

# **Intuitive Sensorintegration zur thermischen Berechnung elektrischer Maschinen**

Dipl.-Ing. Guntram Gelke, Univ. Prof. Dr.-Ing. Jana Kertzsch

Institut für Elektrotechnik, TU Bergakademie Freiberg

## **Kurzfassung**

In diesem Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt wie gemessene Daten genutzt werden können um die mit einem thermischen online-Modell geschätzten Temperaturen zu verbessern. Die Methode zeichnet sich insbesondere durch eine physikalisch interpretierbare Vorgabe von zwei Parametern aus, mit denen bestimmt werden kann, wo und wie stark die Daten zur Anpassung verwendet werden. Das Verfahren wird mit verschiedenen Einstellungen anhand von Versuchen getestet und ausgewertet.

## **Abstract**

A new technique to improve temperature estimation in electrical machines is proposed in this paper. An easily adjustable observer use local temperature data. In particular, the method is characterized by a physically interpretable specification of two parameters, which can be used to determine where and how much the data is used for adaptation. The procedure is tested and evaluated with different settings based on experiments carried out.

## **1 Einleitung**

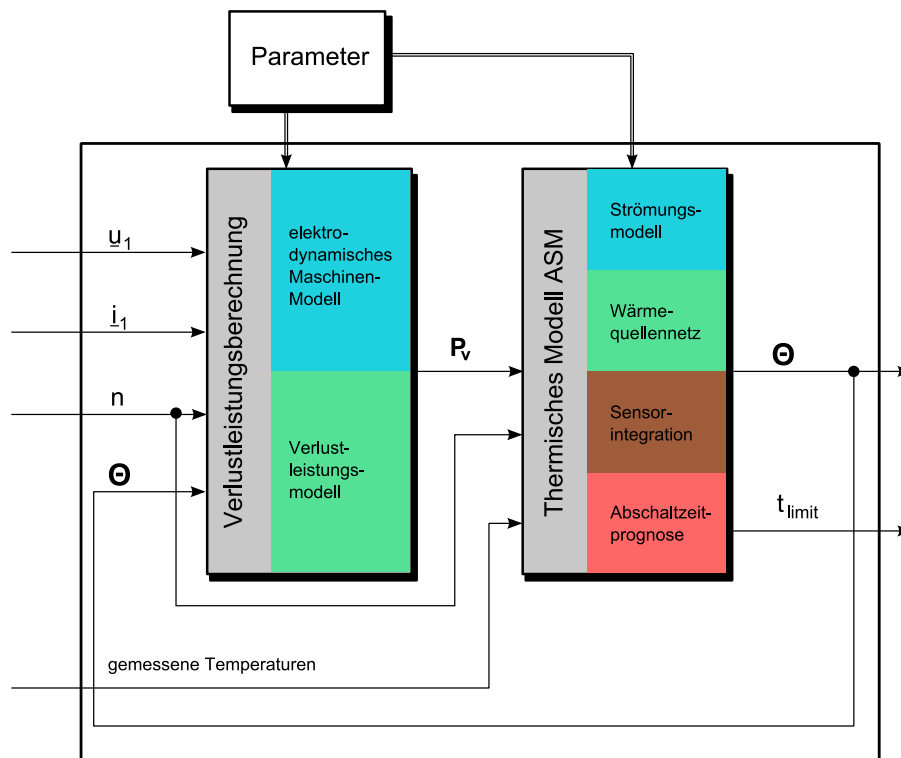
Hochausgenutzte elektrische Maschinen bieten flexible und dynamische Einsatzmöglichkeiten. Wechselnde Belastungen und Drehzahlen führen bei Antrieben zu Änderungen der Verlustverteilung respektive der Erwärmung der Maschinen. Die Anstrengungen nach hoher Leistungsdichte führen zu einer Reduzierung der Masse und damit der Wärmekapazität der Maschinen. Dies schlägt sich in einer erhöhten Dynamik thermischer Ausgleichsvorgänge nieder. Thermische Berechnungen für solche Anwendungsfälle können onlinefähig mit thermischen Mehrkörpermodellen durchgeführt werden [1]. Voraussetzung dafür ist, dass die verschiedenen Verlustarten entsprechend berücksichtigt werden und Hotspots innerhalb der elektrischen Maschine nachgebildet werden. Die Daten vorhandener Temperatursensoren in der Maschine können zur Verbesserung der thermischen Simulation verwendet werden.

In diesem Beitrag wird gezeigt, wie sich Sensordaten in ein onlinefähiges thermisches Modell, integrieren lassen um die Temperaturverteilung in einer Asynchronmaschine zu berechnen. Die Auslegung lässt sich physikalisch interpretieren und auf greifbare Parameter zurückführen.

## 2 Berechnungsmodell zur Temperaturüberwachung

Um die Maschinentemperaturen während des Betriebs zu berechnen und den Motor vor unzulässiger Erwärmung zu schützen, wird ein Motorschutzsystem (Abb. 1) verwendet, welches in [1] ausführlich beschrieben ist.

Für die hier betrachtete Asynchronmaschine (ASM) wird aus den Augenblickswerten des Stromraumzeigers  $\underline{i}_1$ , des Spannungsraumzeigers  $\underline{u}_1$  und der Drehzahl  $n$  ein elektrodynamisches Maschinenmodell parallel zur elektrischen Maschine berechnet. Das elektrodynamische Maschinenmodell liefert die Zustände der Maschine, aus denen die Kupferverluste, die Eisenverluste, die Reibungsverluste und die Zusatzverluste berechnet werden. Diese sind Eingangsgröße des thermischen Modells.



