

PRAXISPHASENBERICHT

Fremdfeldbeeinflussung auf Messstromwandler in der Niederspannung

Studiengang Elektrotechnik

Vorgelegt von

OliverSchmidt

Matrikelnummer: 7023462

Emden, 9. Dezember 2025

Betreut von

Dr. Sandro Günter

Dipl.-Ing. Holger Kuhleemann

Dipl.-Ing. Rainer Ludewig

Simon Westerbur, B. Eng.

Zusammenfassung

Kompakte Niederspannungsschaltanlagen erfordern konstruktionsbedingt geringe Phasenmittelabstände. Die dabei auftretenden hohen Betriebsströme führen zu starken magnetischen Fremdfeldern, welche die Messgenauigkeit von Messstromwandlern signifikant beeinträchtigen können. Insbesondere die Störeinkopplung auf die mittlere Phase (L2) stellt eine Herausforderung für die Einhaltung der Genauigkeitsklasse dar. Das Ziel dieser Arbeit ist die systematische Analyse dieser Fremdfeldbeeinflussung. Es wird eine Methodik entwickelt, um die physikalischen Ursachen der Messabweichungen zu quantifizieren und Lösungsansätze für die Konstruktionspraxis abzuleiten. Hierfür wird ein zweigleisiger Ansatz verfolgt, der Simulation und Messtechnik kombiniert. Zunächst wird der Aufbau eines Quasi-stationäres Modellen Simulationsmodells mittels der FEM-Software FEMM vorgestellt. Diese Methode bildet die nichtlinearen Materialeigenschaften der Wandlerkerne, wie die $B(H)$ -Kennlinie und die magnetische Sättigung, detailliert ab. Zur Parametrierung und Steuerung der 50-Hz-Simulationen wird eine eigens entwickelte Weboberfläche beschrieben. Parallel zur Simulation wird der messtechnische Aufbau zur Validierung der Modelle am Erwärmungsprüfstand erläutert. Dieser Prüfstand ermöglicht die Einspeisung realer Hochströme in verschiedene Sammelschienen-Anordnungen. Zur systematischen Erfassung der Genauigkeitsmessungen nach DIN EN 61869-2 wird ein maßgeschneidertes VBA-Messprotokoll-Tool konzipiert und implementiert.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Abbildungsverzeichnis	III
Glossar	V
1 Vorstellung des Unternehmens	1
2 Analyse der Fremdfeldbeeinflussung von Messstromwandlern	2
2.1 Motivation	2
2.2 Vorgehen	2
2.2.1 Vorbereitung	2
2.3 Erwärmungsprüfstand	2
2.4 Simulation	3
2.4.1 Maßgeschneiderte Simulationsumgebung	3
2.4.2 Detaillierter Modellaufbau	6
2.5 Messung	6
2.5.1 Messaufbau	6
2.5.2 Messprotokoll	9
2.5.3 Messdurchführung	12
3 Reflexion	13
3.1 Was habe ich gelernt?	13
3.2 Was lief nicht so gut?	13
3.3 Wie hätte man es besser machen können?	13
4 Zusammenfassung und Ausblick	15

Abbildungsverzeichnis

1.1	Firmenzentrale der Rolf Janssen GmbH in Aurich	1
2.1	Weboberfläche der Simulationssoftware mit Vorschau des Modells	4
2.2	Weboberfläche der Simulationssoftware mit Einstellmöglichkeiten für die Simulation	5
2.3	Messaufbau des Erwärmungsprüfstands ohne Messstromwandler	7
2.4	Messaufbau mit installierten Messstromwandlern in Position 2 (Phase L2 nach vorne verlagert)	8
2.5	Ersatzschaltbild der sekundärseitigen Bürde (Kabel, Messgerät und ggf. Kompensation)	8
2.6	Dashboard des VBA-Messprotokolls	10
2.7	Modul zur Bürdenberechnung	10
2.8	Modul zur Erfassung der Magnetisierungskennlinie	11
2.9	Modul zur Genauigkeitsprüfung	11
2.10	Messschaltung zur Aufnahme der Magnetisierungskennlinie	12

Glossar

Erwärmungsprüfstand Hochstrom-Prüfanlage der Rolf Janssen GmbH. Dient in dieser Arbeit als Quelle für reale Hochströme (bis mehrere kA) bei Kleinspannung zur Simulation der Betriebsbedingungen..

FEMM Finite Element Method Magnetics. Die verwendete Open-Source-Software zur Simulation der magnetischen Flussdichteverteilung im 2D-Raum..

Kompensationswiderstand Serieller Widerstand im Sekundärkreis, der eingesetzt wird, um die geringe Eingangsimpedanz moderner Digitalmessgeräte auszugleichen und die Nennbürde des Wandlers zu erreichen..

Quasi-stationäres Modell Der in dieser Arbeit entwickelte Simulationsansatz, bei dem das dynamische 50-Hz-Verhalten durch eine automatisierte Sequenz statischer FEMM-Berechnungen diskreter Zeitpunkte angenähert wird..

Unterbürdung Betriebszustand, bei dem die tatsächliche sekundäre Lastimpedanz deutlich kleiner ist als die spezifizierte Nennbürde, was insbesondere bei älteren Wandlern an moderner Messtechnik zu Fehlern führen kann..

Wandler-Kurzschlussklemme Spezielle Anschlussklemme, die das gefahrlose Kurzschließen der Sekundärwicklung vor dem Auftrennen des Messkreises ermöglicht..

1 Vorstellung des Unternehmens

Das Unternehmen, die Rolf Janssen GmbH, wurde im Jahr 1949 gegründet und blickt auf eine mehr als 75-jährige Geschichte im Bereich der Elektrotechnik zurück. Mit Hauptsitz in Aurich, hat sich das Unternehmen kontinuierlich entwickelt und beschäftigt heute über 200 Mitarbeiter an insgesamt fünf Standorten in Deutschland.



Abbildung 1.1: Firmenzentrale der Rolf Janssen GmbH in Aurich

Das Kerngeschäft der Rolf Janssen GmbH liegt in der Planung, Fertigung und Inbetriebnahme von elektrotechnischen und leittechnischen Anlagen. Das Leistungsportfolio ist dabei breit diversifiziert im Bereich der Schaltanlagen und konzentriert sich auf die folgenden Hauptgeschäftsfelder:

- **Niederspannungsschaltanlagen:** Die Entwicklung und Fertigung von maßgeschneiderten Schaltanlagen bilden eine zentrale Säule des Unternehmens. Hierbei werden individuelle Kundenanforderungen präzise umgesetzt.
- **Prozessautomatisierung:** Ein weiterer Schwerpunkt ist die Konzeption und Implementierung von modernen Automatisierungslösungen für industrielle Fertigungs- und Verfahrensprozesse.
- **Diesel-Netzersatzanlagen:** Das Unternehmen stellt Notstromaggregate her, die eine unterbrechungsfreie Stromversorgung für kritische Infrastrukturen und industrielle Anwendungen gewährleisten.
- **Maritime Lösungen:** Für den anspruchsvollen maritimen Sektor werden spezialisierte Elektro- und Leittechniksysteme entwickelt, die den besonderen Anforderungen auf See (z. B. auf Schiffen oder Offshore-Plattformen) gerecht werden.

Ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal der Rolf Janssen GmbH ist die hohe Fertigungstiefe. Diese ermöglicht es, den gesamten Produktionsprozess – vom Rohmaterial bis zum betriebsbereiten Endprodukt – im eigenen Haus zu steuern. Dadurch können Kundenanforderungen nicht nur flexibel, sondern auch kurzfristig umgesetzt werden. Das Unternehmen legt besonderen Wert auf die Realisierung von anspruchsvollen Sonderlösungen und bietet eine durchgängige Projektbetreuung, die von der ersten Angebotsphase über die Konstruktion und Fertigung bis zur finalen Inbetriebnahme reicht. Diese umfassende Herangehensweise positioniert die Rolf Janssen GmbH als kompetenten und zuverlässigen Partner für elektrotechnische Gesamtpakete in diversen Branchen.

2 Analyse der Fremdfeldbeeinflussung von Messstromwandlern

Im Rahmen dieser Praxisphase wird die Fremdfeldbeeinflussung auf Messstromwandler im Bereich der Niederspannung analysiert. Ziel ist es, die physikalischen Ursachen für Messabweichungen, basierend auf dem Induktionsgesetz, zu untersuchen und Lösungsansätze zur Minimierung dieser Störeinflüsse zu entwickeln.

2.1 Motivation

In modernen Niederspannungsschaltanlagen treffen konstruktive Anforderungen an eine kompakte Bauweise auf hohe Betriebsströme. Die daraus resultierende kompakte Anordnung der Sammelschienen führt dazu, dass die starken magnetischen Wechselfelder der stromführenden Leiter auf benachbarte Messstromwandler koppeln. Diese Fremdfeldbeeinflussung ist eine signifikante Ursache für Messfehler, die Einhaltung der Genauigkeitsklasse beeinträchtigen kann und somit für Verrechnungszwecke nicht mehr zulässig ist. Besonders kritisch ist diese Kopplung für den Wandler der mittleren Phase L2, da dieser von den Feldern der beiden äußeren Phasen L1 und L3 beeinflusst wird.

2.2 Vorgehen

Um die gegenseitige Beeinflussung der Magnetfelder zu untersuchen, wurde die Open-Source-Software FEMM eingesetzt. Mit dieser lassen sich verschiedene elektrotechnische Problemstellungen wie magnetische, elektrostatische, stromfluss oder thermische Phänomene simulieren. Da die Software jedoch ausschließlich stationäre Probleme in zwei Dimensionen berechnen kann, wurde für die Analyse der Magnetfeldeinkopplung in die Messstromwandler eine ergänzende Software zur Simulation dynamischer Vorgänge entwickelt. Die messtechnische Untersuchung der Messstromwandler findet im Erwärmungsprüfstand statt. Sie gliedert sich in zwei Bereiche: Zuerst werden die internen Parameter mittels ACV-Messverfahren- und DCV-Messverfahren-Messungen ermittelt. Anschließend erfolgt die Genauigkeitsmessung unter Betriebsbedingungen mit den jeweiligen Nennströmen der Wandler.

2.2.1 Vorbereitung

Als Vorbereitung für die messtechnischen und simulativen Untersuchungen wurden Messstromwandler verschiedener Hersteller mit unterschiedlichen Nennströmen beschafft. Parallel dazu erfolgte eine umfassende Einarbeitung in die theoretischen Grundlagen der Messwandlertechnik und der Fremdfeldproblematik. Dies umfasste die Recherche und Analyse relevanter Fachartikel und Bücher. Ergänzend wurden erste analytische Berechnungen zur Magnetfeldeinkopplung mittels MATLAB durchgeführt.

2.3 Erwärmungsprüfstand

Der Erwärmungsprüfstand (siehe Abbildung 2.3) ist die zentrale Messeinrichtung für dieses Projekt. Obwohl sein primärer Zweck, wie der Name andeutet, die thermische Analyse von Niederspannungsschaltanlagen nach VDE-Norm ist, liegt sein entscheidender Vorteil für diese Untersuchung in einer anderen Eigenschaft: Er kann die für den Realbetrieb typischen, sehr hohen Nennströme bis zu mehreren Kiloampere erzeugen. Der Prüfstand nutzt einen Hochstromtransformator, um die benötigten Ströme bei sehr geringer Spannung (typischerweise $< 10\text{ V}$) in das Sammelschienen-System einzuspeisen. Für die Analyse der Fremdfeldbeeinflussung ist dies die ideale Voraussetzung: Die hohen Ströme erzeugen die realitätsnahen, starken Magnetfelder,

deren Kopplung auf die Messstromwandler untersucht werden soll. Wie in Abschnitt 2.5.1 detailliert beschrieben, wurde für die Messungen ein spezielles, modulares Kupferschienenensystem im Prüfstand installiert. Dieses System erlaubt es, die Messstromwandler schnell zu montieren und verschiedene geometrische Anordnungen (insbesondere unterschiedliche Phasenmittelabstände) zu realisieren, um deren Einfluss auf die Messgenauigkeit systematisch zu untersuchen.

2.4 Simulation

Für die Simulation wurden verschiedene Ansätze verfolgt. Zunächst kam ein in MATLAB implementiertes Skript zum Einsatz, das die Magnetfelder auf Grundlage des Biot-Savart-Gesetzes berechnete. Schnell zeigte sich jedoch, dass dieser Ansatz die physikalische Realität nur unzureichend abbildete. Daher wurde eine alternative Methode erforderlich. Nach einer ausführlichen Recherche geeigneter, kostenfreier Open-Source-Software für Magnetfeldsimulationen fiel die Wahl auf FEMM (Finite Element Method Magnetics). FEMM ist ein Programm, das magnetische Probleme mithilfe der FEM löst. Der entscheidende Vorteil gegenüber dem Biot-Savart-Ansatz liegt darin, dass FEMM nicht nur komplexe Leitergeometrien, sondern auch die nichtlinearen Materialeigenschaften ferromagnetischer Werkstoffe (z. B. $B(H)$ -Kennlinie und magnetische Sättigung) berücksichtigt. Genau diese Eigenschaften wurden beim reinen Biot-Savart-Modell vernachlässigt, was zu deutlichen Abweichungen führte. Daher wurde das Modell in FEMM neu aufgebaut, um die Sättigungseffekte realitätsnah abzubilden.

