Bachelorarbeit

Thema: Entwicklung eines thermischen Modells für eine permanentmagneterregte Erregermaschine und Ermittlung ihrer Grenzleistung in Abhängigkeit der thermischen Anbausituation

vorgelegt von: **Alexander Hannes Amadeus Müller-Uri**

Studiengang: Elektrotechnik und Informationstechnik
Studienprofil: Elektrische Energietechnik

Verantwortlicher Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. Cornelius Bode
Betrieblicher Betreuer: Dipl.-Inf. Holger Klotsche

Ausgabetermin: 29.07.2024 Abgabetermin: 21.10.2024

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 4
2. Grundlagen 5
2.1 Der PMG-1 5
2.1.1 PMG Nenndaten 7
2.1.2 Grundprinzip PMG-1 7
2.2 Verluste 8
2.3 Wärmeübertragung 10
2.4 Wärmeübertragungsarten 11
2.4.1 Definitionen 12
2.4.2 Konvektion 12
2.4.3 Freie Konvektion 13
2.4.4 Erzwungene Konvektion 13
2.4.5 Strahlung 13
2.5 Thermische Netzwerke 14
2.5.1 Aufbau eines Thermischen Netzwerks 15
2.5.2 Wärmequellen und Referenztemperaturen 15
2.5.3 Thermische Widerstände 15
2.5.4 Thermische Kapazitäten 16
2.5.5 Modellwerkzeug 16
2.5.6 Modellierung der Nut 17
3. Modellerstellung des PMG-1 18
3.1 Geometrien festlegen 18
3.2 Erstellung des Ersatzschaltbildes 19
3.2.1 Aufbau Rotor 19
3.2.2 Aufbau Stator und Gehäuse 21
3.2.3 Fertigstellung des Modells 22
3.3 Parametrisierung der thermischen Elemente 25
3.3.1 Außentemperatur als Spannungsquellen 25
3.3.2 Verluste als Stromquellen 25
3.3.3 Übergangswiderstände für die erzwungene Konvektion 26
3.3.4 Übergangswiderstände der freien Konvektion 28
3.4 Modellzusätze 29
4. Simulation 30
4.1 Nennbetrieb 1: 1,58kW Modell und 1,58kW Simulation 30
4.1.1 Anpassen an die Messergebnisse 32
4.2 Simulationsvergleich 2,8kW 33

4.3 Diskussion zur Genauigkeit....33
4.4 Grenzleistung 1: Grenzleistung im Aufbau „Prüfstand“....34
4.5 Simulation der thermische Anbauvarianten....35
4.5.1 Nennbetrieb 2: Anbauvariante mit einer erhöhten Wellentemperatur....35
4.5.2 Grenzleistung 2: Anbauvariante mit einer erhöhten Wellentemperatur....36
4.5.3 Nennbetrieb 3: Erhöhte Außentemperatur....36
4.5.4 Grenzleistung 3: Erhöhte Außentemperatur....37
4.5.5 Nennbetrieb 4: M270 Blechpaket anstatt M400....37
4.5.6 Grenzleistung 4: M270 Blechpacket anstatt von M400....38
5. Diskussion der Simulationsergebnisse....39
5.1 Nennbetriebe....39
5.2 Grenzleistungen....39
5.3 Kritische Betrachtung....40
6. Fazit....41
7. Anhang....44
8. Quellen....44
9. Eigenständigkeitserklärung....46

1. Einleitung

In Zeiten des Fachkräftemangels, steigender Energiekosten und der wachsenden Nachfrage nach kürzeren Arbeitswochen gewinnt die Optimierung von Arbeitsprozessen zunehmend an Bedeutung. Gemeinsam mit der Partzsch Elektromotoren GmbH soll im Umfang dieser Arbeit ein kleiner, aber dennoch bedeutender Bestandteil von Generatoren erforscht werden.

Große elektrische Generatoren, die unsere moderne Lebensweise ermöglichen, benötigen eine Hilfsspannung, um ihren Rotor zu magnetisieren und somit die Ausgangsleistung variabel einzustellen [1]. Diese Einstellung muss idealerweise eine stabile Frequenz von 50 Hz für das Netz gewährleisten. Im Laufe der Jahre wurden zahlreiche Erregersysteme entwickelt, die heute essenzieller Bestandteil von Generatoren sind.

In dieser Arbeit wird ein solches Erregersystem simuliert, indem ein kleiner Generator als "Lumped Parameter Thermal Model" (LPTN) modelliert wird. Es verspricht die Möglichkeit die thermische Leistungsgrenze in verschiedenen Anbausituationen schnell ermitteln zu können. Im Gegensatz zur FEM-Simulation (Finite-Elemente-Methode), die hohe Rechenleistung und viel Zeit benötigt, bietet ein LPTN-Modell die Möglichkeit die Ergebnisse schneller und nahezu genauso präzise darzustellen [2].

Die Simulationsvariante ermöglicht es mit einem elektrischen Netzwerk die Temperaturen in einem Objekt zu ermitteln. Mit viel Zeit und Energie könnte dies sogar per Hand ausgerechnet werden, doch mit Programmen wie MATLAB oder MotorCAD kann das Ergebnis innerhalb weniger, oder sogar unter, einigen Sekunden dargestellt werden. Diesen Vorteil gilt es für den PMG-1 zu nutzen und somit, nach der Entwicklung des Modells, ein schnelles und präzises Simulationsmodell zu erstellen.

Diese Arbeit beschäftigt sich hauptsächlich damit, das Modell als Grundlage für verschiedene Anbausituationen zu nutzen. Kunden haben vielfältige Anforderungen, was für ein breites Produktpacket kein Problem darstellt. Bei einer Serienherstellung eines einzigen Produktes entstehen zur Anpassung meist hohe Aufwands- und Forschungskosten. Mit dem LPTN-Modell sollen besondere Wünsche vor der Entwicklung geprüft werden können, ohne erst einen neuen Generator bauen zu müssen. So wird in dieser Arbeit die Erstellung eines LPTN-Modells erläutert, ihre Anwendung dargestellt und beispielhafte Anbausituationen in Bezug auf die thermische Grenzleistung des Generators modelliert.

2. Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlage der Elektrischen Maschine, und der verwendeten Rechen- und Modellkonzepte vorgestellt, um den physikalischen Zusammenhang, sowie den späteren Aufbau des Modells nachvollziehen zu können.

2.1 Der PMG-1

Der PMG-1 ist eine Permanentmagneterregte Synchronmaschine, die von der Firma Partzsch als Bestandteil für ein Erregersystem hergestellt wird. Dieses Erregersystem soll im Betrieb die Rotorwicklung einer größeren Synchronmaschine mit einer Gleichspannung speisen. Beispielhaft ist in **Abb. 1** [3] ein solches Erregersystem dargestellt. Ganz links an der Welle (Shaft) ist der Permanentmagnetgenerator (PMG) montiert, dessen Rotor mit der Welle des Hauptrotors verbunden ist. Dreht sich die Welle, wird im Stator des PMG eine Spannung induziert, die Strom an den automatischen Spannungsregler (AVR) liefert. Der AVR regelt die Spannung und leitet sie an den Erregerstator weiter, der wiederum eine Spannung im Erregerrotor (Exciterrotor und -stator) induziert. Die dadurch erzeugte Spannung wird mittels eines Gleichrichters an den Rotor der Hauptmaschine weitergeleitet und gleichgerichtet. Dadurch ist eine bürstenlose und netzunabhängige Erregung der Hauptrotorwicklung möglich.

Der PMG-1 wird als sogenannter Innenläufer hergestellt, da der Rotor sich innerhalb des Stators dreht. Die Nenndaten und ein Aufschnitt des PMG-1 wird unten in **Abb. 2** aufgeführt. Das Rotorblechpaket der Maschine ist mit Neodym-Magneten ausgestattet. Zudem verläuft das induzierte Feld synchron zur Rotation des rotierenden Magnetfeldes der Permanentmagneten. Der Vorteil dieser Maschinen liegt in ihrer hohen Effizienz bei Teillast, ihrer guten Steuerbarkeit, und das nur noch die Statorwicklung als stromführende Wicklung benötigt wird [4].

Der PMG-1 wurde bisher mit simulierter Last, mittels Heizstäben und einer Antriebsmaschine, im generatorischen Betrieb getestet. Die verwendeten Verlustleistungen werden aus durchgeführten Prüfungen vor der Arbeit ermittelt. Es wurde dadurch festgestellt das, zumindest für den Nennbetrieb, hauptsächlich die Eisenverluste für die Erwärmung zuständig sind.

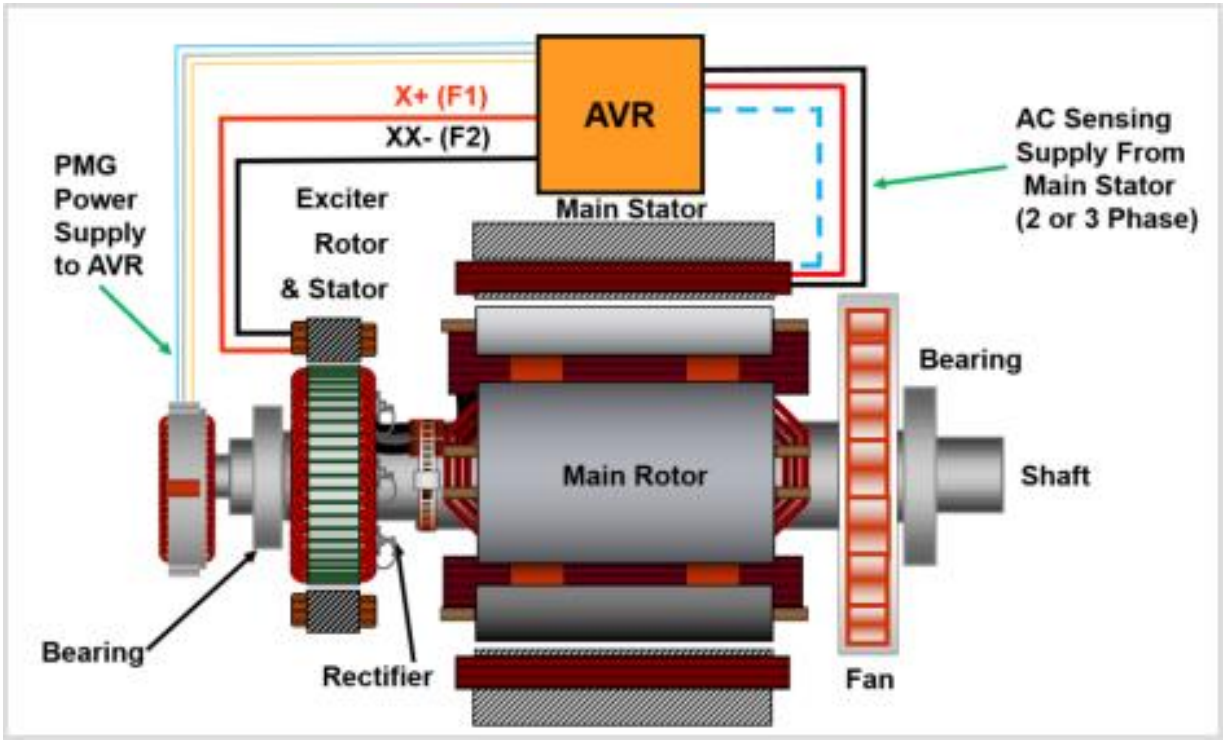

Abb. 1 Erregersystem Beispiel [3]

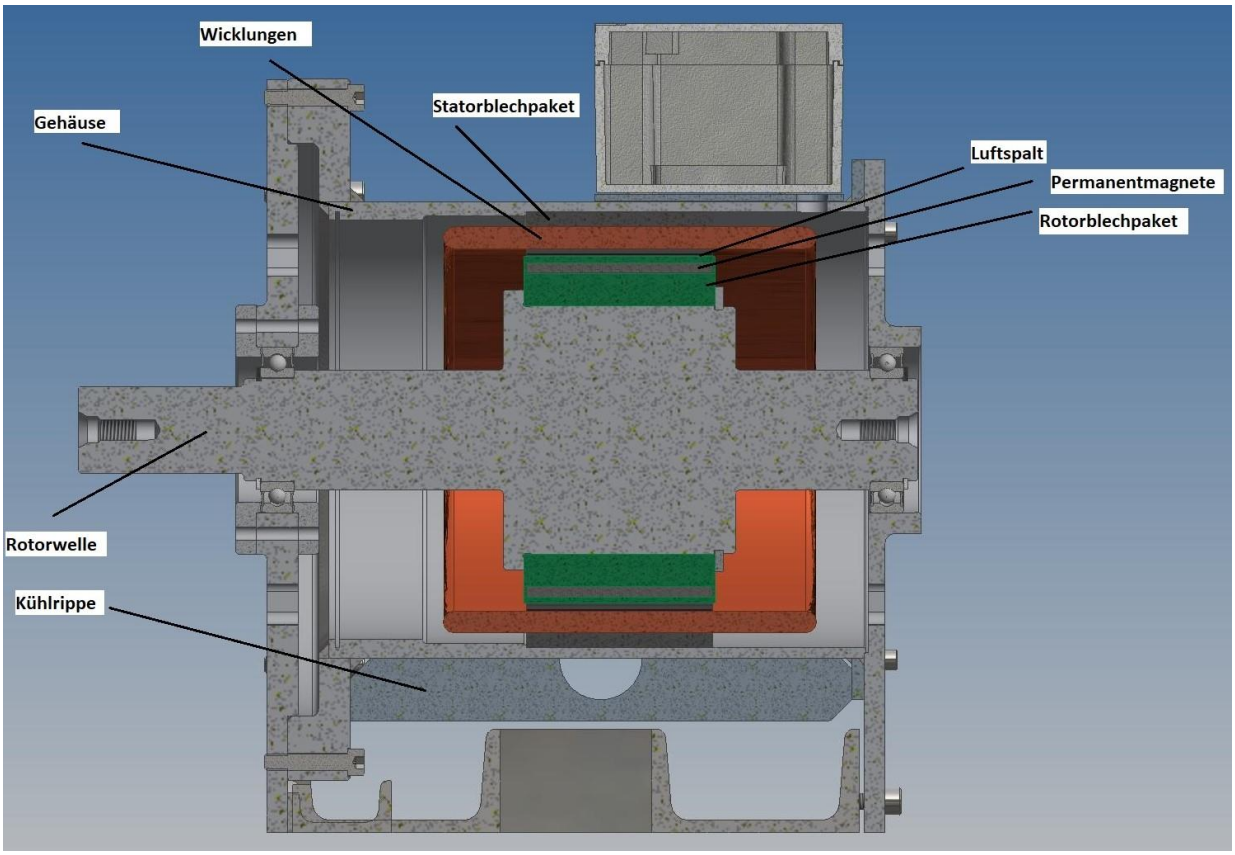

Abb. 2 Partzsch-PMG-1 aus der Konstruktionsdatei

2.1.1 PMG Nenndaten

Für das thermische Modell werden einerseits die elektrischen Daten gebraucht. Andererseits werden die mechanische Konstruktion und Geometrie des PMG-1 benötigt, um die thermischen Ersatzbauteile zu errechnen. Mit dem Anhang (1) wird eine Übersicht der wichtigen Daten angefügt.

2.1.2 Grundprinzip PMG-1

Die permanenterregte Synchronmaschine besteht aus einem feststehenden Stator und eine sich drehende Welle im Inneren, Rotor oder Läufer genannt. Der Läufer soll während des Betriebs über einen magnetischen Fluss eine Spannung im Stator induzieren. Um das zu ermöglichen, muss ein Magnetfeld vorhanden sein, das durch Permanentmagneten erzeugt wird. **Abb. 3** [5] zeigt das allgemeine Ersatzschaltbild einer Synchronmaschine.