**Abb. 1:** Berechnungsschema zur thermischen Überwachung elektrischer Maschinen [1]

Das thermische Modell basiert auf einem Wärmequellennetz, mit dem die Maschinentemperaturen ermittelt werden. Da auch die Verluste in der Maschine teils temperaturabhängig sind,

werden die simulierten Maschinentemperaturen dem elektro-dynamischen Maschinenmodell zur Verfügung gestellt.

Die Erwärmung der Maschine kann von den rein simulierten Größen abweichen. Ursache sind neben Modellierungsfehlern auch äußere Einflüsse wie sich verändernde Umgebungstemperaturen, auftretende Strömungshindernisse oder defekte Maschinenteile. Um dem vorzubeugen, werden Messwerte von Temperatursensoren zur Verbesserung der simulierten Maschinentemperaturen mit Hilfe einer Beobachterstruktur integriert.

Die Abschaltzeitprognose überwacht die Grenztemperaturen und prognostiziert den Zeitpunkt des Erreichens dieser Grenzen. Dafür wird vom aktuellen Erwärmungs- und Belastungszustand ausgehend die weitere Erwärmung mit Hilfe des thermischen Modells berechnet. Die Abschaltzeitprognose ist nicht Bestandteil dieses Beitrags.

Die Parameter der elektrischen und thermischen Modellierung werden in diesem Beitrag als bekannt vorausgesetzt. Während die elektrischen Parameter sich aus der Maschinenprüfung nach DIN EN 60034-28 ableiten lassen, können die thermischen Parameter aus den Abmessungen, s. [2], berechnet oder über einen Identifikationsalgorithmus, s. [1], ermittelt werden.

### 3 Thermisches Mehrkörpermodell

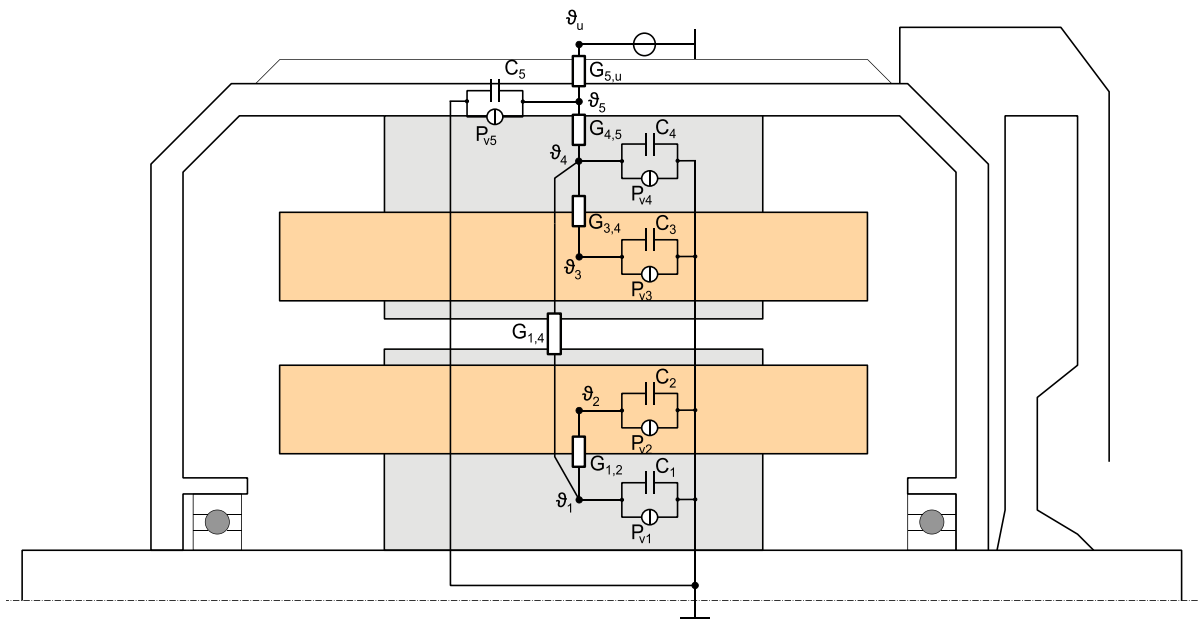
Die thermische Modellierung mit einem Wärmequellennetz basiert auf folgenden Annahmen:

- Abbildung realer Bauteile der Maschine
- Ausnutzung von Symmetrien in der Maschine
- homogene Verlustverteilung und Temperatur innerhalb jedes Körpers
- Zuweisung von Wärmeübergängen zwischen den Körpern
- Zuweisung von Wärmekapazitäten

Das hier verwendete 5-Körper-Modell (Abb. 2) bildet nur die wesentlichen Maschinenbestandteile und Wärmeübergänge ab. Die thermischen Wärmequellennetze lassen sich mit einem elektrischen Ersatzschaltbild abbilden (Abb. 2). Für jeden Körper erhält man eine lineare Differenzialgleichung 1. Ordnung.

