere Ergebnisse liefern kann als das bestehende Modell mit drei Massen.

### AUTOREN VITA



#### Prof. Dr.-Ing. Ulrich Schrade

1988 – 1993 Studium des Maschinenbaus, Technische Universität München

1993 – 1999 Wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Maschinenelemente, Technische Universität München

1999 – 2009 Verschiedene Positionen in der Industrie, Fachgebiet Konstruktion und Entwicklung in der Antriebstechnik

Seit 2009 Professor an der Fakultät Maschinenbau und Fahrzeugtechnik, Hochschule Ulm



#### Dipl. Ing. Johannes Eha

1994 – 2000 Studium der Elektrotechnik, Universität Stuttgart

Seit 2000 Im Bereich Hardwareentwicklung, mit den Schwerpunkten Leistungselektronik, FPGA-Programmierung und Regelungstechnik, ARADEX AG



#### Dipl. Physiker Rolf Speer

1982 – 1989 Studium der Physik mit den Schwerpunkten Laserphysik und Halbleiterphysik, Universität Stuttgart

1989 Mitgründer der Aradex GmbH, später der ARADEX AG

Aktuell In der ARADEX AG zuständig für Forschung & Entwicklung



#### Dipl. Ing. (FH) Benjamin Schüle

2001 – 2006 Studium im Fachbereich Elektronik/ Technische Informatik, Hochschule Aalen

Seit 2006 Im Bereich der Hardwareentwicklung, mit den Schwerpunkten Mikrocontroller und FPGA-Programmierung, ARADEX AG

Kontakt ARADEX AG  
Ziegelwaldstr. 3  
73547 Lorch  
Tel.: +49 7172 91 81 0  
E-Mail: info@aradex.com