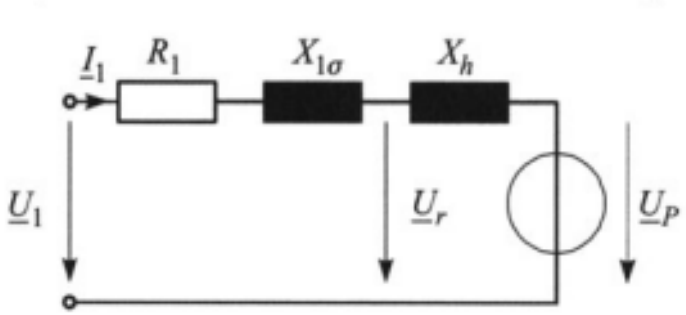

Abb. 3 Ersatzschaltbild Synchronmaschine [5]

R_1	Ohm'scher Widerstand einer Wicklung	/ Ohm
$X_{1\sigma}$	Streureaktanz einer Ständerwicklung	/ H
X_h	Hauptreaktanz	/ H
$\underline{U}_P$	Polradspannung	/ V
$\underline{U}_r$	Luftspaltspannung ($\underline{U}_P + (X_h \frac{d\psi}{dt})$)	/ V
$\underline{U}_1$	Klemmenspannung	/ V
$\underline{I}_1$	Statorstrom	/ I

Mittels des Ersatzschaltbilds einer Synchronmaschine kann nun die erste Gleichung (Gl.) (1.0) zur Ermittlung der Ausgangsspannung hergeleitet werden.

$$\underline{U}_1 = (R_1 + \mathrm{j}X_{1\sigma})\,\underline{I}_1 + \underline{U}_\mathrm{r} \tag{1.0}$$

Zur Berechnung der Leistung dieser Maschine wird Gl. (1.1) verwendet [4]. Da im Prüfstand ein rein Ohm'scher Widerstand benutzt wurde und $\cos(\varphi)$ gleich Eins war, kann man die Gl. (1.2) verwenden.

$$P = \sqrt{3} \cdot U_\mathrm{gen} \cdot I_\mathrm{gen} \cdot \cos(\varphi) \tag{1.1}$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U_\mathrm{gen} \cdot I_\mathrm{gen} \tag{1.2}$$

P	Generatorleistung	/ W
U_gen	Generatorspannung	/ V
I_gen	Generatorstrom	/ A

2.2 Verluste

Verluste kommen praktisch überall da vor, wo Energie genutzt, gewandelt oder gespeichert wird. In den elektrischen Maschinen treten mechanische, magnetische und elektrische Verluste auf [4], die hauptsächlich für erhöhte Temperaturen im Generator verantwortlich sind. Dazu zählen: Reibungen der Lager, Strom in den Kupferwicklungen, Wirbelströme sowie Ummagnetisierung der Blechpakete, Wirbelströme in den Magneten und Zusatzverluste. Somit ergibt sich grundlegend die Gl. (1.3), die die Zusammensetzung der Kupfer-, Eisen-, Permanentmagnet- und Lagerverluste darstellt [6].

$$P_{V,\,\mathrm{ges}} = P_{\mathrm{V,\,CU}} + P_{\mathrm{V,\,Fe}} + P_{\mathrm{V,\,PM}} + P_{\mathrm{V,\,Reib}} \tag{1.3}$$

$P_\mathrm{v,i}$	Verlustleistung	/ W

$P_{\mathrm{V,\,ges}}$

Die Eingangsleistung wird vom Antriebsmotor gestellt und ist somit für den PMG selbst mechanische Leistung. Demnach wird im Betrieb angenommen, dass die Gesamtleistung des Systems verlustfrei vom Antrieb gestellt wird und die einzigen Verluste vom PMG-1 ausgehen. Somit ist die Gesamtverlustleistung die Summe aus allen Verlustleistungen am PMG-1 Gl. (1.3) [6].

$P_{\mathrm{V,\,Cu}}$

Da die Wicklungen im Stator Strom führen, entstehen auch Verluste durch die Ohm'schen Verluste dieser Wicklung. Diese Verlustleistung wird als einer der Hauptbestandteile dieser Bachelorarbeit genutzt, da in den Wicklungen somit eine Wärmequelle entsteht [6] und die Isolation eine der thermisch kritischsten Stellen darbietet. Die Gl. (1.4) ergibt sich aus den drei Phasenströmen mal des Kupferwiderstands der einzelnen Wicklungen.

$P_{\mathrm{V,\,Fe}}$

Die Eisenverluste sind die im Eisen auftretenden Verluste. Sie zeichnen sich als die Summe aus den Hysterese-, Wirbelstrom- und Zusatzverlusten der Blechpakete Gl. (1.5) aus. Diese sind sowohl im Stator als auch Rotor vorhanden, können aber ebenfalls im Gehäuse und allen leitenden Materialien des PMG-1 auftreten. Im Rahmen der Bachelorarbeit wird zudem nur die Verlustleistung von Stator- und Rotorblechpaket als Wärmequelle einbezogen.

$P_{\mathrm{V,\,PM}}$

Da Permanentmagnete aus stromleitendem Neodym bestehen, entstehen hier auch Verluste durch Wirbelströme wie im Blechpaket. Im Rahmen der Bachelorarbeit werden diese Leistung vernachlässigt, da sie in genauerer Betrachtung relativ klein sind und dessen Berechnung den Rahmen der Arbeit überschreiten würde. Gl. (1.6) steht symbolisch für den Ansatz wie die Verluste berechnet werden könnten.

P_{Reib}

Reibungsverluste können in Lager- und Luftreibungsverluste unterteilt werden. Diese Verluste sind jedoch im Vergleich zu den Kupfer- und Eisenverlusten vernachlässigbar klein [6] und werden in dieser Arbeit als Wärmequelle nicht mit einbezogen. Die Gl. (1.7) ergibt sich aus dem Reibungsmoment und der Winkelgeschwindigkeit des PMG-1. Im Vergleich zu den Kupfer- und Eisenverlusten wird dies aber ebenfalls vernachlässigt.

Tabelle 1 Verlustleistungsformeln

	Formel	Beschreibung
$P_{\mathrm{V,\,ges}}$	$P_{\mathrm{V,\,ges}} = P_{\mathrm{V,\,Cu}} + P_{\mathrm{V,\,Fe}} + P_{\mathrm{V,\,PM}} + P_{\mathrm{V,\,Reib}}$ (1.1)	Gesamtverlustleistung
$P_{\mathrm{V,\,Cu}}$	$P_{\mathrm{V,Cu}} = 3 \cdot I^2 \cdot R_{\mathrm{Cu}}$ (1.2)	Kupferverluste
$P_{\mathrm{V,\,Fe}}$	$P_{\mathrm{V,\,Fe}} = P_{\mathrm{V,Hy}} + P_{\mathrm{V,Wi}} + P_{\mathrm{V,Fe,zu}}$ (1.5)	Eisenverluste

$P_{V,\,PM}$	$\frac{{U_M}^2}{R_{PM}}$	(1.6)	Magnetverluste
$P_{V,\,Reib}$	$M_{Rb} \cdot \Omega$	(1.7)	Reibungsverluste

I	*Generatorstrom*	*/ A*
R_{cu}	Wicklungswiderstand	/ Ohm
U_M	Spannungsfall Magnet	/ V
R_{PM}	Ohmscher Widerstand Magnete	/ Ohm
M_{Rb}	Reibungsmoment	/ Nm
Ω	Drehzahl	/ Upm

2.3 Wärmeübertragung

Da das thermische Netzwerk die Wärmeübertragung im PMG-1 darstellen soll, müssen die verschiedenen Wärmeleitungsmechanismen unterschieden werden. In diesem Kapitel wird die physikalische Grundlage zur Wärmeleitung erläutert. Das Folgende Kapitel bezieht sich auf das Buch über die Grundlagen und Praxis der Wärmeübertragung von Peter von Böckh und Thomas Wetzel [7].

Als Grundlage soll der allgemein geltende erste Hauptsatz der Thermodynamik dienen. Er besagt, dass die Energie in einem System umgewandelt, aber nicht gebildet oder vernichtet werden kann [8]. Gl. (2.1) zeigt den ersten Hauptsatz für instationäre offene Systeme, da in unserem System, Energie durch Strom und Spannung zugeführt wird, und von der Maschine in die Umgebung abgegeben wird. Somit muss die umgewandelte Energie, sowie die Eingangs- und Ausgangsenergie in Betracht gezogen werden.

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} + P + \sum_{ein} \dot{m}_e \left(h_e + \frac{w_e}{2} + g z_e\right) - \sum_{aus} \dot{m}_a \left(h_a + \frac{w_a}{2} + g z_a\right) \tag{2.1}$$

$\frac{dE}{dt}$	Energie des Systems	/ Joules

$\dot{Q}$	Wärmestrom	/ W
m_i	Massenstrom	/ kg/s
h_i	Spezifische Enthalpie	/ J/kg
w_i	Geschwindigkeit	/ m/s
gz_i	Fallbeschleunigung	/ m/s^2

Die innere kinetische und potenzielle Energie kann vernachlässigt werden, da sie konstant ist. Somit kann die Gesamtenergie durch die innere Energie ersetzt werden Gl. (2.2). Daher wird die Gesamtenergie zur Summe der Energien der Einzelphasen α, β, etc. Die Energien sind immer noch zeitlich, aber nicht von Ortskoordinaten abhängig. Diese Vereinfachung, ermöglicht die Veränderung von einem Feldproblem zu einem diskreten System.

$$U = U^{\alpha} + U^{\beta} \ldots = m^{\alpha}u^{\alpha} + m^{\beta}u^{\beta} + \ldots \tag{2.2}$$

U	Innere Energie	/ J
m^{α}	Masse	/ kg
u^{α}	Spezifische innere Energie	/ J/kg

Damit erhält man die Finale Gl. (2.3) als Grundlage für das thermische Netzwerk, da der Energiefluss an einem Punkt aus der Energie des Systems und seiner diskreten Eingangsenergie und Ausgangsenergie abhängig ist.

$$\dot{Q} + P = \frac{dU}{dt} + \sum_{ein} \dot{m}_e \left(h_e + \frac{w_e}{2} + gz_e\right) - \sum_{aus} \dot{m}_a \left(h_a + \frac{w_a}{2} + gz_a\right) \tag{2.3}$$

2.4 Wärmeübertragungsarten

Laut *Nußelt* [9] gibt es nur zwei Arten der Wärmeübertragung: die Wärmeleitung und die Strahlung. Wobei bei der Wärmeleitung auch zwischen *freier* und *erzwungener Konvektion* unterschieden wird.

2.4.1 Definitionen

Wärmestrom- und dichte:

Der Wärmestrom $\dot{Q}$ ist die Einheit, die angibt, wie viel Wärme pro Zeiteinheit übertragen wird. Die Dimension der Einheit ist Watt (W). [7]

Die Wäremstromdichte $\dot{q}$ ist die Einheit, die an Wärmestrom pro Flächeneinheit übertragen wird. Sie hat die Dimension (W/m^2).[7]

Wärmeleitfähigkeit:

Die Wärmeleitfähigkeit λ gibt laut Böckh und Wetzel an „welcher Wärmestrom pro Längeneinheit des Materials in Richtung des Wärmestromes und pro Grad Temperaturdifferenz übertragen werden kann.“ [7].

Sie wird als W/(m k) dargestellt.

Wärmekapazität:

Die Wärmekapazität gibt das Verhältnis an, wieviel Wärme ein Körper benötigt, um die Temperatur um ein Grad Kelvin oder Celsius zu erhöhen.

Sie hat die Dimension J/K.

2.4.2 Konvektion

Stationäre Wärmeleitung findet immer da statt, wo sich bei einem konstanten Wärmestrom die Temperatur an jedem Ort konstant verhält. Gemäß *Fourier* wird sie als Gl. (3.1) definiert. $\nabla\vartheta$ ist hier als Temperaturgradient im Stoff definiert [7].

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \nabla\vartheta \tag{3.1}$$

$\dot{q}$	Wärmestromdichte	/ W/m^2
λ	Wärmeleitfähigkeit	/ W/(m k)
$\nabla\vartheta$	Temperaturgradient	/ K

So wie im elektrischen Netzwerk gilt also, das der Strom gleich des Spannungsgradienten, mal der Leitfähigkeit entspricht Gl. (3.2) [10].

$$I = G \cdot \nabla U \tag{3.2}$$

G	Elektrische Leitfähigkeit	/ S

2.4.3 Freie Konvektion

Solange sich ein Körper innerhalb eines ruhenden Fluids befindet, spricht man von freier Konvektion. Ein warmer Körper, wie der PMG-1, erwärmt das umgebende Fluid – Luft. Durch die Wärmeleitung erwärmt sich die Umgebungsluft am Körper und steigt auf. Diese Bewegung erzeugt einen Wärmestrom an der Oberfläche.

Der thermische Widerstand für Wärmeleitung wird durch Gl. (3.31) gegeben [6].

$$R_{\mathrm{kond}} = \frac{\delta}{\lambda A_Q} \quad / \text{K/W} \quad (3.31)$$

δ	Länge der Wärmeleitstrecke	/ m
λ	Wärmeleitfähigkeit	/ W/(m K)
A_Q	Querschnitt der Wärmeleitfläche	/ m^2

Der Konvektionswiderstand wird durch Gl. (3.32) gegeben [6].

$$R_{\mathrm{konv}} = \frac{1}{\alpha A} \quad / \text{K/W} \quad (3.32)$$

α	Wärmeübergangskoeffizient	/ W/(m^2 K)

2.4.4 Erzwungene Konvektion

Bei erzwungener Konvektion wird der Wärmeübergang durch die Temperaturdifferenz und Strömung, die außerhalb eines Materials aufrechterhalten wird, bestimmt [7]. Beim PMG-1 wird, zum Beispiel durch die Erwärmung des Innenraums, ein Temperaturunterschied zwischen Innen- und Außenwand des Gehäuses erzeugt, worauf eine Wärmeleitung zwischen Innen- und Außenwand erfolgt. Genau wie ein Spannungsfall innerhalb eines Materials Strom erzeugt.

2.4.5 Strahlung

Strahlung ist die Wärmeübertragung durch elektromagnetisches Wellen [8]. Sie benötigt kein Medium zur Wärmeübertragung, anders als die Wärmeleitung. Zusätzlich zu der Wärmeleitung überträgt auch die Strahlung Wärme vom PMG-1 an die Umgebung. Im Rahmen der Arbeit

wird dies vernachlässigt, da diese Art der Übertragung minimal, gegenüber der Wärmeleitung ist [11].

2.5 Thermische Netzwerke

Da FEM-Berechnungsmodelle eine hohe Rechenleistung und -dauer benötigen werden heutzutage oftmals thermische Netzwerke als Alternative gewählt. Die Genauigkeit dieser Modelle sind durch ihre Komplexität der Netzwerke eingeschränkt. So gibt es drei Kategorien [12]:

Dunkel-Grau - Ist die niedrigste Komplexitätsstufe, bei der Modelle in nur zwei bis drei Knotenpunkte dargestellt werden. Die Hauptpfade der Wärmeübertragung werden simpel dargestellt, ohne Vorkenntnisse über das zu betrachtende Objekt zu benötigen. Jedoch fehlen dann die komplexen Wärmeverlaufe und die Genauigkeit kann für anspruchsvolle Strukturen stark beeinflusst werden. Diese Komplexitätsstufe bietet jedoch eine sehr schnelle Entwicklungs- und Berechnungsdauer.