Für das 5-Körper-Modell erhält man folgendes Gleichungssystem:

$$\mathbf{C} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \\ \vartheta_3 \\ \vartheta_4 \\ \vartheta_5 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_F \begin{bmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \\ \vartheta_3 \\ \vartheta_4 \\ \vartheta_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{v1} \\ P_{v2} \\ P_{v3} \\ P_{v4} \\ P_{v5} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ G_{5,u} \end{bmatrix} \vartheta_u \quad (1)$$



1	Läuferblechpaket und Welle	4	Ständerblechpaket
2	Läuferwicklung	5	Gehäuse
3	Ständerwicklung		

**Abb. 2:** thermisches Ersatzschaltbild einer ASM (5-Körper-Modell) [1]

mit der Wärmekapazitätsmatrix  $\mathbf{C}$ , welche eine Diagonalmatrix ist und die Wärmekapazitäten der fünf Körper enthält:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_5 \end{bmatrix} \quad (2)$$

und der Matrix  $\mathbf{A}_F$ , welche die Wärmeleitwerte enthält, die Wärmeübergänge zwischen den Körpern beschreiben:

$$\mathbf{A}_F = \begin{bmatrix} -(G_{1,2} + G_{1,4}) & G_{1,2} & 0 & G_{1,4} & 0 \\ G_{1,2} & -G_{1,2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -G_{3,4} & G_{3,4} & 0 \\ G_{1,4} & 0 & G_{3,4} & -(G_{1,4} + G_{3,4} + G_{4,5}) & G_{4,5} \\ 0 & 0 & 0 & G_{4,5} & -(G_{4,5} + G_{5,u}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Die Eingangsgrößen sind die fünf Verlustleistungen des Verlustleistungsvektors  $\mathbf{P}_V$  und die Umgebungstemperatur  $\vartheta_u$ . Die Parameter des thermischen Modells werden für diese Maschine über zwei Erwärmungsversuche bei Dauerbetrieb S1 und bei ununterbrochenem periodischem Betrieb S6 nach [1] ermittelt.

#### 4 Thermischer Beobachter

Modellierungsfehler oder sich ändernde Wärmeübertragungen durch z.B. einen verstopften Lüfter führen zu Abweichungen zwischen simulierten und realen Temperaturen in der Maschine. Durch die Kenntnis der aktuellen Temperatur an spezifischen Orten soll der Fehler über eine Beobachterstruktur nach Möglichkeit für alle Temperaturen kompensiert werden.

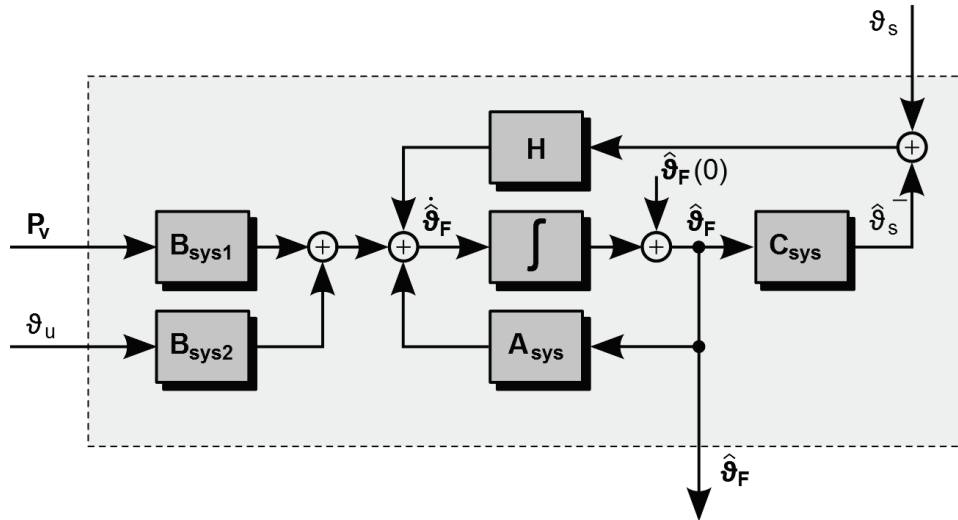


Abb. 3: Thermischer Zustandsbeobachter

##### 4.1 Beobachterstruktur

Für das Gleichungssystem der Gl. (1) kann ein Zustandsbeobachter nach Luenberger verwendet werden [4]. Wie in Abb. 3 zu sehen, wird dafür der Messwert des Temperatursensors  $\vartheta_s$  mit dem aus dem Modell geschätzten Wert  $\hat{\vartheta}_s$  verglichen und der gebildete Fehler mit dem Rückkopplungsvektor  $\mathbf{H}$  gewichtet zurückgeführt.

Die zugehörige Beobachtergleichung ergibt sich zu:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\vartheta}_1 \\ \hat{\vartheta}_2 \\ \hat{\vartheta}_3 \\ \hat{\vartheta}_4 \\ \hat{\vartheta}_5 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{\text{sys}} \begin{bmatrix} \hat{\vartheta}_1 \\ \hat{\vartheta}_2 \\ \hat{\vartheta}_3 \\ \hat{\vartheta}_4 \\ \hat{\vartheta}_5 \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{\text{sys1}} \begin{bmatrix} P_{v1} \\ P_{v2} \\ P_{v3} \\ P_{v4} \\ P_{v5} \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{\text{sys2}} \vartheta_u + \mathbf{H}(\vartheta_s - \hat{\vartheta}_s) \quad (4)$$

mit den Systemmatrizen:

$$\mathbf{A}_{\text{sys}} = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{A}_F \quad \mathbf{B}_{\text{sys1}} = \mathbf{C}^{-1} \quad \mathbf{B}_{\text{sys2}} = \mathbf{C}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ G_{5,u} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Das Gleichungssystem entspricht dem des thermischen Modells im Falle, dass der Rückkopplungsvektor  $\mathbf{H}$  ein Nullvektor ist.

