



University of Applied Sciences

**HOCHSCHULE
EMDEN·LEER**



**Rolf Janssen GmbH
Elektrotechnische Werke**

PRAXISPHASENBERICHT

Fremdfeldbeeinflussung auf Messstromwandler in der Niederspannung

Studiengang Elektrotechnik

Vorgelegt von

Oliver Schmidt

Matrikelnummer: 7023462

Emden, 12. November 2025

Betreut von

Dr. Sandro Günter

Dipl.-Ing. Holger Kuhlemann

Dipl.-Ing. Rainer Ludewig

Simon Westerbur, B. Eng.

Zusammenfassung

Hier fasst du deine Arbeit kurz und prägnant zusammen.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Abbildungsverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
Glossar	V
1. Vorstellung des Unternehmens	1
2. Analyse der Fremdfeldbeeinflussung von Messstromwandlern	3
2.1. Motivation	3
2.2. Vorgehen	3
2.2.1. Vorbereitung	3
2.3. Erwärmungsprüfstand	4
2.4. Simulation	4
2.4.1. Maßgeschneiderte Simulationsumgebung	4
2.4.2. Detaillierter Modellaufbau	7
2.5. Messung	7
2.5.1. Messaufbau	7
2.5.2. Messprotokoll	10
2.5.3. Messdurchführung	13
2.6. Ergebnisse	15
3. Reflexion	16
3.1. Was habe ich gelernt?	16
3.2. Was lief nicht so gut?	16
3.3. Wie hätte man es besser machen können?	17
4. Zusammenfassung und Ausblick	18
A. Zusätzliche Messdaten und Grafiken	19

Abbildungsverzeichnis

1.1.	Firmenzentrale der Rolf Janssen GmbH in Aurich	1
2.1.	Weboberfläche der Simulationssoftware mit Vorschau des Modells	5
2.2.	Weboberfläche der Simulationssoftware mit Einstellmöglichkeiten für die Simulation	6
2.3.	Messaufbau des Erwärmungsprüfstands ohne Messstromwandler	8
2.4.	Messaufbau mit installierten Messstromwandlern in Position 2 (Phase L2 nach vorne verlagert)	9
2.5.	Ersatzschaltbild der sekundärseitigen Bürde (Kabel, Messgerät und ggf. Kompensation)	10
2.6.	Dashboard des VBA-Messprotokolls	11
2.7.	Modul zur Bürdenberechnung	12
2.8.	Modul zur Erfassung der Magnetisierungskennlinie	12
2.9.	Modul zur Genauigkeitsprüfung	13
2.10.	Messschaltung zur Aufnahme der Magnetisierungskennlinie	14

Abkürzungsverzeichnis

FEM Finite-Elemente-Methode.

I_N Nennstrom.

L1 Phase L1.

L2 Phase L2.

L3 Phase L3.

VDE Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik.

Glossar

ACV-Messverfahren Ein Messverfahren, das Wechselspannung und -strom nutzt, um frequenzabhängige Eigenschaften eines Bauteils zu bestimmen. Bei Messstromwandler dient es typischerweise zur Ermittlung von Induktivitäten und Eisenverlusten..

B(H)-Kennlinie Auch Magnetisierungskennlinie genannt. Beschreibt den nichtlinearen Zusammenhang zwischen der magnetischen Flussdichte (B) und der magnetischen Feldstärke (H) in einem ferromagnetischen Material. Sie ist essenziell zur Modellierung der Magnetische Sättigung..

Biot-Savart-Gesetz Ein Grundgesetz der Magnetostatik, das die Stärke und Richtung des Magnetfeldes berechnet, das von einem konstanten elektrischen Strom (DC) erzeugt wird..

Bürde Die Bürde beschreibt die an den Sekundärkreis eines Messwandlers angeschlossene Last (Impedanz). Sie wird üblicherweise in Voltampere (VA) angegeben und ist entscheidend für die Einhaltung der Genauigkeitsklasse..