Hell-Grau - Diese Netzwerke geben ein Zwischenmaß an Berechnungsdauer und Komplexität. Sie werden aus 5-15 Knotenpunkten erstellt und bieten eine genauere Betrachtung der thermischen Elemente der Maschine als die niedrigste Komplexitätsstufe. So werden die Übergänge und das thermische Verhalten der Einzelkomponenten realistischer ausgeführt. Die Parameter lassen sich gut aus Datenblätter ermitteln und für komplexere Stellen, kann man mit experimentellen Daten das Modell verbessern.

Weiß - Ist der höchste Grad an Komplexität. Es können kritische Stellen mit hoher und diskreter Genauigkeit modelliert werden. So werden Wicklungen ausführlich abgebildet und hauptsächlich aus Werten der Materialdatenblättern parametrisiert. Diese Stufe bietet eine sehr hohe Genauigkeit, um zum Beispiel die Temperaturen innerhalb der Nut besser darzustellen, jedoch steigt der Rechen- und Modellierungsaufwand stark an.

Thermische Netzwerke benutzen die im Kapitel 2.3 Wärmeübertragung verwendeten Grundprinzipien und Gleichungen, um thermische Elemente mit Elektrischen zu substituieren. So werden thermische Widerstände durch Elektrische Widerstände, Wärmekapazitäten durch Kondensatoren, Wärmequellen durch Stromquellen, sowie Temperaturen als Spannungen implementiert [6]. Dies wird in der **Tabelle 2** gegenübergestellt.

Tabelle 2 Umwandlung der thermischen zu elektrischen Größen

Wärmeübertragung	Einheit	Elektrisches Netzwerk	Einheit
Wärmestrom	W	Strom	A
Temperatur	K	Spannung	V
Wärmeleitwiderstand	W/K	Ohm`scher Widerstand	Ω
Wärmekapazität	J/K	Elektrische Kapazität	F

2.5.1 Aufbau eines Thermischen Netzwerks

Das thermische Modell soll eine geringere Rechenleistung und Rechenzeit bieten [2]. Dazu muss eine Vereinfachung der Wärmequellen vorgenommen werden. Die Bauteile werden als diskrete Punktmassen mit thermischem Widerstand zur Umgebung angenommen. Ansonsten müsste die Temperaturverteilung über ein Feldproblem gelöst werden, was ein hohen Rechenaufwand erzeugen würde [6].

Das Modell wird aus eindimensionalen Schnittstellen der Maschine erstellt. Die Punktmassen werden mit ihren Bauteilen ersetzt und je nach Kategorie Grau bis Weiß zusammengeschlossen.

2.5.2 Wärmequellen und Referenztemperaturen

Sobald die für das Modell angenommenen Wärmequellen bestimmt wurden, sowie die Leistung als auch der Ursprungsort, werden diese als Stromquellen in das Modell eingesetzt. Sie sind immer zu einem Knotenpunkt auf der einen Seite und auf der anderen Seite zur Masse geführt. Referenztemperaturen werden mittels einer Spannungsquelle dargestellt, zum Beispiel als Außentemperatur der PMG-1.

2.5.3 Thermische Widerstände

Mit einem Querschnitt der Maschine lassen sich die verschiedenen Bauteile diskretisieren, jedoch ist hier – je nach Kategorie – die meiste Freiheit zur Zusammensetzung gegeben. Für komplexe Stellen, wie zum Beispiel für die Wicklung in der Nut, wird im weiteren Verlauf der Arbeit ein Ansatz vorgestellt. Doch auch für die Übergangsstellen zwischen Materialien muss hier klar entschieden werden, wie detailliert das Modell sein soll.

Für dünne eindimensionale Schichten kann ein einzelner Widerstand verwendet werden. Wenn jedoch das Material im Inneren, unterschiedliche Temperaturen im Endzustand aufweist ($t = \infty$ und C_{th} = Geladen), muss dieses in zwei oder mehreren Punktmassen, mit je einem thermischen Widerstand, ersetzt werden.

Die Werte für die thermischen Widerstände können aus den Tabellen und Maschinendaten bestimmt werden. Beispielsweise kann für das Material Kupfer in einem Nachschlagewerk wie in *CRC Handbook of Chemistry and Physics* [13] die Wärmeleitfähigkeit ermittelt werden. Sind jedoch schlecht quantifizierbare Stellen vorhanden, muss mit Messwerten experimentell ermittelt werden.

2.5.4 Thermische Kapazitäten

Da Materialien sowohl Wärmekapazitäten wie Widerstände haben, muss man für eine zeitlichen Verlauf auch ihre Kapazität beachten. Diese Kapazität erzeugt einen Wärmeverlauf, so wie sich ein Kondensator unter Gleichstrom elektrisch Laden würde [8]. Kapazitäten werden dann an die Knotenpunkte des Thermischen Netzwerks parallel angeschlossen. Werte, für die verwendeten Materialien wie Kupfer, Blechpakete und Gusseisen, findet man genauso einfach in Datenblättern – für Klebstoffe und Dämmmittel kann sich die Bestimmung schwieriger darstellen. Das liegt daran, dass die verbaute Dicke und Homogenität manchmal nicht gut einschätzt werden kann. Für diese Fälle lassen sich ebenfalls mittels Experimenten die entsprechenden Werte ermitteln.

Für thermische Modelle, bei denen nur die absolute Endtemperatur notwendig ist, kann die Kapazitäten vernachlässigt werden, da am Zeitpunkt t=∞ die Kapazitäten vollgeladen sind und keinen Einfluss auf das System auswirken. Die Wärmekapazität C_{th} in Gl. (3.4) ergibt sich aus der spezifischen Wärmekapazität des Materials, dem Volumen und aus der Dichte.

$$C_{\mathrm{th}} = \rho V c \qquad / \text{ J/kg} \qquad (3.4)$$

ρ	Dichte	/ kg/m^3
V	Volumen	/ m^3
c	Spezifische Wärmekapazität	/ J/(K kg)

2.5.5 Modellwerkzeug

Für die Berechnung von FEM-Modellen wird viel Zeit und Rechenleistung für ein thermisches Modell einer elektrischen Maschine benötigt [2]. Analog wäre eine solche Umsetzung kaum vorstellbar. Thermische Netzwerke sind aufgrund ihrer Analogie zu elektrischen Netzwerken ganz einfach mit Knoten- und Maschensätzen zu errechnen. Noch simpler gestaltet sich eine solche Rechnung durch die Nutzung von Programmen wie MotorCAD, LT-Spice, MATLAB oder ähnlichen Rechenprogrammen. Somit ist der Aufwand mit Programmen geringer und eine Modellierung auf leistungsschwächeren Geräten würde dennoch wenig Zeit beanspruchen.

Für diese Bachelorarbeit wird die Software Simscape von MATLAB (vers. R2022b) genutzt. Sie ermöglicht die bildliche Zusammenstellung von Simulinkblöcken, mit der man elektrische Bauteile zusammenschließen und Parametrisieren kann. Ergebnisse wie die Spannungen (Temperatur der Bauteile) können mit virtuellen Spannungsmessgeräte ermittelt werden.

2.5.6 Modellierung der Nut

Die Nut einer Maschine ist einerseits eine Wärmequelle, die durch Kupferverluste in den Wicklungen entstehen. Andererseits ist sie auch eine – im Vergleich zum Blechpaket und Gehäuse – komplexe thermische Schnittstelle. Es führen Wicklungen mit Lackisolation durch die Nut und sie ist mit Harz und Lufteinschlüssen gefüllt, sowie mit Isolationspapier umhüllt. Gezeigt wird das in der vereinfachten **Abb. 4**. Sowas mit einem einzelnen thermischen Widerstand zu simulieren, würde die Präzision des Modells stark beeinträchtigen, jedoch jeden Leiter, Isolationsschicht, Lufteinschluss und Kleber in das Netzwerk einzubauen, würde nicht den Sinn eines vereinfachten Modells erfüllen.

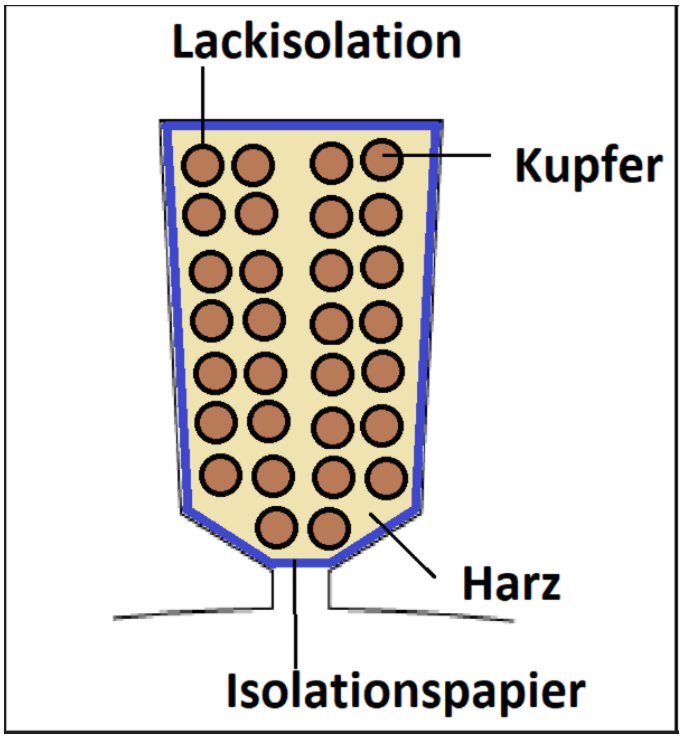

Abb. 4 Aufbau Nut-PMG-1

Um dieses Problem zu lösen, werden in *Thermische Modellierung der Wicklung einer elektrischen Antriebsmaschine* [14] drei Prinzipien vorgestellt und deren Genauigkeit überprüft. Für das später vorgestellte Modell wird die Version Quadrat-Parallel in **Abb. 5** benutzt. Hierbei werden die Bestandteile in der Nut in Sektoren aufgeteilt: Verguss, Isolation und Kupfer. Diese Sektoren werden dann nach der genannten Version zusammengeschalten. **Abb. 5** zeigt den Aufbau einer der Vereinfachten Nut und die von [14] erwähnte Quadrat-

Parallelschaltung. Sie bietet höchste Genauigkeit, ohne den Rechenaufwand deutlich zu erhöhen. [6]

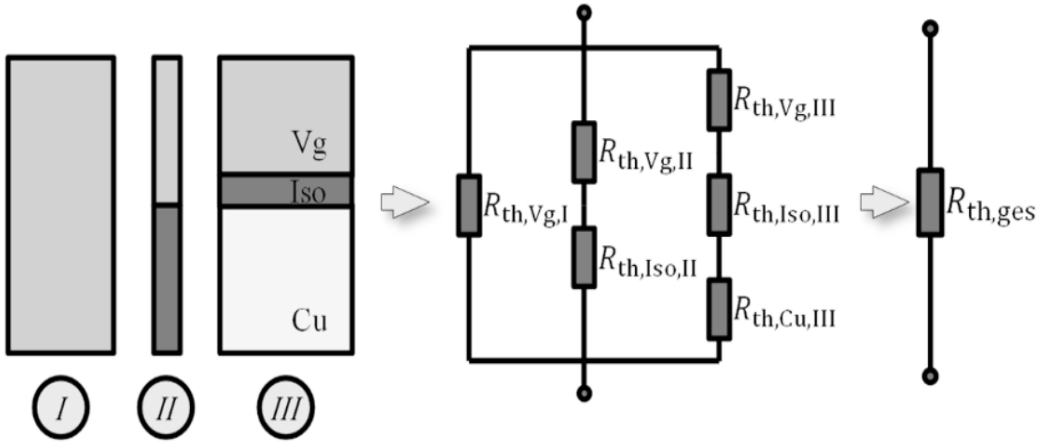

Abb. 5 Näherungsverfahren Quadrat-Parallel zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit [6]

3. Modellerstellung des PMG-1

In diesem Kapitel werden die im Grundlagenteil besprochenen Kapitel auf den PMG-1 angewendet. Es werden die Berechnungen und Zusammenstellungsschritte erläutert und nach der Zusammenstellung wird das komplette Modell vorgestellt. Zuerst wird das Netzwerk erstellt und dann werden die Parameter berechnet.

3.1 Geometrien festlegen

Da der PMG-1 größtenteils symmetrisch ist und das Modell so simpel wie möglich gehalten werden soll, kann ein Abschnitt des Generators modelliert und auf den Rest des Generators angewendet werden. Das Modell würde sonst, im Fall des PMG-1, aus 36 symmetrischen Komponenten bestehen. Somit werden wie in **Abb. 6** gezeigt nur 10°, oder ein 36stel, der Maschine modelliert. Dieser Abschnitt enthält einen Stator-Zahn, sowie eine ganze Nut. Zudem werden die Maße der Nut und des Innen- und Außendurchmessers des Statorblechs dargestellt.

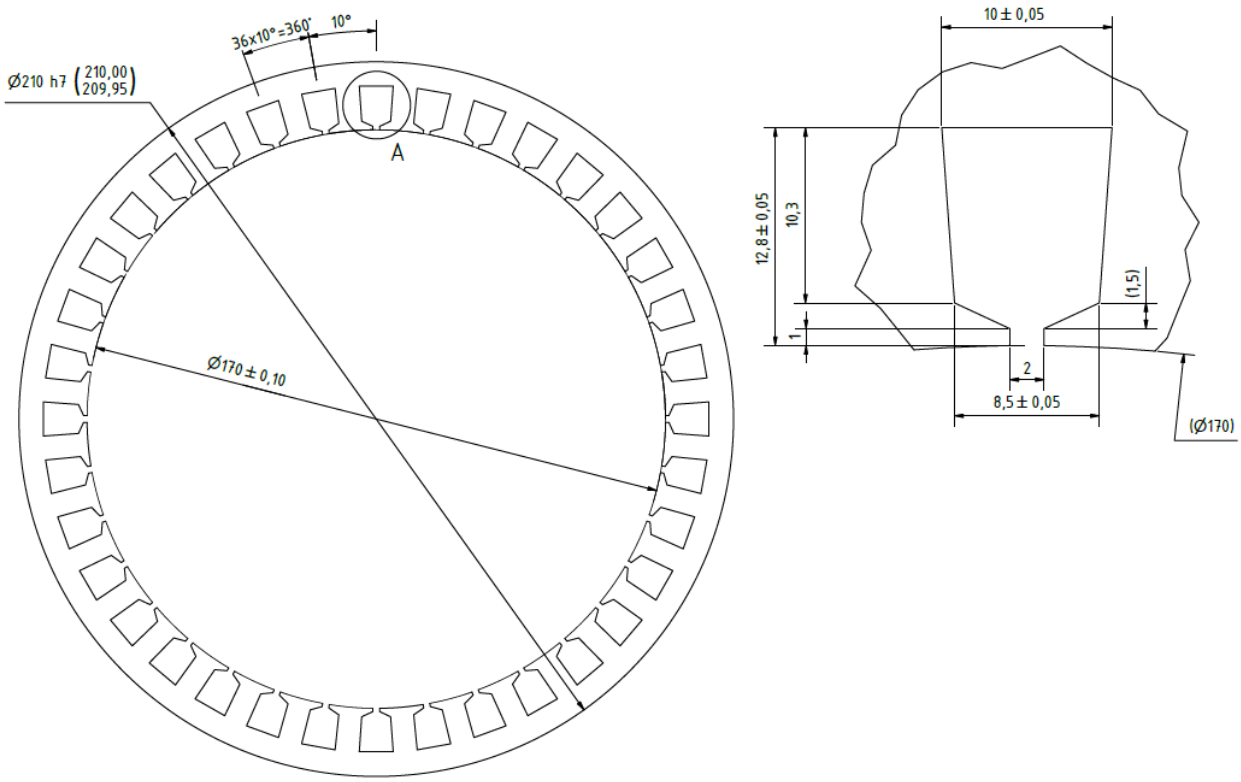

Abb. 6 Gewählter Abschnitt des Statorblechs, sowie Nut und Durchmessermaße aus den Konstruktionsdokumenten.