2.4.1 Maßgeschneiderte Simulationsumgebung

Für die spezifischen Anforderungen des Messaufbaus wurde auf Basis von FEMM eine maßgeschneiderte Softwarelösung entwickelt, die die Fremdfeldbeeinflussung gezielt abbildet. Diese Lösung stellt eine Weboberfläche (siehe Abbildung 2.1) bereit, über die sich die Simulationen definieren, parametrieren und starten lassen (siehe Abbildung 2.2). Die Oberfläche dient als einheitliche Vorlage (Template) und ermöglicht die standardisierte Erstellung von Simulationsmodellen für verschiedene Wandlertypen und Sammelschienenanordnungen. Da FEMM ausschließlich stationäre Fälle betrachtet, implementiert die Hilfssoftware ein Quasi-stationäres Modell, um die dynamischen Vorgänge anzunähern. Zu diskreten Zeitpunkten t_n innerhalb einer Netzperiode berechnet die Hilfssoftware die jeweiligen Momentanwerte der Phasenströme $i_{L1}(t_n)$, $i_{L2}(t_n)$ und $i_{L3}(t_n)$. Diese Werte werden automatisiert an FEMM übergeben, das für jeden Zeitschritt ein stationäres Magnetfeldproblem löst. Durch die Aneinanderreihung der Einzelergebnisse – insbesondere des magnetischen Flusses $\Psi(t_n)$ im Wandlerkern – lässt sich der zeitliche Verlauf über eine volle Periode rekonstruieren.

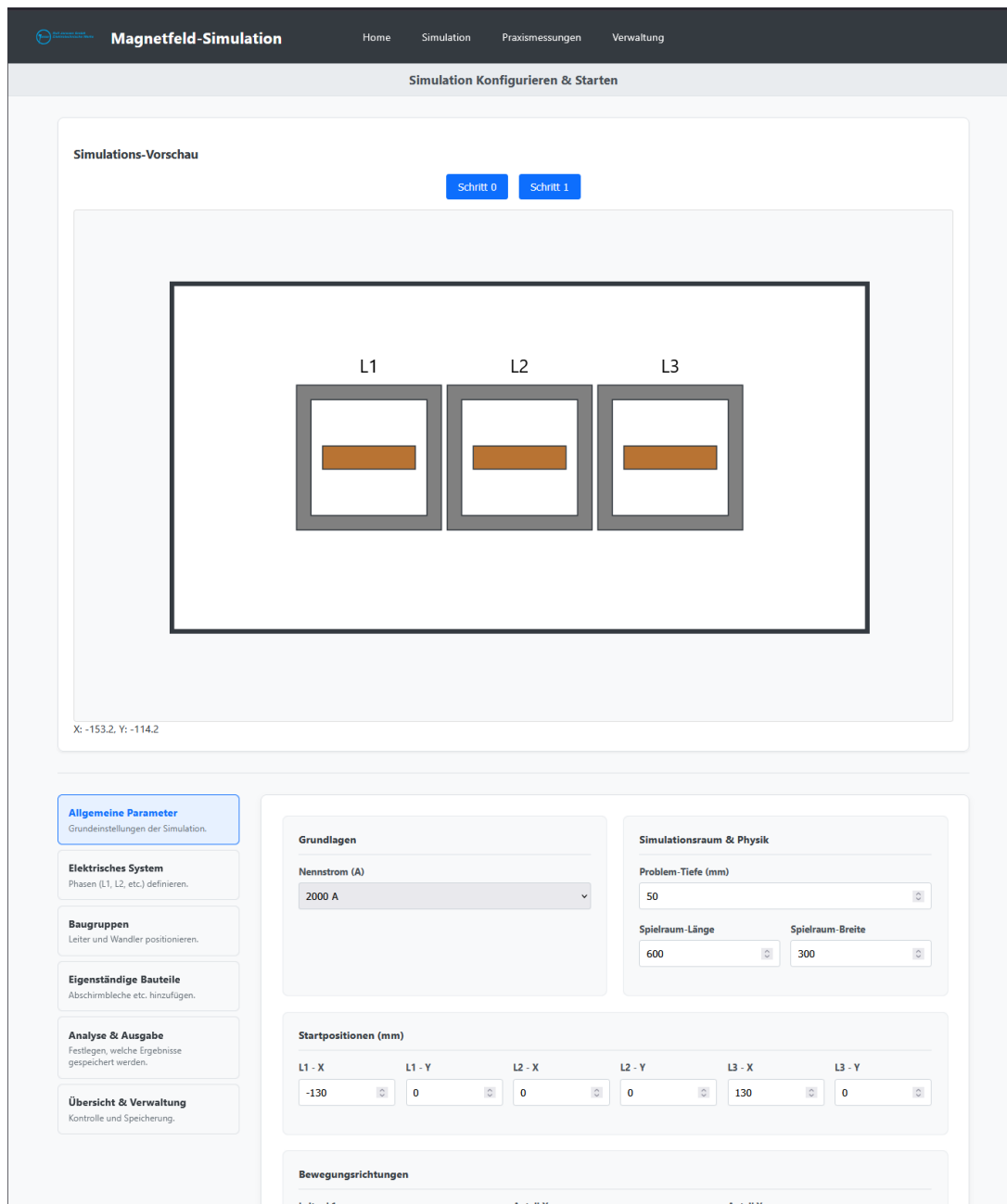


Abbildung 2.1: Weboberfläche der Simulationssoftware mit Vorschau des Modells

Grundlagen

Nennstrom (A)

2000 A

Simulationsraum & Physik

Problem-Tiefe (mm)

50

Spielraum-Länge

600

Spielraum-Breite

300

Startpositionen (mm)

L1 - X	L1 - Y	L2 - X	L2 - Y	L3 - X	L3 - Y
-130	0	0	0	130	0

Bewegungsrichtungen

Leiter L1	Anteil X	Anteil Y
Keine Bewegung	-1	-1
Leiter L2	Anteil X	Anteil Y
Keine Bewegung	0	1
Leiter L3	Anteil X	Anteil Y
Keine Bewegung	1	-1

Schrittweiten (mm)

Pos 1	Pos 2	Pos 3	Pos 4
80			

Analyse-Parameter

Vorgegebener Primärstrom 1 (A)	Vorgegebener Primärstrom 2 (A)	Vorgegebener Primärstrom 3 (A)
2000	2500	0
Phasenwinkel Start (°)	Phasenwinkel Ende (°)	Phasenwinkel Schritt (°)
0	180	15