DCV-Messverfahren Ein Messverfahren, das Gleichspannung und -strom verwendet, um rein ohmsche Widerstände zu messen. Bei einem Messstromwandler wird es zur präzisen Bestimmung des Kupferwiderstandes der Sekundärwicklung eingesetzt..

Erwärmungsprüfstand Ein spezieller Prüfaufbau zur Verifizierung des thermischen Verhaltens von Schaltanlagen nach VDE-Norm. Mittels eines regelbaren Hochstromtransformators wird der Nenn- oder Überlaststrom bei sehr geringer Spannung (typischerweise unter 10 V) in die Hauptstrombahnen eingespeist. Dies simuliert die reale Wärmeverlustleistung (I^2R) im Betrieb und ermöglicht die Überprüfung, ob die entstehende Wärme zuverlässig abgeführt wird und keine unzulässig hohen Temperaturen an Komponenten wie Sammelschienen oder Schaltgeräten auftreten..

FEMM Finite Element Method Magnetics. Eine quelloffene Software zur Simulation von 2D- und achsensymmetrischen Problemen der Elektrostatik und Magnetostatik. Sie wird häufig in der Elektrotechnik zur Analyse von magnetischen Feldern in Geräten wie Transformatoren oder Motoren eingesetzt..

Fremdfeld Ein magnetisches oder elektrisches Feld, das von einer externen Quelle erzeugt wird und als Störgröße auf ein betrachtetes System einwirkt. Das Einwirken dieses Feldes (die Einkopplung) auf einen Messstromwandler kann dessen Messgenauigkeit beeinträchtigen..

Genauigkeitsklasse Gibt die maximal zulässige prozentuale Messabweichung eines Messwandlers unter Nennbedingungen an. Gängige Klassen sind z.B. 0,2, 0,5 oder 1..

Induktionsgesetz Das Faradaysche Induktionsgesetz ist eine physikalische Grundlage der Elektrotechnik. Es besagt, dass eine zeitliche Änderung des magnetischen Flusses durch eine Leiterschleife eine elektrische Spannung in dieser Schleife induziert. Dies ist das Funktionsprinzip von Transformatoren und somit auch von Messstromwandlern..

Kompensationswiderstand Ein zusätzlich in den Sekundärkreis eines Messstromwandler geschalteter ohmscher Widerstand. Er dient dazu, eine Unterbürdung zu kompensieren, indem die Gesamtimpedanz künstlich auf den Wert der Nennbürde angehoben wird..

Leerlaufbetrieb (Stromwandler) Der unzulässige Betriebszustand eines Messstromwandler, bei dem die Sekundärwicklung offen ist (keine Bürde angeschlossen). Dies führt zu extrem hohen, gefährlichen Spannungsspitzen an den Sekundärklemmen und zur Zerstörung des Wandlers..

Leiter Ein elektrisch leitendes Material, das dazu dient, elektrischen Strom zu führen. In Schaltanlagen sind dies typischerweise Sammelschienen oder Kabel..

Magnetische Sättigung Ein Effekt in ferromagnetischen Werkstoffen, bei dem die magnetische Flussdichte (B) auch bei einer starken Erhöhung der äußeren magnetischen Feldstärke (H) nicht weiter ansteigt. Der Kern kann keinen weiteren magnetischen Fluss aufnehmen..

MATLAB Eine kommerzielle Software von The MathWorks, Inc. zur Lösung mathematischer Probleme und zur numerischen Simulation. Der Name steht für „Matrix Laboratory“..

Messstromwandler Ein spezieller Transformator, der hohe Primärströme in ein proportionales, kleines und für Messgeräte verarbeitbares Sekundärsignal umwandelt. Im Fachjargon oft verkürzt als 'Wandler' bezeichnet..

Nennstrom Der vom Hersteller festgelegte Wert des Primärstroms (I_N), für den ein Messstromwandler ausgelegt ist und bei dem er seine spezifizierte Genauigkeitsklasse einhält..