Da der Abschnitt gewählt wurde, müssen nun die Bauteile diskretisiert werden aus denen das Modell bestehen soll. So muss der Rotor, die Magnete, der Stator, die Nut und das Gehäuse in ein Netzwerk aus thermischen Bauelementen eingeteilt werden. Im Verlauf des Kapitels werden diese Sektoren einzeln modelliert und dann zusammengeschalten.

Für die Dimensionierung der Widerstände, werden diese ebenfalls nur für die 10° Sektoren abgemessen, das heißt in Längsrichtung-Z, Breite-X, und Höhe-Y. Die Verlustleistungen werden ebenfalls alle durch 36 geteilt.

3.2 Erstellung des Ersatzschaltbildes

3.2.1 Aufbau Rotor

Das Modell wird in dieser Arbeit von Innen nach Außen modelliert. Es wird der in **Abb. 7** rot markierte Bereich modelliert. Um diesen Abschnitt zu modellieren, müssen alle relevanten Punktmassen diskretisiert und als Widerstand verschaltet werden. Die Außentemperatur, die mittels freier Konvektion mit der Welle verbunden ist, wird als Spannungsquelle dargestellt. **Abb. 8** zeigt das fertige Ersatzschaltbild für diesen Abschnitt. Durch den einfachen Aufbau sind alle Übergänge in Serie geschaltet, da der Wärmefluss als vertikal verlaufend angenommen wird. Lediglich der Luftspalt wird parallel implementiert, da sich der Widerstand zum Inneren

der Nut anders verhält. Einerseits ist die Nut mit Isolierpapier umhüllt und andererseits bis zum Nut-Inneren ist der Luftspalt 1mm höher als die 2mm zum Statorzahn.

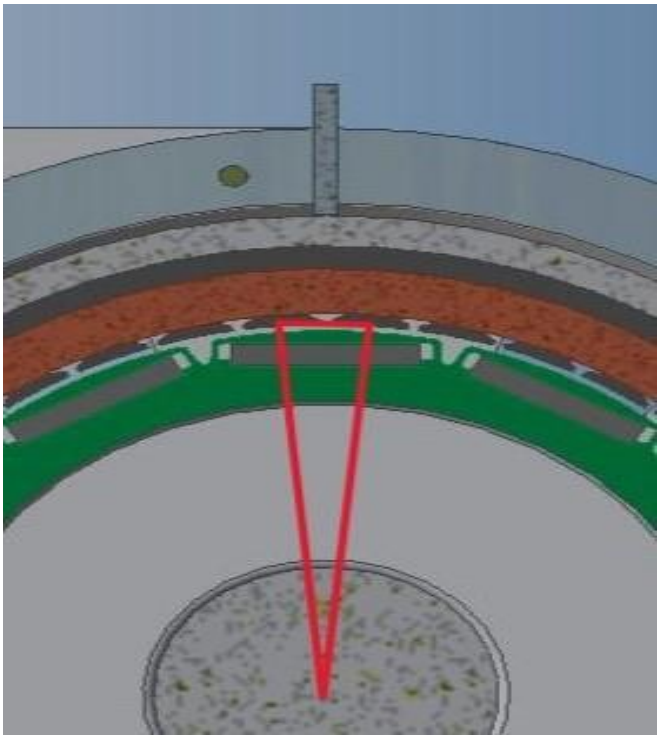

Abb. 7 Schnittstelle zur Modellierung des Rotors

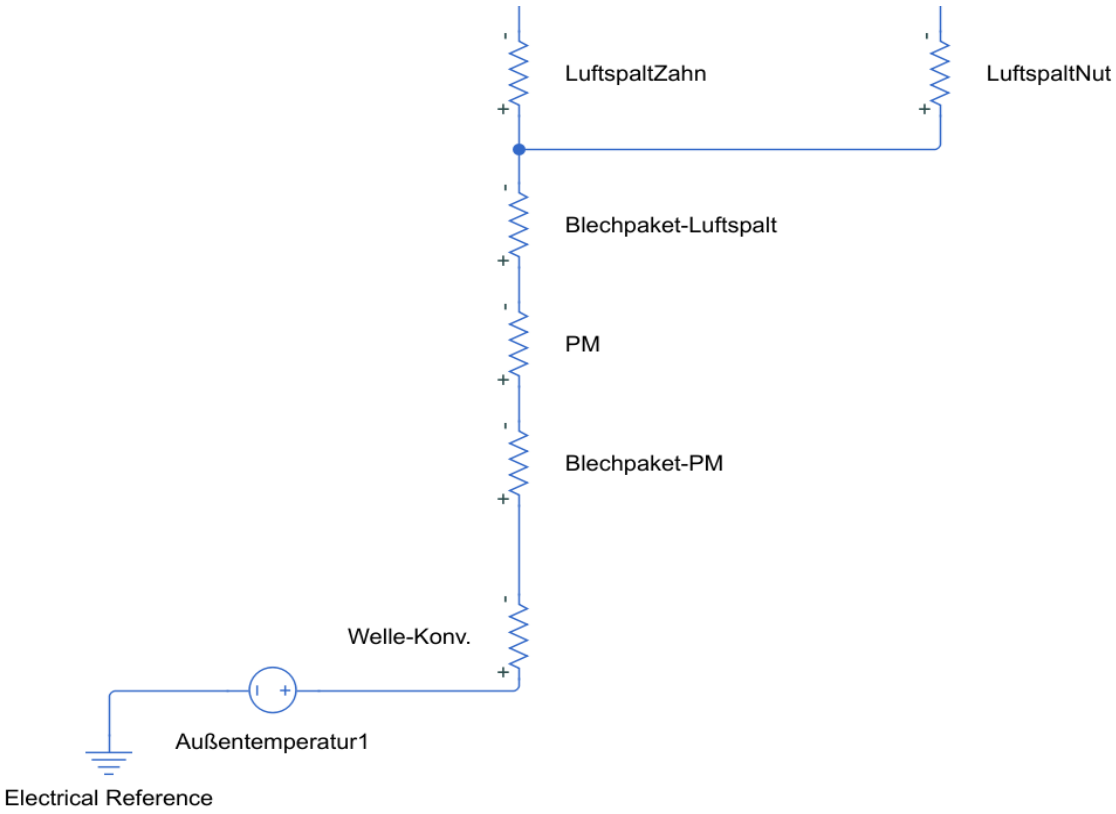

Abb. 8 Ersatzschaltbild Rotor

3.2.2 Aufbau Stator und Gehäuse

Hier wird der Wärmeübergang vom Zahn bis zum Äußeren Gehäuse zusammengeschaltet. **Abb. 9** zeigt den gewählten Abschnitt. Die Nut wird separat im nächsten Abschnitt modelliert.

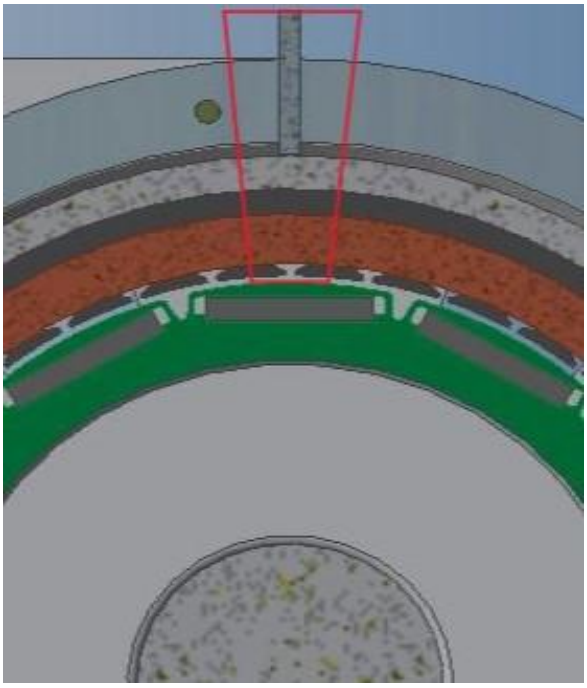

Abb. 9 Schnittstelle zur Modellierung von Stator bis zum Gehäuse.

Wenn die Nut und Wicklung vorerst ausgelassen werden, so kann das Blechpaket des Stators bis zum Gehäuse erneut, als eine in Reihe geschaltete Kette von Wärmeübergängen betrachtet werden. Da sich die Form des Zahns, zu sehen in **Abb. 4** und **Abb. 6**, verändert, wird zuerst der breite Teil bis zur Höhe des Nutkeils als Rechteck definiert. Danach wird der Zahn in zwei gleiche vertikale Abschnitte aufgebrochen, um die Eisenverluste des Zahns in der Mitte zu platzieren. Das gleiche wird für das Joch (Zahn-Joch-y1 und y2) in der vertikalen und (Joch-x1 und Joch-x2) in der horizontalen vorgenommen. Die Außentemperatur wird wieder nach den Konvektionswiderständen des Gehäuses eingefügt.

So wird nur das Gehäuse mit parallelgeschalteten Konvektionswiderständen angeschlossen. Die Paralleldarstellung dient zur Betrachtung davon, dass vor und hinter dem Statorblechpaket (In **Abb. 2** zu sehen) das Gehäuse andere Konevktionsflächen hat und aufgrund der Gehäuseauslegung die Wärme zu diesen Flächen schlechter transportiert wird. Um dies deutlich zu machen, wird die Gl. (3.31) benötigt. Während über dem Gehäuse direkt am Blechpaket eine große Fläche A (gesamte Fläche zur Außenluft) und ein kleiner Durchmesser δ (vom Statorblech bis zur Luft) existiert, ist der Übergangswiderstand R_{kond} klein. In den horizontalen Teilen ist eine kleine Fläche A (die Fläche vom Querschnitt des Gehäuses) und

ein höherer Durchmesser δ (die Distanz vom Statorblechende bis zum Gehäuseende) gegeben. Somit ist der Widerstand im Vergleich zu dem am Blech anliegenden Teil sehr hoch.

Abb.10 zeigt die Zusammenschließung dieser Widerstände und den Übergang zur Nut durch das Isolierpapier, das in drei Übergänge aufgeteilt wurde: von unten (Isopapier Zahn-Nut1), seitwärts zum Zahn (Isopapier Joch-Nut), und oberhalb vom Joch (Isopapier Joch-Nut1).

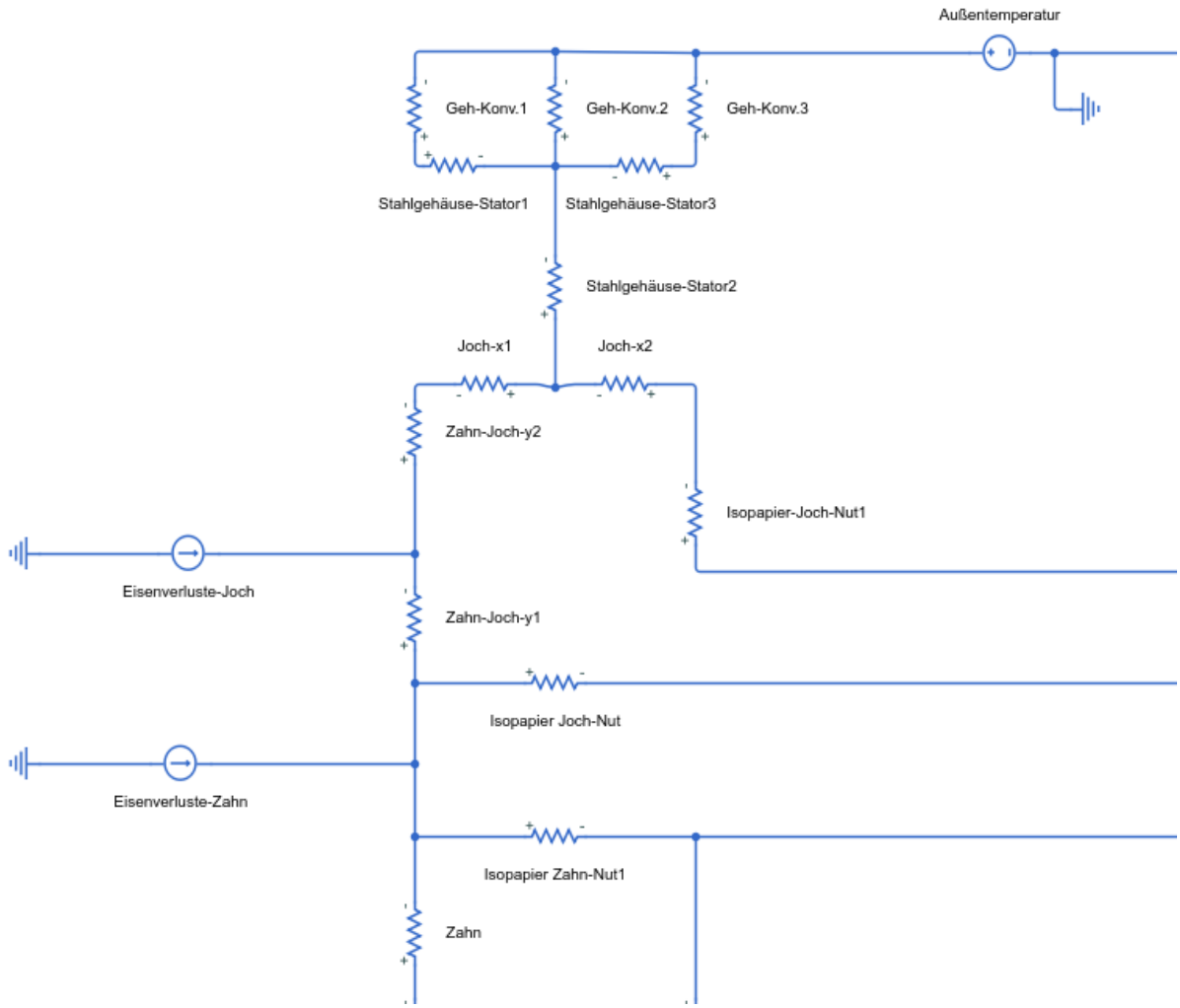

Abb. 10 Ersatzschaltbild Stator und Gehäuse

3.2.3 Fertigstellung des Modells

Um die Nut zu modellieren, wird wie in **Abb. 5** dargestellt, das Konzept der Quadrat-parallel-Schaltung angewendet. Oechslen zeigt in seiner Arbeit [6], dass dies die besten Ergebnisse liefert, ohne den Modellierungsaufwand übermäßig zu erhöhen. Die Anordnung der Elemente sind hier schon vorgegeben, jedoch nicht die Platzierung der Kupferverluste. Die Verluste

werden im Modell zwischen Kupfer ($R_{\mathrm{th,cu,|||}}$) und Isolationslack ($R_{\mathrm{th,iso,|||}}$) eingefügt. **Abb. 11** zeigt schließlich das gesamte Modell inklusive der nun modellierten Nut.

Zusätzlich zum Modell werden Spannungsmessgeräte eingefügt, um am Ende die Temperaturen der Bauteile zu ermitteln. Diese müssen vor den Spannungsquellen (Referenzerdung) und bis zum Bauteil messen. So wird die Gesamttemperatur dargestellt, ansonsten würde nur der einzelne thermische Unterschied vor und nach dem Übergang gemessen werden. Diese Spannungsmessgeräte sind am Gehäuse, am Statorjoch und -Zahn, an den Eisenverlusten-Joch, am Kupfer und an den Permanentmagneten angebracht. So können die Wärmeübergänge im Generator besser nachvollzogen werden. Mit mehr Messgeräten könnte auch nach jedem Übergangswiderstand die Temperatur dargestellt werden. Dies würde so aber die Übersichtlichkeit verringern.