1. simulation.json erstellen

Abbildung 2.2: Weboberfläche der Simulationssoftware mit Einstellmöglichkeiten für die Simulation

2.4.2 Detaillierter Modellaufbau

Der detaillierte Modellaufbau in FEMM erfolgte in einem zweidimensionalen Querschnitt, der die Anordnung der Sammelschienen und des Messstromwandlers abbildet:

- **Geometrie:** Die drei Phasenleiter wurden entsprechend ihrer realen Querschnittsabmessungen (z. B. 100 mm × 10 mm) und ihres Mittenabstands modelliert. Ebenso wurde der Ringkern des Messstromwandlers mit seinem exakten Innen- und Außendurchmesser sowie seiner Position relativ zu den Leitern nachgebildet.
- **Materialien:** Den Leitern wurde Kupfer mit seiner spezifischen elektrischen Leitfähigkeit zugewiesen, der Umgebungsraum als Luft ($\mu_r = 1$) definiert. Der ferromagnetische Wandlerkern erhielt eine nichtlineare B(H)-Kennlinie aus der FEMM-Materialbibliothek (z. B. M-19 Steel), um das Sättigungsverhalten realitätsnah zu erfassen.

2.5 Messung

Bei der Messung am Erwärmungsprüfstand sollen die Messstromwandler in verschiedenen geometrischen Anordnungen auf ihre Genauigkeit hin überprüft werden. Die Anordnung der Kupferschienen wurde für diese Messungen speziell angefertigt, wodurch sich die Messstromwandler möglichst einfach und schnell in den verschiedenen Positionen vermessen lassen.

2.5.1 Messaufbau

Ziel der Messungen ist es zu überprüfen, ob die Messstromwandler durch geometrische Anpassung weiterhin unter dem Einfluss von Fremdfeldern, die Anforderungen an die Genauigkeitsklasse der DIN-Norm 61869-2 einhalten. Die Grenzwerte für die Übersetzungsmessabweichung sind dazu in Tabelle 2.1 dargestellt.

Tabelle 2.1: Grenzwerte für Übersetzungsmessabweichung für Stromwandler für Messzwecke (Klassen 0,1 bis 1) nach DIN EN 61869-2

Genauigkeitsklasse	Übersetzungsmessabweichung			
	$\pm\%$ bei Strom (% von Bemessungsstrom)			
	5	20	100	120
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5
1	3,0	1,5	1,0	1,0

Zu diesem Zweck zeigt Abbildung 2.3 das spezialisierte Kupferschienensystem des Erwärmungsprüfstand. Dieser Aufbau ermöglicht die Simulation von zwei verschiedenen Phasenmittelabständen. Der Phasenmittelabstand bezeichnet den Abstand zwischen den Außenleitern. Dieses Maß wird durch den Hauptschalter bestimmt, an dem die Kupferschienen befestigt sind (im Erwärmungsprüfstand ist kein Hauptschalter verbaut). Das abgebildete System ist zweigeteilt:

- Links im Bild ist das Schienensystem für Ströme von 630 A bis 1250 A mit einem Phasenmittelabstand von 70 mm zu sehen.
- Rechts im Bild befindet sich das System für Ströme von 630 A bis 3200 A mit einem Phasenmittelabstand von 90 mm.

Ein drittes Schienensystem (für 3200 A bis 5000 A mit 210 mm Phasenmittelabstand) ist nicht dargestellt, da es gesondert verbaut werden muss. Um die Messstromwandler auf dem Schienensystem zu installieren, muss die Kurzschlussbrücke entfernt werden. Anschließend können die Wandler von unten auf die Schienen der jeweiligen Phasen geschoben werden.

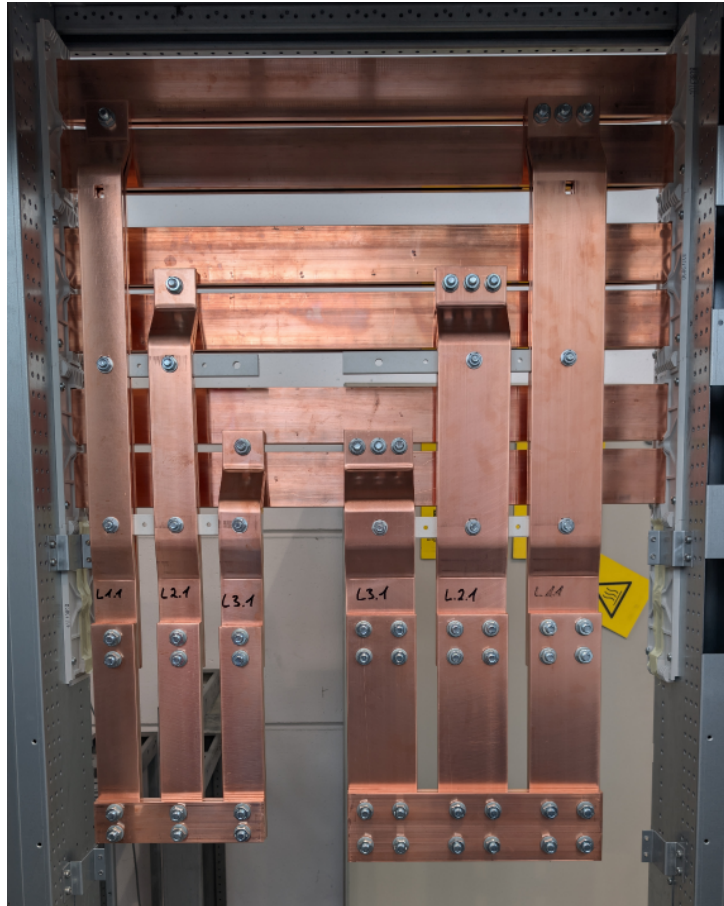


Abbildung 2.3: Messaufbau des Erwärmungsprüfstands ohne Messstromwandler

In der folgenden Abbildung 2.4 ist die Position 2 realisiert. Bei dieser Anordnung wird die Phase L2 durch die Installation einer zusätzlichen Kupferschiene mit einem Winkel nach vorne verlagert.