Liegt der Sensor in der Maschine und gibt es einen hohem Wärmeleitwert zwischen der Umgebungstemperatur und der Sensorposition, dann haben Änderungen der Umgebungstemperatur unmittelbaren Einfluss auf die Sensordaten. In diesem Fall kann die Umgebungstemperatur über einen Störgrößenansatz mit dem Beobachter geschätzt werden. Ein Sensor für die Umgebungstemperatur ist dann nicht nötig.

Für den Störgrößenbeobachter erhält man folgende Beobachtergleichung:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\vartheta}_1 \\ \hat{\vartheta}_2 \\ \hat{\vartheta}_3 \\ \hat{\vartheta}_4 \\ \hat{\vartheta}_5 \\ \hat{\vartheta}_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{\text{sys}} & \mathbf{B}_{\text{sys}2} \\ \mathbf{0} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\vartheta}_1 \\ \hat{\vartheta}_2 \\ \hat{\vartheta}_3 \\ \hat{\vartheta}_4 \\ \hat{\vartheta}_5 \\ \hat{\vartheta}_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{\text{sys}1} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{v1} \\ P_{v2} \\ P_{v3} \\ P_{v4} \\ P_{v5} \end{bmatrix} + \mathbf{H}_{\text{St}}(\vartheta_S - \hat{\vartheta}_S). \quad (6)$$

Die geschätzte Umgebungstemperatur wird nur über den Beobachtungsfehler angepasst. Die Dynamik lässt sich über den Rückkopplungsvektor  $\mathbf{H}_{\text{St}}$  einstellen.

## 4.2 Beobachterausslegung

Allgemein sollte zur Einstellung des Beobachters der Vektor  $\mathbf{H}$  so parametrisiert werden, dass es zu einer schnellen, rauscharmen und dauerhaften Übereinstimmung zwischen den simulierten und den gemessenen Werten kommt. Bekannte Methoden zur Auslegung, wie die Polvorgabe [4], sind dabei für den Anwender oft nur schwierig zu handhaben. Die in diesem Beitrag vorgestellte Einstellung basiert auf einer physikalischen Interpretation der Rückführung und ist durch eine mit 2 Parametern für den Anwender leichte Einstellbarkeit gekennzeichnet.

Durch Erweitern und Umstellen kann die Rückführung als Korrekturleistung betrachtet werden:

$$\mathbf{H}(\vartheta_S - \hat{\vartheta}_S) = \mathbf{C}^{-1}\mathbf{C}\mathbf{H}(\vartheta_S - \hat{\vartheta}_S) = \mathbf{C}^{-1}\mathbf{P}_{\text{korr}} \quad (7)$$

mit

$$\mathbf{P}_{\text{korr}} = \mathbf{C}\mathbf{H}(\vartheta_S - \hat{\vartheta}_S). \quad (8)$$

Die Summe der Elemente des Produkts aus der Matrix  $\mathbf{C}$  und dem Vektor  $\mathbf{H}$  entspricht der Korrekturleistung:

$$P_{\text{beo}} = \sum \mathbf{C}\mathbf{H} \quad (9)$$

des Beobachters bei 1 K Temperaturdifferenz. Sie ist somit ein Maß für die Stärke des Beobachtereingriffs.

Der andere Parameter soll die Verteilung des Beobachtereingriffs auf die fünf Körper des Mehrkörpermodells festlegen. Dabei soll die Korrektur vorrangig dort erfolgen, wo die Temperatur bekannt ist, also an der Vergleichsstelle und an mit dieser thermisch gut gekoppelten Körpern. Körper die einen sehr niedrigen Wärmeleitwert zur Vergleichsstelle besitzen, sollten wenig bis gar nicht in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz an der Vergleichsstelle korrigiert werden, da deren Temperatur im Umkehrschluss auch nur einen geringen oder keinen Einfluss auf die Vergleichsstelle hat.

Zur Umzusetzung wird ein stationärer Erwärmungsvorgang mit dem thermischen Modell berechnet, bei dem nur Verluste an der Sensorposition angesetzt werden. Dann ermittelt man bei Erreichen von 63 % der Endübertemperatur der Vergleichsstelle die Übertemperaturen  $\vartheta_{iü}$  aller  $i$  Körper des thermischen Modells und bezieht diese auf die entsprechende Übertemperatur an der Vergleichsstelle  $\vartheta_{sü}$ . Für jeden Körper des Modells kann dann mit dem vorzugebenen Exponenten  $a_{\text{exp}}$  ein Faktor nach:

$$k_i = \left(1 - \frac{\vartheta_{sü} - \vartheta_{iü}}{\vartheta_{sü}}\right)^{a_{\text{exp}}} \quad (10)$$

bestimmt werden.