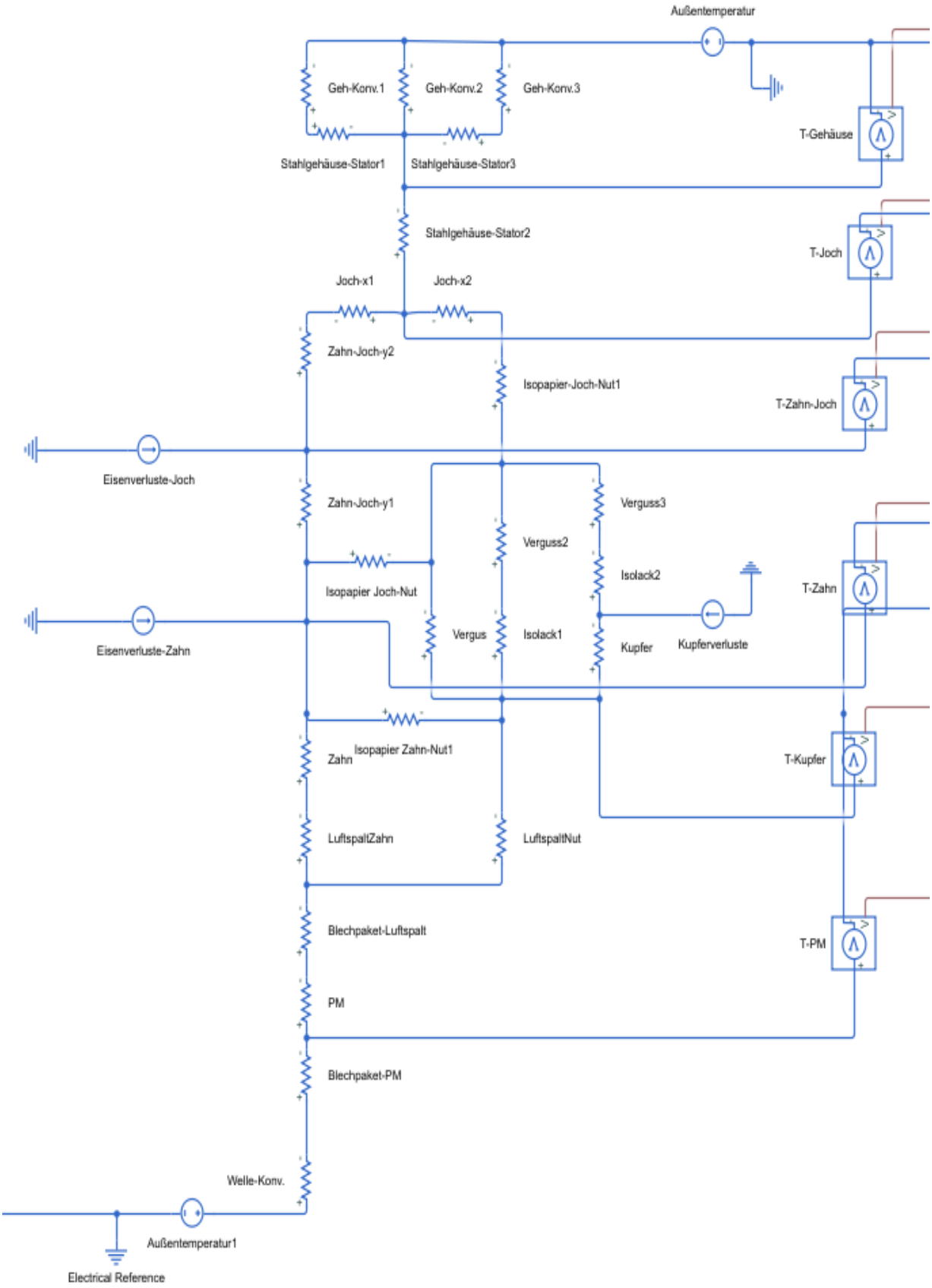

Abb. 11 Gesamtes thermisches Netzwerk

3.3 Parametrisierung der thermischen Elemente

In diesem Kapitel wird gezeigt wie die Parameter für das PMG-1 Modell berechnet wurden. Diese Werte werden nach der Errechnung in die Modellbauteile eingetragen. Anstelle von den Materialwerten können einige dieser Werte mit gemessenen Ergebnissen verbessert oder neu errechnet werden. Für diese Arbeit werden alle Werte der erzwungenen Konvektion rein rechnerisch, aus den in Datenblättern gefundenen Angaben ermittelt. Da sich die freien Konvekionsgrößen jedoch stark verändern können, müssen diese mit Messdaten an die realen Werten angeglichen werden.

Limitationen, wie die leichten geometrischen Veränderungen, aufgrund der Einfachheit des Modells, werden somit in das Modell eingehen. Des Weiteren wurden die Materialübergänge als Ideal angenommen, also beispielsweise, dass zwei Platten aneinander perfekt homogene Auflageflächen zueinander haben, ohne jegliche Lufteinschlüsse und keine anderen Kleb- und Flüssigstoffe aufweisen.

3.3.1 Außentemperatur als Spannungsquellen

Wie in Kapitel 2.5.2 beschrieben wurde, werden die Außentemperaturen mittels Spannungsquelle in das Netzwerk eingebaut. Für den Nennbetrieb, wie im Prüfstand bei 1,58kW wurde eine Außentemperatur von 29,8°C gemessen, dementsprechend werden für das MATLAB Modell die Spannungsquellen auf 29,8 V DC-Spannung eingestellt. Es wird somit angenommen, dass sich die Temperatur vor der Welle und am Gehäuse nicht unterscheidet. Für andere Versuche kann man diese, je nach Interesse oder Messwerten, auf die entsprechende Spannung oder Temperatur einstellen.

3.3.2 Verluste als Stromquellen

Die Eisenverluste für die vorher durchgeführten Erwärmungsläufe wurden von einem externen Berechnungsbüro („PROFLUXX“) für den Leerlauf und Nennbetrieb bereits errechnet und werden in dieser Arbeit daher nicht neu ermittelt. Für den Leerlauf wurden im Joch des Statorblechpakets 82,3 W Verlustleistung und im Zahn 74,9 W berechnet. Diese waren im Nennbetrieb gleich. Die Kupferverluste wurden mittels des Wicklungswiderstand und des durchfließenden Stroms berechnet. So werden beispielsweise mit den Gl. (4.0.1) und Gl. (4.0.2) die Kupferverluste für den Nennbetrieb errechnet. Die Drei vor dem Strom *I* ergibt sich aus den drei Phasen, die im Generator fließen. Der Widerstand wird durch zwei geteilt, da bei der Widerstandsmessung, die Generatorwicklung über zwei Phasen gemessen wird.

$$P_{cu} = 3 \cdot I^2 \cdot \frac{R}{2} \quad (4.0.1)$$

$$P_{cu} = 3 \cdot 7.42A^2 \cdot \frac{0{,}2617\Omega}{2} = 21{,}61W \quad (4.0.2)$$

Insofern die Werte für ein Betriebszustand ermittelt wurden, müssen diese bei anderen Leistungen und Drehzahlen etc. neu errechnet werden. Bevor diese im Modell implementiert werden können, ist eine Reduzierung der Gesamtverluste auf den gewählten Querschnitt des Modells notwendig. Somit erfolgt im PMG-1 Modell eine Teilung der Leistungen durch 36, da nur 10° des Querschnitts betrachtet werden. Diese Endwerte werden dann mit Stromquellen als DC-Strom eingefügt. Dadurch ergeben sich für den Nennbetrieb die Werte: 1,183 W für die Kupferverluste, 2,286 W für die Eisenverluste-Joch und 2,08 W für die Eisenverluste-Zahn.

3.3.3 Übergangswiderstände für die erzwungene Konvektion

Für die Übergangswiderstände der erzwungenen Konvektion wird die Gl. (3.31) benötigt. Diese werden sich nicht bei verschiedenen Leistungen beachtlich ändern und müssen bei der Erstellung eines vereinfachten Modells nur einmalig ausgerechnet werden. Es werden wieder einige geometrische Vereinfachungen gemacht. Die schrägen Abschnitte des Nutkeils werden als Rechtecke betrachtet und die Auflagefläche eines Magneten wurde durch 36 geteilt, somit sind die Blechübergänge zwischen den Magneten nicht mit einberechnet. Grundsätzlich sind in diesem Modell alle Feststoffe für diese Form der Konvektion verantwortlich.

Abb. 12 zeigt die Rechenwege in MATLAB auf der linken Seite und die Widerstandswerte auf der rechten Seite. Grundlage ist die Gl. (3.31). Die Lambdas werden in **Tabelle 3** gegeben und die Längen δ aus den gewählten geometrischen Daten errechnet. Als Beispiel wird der Widerstand für den Zahn bis zur Höhe des Nutkeils in Gl. (4.2) errechnet. Die notwendigen Daten werden in Gl. (4.1.1-4.1.3) gegeben. Die Länge-y beträgt hier $2{,}5\ \mathrm{mm}$. ($170mm \cdot \pi$ /36) ist die Breite-x des Stators im Inneren, $92\ \mathrm{mm}$ ist die Länge-z des Stators. Die $2\ \mathrm{mm}$ werden wegen des Luftspaltes zwischen dem Zahn und Nutkeil subtrahiert.

Tabelle 3 Lambda Werte der Materialien aus Datenblättern der Hersteller und [15]

Material	**Lambda [λ] in W/mk**
Magnete	8,932
Blechpaket (M400)	24,5
Kupfer	370
Isolationslack	0,16
Isolationspapier	0,139
Epoxidharz	1,4

Stahl	50

$$A_{\text{Zahn}} = \left(\frac{170mm \cdot \pi}{36} - 2mm\right) \cdot 92mm = 1180.84\, mm^2 \qquad (4.1.1)$$

$$\lambda_{\text{Blechpaket}} = 24{,}5\,\frac{W}{mk} \qquad (4.1.2)$$

$$\delta_{\text{Zahn}} = 2{,}5mm \qquad (4.1.3)$$

Mit Gl. (3.31):

$$R_{\text{th}-\text{Zahn}} = \frac{0{,}0025m}{24{,}5\frac{W}{mk} \cdot 0{,}011808m^2} = 0{,}0864\,\frac{K}{W} \qquad (4.2)$$

Für die Einfachheit der Berechnung wurde für den PMG-1 ein Koordinatensystem erstellt. Von Lagerschild zu Lagerschild ist die z-Achse, vom Mittelpunkt des Rotors bis zum äußeren Gehäuse ist die y-Achse (Höhe) und in die Breite führt die x-Achse.

```
%Formel Widerstände (erz. Konv): x/(y*z*Lambda)%
%freie Konvektion = 1/(a*A)
R_Welle1 = Welley./(Wellex*Rotorblechz*(Stahl));
R_Welle2 = (Wellez-92)./((60/36).^2*pi*(Stahl));
R_Blech_pm = Blechrot2y/(Blechrot2x*Rotorblechz*L_Blechpaket);
R_PM = (5/10.667*Rotorblechz*L_Blechpaket);
R_Pm_Blech = Blechrot1y/(Blechrot1x*Rotorblechz*L_Blechpaket);
R_Luftspalt1 = 1/(as*((Zahn1x-2)*Rotorblechz)/10e6);
R_Luftspalt2 = 1/(as*(Rotorblechz*Nutluftx)/10e6);
R_Zahn = Zahn1y/(Zahn1x*Statorblechz*L_Blechpaket);
R_Zahn2 = Zahn2y/(Zahn2x*Statorblechz*L_Blechpaket);
R_Jochy = Zahn3y/(Zahn3x*Statorblechz*L_Blechpaket);
R_Jochx = Zahn4x/(Zahn3y*Statorblechz*L_Blechpaket);
R_Geh1 = Gehy/(Gehx*Gehz*Stahl);
R_Geh2 = Gehz1/(Gehy*Gehx*Stahl);
R_Geh3 = Gehz2/(Gehy*Gehx*Stahl);
R_Geh1_k = 1/((Gehz*Gehx+RipU*Gehz)*(ag1/1000000));
R_Geh2_k = 1/((Gehz1*Gehx+RipU*Gehz)*(ag1/1000000));
R_Geh3_k = 1/((Gehz2*Gehx+RipU*Gehz2)*(ag1/1000000));
R_Iso1 = Nutisoy/(Nutx*Statorblechz*Isop);
R_Iso2 = Nutisoy/(Nutisoy1*Statorblechz*Isop);
R_Iso3 = Nutisoy/(Nutisox*Statorblechz*Isop);
R_Vergus1 = Nuty/(5*Wickelkopfz*Harz);
R_Vergus2 = (Nuty/2)/(1*Wickelkopfz*Harz);
R_Vergus3 = (Nuty/2)/(5*Wickelkopfz*Harz);
R_Isol1 = (Nuty/2)/((Isolackx)*Wickelkopfz*Isos);
R_Isol2 = (Isolackx)/(5*Wickelkopfz*Isos);
R_Kupfer = Kupferschnitt/(Kupferschnitt*Wickelkopfz*L_cu);
R_Wellek = 1/((90*pi/36)*(Wellez-266)*ag1/1000000);
R_Blech_k = 1/(((105.^2*pi-85.^2*pi)/36)*(ag3/1000000));
R_Wickelk_k = 1/((81.6+20*10*4)*(ag3/1000000));
```

R_Blech_k	308.2331
R_Blech_pm	0.4985
R_Geh1	0.1159
R_Geh1_k	14.0515
R_Geh2	10.5531
R_Geh2_k	13.8045
R_Geh3	7.9948
R_Geh3_k	17.2365
R_Iso1	2.3459
R_Iso2	2.2776
R_Iso3	2.3459
R_Isol1	160.0254
R_Isol2	19.6903
R_Jochx	0.6347
R_Jochy	0.4518
R_Kupfer	0.0239
R_Luftspalt1	190.3493
R_Luftspalt2	1.0312e+03
R_PM	1.0565
R_Pm_Blech	0.0883
R_Vergus1	13.0215
R_Vergus2	32.5537
R_Vergus3	6.5107
R_Welle1	1.2456
R_Welle2	533.9967
R_Wellek	222.5189
R_Wickelk_k	115.9414
R_Zahn	0.0864
R_Zahn2	0.6750

Abb. 12 MATLAB Rechnungen (Links) mit Ergebnissen (Rechts)

Die Werte werden somit aus den Materialeigenschaften errechnet und in die jeweiligen Ersatzelemente im Modell eingefügt. Diese Werte können sehr gut reproduziert werden da, außer bei erwähnten Vereinfachungen, die Ergebnisse an die geometrischen und werkstofftechnischen Eigenschaften gebunden sind. Diese Charakteristiken ändern sich nicht schlagartig, außer man ersetzt ein Material komplett oder ändert die Geometrie. Andere äußerliche Einwirkungen wie Wind, Leistung, Anbringung etc. werden diese Werte nicht beeinflussen.