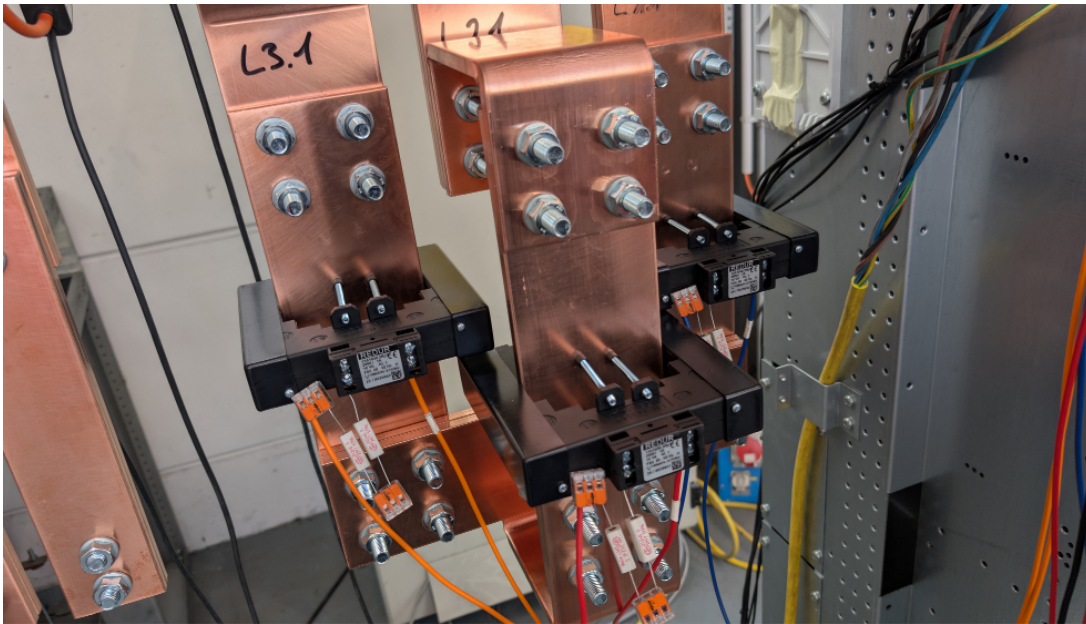


Abbildung 2.4: Messaufbau mit installierten Messstromwandlern in Position 2 (Phase L2 nach vorne verlagert)

Nach der Montage am Schienensystem werden die Messstromwandler verdrahtet. Dafür werden die Anschlüsse der Sekundärwicklung auf spezielle Wandler-Kurzschlussklemmen geführt. Diese Klemmen ermöglichen ein sicheres Kurzschließen der Sekundärseite, bevor ein Messgerät entfernt oder getauscht wird. Zudem bieten diese Klemmen die Möglichkeit, Messgeräte direkt über Standard-Labormessleitungen anzuschließen. Dieser Schritt ist aus Sicherheitsgründen essenziell: Ein Messstromwandler darf niemals auf der Sekundärseite offen betrieben werden. Im Leerlauf würden an den offenen Klemmen extrem hohe und gefährliche Spannungen entstehen. Diese lebensgefährlichen Spannungsspitzen können die Isolation des Wandlers zerstören und stellen eine ernste Gefahr durch Stromschlag dar. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Bürde des Wandlers. Messstromwandler besitzen eine definierte Nennbürde (meist in VA angegeben), die im Betrieb eingehalten werden muss, damit der Wandler korrekte Messergebnisse innerhalb seiner Genauigkeitsklasse liefert. Das Ersatzschaltbild in Abbildung 2.5 visualisiert die Komponenten der sekundärseitigen Gesamtimpedanz, die sich aus den Leitungswiderständen (R_{Kabel}), dem Messgerät (A) und dem, falls nötig, zusätzlichen Kompensationswiderstand ($R_{Kompensation}$) zusammensetzt.

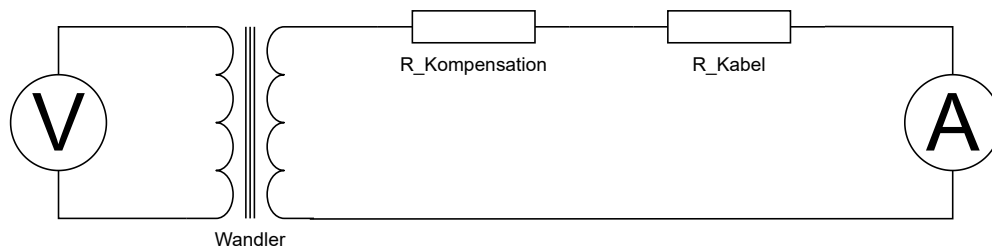


Abbildung 2.5: Ersatzschaltbild der sekundärseitigen Bürde (Kabel, Messgerät und ggf. Kompensation)

Früher waren analoge Dreheisenmesswerke der Standard zur Strommessung. Da diese Messwerke eine signifikante interne Bürde (Eigenverbrauch) aufweisen, wurden die Wandler entsprechend für eine höhere Ausgangsbürde ausgelegt. Heutzutage erfolgen Messungen primär mittels digi-

taler Messgeräte. Diese sind im Strommessbereich extrem niederohmig (die Impedanz liegt oft deutlich unter $1\ \Omega$). Wird ein älterer Wandler, der für eine hohe Bürde ausgelegt ist, mit einem modernen, niederohmigen Messgerät betrieben, wird die Nennbürde nicht mehr erreicht. Man spricht von einer Unterbürdung. Dieser Betriebszustand führt zu Messfehlern. Um dies zu kompensieren und den Wandler in seinem korrekten Arbeitsbereich zu betreiben, müssen zusätzliche Kompensationswiderstände in den Sekundärkreis geschaltet werden (siehe in Abbildung 2.5), um die Gesamtimpedanz auf die Nennbürde des Wandlers zu erhöhen.

2.5.2 Messprotokoll

Zur systematischen Erfassung und späteren Auswertung der Messdaten ist ein strukturiertes Messprotokoll erforderlich. Die Herausforderung besteht in der repetitiven Art der Genauigkeitsmessung: Für eine Vielzahl unterschiedlicher Messstromwandler mit verschiedenen Nennströmen müssen die identischen Messprozeduren (siehe Tabelle 2.1) durchgeführt und protokolliert werden. Ein erster Ansatz bestand darin, eine standardisierte Tabellenvorlage in Excel zu erstellen. Diese Vorlage wurde anschließend für jeden zu messenden Wandler manuell kopiert. Diese Methode erwies sich jedoch schnell als unpraktikabel und fehleranfällig. Die wesentlichen Nachteile waren:

- Mangelnde Wartbarkeit: Nachträgliche Änderungen oder Erweiterungen an der Vorlage (z.B. eine zusätzliche Berechnungsspalte) mussten mühselig in jeder einzelnen, bereits kopierten Datei manuell nachgepflegt werden.
- Schlechte Datenvergleichbarkeit: Ein direkter Vergleich der Messwerte verschiedener Wandler war nicht ohne Umwege (z.B. erneutes manuelles Zusammenkopieren) möglich, da die Daten dezentral in separaten Dateien vorlagen.