Der Rückkopplungsvektor wird in Abhängigkeit dieser Faktoren  $k_i$ , der Korrekturleistung  $P_{\text{beo}}$  und der Wärmekapazitäten  $C_i$  der Körper wie folgend berechnet:

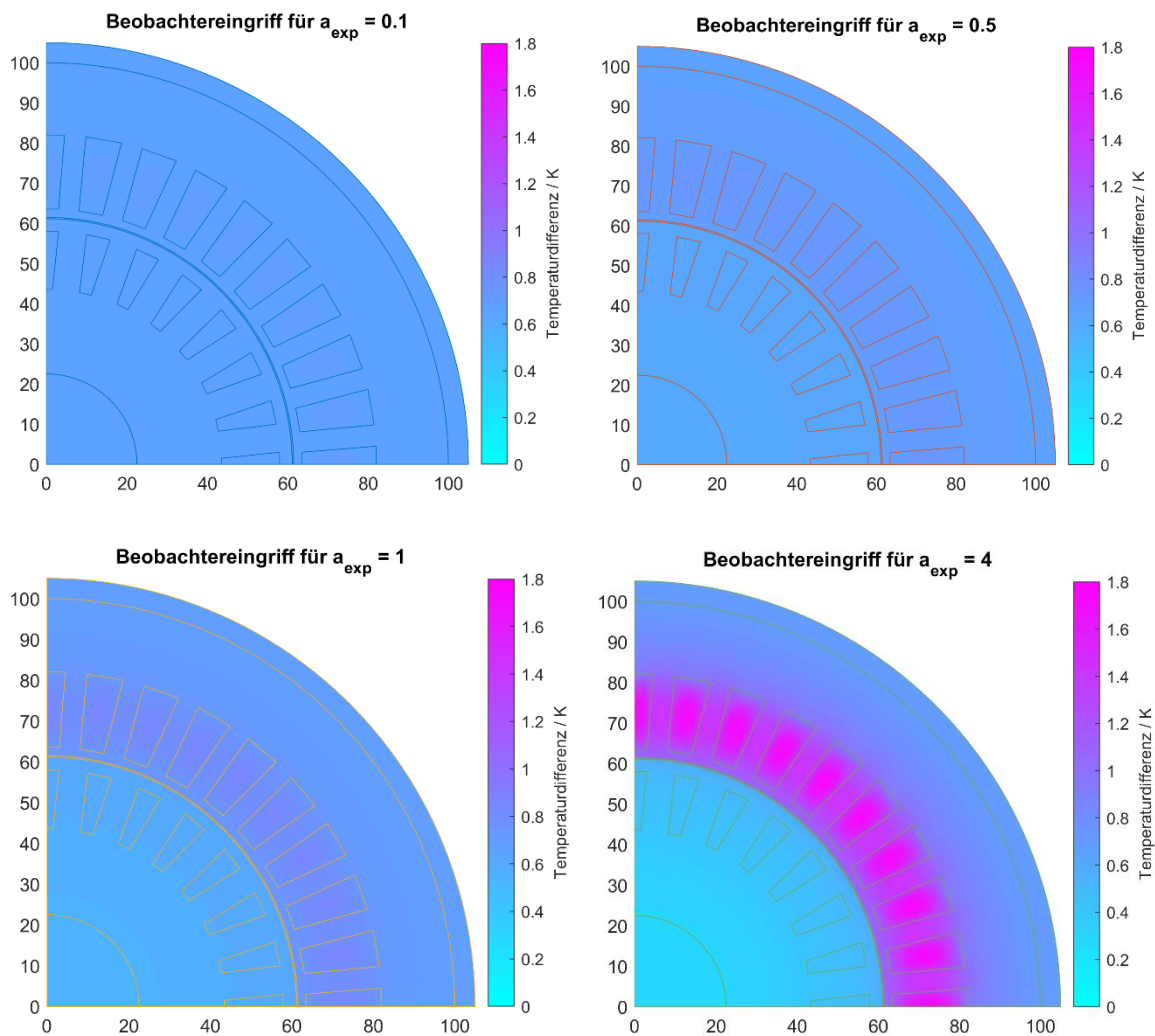
$$\mathbf{H} = \mathbf{C}^{-1} \left( \frac{\mathbf{1}}{\sum C_i k_i} \begin{bmatrix} C_1 k_1 \\ C_2 k_2 \\ C_3 k_3 \\ C_4 k_4 \\ C_5 k_5 \end{bmatrix} P_{\text{beo}} \right). \quad (11)$$

Der Rückkopplungsvektor für den Störgrößenbeobachter lässt sich nach:

$$\mathbf{H}_{\text{St}} = \mathbf{C}'^{-1} \left( \frac{\mathbf{1}}{\sum C_i k_i} \begin{bmatrix} C_1 k_1 \\ C_2 k_2 \\ C_3 k_3 \\ C_4 k_4 \\ C_5 k_5 \\ 1 \end{bmatrix} P_{\text{beo}} \right) \quad (12)$$

ähnlich auslegen. Die Matrix der Wärmekapazitäten muss dafür um eine Ordnung erweitert werden. Der letzte Eintrag der Diagonalmatrix wird 1 gesetzt. Hier bezeichnet mit  $\mathbf{C}'$ . Die Dynamik der Schätzung der Umgebungstemperatur ist damit an die Dynamik des Maschinenbeobachters gekoppelt. Je nach Umgebungsbedingung kann davon abgewichen werden.