3.3.4 Übergangswiderstände der freien Konvektion

Die freie Konvektion hingegen der erzwungenen Konvektion ist sehr stark von der Umgebung abhängig. So ist zwar die Gleichung für den Widerstand einfacher, da nur die Fläche A und das α benötigt wird, jedoch ist das α für jede Einbausituation und Umgebungsform unterschiedlich. Zum Beispiel: Im Luftspalt zwischen Rotor und Stator wird die Gl. (4.3) angewendet [16], die die Rohrförmigkeit und ein Verhältnis zwischen Luftgeschwindigkeit *v* und Durchmesser *D* von „*D*v* > 0,00855 m²/s“ voraussetzt. Dazu ist die Gleichung von der Windgeschwindigkeit abhängig, die wiederrum von der Drehzahl des Generators abhängt. Somit ergibt sich die Gl. (4.4), wobei die Windgeschwindigkeit durch die 1500 Upm des Generators errechnet wurde.

$$\alpha = 2 \cdot v + 3 \cdot (\frac{v}{D})^{0,5} \tag{4.3}$$

v	Luftgeschwindigkeit	/ m/s
D	Zylinderdurchmesser	/ m

$$\alpha_{\text{Luftspalt}} = 2 \cdot 13\frac{m}{s} + 3 \cdot \left(\frac{13\frac{m}{s}}{0{,}167\ m}\right)^{0,5} = 52{,}7\frac{W}{m^2K} \tag{4.4}$$

Außerhalb des Generators ist dann eine andere Gl. (4.5) notwendig, die nur für eine freie Strömung anwendbar ist, aber somit keine andere Variable, außer die des Temperaturunterschieds benötigt [16]. Alle Formeln sind nicht-linear, da sich das α und folglich der Widerstand je nach Temperaturunterschied der Fläche zur Luft ändert. Zu sehen ist dies in **Abb. 13**, wo die Unterschiede der Konvektionswiderstände zwischen 30°C Luft und Gehäusetemperaturen von: 65°C (ag1), 95°C (ag2) und 135°C (ag3) dargestellt werden.

$$\alpha = 9{,}4 + 0{,}00852 * (T_{\text{Gehäuse}} - T_{\text{Luft}}) \tag{4.5}$$

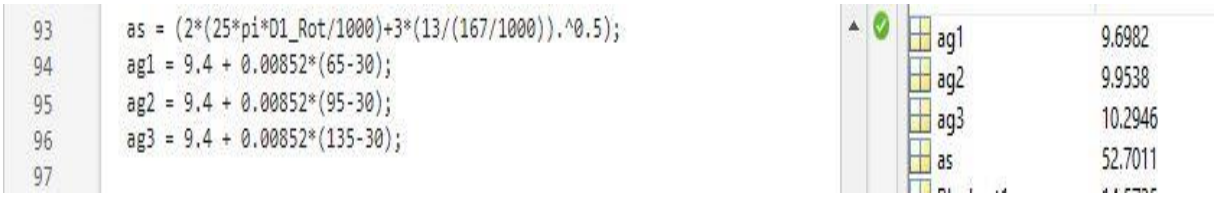

Abb. 13 α der freien Konvektionswiderstände für den Luftspalt (as) und das Gehäuse 65-30°C (ag1), 75-30°C (ag2) und 135-30°C (ag3)

Diese Konvektionswiderstände sind also mittels der Fläche, die zur Luft besteht, auszurechnen. Als Beispiel dafür dient der Widerstand „Geh.-Konv.2“. Dabei wird die Gl. (4.5) verwendet. Der Außendurchmesser des Gehäuses beträgt $215\ \mathrm{mm}$ und die Fläche wird ähnlich wie in Gl. (4.1.1) in Gl. (4.6) ausgerechnet. Die $61\,mm \cdot 92\,mm$ sind dazu noch für einen der außen angebrachten Kühlrippen. Somit ergibt sich die Fläche:

$$A_{\mathrm{Geh.-Konv.2}} = \frac{215\ mm \cdot \pi \cdot 92\ mm}{36} + 61\ mm \cdot 92\ mm = 7338\ mm^2 \qquad (4.6)$$

Mit den nun ermittelten Werten kann mit Gl. (4.7) der freie Konvektionswiderstand für das Bauteil Geh.-konv.2 errechnet werden:

$$R_{\mathrm{Geh.-Konv.2}} = \frac{1}{9.698\,\frac{W}{m^2K} \cdot 0{,}007388\ m^2} = 14{,}05\,\frac{K}{W} \qquad (4.7)$$

Nach der Errechnung gehen diese ebenfalls mittels MATLAB Skript zu den gleichnamigen Bauteilen.

Aufgrund der hohen Fragilität dieser freien Konvektionswiderstände, müssen diese gegebenenfalls mit Korrekturfakotoren verbessert werden. So ist der PMG-1 beispielsweise kein perfekter Zylinder, die Oberflächenströmung wurde nicht gemessen und die Luftgeschwindigkeit kann im inneren anders sein als sie mit der Drehzahl ausgerechnet wurde. So wird es notwendig mit Messdaten diese Widerstände zu verbessern. Dies wird in Kapitel 4.1.1 ausgeführt.

3.4 Modellzusätze

Die Parameter der Bauteile und die Messgeräte sind nun gesetzt und das Modell kann getestet werden. Das Netzwerk, inklusive der Messgeräte, wird unter einer „Mask“ im Programm versteckt, lediglich die Signalleitungen der Messgeräte werden nach außen zu einem „Scope“ geführt, worin man die Ergebnisse in einem Diagramm darstellen kann. Um die Ergebnisse zu bekommen, muss nur noch der Startknopf gedrückt und das Scope geöffnet werden. Falls Parameter geändert werden sollen, können diese im Skript angepasst, laufen gelassen und das Modell schließlich erneut abgespielt werden.

4. Simulation

In diesem Kapitel wird das Modell ausgeführt und die Ergebnisse werden dargestellt, ausgewertet und mit den Erwärmungsläufen – falls vorhanden – verglichen. Zuerst wird das Modell mit den Parametern des Erwärmungslaufes bei Nennbetrieb (1,58 kW-Leistung) ausgeführt und dann mit den vorhandenen Daten gegenübergestellt. Mögliche Verbesserungen werden dabei vorgenommen. Es werden die Temperaturdifferenzen gezeigt und Unstimmigkeiten untersucht. Danach wird das Modell variiert, um die möglichen Anbausituationen des PMG-1 zuerst im Nennbetrieb zu untersuchen. Die Modelle werden dann genutzt, um die thermischen Grenzleistungen zu finden.

4.1 Nennbetrieb 1: 1,58kW Modell und 1,58kW Simulation

Dieser Abschnitt vergleicht den Erwärmungslauf aus dem Prüfstand mit dem MATLAB-Modell. Dazu wurden im Voraus Messungen mit Pt100 Elementen durchgeführt, die am antriebsseitigen Wickelkopf, nicht-antriebseitigen Wickelkopf, am Gehäuse und in der Umgebung installiert wurden. Die Wicklungstemperaturen und Magnettemperaturen wurden analytisch ausgerechnet. Die Kupfertemperatur wurde aus dem Wicklungswiderstand zum Endzeitpunkt errechnet und die Magnettemperatur wurde aus der Reduzierung der von den Magneten induzierten Spannung ermittelt. Somit sind die Vergleichswerte nutzbar, jedoch ist auch mit Abweichungen zu rechnen.

Abb. 15 zeigt die Messergebnisse für die gewählten Positionen und **Tabelle 4** die Endwerte des Modells. Die Achsen sind in MATLAB nicht beschriftet, jedoch ist die y-Achse die Temperatur in °C und die x-Achse die Zeit der Messintervalle in Sekunden. Da in dem Modell nur Widerstände benutzt werden, zeigt das Modell auch nur die Endtemperaturen als Geraden an. Würde man die Wärmekapazitäten noch einbauen, könnte man den zeitlichen Verlauf auch in diesem „Scope“ sehen. Die genaue Auswertung folgt noch, jedoch kann aus den entwickelnden Temperaturen eine Plausibilität für das Modell erkannt werden. Zum Beispiel ist im Kupfer die höchste Temperatur, das Gehäuse liegt unter der Höchsttemperatur und die niedrigste Temperatur haben die Magnete, was dem realen Verhalten entspricht.

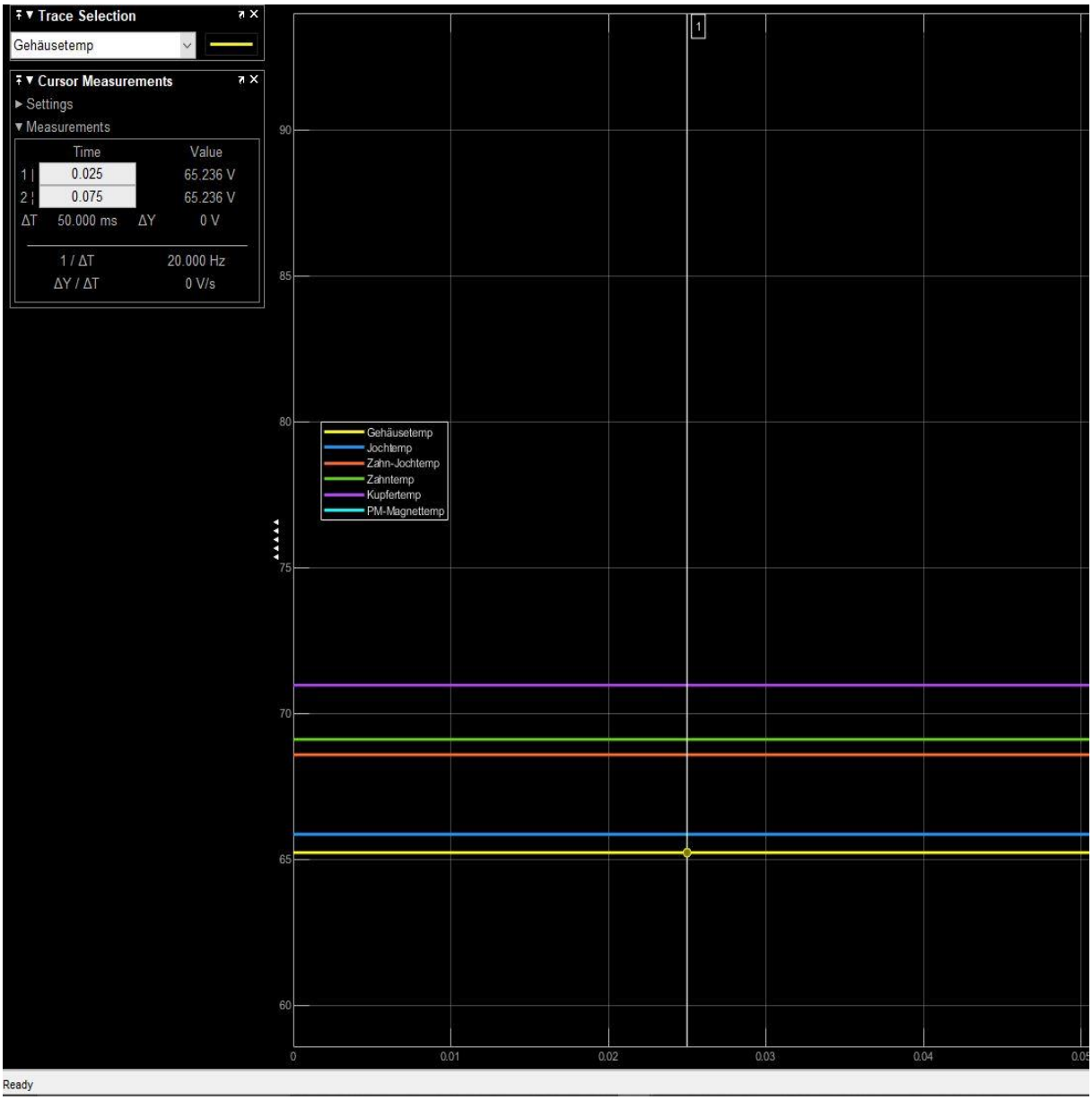

Abb.15 Messergebnisse als Darstellung in Matlab

Tabelle 4 Endtemperaturen MATLAB-Simulation für den Nennbetrieb

Ort	Gehäuse	Joch	Zahn-Joch	Zahn	Kupfer	Magnete
Temperatur in °C	60,98	64,55	64,02	64,45	65,27	49,65

Mit den Enddaten müssen nun noch die Originalmessung und das Modell verglichen werden. **Tabelle 5** stellt diese Endwerte gegenüber und zeigt ihre Differenz. Da nicht alle Positionen bemessen wurden, können hier nur die Kupfer-, Magnet- und Gehäusetemperatur miteinander verglichen werden.

Tabelle 5 Endtemperaturen Simulation und Messungen bei 1,58 kW

	Messungen	**Modell**	**Differenz**
	In °C	In °C	In K
Gehäuse	67,2	61,0	-6,2
Kupfer	71,6	65,3	-6,3
Magnete	57,7	49,7	-8,0

Die Endtemperaturen der Simulation weichen von den Messergebnissen ab. Sie sind, zumindest in den vergleichbaren Maschinenbereichen, maximal 8 K (13,86%) von der Originalmessung entfernt. Somit ist das Modell in diesem Leistungsbereich noch nicht vereinbar mit den realen Ergebnissen.

4.1.1 Anpassen an die Messergebnisse

Mit den Abweichungen der Messergebnisse können die freien Konvektionswiderstände experimentell verbessert werden. Infolgedessen, dass die Temperaturen alle unter den Messwerten liegen, müssen die freien Konvektionswiderstände am Gehäuse erhöht werden, damit weniger Wärme aus der Maschine an die Umgebung abgegeben wird. Gleichzeitig muss der Widerstand im Luftspalt verringert werden, um die bessere Wärmeübertragung zwischen Rotor und Stator zu realisieren.

Es werden so auch nur die freien Konvektionswiderstände geändert, da diese die höchste Ungenauigkeit aufweisen. Unbekannte Oberflächenbeschaffenheit und -beströmung, sowie geometrische Abweichungen von den Formelvorgaben beeinflussen diesen Teil des Modells sehr stark. Die erzwungenen Konvektionswiderstände sind auch von kleinen Faktoren abhängig, jedoch sind ihre Werte – und somit auch ihre Abweichungen – im Vergleich zu den freien Größen minimal.

Die freien Konvektionswiderstände am Gehäuse und an der Welle wurden um 25% erhöht. Die Übergangswiderstände im Luftspalt wurden um 25% verringert. Somit ergeben sich in **Tabelle 6** die die neuen Simulations- und Messergebnisse.

Tabelle 6 Vergleich zwischen Messdaten und angepassten Simulationsergebnissen

	Messungen	**Modell**	**Differenz**
	In °C	In °C	In K
Gehäuse	67,2	67,9	+0,7
Kupfer	71,6	72,2	+0,6
Magnete	57,7	57,9	+0,2

Mit den neuen Modellergebnissen wurden die Messergebnisse auf maximal 1% Abweichung reduziert. Um die Genauigkeit dieser Anpassung zu bestimmen, muss das Model nochmal gegen Messergebnisse einer anderen Leistung verglichen werden.

4.2 Simulationsvergleich 2,8kW

Da für die 1,58 kW die Verwendbarkeit nun festgestellt wurde und das Modell für die Ermittlung der Grenzleistung zuständig sein soll, muss das Modell auch bei höheren Leistungen fungieren. Hierfür wird das Modell noch zu der höchstmöglichen Leistung der Messdaten verglichen. Durch die Limitierung der Last und Antriebsmaschine, konnte der PMG-1 nur bis 2,8 kW im Dauerbetrieb getestet werden. **Tabelle 7** zeigt erneut die zwei Messreihen mit ihrer Differenz. Die Parameter der Leistung und der Konvektionswiderständen wurden angepasst. Somit sind die Kupferverluste nun insgesamt 67,68 W, die Eisenverluste bleiben gleich und die Konvektionswiderstände sind auf den höheren Temperaturunterschied zwischen Endtemperatur des Gehäuses zur Außenluft eingestellt. Die Umgebungstemperatur während des Erwärmungslauf betrug 30,1°C also 0,3 K höher als während des 1,58 kW Testlaufes.