Aus diesen Gründen wurde ein zentralisiertes Messprotokoll-Tool in Excel konzipiert und mittels VBA (Visual Basic for Applications) umgesetzt. Dieses Tool trennt die Dateneingabe klar von der Datenspeicherung:

- Zentrales Dashboard: Eine grafische Oberfläche (Dashboard) dient als zentrale Steuer- und Eingabemaske. Hier kann der zu prüfende Messstromwandler ausgewählt und neue Messwerte können erfasst werden.
- Datenbank-Struktur: Die Stammdaten der Wandler (z.B. Typ, Hersteller, Nennstrom) sowie die erfassten Messwerte werden in separaten, als Datenbank fungierenden Tabellenblättern gespeichert.

Dieser Aufbau stellt die Datenkonsistenz sicher, vereinfacht die Wartung des Tools und ermöglicht jederzeit eine globale, vergleichbare Auswertung aller erfassten Messdaten.

320_MBS
ASK 101.4
Nennstrom: 2000 A
Bürde: 10 VA

Dashboard

Bürde

Magnetisierungskennlinie

Messgenauigkeit

SPEICHERN

Wandler auswählen: ASK 101.4

Hersteller	320_MBS
Nennbürde	10
Übersetzung	2000/1
Nennstrom	2000
Klasse	Kl.1
Überstrom	0
Wandler_ID	3202

LADEN

Abbildung 2.6: Dashboard des VBA-Messprotokolls

Das in Abbildung 2.6 gezeigte Dashboard dient als zentrale Startseite. Hier wird zu Beginn der Messung der Messstromwandler ausgewählt, der geprüft werden soll. Dessen Stammdaten – also Hersteller, Nennstrom, Nennbürde und Genauigkeitsklasse – lädt man direkt aus der Datenbank. Nach Abschluss aller Messungen und Berechnungen wird das Dashboard ebenfalls genutzt, um die bearbeiteten Daten wieder zu speichern.

320_MBS
ASK 101.4
Nennstrom: 2000 A
Bürde: 10 VA

Dashboard

Bürde

Magnetisierungskennlinie

Messgenauigkeit

SPEICHERN

Kompensation
6,00 VA

Kabelbürde
42,80 mVA

Messgerätekürde
1,00 VA

Wandler (CT)
10,00 VA

A

MODUL: BÜRDE

Bürde berechnen

Kabellänge [m]:	6,00
Querschnitt [mm ²]:	2,50
Messgerät [Ω]:	1,00
S _{ist} [VA]:	1,04
Status:	Warnung – Unterbürdung (ab Bürde erhöhen)
R _{komp} [Ω]:	6,90

Abbildung 2.7: Modul zur Bürdenberechnung

Das Modul zur Bürdenberechnung (Abbildung 2.7) ist entscheidend für die korrekte Konfiguration des Messaufbaus, damit die Nennbürde des Wandlers exakt getroffen wird. Man trägt hier die relevanten Parameter des Aufbaus ein: die Kabellänge zum Messgerät, den Leiterquerschnitt und den Innenwiderstand des Messgeräts. Das Tool berechnet daraus die resultierende Kabel- und Messgerätebürde. Vor allem ermittelt es automatisch den notwendigen Kompensationswi-

derstand (R_{komp}), der eingesetzt werden muss, um eine Unterbürdung zu verhindern und die Nennbürde präzise einzustellen.

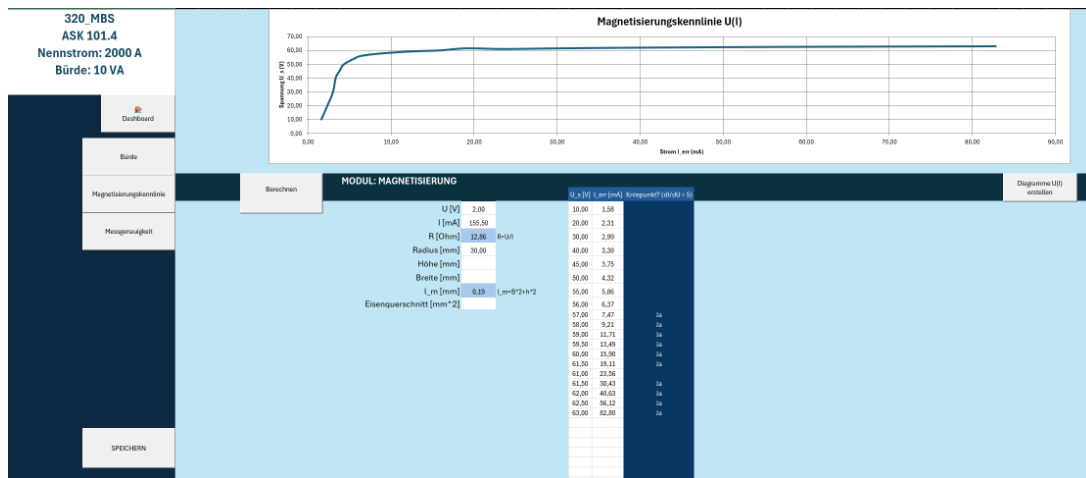


Abbildung 2.8: Modul zur Erfassung der Magnetisierungskennlinie

Das in Abbildung 2.8 dargestellte Modul dient der Erfassung des Sättigungsverhaltens des Wandlerkerns. Hier trägt man die gemessenen Wertepaare aus Spannung (U) und Magnetisierungsstrom (I) in die Tabelle ein. Zusätzlich werden die geometrischen Kerndaten (z.B. Radius, Höhe, Breite) erfasst, die das Tool für die Auswertung benötigt. Basierend auf den eingegebenen Daten wird die resultierende U(I)-Kennlinie direkt als Grafik dargestellt, was eine sofortige visuelle Beurteilung des Sättigungsverhaltens erlaubt. Die Tabelle unterstützt die Analyse zusätzlich, indem sie automatisch dabei hilft, den Knipunkt der Kennlinie zu identifizieren.