Für die Auslegung der Beobachterrückführung ist damit nur die Korrekturleistung  $P_{beo}$ , welche die Dynamik des Beobachters beeinflusst und der Exponent  $a_{exp}$ , der bestimmt wie lokal der Beobachtereingriff um die Vergleichsstelle erfolgt, vorzugeben. Die Korrekturleistung  $P_{beo}$  wird in diesem Beitrag den Verlusten in der Maschine bei Bemessungslast gleich gesetzt. Zum Veranschaulichen der Auswirkungen des Exponenten  $a_{exp}$  wird das Verfahren der Beobachterrückführung auf eine 2D FEM-Simulation angewendet. Als Vergleichsstelle für den Beobachtereingriff wird die Ständerwicklungstemperatur gewählt. Abb. 4 zeigt die Änderung der Erwärmung der Maschine durch den Beobachtereingriff über 20s bei 500 W Beobachterkorrekturleistung und verschiedenen Exponenten.



**Abb. 4:** Vergleich verschiedener Beobachtereinstellungen



Für  $a_{\text{exp}} \rightarrow 0$  findet ein gleichmäßiger Beobachtereingriff über die gesamte Maschine statt. Fehler an der Vergleichsstelle führen zu einer Anpassung aller Maschinentemperaturen. Je größer der Exponent  $a_{\text{exp}}$  gewählt wird umso lokaler findet der Beobachtereingriff um die Vergleichsstelle statt. Thermisch schlecht gekoppelte Körper, wie der Läufer in Bezug zur Ständerwicklung, werden dann durch die Rückführung kaum beeinflusst.

## 5 Praktische Erprobung

Zur Validierung des Verfahrens werden an einer instrumentierten Asynchronmaschine mit kurzgeschlossenem Schleifringläufer folgende Belastungsversuche durchgeführt:

- S2: Kurzzeitbetrieb mit Bemessungslast und verstopftem Lüfter
- S6: ununterbrochener periodischer Betrieb (abwechselnd 5 min 50% Belastung und 5 min 130% Belastung) mit falschen Startwerten

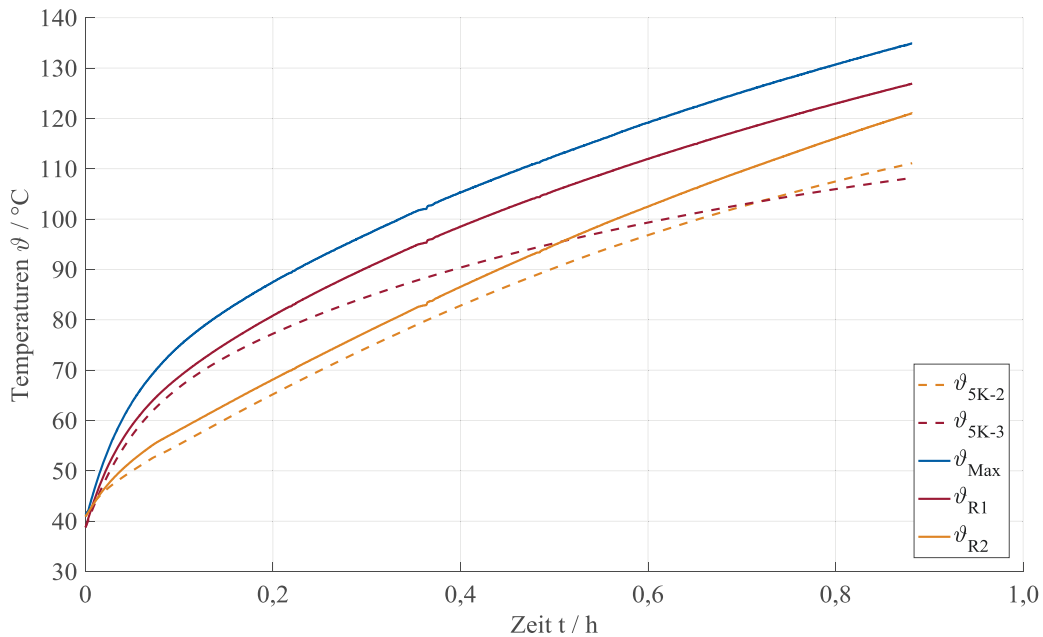
Während der Versuche werden die Temperaturen der Läuferwicklung, der Ständerwicklung und der maximalen Maschinentemperatur mit 1 s Abtastintervall aufgenommen. Für jeden Betriebsfall werden die gemessenen Verläufe und die mit dem thermischen Modell ohne Beobachterrückführung simulierten Verläufe dargestellt. Der Beobachtereinfluss wird über Kenngrößen bei verschiedenen Rückführungen gezeigt.

Es werden 7 verschiedene Beobachterrückführungen verglichen. Als Vergleichsstellen werden die Ständerwicklungstemperatur und die Läuferwicklungstemperatur ausgewählt. Jede Vergleichsstelle wird dann mit 3 verschiedenen Exponenten  $a_{\text{exp}} = \{0,1; 0,5; 4\}$  eingestellt. Zusätzlich wird ein Beobachter gewählt, der die Rückführungen an beiden gewählten Vergleichsstellen kombiniert.

Die Beobachter auf Basis der Ständerwicklungstemperatur werden als Störgrößenbeobachter ausgeführt und schätzen die Umgebungstemperatur mit, während die Beobachter mit der Läuferwicklungstemperatur als Vergleichsstelle die gemessene Umgebungstemperatur als Eingangsgröße der Modelle haben.