Niederspannung Bezeichnet nach IEC 60038 Wechselspannungen (AC) bis 1000 V und Gleichspannungen (DC) bis 1500 V. In diesem Bereich sind die meisten öffentlichen und industriellen Stromnetze angesiedelt..

Niederspannungsschaltanlage Eine Anlage zur Verteilung elektrischer Energie im Bereich der Niederspannung. Sie kombiniert Schaltgeräte zum Verbinden und Trennen von Stromkreisen mit Schutz- und Messeinrichtungen wie Sicherungen und Messstromwandlern..

Phasenmittelabstand Der Mittenabstand zwischen den Sammelschienen oder Leiter benachbarter Phasen (z.B. von L1 zu L2) in einem Drehstromsystem..

Quasi-stationäres Modell Ein Simulationsansatz, um ein zeitdynamisches Problem (z.B. 50-Hz-Wechselstrom) durch eine Serie von diskreten, zu einzelnen Zeitpunkten berechneten stationären (statischen) Zuständen anzunähern..

Sammelschiene Ein massiver elektrischer Leiter aus Kupfer oder Aluminium in einer Schaltanlage, der zur Verteilung hoher Ströme auf mehrere Abgänge dient..

Unterbürdung Ein Betriebszustand, bei dem die angeschlossene sekundäre Bürde eines Messstromwandler signifikant niedriger ist als dessen Nennbürde. Dies tritt häufig bei der Verwendung moderner, niederohmiger Digitalmessgeräte mit älteren Wählern auf und kann zu Messfehlern führen..

Wandler-Kurzschlussklemme Eine spezielle Anschlussklemme für die Sekundärseite von Messstromwandler. Sie verfügt über einen Mechanismus (z.B. eine Brücke oder einen Schieber), um die Sekundärwicklung vor dem Trennen des Messgeräts sicher kurzzuschließen und so den gefährlichen Leerlaufbetrieb (Stromwandler) zu verhindern..

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 komplexen elektrotechnischen und leittechnischen Anlagen. Das Leistungsportfolio ist dabei breit diversifiziert 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 bereit, die eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) 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 Fertigungs-

tiefe. 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, welche die Einhaltung der Genauigkeitsklasse beeinträchtigen kann und somit für Verrechnungszwecke nicht mehr geeignet 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 Nennströme 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 wissenschaftlicher Artikel (Paper) und Fachbücher. Ergänzend

wurden erste analytische Berechnungen zur Magnetfeldeinkopplung mittels MATLAB durchgeführt.

2.3. Erwärmungsprüfstand

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-Gesetz-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 Finiten-Elemente-Methode (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, erweitert die Hilfssoftware diesen Ansatz zu einem Quasi-stationären Modell. Die Hauptausforderung bei der Simulation bestand darin, die zeitharmonischen 50-Hz-Wechselfelder der Sammelschienen darzustellen. 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.