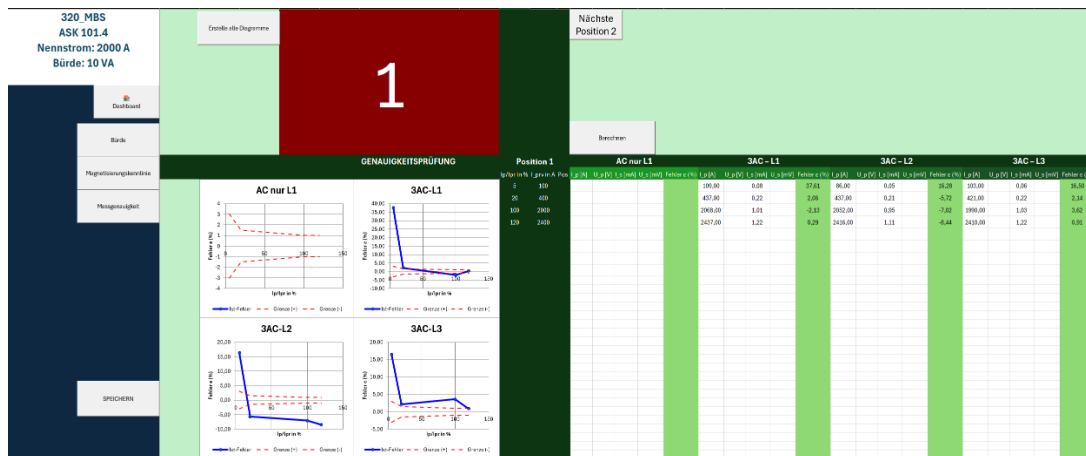


Abbildung 2.9: Modul zur Genauigkeitsprüfung

Abbildung 2.9 zeigt das Kernmodul zur Genauigkeitsprüfung. Es dient der Eingabe und automatisierten Auswertung der Messwerte. Nach Eingabe der Messwerte für die normativen Prüfpunkte (z.B. 5 %, 20 %, 100 % I_N) der Phasen berechnet das Tool den Übersetzungsfehler (ϵ). Die Grafik visualisiert sofort, ob die Messkurve (blau) innerhalb der Grenzl意思 (rot) liegt und der Wandler somit die Anforderungen seiner Genauigkeitsklasse erfüllt. Die Vorgehensweise zur Ermittlung dieser Messwerte ist in Abschnitt 2.5.3 beschrieben.

2.5.3 Messdurchführung

Die Messdurchführung am Prüfstand gliedert sich in zwei Hauptbereiche: die Ermittlung der Wandler-Basiskennwerte (B(H)-Kennlinie, Wicklungswiderstand) und die eigentliche Genauigkeitsmessung unter Last und Fremdfeldeinfluss.

Kennlinien- und Widerstandsmessung Zuerst werden die internen Parameter des Wandlers bestimmt. Für die Aufnahme der B(H)-Kennlinie muss die Primärseite des Wandlers unbeschaltet, also im Leerlauf, sein. Die Messung erfolgt sekundärseitig durch das Anlegen einer variablen AC-Spannung, wie in Abbildung 2.10 dargestellt. Als Spannungsquelle diente eine regelbare AC-Quelle (Typ: Kocos Artis 600).

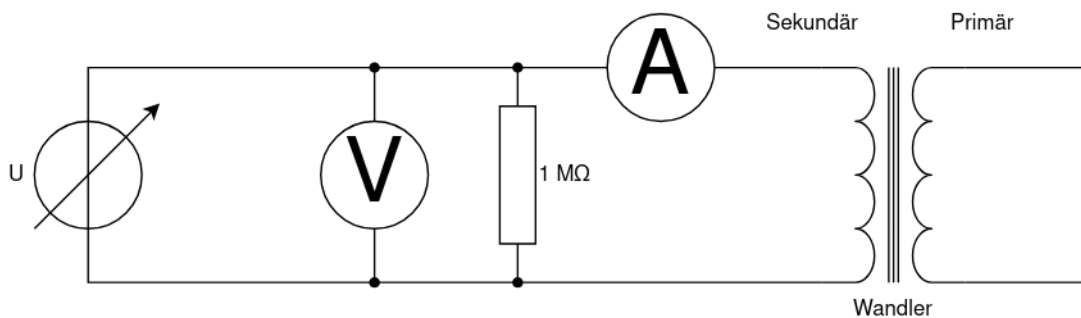


Abbildung 2.10: Messschaltung zur Aufnahme der Magnetisierungskennlinie

Parallel zur Sekundärwicklung wird ein hochohmiger Widerstand geschaltet. Dieser Schutzwiderstand begrenzt die beim Ummagnetisieren des Kerns entstehenden Stromspitzen und schützt so die angeschlossenen Messgeräte. Bei der Messdurchführung wird die Spannung schrittweise von einem niedrigen Wert beginnend erhöht, bis die magnetische Sättigung des Kerns deutlich eintritt. Um den Verlauf der Kennlinie im Bereich des Kniefunkts präzise abzubilden, wurden die Spannungsschritte in dieser Region bewusst verkleinert. Zusätzlich wurde der Widerstand der Sekundärwicklung (R_{CT}) bestimmt. Hierfür wurde das Prüfgerät (Kocos Artis 600) als Gleichspannungsquelle konfiguriert. Aus den gemessenen Werten einer stabilen Gleichspannung und des resultierenden Gleichstroms wurde der Widerstand nach dem Ohm'schen Gesetz berechnet.

Genauigkeitsmessung Nach der Ermittlung der Basiskennwerte erfolgt die zentrale Genauigkeitsmessung am Erwärmungsprüfstand. Dazu wird der Messstromwandler zunächst in der ersten geometrischen Anordnung (z.B. Position 1) auf dem Kupferschienensystem montiert. Anschließend werden nacheinander die in der Norm (Tabelle 2.1) geforderten Prüfströme (z.B. 5 %, 20 %, 100 % und 120 % des Nennstroms) auf die Primärseite aufgeprägt. Für jeden einzelnen Prüfpunkt und für jede Phase (L1, L2, L3) werden die exakten Ströme der Primär- und Sekundärseite mithilfe eines Referenzmessgeräts erfasst. Diese ermittelten Messwertpaare werden in das VBA-Messprotokoll (siehe Abbildung 2.9) übertragen, welches daraus den Fehler berechnet. Um den Einfluss der Fremdfelder durch die geometrische Anordnung zu untersuchen, wird der Messaufbau anschließend umgebaut. Beispielsweise wird, wie in Abbildung 2.4 gezeigt, die Anordnung für Position 2 realisiert, bei der die mittlere Phase L2 nach vorne verlagert ist. Nach dem Umbau wird der gesamte Genauigkeits-Messzyklus für diese Position wiederholt. Dieser Prozess wird für alle zu untersuchenden Wandler und geometrischen Anordnungen iteriert.

3 Reflexion

Dieses Kapitel fasst die gewonnenen Erkenntnisse der Praxisphase zusammen und ordnet die Ergebnisse in den Gesamtkontext ein. Dabei werden sowohl der fachliche Kompetenzzuwachs als auch die bewältigten Herausforderungen und daraus resultierende Optimierungspotenziale beleuchtet.