### Kurzzeitbetrieb S2 mit verstopfem Lüfter

Betrachtet man den Versuch S2 mit verstopfem Lüfter (Abb. 5), sieht man, dass die mit dem 5-Körper-Modell simulierten Temperaturen und die gemessenen Temperaturen divergieren. Die reduzierte Kühlmittelströmung führt zu einer erhöhten Erwärmung der Maschine. Am Ende des Versuchs beträgt der Unterschied zur simulierten Ständerwicklungstemperatur 18,8 K.



**Abb. 5:** Vergleich gemessener und simulierter Temperaturen bei S2 mit verstopfem Lüfter

Modell/Beobachter	$a_{\text{exp}}$	$\vartheta_{\text{max}} - \max(\vartheta_{5K})$	$\vartheta_{R1} - \vartheta_{5K-3}$	$\vartheta_{R2} - \vartheta_{5K-2}$
5-K-Modell	-	23,9 K	18,8 K	10,0 K
Rückführung der Ständerwicklungstemperatur	0,1	7,9 K	0,6 K	8,0 K
	0,5	8,2 K	0,4 K	5,0 K
	4	8,2 K	0,3 K	3,8 K
Rückführung der Läuferwicklungstemperatur	0,1	16,5 K	12,0 K	0,5 K
	0,5	17,0 K	14,2 K	0,3 K
	4	17,3 K	17,0 K	0,3 K
Kombiniert	0,5	8,3 K	0,5 K	0,3 K

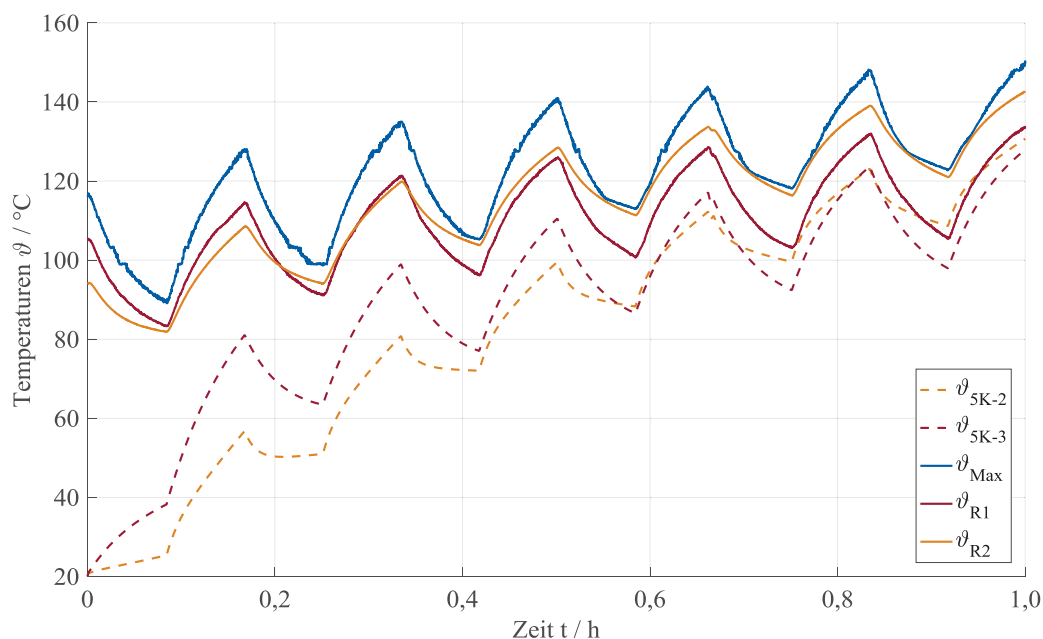
**Tabelle 1:** Betrag maximaler Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Werten bei S2

Die Ergebnisse der Tabelle 1 zeigen, dass die Ständerwicklungstemperatur durch deren Rückführung im Beobachter sehr gut geschätzt wird. Für den Exponenten  $a_{\text{exp}} = 0,1$  bewirkt die Rückführung der Ständerwicklungstemperatur, dass die Läuferwicklungstemperatur zu hoch geschätzt wird. Bei höherem Exponenten tritt die Korrektur vor allem im Ständer auf, und wirkt so der Ursache besser entgegen. Der Fehler der Läufertemperaturen wird dann stärker reduziert. Für diesen Belastungsfall erscheint ein großer Exponent vorteilhaft. Die Abweichung zur maximalen Maschinentemperatur, die im Wickelkopf des Ständers auftritt, kann auf etwa 8 K reduziert werden. Mit dem verwendeten thermischen Modell lässt sich diese Abweichung nicht weiter reduzieren.

Die Rückführung der Läuferwicklungstemperatur verbessert den Schätzwert an der Vergleichsstelle, bewirkt aber für die maximale Maschinentemperatur und die Ständertemperaturen nur geringe Vorteile. Der Sensor ist für diesen Fehler zu entkoppelt von der Ursache. Ein niedriger Exponent ist hier etwas besser, da so die Gehäusetemperatur stärker korrigiert wird.

### Periodischer Betrieb mit falschen Startwerten

Liegen nach einem Neustart des thermischen online-Modells keine aktuellen Startwerte vor, so kann es wie in Abb. 6 zu sehen, sehr lange dauern bis die Temperaturen wieder übereinstimmen. So liegt der simulierte Wert für die Läuferwicklungstemperatur nach 1 h immer noch 11,9 K unter dem gemessenen Wert.