Tabelle 7 Vergleich der Messungen bei 2,8kW

	Messungen	**Modell**	**Differenz**
	In °C	In °C	In K
Gehäuse	74,4	77,1	+2,7
Kupfer	84,0	84,7	+0,7
Magnete	69,9	65,1	-4,8

Die Ergebnisse des 2,8 kW Modells weichen um maximal 4,8 K (6,8%) von den Originaldaten ab. Jedoch fallen die Gehäuse- und Kupfertemperaturen wesentlich besser aus. Die Leistungserhöhung reduziert somit die Genauigkeit der Temperaturen leicht. Anzumerken ist jedoch, dass bei höheren Leistungen, die für die Kupfertemperaturen von 155°C nötig sind, diese Abweichungen auch höher sein könnten.

4.3 Diskussion zur Genauigkeit

In erster Sicht ist, mit der Überprüfung der Genauigkeit mittels dem 2,8 kW Erwärmungslauf, ein vielversprechendes Ergebnis erzielt wurden. Obwohl die K-Faktoren nur zur Annäherung zum 1,58 kW eingestellt wurden und direkt in das 2,8 kW Modell übernommen wurden, funktioniert das Modell in einem nutzbaren Ausmaß. Hinzu kommt, dass die gemessenen Temperaturen selbst nicht viel genauer sind, wie in 4.1 Anpassung an die Messergebnisse besprochen wurde.

Kritische Aspekte dieser Vergleichergebnisse bestehen trotzdem. Die Messungen mit den Pt100-Elementen sind fehlerbehaftet, da sie lediglich mit Klebestreifen im Wickelkopf befestigt wurden. Zudem spiegeln die Kupferergebnisse in der Simulation die Temperaturen im Inneren der Nut wider und erfassen die Temperaturen für den „Hotspot“ des Kupfers.

Weiterhin bestehen die Limitationen der Modellierung der Konvektion, da sich die Konvetkionswiderstände aufgrund abweichender Oberflächenbeströmung oder -beschaffenheit stark verändern. Diese freien Konvektionswiderstände sind auch die dominantesten Bauteile des Modells, da sie mit unter 5000-fach größer als die der erzwungenen Konvektion sind. Eine Veränderung und Erhöhung der Komplexität dieser Widerstände könnte das Modell genauer machen.

Im Ganzen wird mit dem 2,8 kW vergleich eine bestimmte Messgenauigkeit zugesichert, womit das Modell eine gute Annäherung zur Realität abbilden kann. Letztendlich müssen die folgenden Betrachtungen trotzdem mit Bedacht genutzt werden, da es keine Vergleiche gibt und bestimmte Veränderungen der Struktur auch unvorhersehbare Einflüsse mit sich bringen können.

4.4 Grenzleistung 1: Grenzleistung im Aufbau „Prüfstand“

Die Genauigkeit des Modells wurde somit beleuchtet. Unter der Annahme, dass das Modell realistische Temperaturen im höheren Leistungsbereich darstellt, wird der Aufbau, so wie er bisher geprüft wurde, genutzt. Die Parameter (Leistung und Strom) für die Kupferverluste wurden experimentell ermittelt, bis entweder das Kupfer 155°C Betrug oder die Magnete ihre Entmagnetisierungsgrenze von 130°C erreichten. Auch wenn es unwahrscheinlich ist, dass der PMG-1 bis zu einer Gehäusetemperatur von über 100°C betrieben wird, werden in den folgenden Grenzleistungen die Grenzen der Materialeigenschaften ausschlaggebend sein. Die Magnete sind zwar auch für bis zu 150°C ausgelegt, jedoch ist dies die Temperatur der totalen Entmagnetisierung (Zerstörung) und ab 130°C fällt die induzierte Spannung schon beachtlich ab, um keinen stabilen Betrieb zu ermöglichen.

Für die erste Grenzleistung wurden die freien Konvektionswiderstände an den Temperaturunterschied von 125°C (Gehäusetemperatur) zu 30°C (Außentemperatur) angepasst. Die Eisenverluste wurden wie zuvor als konstant für jede Leistung angenommen. **Tabelle 8** zeigt die neuen Endtemperaturen an.

Tabelle 8 Endtemperaturen der Grenzleistung

Ort	Gehäuse	Joch	Zahn-Joch	Zahn	Kupfer	Magnete
Temperatur in °C	128,8	130,4	136,7	138,5	155,0	104,2

Somit zeigen die Ergebnisse, dass die Kupfertemperatur ausschlaggebend zur thermischen Grenzleistung ist und nicht die Magnettemperatur. Die einzustellende Kupferverlustleistung betrug 329 W, was mit der Gl. (4.0.1) einen Strom von 27,0 A ergibt. Das bedeutet, dass solang der PMG-1 bei 27,0 A Dauerbetrieb läuft, er an seine thermische Grenze laufen und die Isolation somit zerstört wird. Mit der Gl. (1.2) ist das eine Grenzleistung von 5,6 kW. Die Spannung hier wird als 120 V angenommen, da sich mit steigender Temperatur die induzierte Spannung verringert. Dies ist in **Abb. 16** nachzuvollziehen.

Der PMG-1 könnte, in einem Aufbau wie im Prüfstand, bei 30°C Außentemperatur bis zu dieser Grenze betrieben werden. Sobald die Außentemperatur steigt oder die Konvektion beeinträchtigt wird, müsste man die Leistung verringern.

4.5 Simulation der thermische Anbauvarianten

4.5.1 Nennbetrieb 2: Anbauvariante mit einer erhöhten Wellentemperatur

Im Betrieb an einem Generatorerregersystem wird der PMG-1 normalerweise an die Leistung des automatischen Spannungsreglers limitiert. Zudem ist der Anbau anders als der Prüfstandaufbau. Mit der Nennbetriebsprüfung soll zuerst geprüft werden, ob der Generator mit veränderter Einbausituation, an die thermische Grenze der Magnete oder der Kupferisolation kommt.

Im Betrieb bei Kunden ist der Generator fest am Gehäuse und der Welle montiert. So ist die Außentemperatur am Gehäuse wieder, je nach Standort, 30-50°C. Die Temperatur der Welle die im Prüfstand 30°C betrug, ist im Aufbau an einem Hauptgenerator beispielsweise 60-70°C. **Tabelle 9** zeigt die Daten für diesen Betrieb. Die Konvektionswiderstände, sowie die Außentemperatur des Gehäuses sind gleich, jedoch wurden die Außentemperatur und der Konvektionswiderstand an der Welle an 70°C angepasst.

Tabelle 9 Endtemperaturen Nennbetrieb und bei Wellentemperatur von 70°C

Ort	Gehäuse	Joch	Zahn-Joch	Zahn	Kupfer	Magnete
	°C	°C	°C	°C	°C	°C
Prüfstand	68,2	68,7	71,2	71,6	72,5	58,2
Welle 70°C	68,9	69,5	72,0	72,5	73,3	71,8
Differenz	**+0,7**	**+0,8**	**+0,8**	**+0,9**	**+0,8**	**+13,6**

Wie erwartet steigt mit einer erhöhten Außentemperatur die Temperatur an allen Bauteilen. Die größte Veränderung liegt aber bei den Magneten, die von der wärmeren Welle 13,6 K

aufnehmen. Durch die schlechte Wärmeübertragung im Luftspalt wird also fast nur der Rotor erwärmt.

4.5.2 Grenzleistung 2: Anbauvariante mit einer erhöhten Wellentemperatur

Mit der Bestimmung des Welleneinflusses im Nennbetrieb wird jetzt noch die thermische Grenze des Generators ermittelt. Diese bleibt in allen Betrieben beim Erreichen von 130°C Magnettemperatur oder 155°C Kupfertemperatur. **Tabelle 10** zeigt die Ergebnisse der ermittelten Grenzleistung.

Tabelle 10 Grenzleistung bei höherer Wellentemperatur

Ort	Gehäuse	Joch	Zahn-Joch	Zahn	Kupfer	Magnete
Temperatur in °C	129,2	130,7	137,0	138,9	155	117,7

Alle Temperaturen, außer die der Magnete, sind in etwa gleich wie in der Prüfstandvariante. Die Magnete sind jedoch 13 K wärmer als in **Tabelle 8**. Somit kommen die Magnete näher an ihre Grenzen, aber die Kupferisolation erreicht ihr Limit erneut zuerst. Um die Magnete mit dem Nennbetrieb Aufbau an die thermische Grenze zu bringen, müsste die Welle eine Temperatur von 250°C haben, die im Normalbetrieb nicht auftreten sollte. Letztendlich kam der PMG-1, mit der 70°C warmen Welle, mit 327 W Verlustleistung oder 26,9 A an seine Grenze. Das entspricht ebenfalls einer Generatorleistung von 5,6 kW.

4.5.3 Nennbetrieb 3: Erhöhte Außentemperatur

Der „Nennbetrieb 2“ wird als die Standard-Anbauvariante für den folgenden Betrieb angenommen. Es gilt nun noch zu untersuchen, wie sich die thermischen Werte bei einer erhöhten Raumtemperatur ändern, so wie sie in anderen Ländern oder in warmen Räumen auftreten könnten. Es werden nur die Außentemperatur am Gehäuse und die Konvektionswiderstände auf 50°C Außentemperatur angepasst. **Tabelle 11** zeigt die Endtemperaturen im Vergleich zum „Nennbetrieb 2“.

Tabelle 11 Erhöhte Raumtemperatur im Vergleich zum „Nennbetrieb 2“

Ort	Gehäuse	Joch	Zahn-Joch	Zahn	Kupfer	Magnete
	°C	°C	°C	°C	°C	°C
Außentemperatur 30°C	68,9	69,5	72,0	72,5	73,3	71,8
Außentemperatur 50°C	88,5	89,0	91,5	92,0	92,8	84,9
Differenz	**+18,6**	**+19,5**	**+19,5**	**+19,5**	**+19,5**	**+13,1**

Wie erwartet erhöht eine 20 K höhere Außentemperatur fast überall die Temperatur um ca. 20K. Die Magnete heben sich wieder von dieser Veränderung ab, da durch den Luftspalt und der zuvor schon höheren Wellentemperatur von 70°C, die Wirkung der höheren Außentemperatur etwas verringert wird.

4.5.4 Grenzleistung 3: Erhöhte Außentemperatur

Wichtig ist nun also auch die Leistungsminderung der Maschine zu ermitteln. Für die wesentlich höheren Temperaturen im Nennbetrieb wird eine geringere Kupferverlustleistung und somit ein geringerer Strom nötig sein, um den Generator an seine Grenze zu führen. **Tabelle 12** zeigt diese Endtemperaturen.

Tabelle 12 Grenzleistung mit erhöhter Außentemperatur

Ort	Gehäuse	Joch	Zahn-Joch	Zahn	Kupfer	Magnete
Temperatur in °C	134,2	135,5	140,9	142,4	155,00	119,6

Erneut ist der Generator durch die Kupferisolation limitiert. Mit einer Leistung von 255 W braucht es also nur noch 23,8 A um die Grenztemperatur zu erreichen. Somit kann der PMG-1 bei 110 V nur noch 4,54 kW im Dauerbetrieb bereitstellen.

Allgemein haben sich die anderen Temperaturen um minimal 1,9 K (an den Magneten) und maximal 5 K (am Gehäuse) erhöht. Die Magnete sind somit nur noch 10,4 K von ihrer Entmagnetisierung entfernt.

4.5.5 Nennbetrieb 4: M270 Blechpaket anstatt M400

Im Nennbetrieb sind die Eisenverluste, mit gemeinsam 157,2 W, wesentlich höher als die Kupferverluste von 21,61 W. Um diese Verluste zu verringern, könnte man ein verlustärmeres Blechpaket benutzen. Ein Kilogramm M270 Blech erzeugt, bei einer Magnetisierung mit 50 Hz und einer magnetischen Flussdichte von 1,5 T, 270 W Verlustleistung. Somit sind das 130 W weniger als bei M400 Blechpaketen. Anzumerken ist aber, dass diese Leistungen nicht direkt Verluste in einem Generator gleichermaßen beeinflusst.

Um diese Variante zu realisieren, muss nur die Verlustleistung im Eisenjoch- und Zahn angepasst werden. Diese betragen dann 55,4 W für die Jochverluste und 50,1 W für die Zahn-Verluste. Die Werte wurden nicht aus den erwähnten Materialeigenschaften errechnet, sondern durch die komplette analytische Berechnung. **Tabelle 13** stellt die Endwerte dieser Veränderung im Vergleich zum M400 da. Alle anderen Werte wurden wie in „Nennbetrieb 1“ eingestellt.

Tabelle 13 Nennbetrieb PMG-1 mit einem M270 Blechpaket.

Ort	Gehäuse	Joch	Zahn-Joch	Zahn	Kupfer	Magnete
	°C	°C	°C	°C	°C	°C
M400	68,2	68,7	71,2	71,6	72,5	58,2
M270	56,9	57,3	59,1	59,4	60,3	49,9
Differenz	**-12,7**	**-11,4**	**-12,1**	**-12,2**	**-12,2**	**-8,3**

Eine Veränderung des Blechpakets verringert die Temperaturen des Generators um ca. 12 K, was eine maximale thermische Verbesserung von 18,6% darstellt, obwohl die Gesamtverlustleistung um 29,7% gesunken ist. Durch diese Verbesserung ist jedoch wieder die Berührungstemperatur von unter 65°C am Generator gegeben, die für bestimmte Kunden erforderlich sein könnte.

4.5.6 Grenzleistung 4: M270 Blechpacket anstatt von M400

Es wurde eine thermische Verbesserung nun nachgewiesen und infolgedessen wird auch eine höhere Leistung möglich sein, bevor das thermische Limit erreicht wird. Die Temperaturen werden in **Tabelle 14** dargestellt und mit dem M400 Endtemperaturen verglichen.

Tabelle 14 Grenzleistung mit einem M270 Blechpacket

Ort	Gehäuse	Joch	Zahn-Joch	Zahn	Kupfer	Magnete
	°C	°C	°C	°C	°C	°C
M400	128,8	130,4	136,7	138,5	155,0	104,2
M270	127,0	128,6	134,7	136,6	155,0	103,1
Differenz	**-1,8**	**-1,8**	**-2,0**	**-2,1**	**-0,0**	**-1,1**

Obwohl sich die Temperaturen der Maschine nur leicht im Blechpaket verbessert haben, benötigt die Maschine nun 373 W an Kupferverlusten, um an die Grenztemperatur der Kupferisolation zu kommen. Somit kann der Generator ein Strom von 28,8 A liefern. Jedoch ist dieser Strom auch nur 1,8 A mehr als bei dem M400 Blechpaket und daher erhöht sich die Leistung auch nur auf 6,0 kW. Das bedeutet, für den Nennbetrieb konnte die Temperatur verringert werden, jedoch ergibt sich für den Grenzbetrieb gerade mal eine Leistungsverbesserung von 400 W. Dieses Ergebnis ist eine Folge des quadratischen Zusammenhangs zwischen dem Strom und den Kupferverlusten.

5. Diskussion der Simulationsergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse im Allgemeinen nochmal reflektiert. Es wird besprochen, inwiefern sie auf die Realität zutreffen und ob man diese Ergebnisse zur thermischen Ermittlung dieser Einbauvarianten nutzen sollte.

5.1 Nennbetriebe

Mit der K-Faktoren-Anpassung und der gefolgten Überprüfung sollten sich die Nennbetriebe in einem guten und akkuraten Bereich befinden. Die Ergebnisse sind so wie erwartet:

- Bei einer wärmeren Welle wird hauptsächlich die Wellentemperatur beeinflusst, da sich der Luftspalt wie ein thermische Isolationsschicht verhält.
- Eine zusätzlich erhöhte Außentemperatur erwärmt die Maschine gleichmäßig, bis auf die Magnete.
- Mit der Verwendung von M270 Blechpakten wird im Nennbetrieb die Temperatur beachtlich verbessert, sodass eine Berührungstemperatur der Maschine ermöglicht wird.