3.1 Was habe ich gelernt?

Während der Praxisphase konnte ich meine Kenntnisse in mehreren Bereichen erheblich erweitern. Im Bereich der **Softwareentwicklung** habe ich meine Programmierfähigkeiten durch zwei zentrale Projekte auf eine neue Ebene gebracht. Die Entwicklung des VBA-Tools in Excel zur systematischen Messdatenerfassung (Messprotokoll) schulte meine Fähigkeiten in der strukturierten Programmierung und im Datenbankdesign. Parallel dazu erforderte die Konzeption der maßgeschneiderten Simulationsumgebung (Webserver) Kenntnisse in Webtechnologien, um die FEMM-Software anzusteuern und die Simulationen zu parametrieren. Fachlich habe ich ein tiefes Verständnis für die **Magnetfeldsimulation** entwickelt. Die größte Herausforderung – und damit der größte Lerneffekt – bestand darin, die stationäre FEMM-Software durch die Web-Anwendung für Quasi-stationäres Modelle nutzbar zu machen. Im praktischen Bereich der **Messtechnik** habe ich den sicheren Umgang mit dem Erwärmungsprüfstand und professioneller Messtechnik erlernt. Dazu gehörte der normgerechte Aufbau nach DIN EN 61869-2, die korrekte Konfiguration der Bürde (inklusive Kompensationswiderstände) und die systematische Durchführung von Genauigkeitsmessungen unter verschiedenen geometrischen Anordnungen. Theoretisch konnte ich mein im Studium erworbenes Wissen über den **Elektromagnetismus** stark vertiefen. Die intensive Auseinandersetzung mit der Fremdfeldproblematik, dem Induktionsgesetz und der realen Funktionsweise von Messstromwandlern hat die theoretischen Grundlagen greifbar und praktisch anwendbar gemacht.

3.2 Was lief nicht so gut?

Zu Beginn der Simulationsphase gab es Herausforderungen. Der erste Ansatz, die Magnetfeldkopplung mittels MATLAB und dem Biot-Savart-Gesetz zu berechnen, erwies sich als nicht zielführend. Dieses Modell konnte die physikalische Realität, insbesondere die nichtlinearen Sättigungseffekte der ferromagnetischen Wandlerkerne, nicht ausreichend abbilden. Dieser Umweg kostete wertvolle Zeit.

Eine weitere Schwierigkeit war die Einarbeitung in FEMM. Die Software ist zwar leistungsstark, aber auf stationäre 2D-Probleme beschränkt. Die Notwendigkeit, daraus eine Quasi-stationäres Modelle zu entwickeln, erforderte die Konzeption einer zusätzlichen Software-Schicht (den Webserver), was den anfänglichen Aufwand erhöhte. Im messtechnischen Teil war die manuelle Protokollierung der Daten zu Beginn unstrukturiert. Wie in Abschnitt 2.5.2 beschrieben, erwies sich das Kopieren von Excel-Vorlagen als fehleranfällig und unpraktikabel für den Datenvergleich. Diese ineffiziente Methode musste überarbeitet werden, was zur Entwicklung des VBA-Tools führte.

3.3 Wie hätte man es besser machen können?

Rückblickend hätte der Simulationsprozess effizienter gestaltet werden können. Statt Zeit in den MATLAB-Ansatz zu investieren, wäre eine frühere und tiefere Recherche nach etablierten FEM-Tools sinnvoll gewesen. Die Erkenntnis, dass die Nichtlinearität der $B(H)$ -Kennlinie der entscheidende Faktor ist, hätte den Fokus direkt auf ein Werkzeug wie FEMM lenken müssen. In diesem Zusammenhang steht auch die Einarbeitung in VBA. Diese Technologie war mir aus dem

Studium oder Privatem nicht bekannt und wurde erst in der Praxisphase erlernt. Eine frühere Vermittlung dieser Kenntnisse seitens der Hochschule, etwa als praxisvorbereitende Aufgabe, wäre eine große Bereicherung für das Berufsleben. Rückblickend hätte dies nicht nur die Erstellung des Messprotokolls beschleunigt; auch die Simulationsumgebung (der "Webserver") hätte sich womöglich in kürzerer Zeit und mit einer ähnlichen grafischen Oberfläche direkt in Excel mittels VBA realisieren lassen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit analysierte die Fremdfeldbeeinflussung von Messstromwandlern in Niederspannungsschaltanlagen, die durch die kompakte Bauweise und hohe Ströme benachbarter Leiter entsteht. Es wurde erfolgreich eine Methodik zur Untersuchung dieser Störeinflüsse entwickelt, die zwei Kernkomponenten kombiniert: eine maßgeschneiderte, Quasi-stationäres Modelle Simulationsumgebung auf Basis von FEMM und ein systematisches Messverfahren am Erwärmungsprüfstand. Für die strukturierte Datenerfassung wurde ein VBA-basiertes Messprotokoll-Tool realisiert.

Ausblick

Das validierte Simulationsmodell bietet eine solide Grundlage für zukünftige Optimierungen. Als nächste Schritte könnten die Untersuchungen auf ein 3D-FEM-Modell erweitert werden, um auch Streufelder und komplexe Geometrien noch exakter abzubilden. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen kann die Simulationsumgebung nun genutzt werden, um konkrete Konstruktionsrichtlinien und Mindestabstände für die Anordnung von Messstromwandlern in zukünftigen Schaltanlagen-Designs abzuleiten. Dies ermöglicht es der Rolf Janssen GmbH, die Messgenauigkeit bereits in der Planungsphase sicherzustellen und kostspielige Messfehler im Feld zu vermeiden.

Eidesstattliche Versicherung

Ich, der Unterzeichnende, erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Quellenangaben und Zitate sind richtig und vollständig wiedergegeben und in den jeweiligen Kapiteln und im Literaturverzeichnis wiedergegeben.

Ferner erkläre ich, dass zur sprachlichen Verbesserung und Korrektur von Textpassagen künstliche Intelligenz (KI) unterstützend eingesetzt wurde. Die inhaltliche Erstellung der Arbeit erfolgte eigenständig.

Die vorliegende Arbeit wurde nicht in dieser oder einer ähnlichen Form ganz oder in Teilen zur Erlangung eines akademischen Abschlussgrades oder einer anderen Prüfungsleistung eingereicht. Mir ist bekannt, dass falsche Angaben im Zusammenhang mit dieser Erklärung strafrechtlich verfolgt werden können.

Ort, Datum

Aurich, 09. Dezember 2025

Unterschrift

Oliver-Luca Schmidt