**Abb. 6:** Vergleich gemessener und simulierter Temperaturen bei S6 mit falschen Startwerten

Modell/Beobachter	$a_{\text{exp}}$	$\vartheta_{\text{max}} - \max(\vartheta_{5K})$		$\vartheta_{R1} - \vartheta_{5K-3}$		$\vartheta_{R2} - \vartheta_{5K-2}$	
		1 min	10 min	1 min	10 min	1 min	10 min
5-K-Modell	-	81,7 K	46,9 K	72,1 K	33,5 K	68,0 K	51,8 K
Rückführung der Ständerwicklungs-temperatur	0,1	12,3 K	12,8 K	2,6 K	0,6 K	14,1 K	17,3 K
	0,5	10,1 K	13,2 K	0,4 K	0,2 K	48,2 K	25,3 K
	4	10,1 K	13,6 K	0,4 K	0,2 K	67,9 K	46,5 K
Rückführung der Läuferwicklungstemperatur	0,1	21,6 K	9,6 K	19,2 K	3,8 K	3,9 K	0,1 K
	0,5	18,2 K	19,5 K	45,9 K	9,4 K	0,4 K	0,2 K
	4	18,7 K	19,5 K	71,7 K	26,3 K	0,9 K	0,2 K
Kombiniert	0,5	12,8 K	12,5 K	3,1 K	0,8 K	3,6 K	0,4 K

**Tabelle 2:** Temperaturdifferenz zwischen gemessenen und simulierten Werten nach 1 min und nach 10 min bei S6 mit falschen Startwerten

Die Beobachterrückführungen korrigieren die Startwerte sehr schnell auf die aktuellen Maschinentemperaturen, allerdings vor allem an der Vergleichsstelle, s. Tabelle 2. Je höher der Exponent gewählt wird umso schneller verläuft der Korrektur an der Vergleichsstelle aber umso langsamer werden thermisch nicht so gut gekoppelte Bereiche korrigiert. Für den Exponenten 4 findet die Korrektur fast ausschließlich an der Vergleichsstelle statt. Die anderen Maschinenteile verlaufen dann ähnlich den Temperaturen des Modells ohne Rückführung. Das Verhalten ist hier im Vergleich zum Betriebsfall S2 gegensätzlich. Über die gesamte Maschine gesehen, kompensiert die Rückführung der Läuferfemperatur mit niedrigem Exponenten  $a_{\text{exp}}$  am ehesten die falschen Startwerte. Der Beobachter mit Rückführung beider Vergleichsstellen ist auch hier deutlich besser. Die hohen Temperaturdifferenzen an der Vergleichsstelle zu Beginn führen zu entsprechend starken Rückführungen, die zu Überschwingungen führen, weshalb teilweise Temperaturabweichungen nach 1 min besser sind als nach 10 min.

Das Schätzen der Maximaltemperatur, wird auch hier durch den Beobachter deutlich verbessert, die hohen verbleibenden Abweichungen lassen sich aber modellbedingt nicht vermeiden. Die Belastungsphasen im Überlastbereich führen zu hohen Wickelkopftemperaturen, die nicht mit dem 5-Körper-Modell nachgebildet werden.

## 6 Zusammenfassung

Im Beitrag wird eine relativ einfache Lösung zur Integration von Sensordaten zur thermischen Überwachung elektrischer Maschinen vorgestellt. Mit 2 Faktoren können zum einen die Stärke des Beobachtereingriffes als Leistung pro Kelvin Abweichung an der Vergleichsstelle und zum anderen die Lokalität des Beobachtereingriffes über den Exponenten vorgegeben werden.

Ist ein Temperatursensor an einem mit der Umgebungstemperatur gut gekoppelten Bauteil vorhanden, dann kann die Umgebungstemperatur über einen Störgrößenbeobachter geschätzt werden.

Die Auswirkungen auf die zwei hier untersuchten Fehlerfälle zeigen, dass sich mit der vorgeschlagenen Beobachterausslegung in jedem Fall die Temperaturen von Teilen mit guter thermischer Verbindung zu der Vergleichsstelle korrigieren lassen. Eine Verbesserung aller Maschinentemperaturen mit einem Sensor ist in Abhängigkeit vom betrachteten Fehlerfall nicht immer zu erreichen. Mit der vorgeschlagenen Beobachtereinstellung können die simulierten Maschinentemperaturen gezielt beeinflusst werden.

## 7 Literatur

- [1] Gelke, G.; Kertzsch, J.: Thermische Berechnung elektrischer Maschinen für dynamische Betriebsfälle, In: Freiburger Forschungshefte – Elektrische Antriebstechnik, A925, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2017
- [2] Kylander, G.: Thermal modelling of small cage induction motors: Technical Report No. 265. Dissertation. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 1995
- [3] Mellor, P. H.; Roberts, D.; Turner, D. R.: Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design. In: IEE Proceedings - Electric Power Applications. Bd. 138, Nr. 5, 1991, S. 205-218
- [4] Nestler, H.: Einsatz des Luenberger-Beobachters zur On-Line-Temperaturabschätzung in elektrischen Maschinen. Diss. Tech. Hochsch. Aachen, 1989