5.2 Grenzleistungen

Die Grenzleistungs-Simulationen liefern zumindest realistische Schätzungen der Endtemperaturen und der notwendigen Leistungen. Wie genau sie sind kann jedoch nur im Prüffeld ermittelt werden, da es keine Vergleichsmessungen gibt. Empfehlenswert ist dies aber nicht, da das Modell bis zur Materialzerstörung simuliert wurde. So könnte ein Überlastbetrieb für beispielsweise 100°C Kupfertemperatur durchgeführt werden, um bei nicht ganz so hohen Leistungen die Präzession zu ermitteln.

Aus den Simulationswerten können aber noch einige Prognosen erstellt werden:

- Mit einer erhöhten Wellentemperatur wird die Grenzleistung kaum beeinträchtig, durch die gut Luftisolation kann der PMG-1 trotzdem 5,6 kW liefern.
- Eine zusätzlich höhere Außentemperatur verringert die notwendige Leistung erheblich, um an die thermischen Grenzen der Materialen zu gelangen. So ergeben sich hier aus 20 K mehr Umgebungstemperatur 1,04 kW weniger Leistung.
- Mit der Verwendung von einem M270 Blechpaket, profitiert die Maschine im Nennbetrieb, jedoch wird im Grenzleistungsbetrieb keine wesentliche Verbesserung vorausgesagt. Lediglich 400 W mehr, als mit M400er Blechpaketen, benötigt der PMG-1 um an die thermische Grenze zu gelangen.

5.3 Kritische Betrachtung

Trotz der vielversprechenden Ergebnisse muss das Modell in einigen weiteren Punkten kritisiert werden. Die steigende Ungenauigkeit mit der steigenden Temperatur wird sich wahrscheinlich weiter erhöhen. Ein Grund dafür ist die Annahme, dass die Eisenverluste gleich bleiben, da es für die hohen Erwärmungsläufe keine neuen Eisenverlustsberechnung gibt. Die Permanentmagnete entmagnetisieren sich um -0,2101 V/K im Leerlauf wie es die Kennlinie aus **Abb. 16** zeigt. Somit sinken auch die Eisenverluste im Generator, da bei einer 20 K höheren Magnettemperatur schon 4,2 V und bei 30 K, 6,303 V weniger induziert werden.

Die blaue Kennlinie zeigt die reduzierte induzierte Spannung bei 1500 Upm im Leerlauf. Das Ziel war zuerst die Temperatur der Magnete anhand des Spannungsfalls während der Erwärmungsläufe abzuschätzen. In dieser Arbeit kann die Kennlinie aber auch erklären warum die Ungenauigkeit mit höheren Temperaturen sich ebenfalls erhöht. Denn wenn der Generator eine Leistung konstant liefern soll und die induzierte Spannung fällt, muss im Betrieb ein höherer Strom fließen. Es sinken die Eisenverluste, während die Kupferverluste steigen. Beispielsweise wären bei 2,8 kW die Kupferverluste aus den Messdaten 67,65 W, jedoch die Eisenverluste und somit auch die Endtemperaturen niedriger.

Problem dieses Ansatzes ist aber, dass diese Verluste aus dem Erwärmungslauf ausgerechnet werden müssen, um sie in die Simulation zu implementieren. Sie könnten auch aus FEM-Programmen vorsimulieret werden, jedoch ist das wieder mit einem externen Aufwand verbunden. Der Rechenaufwand vor dem Modell bleibt somit ähnlich wie bei FEM-Modellen, jedoch ist die Rechnungsdauer des Programms während der Simulation schneller.

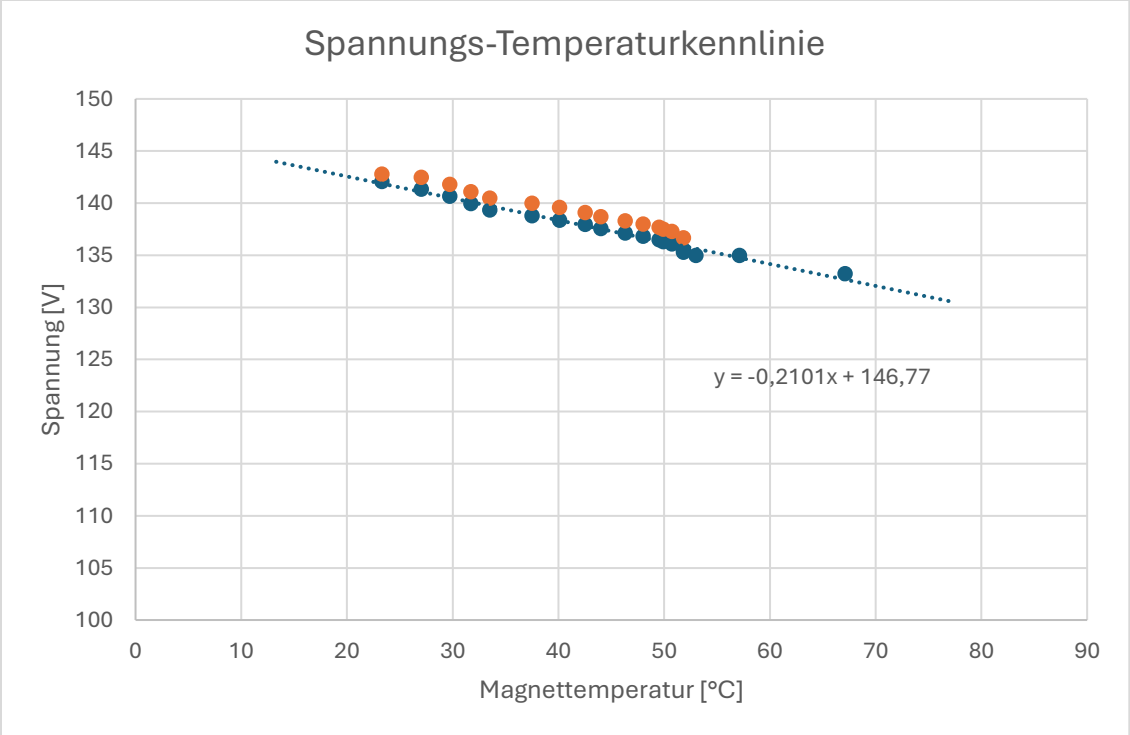

Abb. 16 Spannungsreduzierung nach Magnettemperatur

Überprüfen kann man diese Annahmen nur im Prüffeld, jedoch stellt das erneut einen hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand dar. Mit dem 2,8 kW Vergleich ist jedoch eine hohe Genauigkeit der Nennbetriebe möglich, da sich die meisten Simulationen im Temperaturbereich dieses Erwärmungslaufes befinden. Die Aufwandsvorteile und Genauigkeit in der Entwicklungsphase, so wie sie in anderen Arbeiten, wie *A Simplified LPTN Model for a Fault-Tolerant Permanent Magnet Motor under Inter-Turn Short-Circuit Faults* [2] beschrieben wurden, sind hier ebenfalls zu erkennen. Zumindest sobald das Modell angefertigt wurde, erspart es in Zukunft den Aufwand und die Rechenzeit des Anwenders, ohne die Genauigkeit wesentlich zu beeinträchtigen.

Ein zweiter Grund ist die Annahme, dass die Strahlung des PMG-1 vernachlässigbar sei. Gl. (5.0) [7] zeigt, dass der Unterschied von Gehäusetemperatur und Außentemperatur sehr dominant für die emittierte Strahlung ist. Bei einem hohen Temperaturunterschied wird der Strahlungsanteil auch sehr viel höher ausfallen. Wenn man dies noch in Betracht ziehen würde, wäre es eine wesentliche bessere Annäherung zu den Grenzleistungsergebnissen.

$$P_{\mathrm{rad}} = \sigma A({T_{\mathrm{Auß.}}}^4 - {T_{\mathrm{Geh.}}}^4) \tag{5.0}$$

P_{rad}	Strahlungsleistung	/ W
σ	Stefan-Bolzmann-Konstante	/ W/(m^2 K^4)
A	Fläche	/ m^2
$T_{\mathrm{Auß.}}$	Außentemperatur	/ K
$T_{\mathrm{Geh.}}$	Gehäusetemperatur	/ K

Die Grenzleistungen können aber dafür genutzt werden, den limitierenden Faktor der Kupferisolation darzustellen, da diese Grenze immer vor der thermischen Grenze der Magneten eintrat.

Für die Berechnung der Grenztemperaturen und dementsprechend ihrer Grenzleistung eignet sich dieses Modell vorerst gut. Doch auch hier müsste mit einigen Probeläufen im Prüffeld ihre Genauigkeit überprüft werden um eine klare Antwort zu bekommen.

6. Fazit

Das Modell funktioniert aus erster Sicht sehr gut. Es hat zumindest bei den Nennbetrieben aussichtsreiche Ergebnisse erzielt. Der Vorteil des Rechenaufwandes hat sich aber nur in der

Simulation selbst gezeigt. Im Entwicklungsprozesses dieses Modells müssen viele Parameter erst ausgerechnet werden, bestenfalls mit Messwerten verbessert und sorgsam auf die Realität angepasst werden. Trotz dieser vielen Annahmen und Ungenauigkeiten kann immerhin eine qualitative Schätzung der geplanten Veränderungen erlangt werden. Sobald das Modell steht, könnte man in Zukunft, ohne einen leistungsstarken Rechner oder längeren Berechnungszeiträumen, hilfreiche Ergebnisse zu verschiedensten Anbausituationen erzielen.

Das Modell liefert in unter einer Sekunde die Ergebnisse, doch im Rahmen dieser Arbeit konnten nur begrenzt die verschiedenen Temperaturen der Anbausituationen ausgewertet werden. Ob diese Werte stimmen, müsste man noch mit Prüfungen vergleichen und gegebenenfalls das Modell komplexer und somit präziser gestalten. Allgemein können mit diesem Modell einfache Veränderungen und grobe Temperaturschätzungen dargestellt werden.

Des Weiteren können mögliche Verbesserungen in zwei Gruppen eingeteilt werden: Simulationsoptimierung und Simulationsgenauigkeit. Für die Optimierung des Modells könnten:

- Die nicht-linearen Widerstände in MATLAB besser programmiert werden. Im Modell sind diese manuell im Skript eingebaut und die Temperaturunterschiede müssen jedes Mal neu eingegeben werden.
- Mit einem weiteren Skript könnte das Modell direkt laufen gelassen und die Ergebnisse angezeigt bekommen werden, anstatt das Skript erst abzuspielen und dann das Scope laufen zu lassen.

Zur Verbesserung der Genauigkeit gibt es viele schon erwähnte Problemstellungen:

- Die emittierte Strahlung könnte mittels eines neuen nicht-linearen Widerstands eingefügt werden.
- Die Eisenverluste könnten für die höheren Leistungen an die reduzierte Spannung angepasst werden.
- Für eine etwas bessere Simulation könnten die Geometrien kleiner, jedoch genauer, abgebildet werden.
- Mit genaueren Messungen in den Erwärmungsläufen könnten die aufgetretenen Abweichungen entweder validiert, oder mit experimentell ermittelten Übergangswiderständen verbessert werden.
- Zusätzlich könnte man mit mehr Messstellen auch die Übergänge im Stator und Rotor besser überprüfen.

Das Modell könnte eine stabile Grundlage für ein komplexeres jedoch auch präziseres Simulationswerkzeug für die Firma werden. So ist es möglich, tatsächlich Kundenwünsche erst zu simulieren, ohne den Generator bauen zu müssen. Der PMG-1 kann nun schneller für andere Leistungen, Drehzahlen, Blechmaterialien und Umgebungsbedingungen geprüft werden, als es mit FEM-Programmen möglich wäre.

Mit einer hybriden Arbeitsweise, zusammen mit FEM-Programmen für kritische Stellen, wäre aber auch eine optimierte Form möglich, die Präzision und Geschwindigkeit miteinander vereinbart. Daher wäre noch eine Untersuchung zwischen Lumped Parameter Thermal Networks, FEM-Simulation und hybrider Zusammenarbeit ein interessanter Ausblick für Firmen, Kunden und Ingenieure.

7. Anhang

Tabelle der wichtigsten PMG-Daten

Elektrische Daten	***Größe***	***Einheit***
Spannung	138,00	V
Strom	6,80	A
Leistung	1,58	kW
Cos(φ)	1,00	-
Geometrische Daten		
Rotor		
Außendurchemesser	167,00	mm
Innendurchmesser	120,00	mm
Länge (z)	90,00	mm
Breite PM-Magnete (x)	32,00	mm
Höhe PM-Magnete (y)	5,00	mm
Länge PM-Magnete (z)	92,00	mm
Stator		
Außendurchemesser	210,00	mm
Innendurchmesser	170,00	mm
Länge (z)	92,00	mm
Luftspalt Rotor-Zahn	2,00	mm
Luftspalt Rotor-Nutkeil	3,00	mm
Nut		
Breite Nut	10,00	mm
Höhe Nut (mit Steg)	12,80	mm
Höhe Nut (ohne Steg)	10,30	mm
Zahnbreite (unten)	7,07	mm
Zahnbreite (Oben)	6,77	mm
Stegbreite	2,00	mm
Fläche Nut	81,60	mm^2

8. Quellen

[1] D. Schröder, *Elektrische Antriebe – Grundlagen: Mit durchgerechneten Übungs- und Prüfungsaufgaben.* Springer-Verlag, 2013.

[2] Z. Jia, G. Xu, P. Qian, Q. Chen, Y. Zhou, *A Simplified LPTN Model for a Fault-Tolerant Permanent Magnet Motor under Inter-Turn Short-Circuit Faults.* Energies. 2022.

[3] L. Tom, R. Ramanathan, G. Vakil, C. Gerada, A. McQueen. *Analysis of Integration Options for A Two-Stage Synchronous Generator*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2021.

[4] M. Neubauer, H. Neudorfer, *Permanentmagneterregte Generatoren und Motoren*. Springer, 2011.

[5] A. Binder, *Elektrische Maschinen und Antriebe*, Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2012.

[6] S. Oechslen, *Thermische Modellierung elektrischer Hochleistungsantriebe*. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer+Vieweg, 2018.

[7] P. Böckh, T. Wetzel, *Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis.* 7. Aufl. Berlin: Springer+Vieweg, 2018.

[8] W. Schneider, K. Kallweit,, *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen*. 6. Aufl.: Vieweg+Teubner, 2013.

[9] F. Incropera, D. DeWitt D, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6. Aufl.: Wiley, 2007.

[10] J. Nilsson, S. Riedel, *Electric Circuits*. 10. Aufl.: Pearson 2015.

[11] J. B Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals.* 2. Aufl. McGraw-Hill: 2018.

[12] S. Cabezas, G. Hegedűs, P. Bencs, *Dark Gray Box Lumped Parameter Thermal Network for High Speed Spindle Rolling Bearings*, Pula Kroatien: 2023

[13] D. R Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics.* 104. Aufl.: CRC Press, 2004.

[14] S. Oechslen, H.-C. Reuss, A. Heitmann und T. Engelhardt, *Thermische Modellierung der Wicklung einer elektrischen Antriebsmaschine*, Tagung ZFW (Zentrum für Wärmemanagement) "Thermische Auslegung in der Leistungselektronik", Stuttgart, 27.06.2017.

[15] Wärmeleiteigenschaften von Metallen. Schweizer Fachverlag, o. J. URL: https://www.schweizer-fn.de/stoff/wleit_metall/wleit_metall.php (Zugriff am 8. Oktober 2024).

[16] Wärmeübergang von Gasen. Schweizer Fachverlag, o. J. URL: https://www.schweizer-fn.de/stoff/wuebergang_gase/wuebergang_gase.php (Zugriff am 8. Oktober 2024).

9. Eigenständigkeitserklärung

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Alle sinngemäß und wörtlich übernommenen Textstellen aus fremden Quellen wurden kenntlich gemacht.