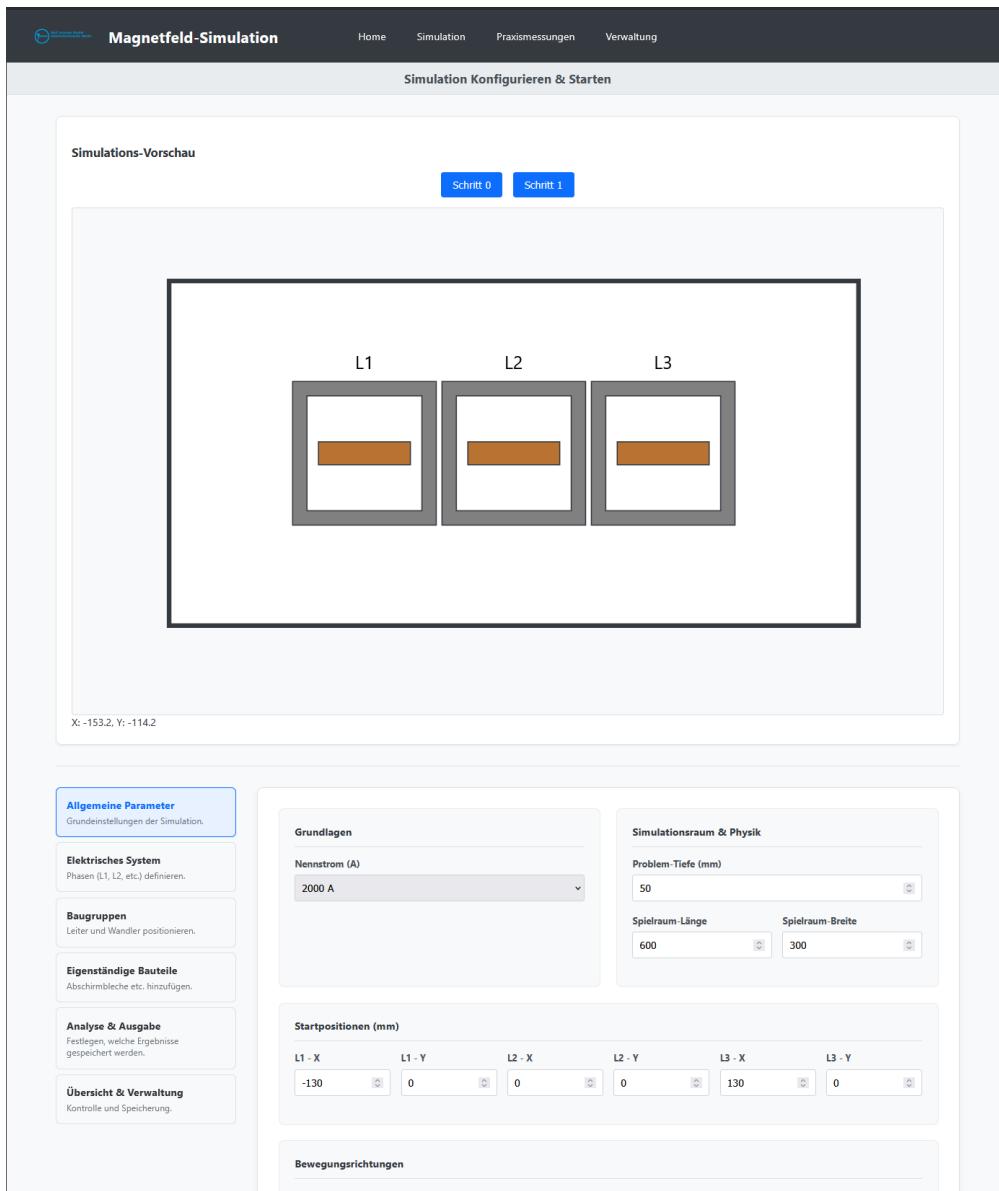


Abbildung 2.1: Weboberfläche der Simulationssoftware mit Vorschau des Modells

Grundlagen	Simulationsraum & Physik
Nennstrom (A)	Problem-Tiefe (mm)
2000 A	50
	Spielraum-Länge Spielraum-Breite
	600 300

Startpositionen (mm)

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

Bewegungsrichtungen

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

Schrittweiten (mm)

Pos 1 80	Pos 2	Pos 3	Pos 4
-------------	-------	-------	-------

Analyse-Parameter

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

- Geometrie: Die drei Phasenleiter wurden entsprechend ihrer realen Querschnittsbmessungen (z. B. 100 mm × 10 mm) und ihres Mittenabstands modelliert. Ebenso wurde der Ringkern des Messstromwandler mit seinem exakten Innen- und Außen-durchmesser sowie seiner Position relativ zu den Leitern nachgebildet.
- Materialien: Den Leiter 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 Magnetische 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 auch unter dem Einfluss von Fremdfeldern, wie sie in einem Drehstromsystem durch benachbarte Phasen entstehen, die Genauigkeitsanforderungen 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				
	±% 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 Er-

wärmungsprüfstand. Dieser Aufbau ermöglicht die Simulation von zwei verschiedenen Phasenmittelabstände. 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.

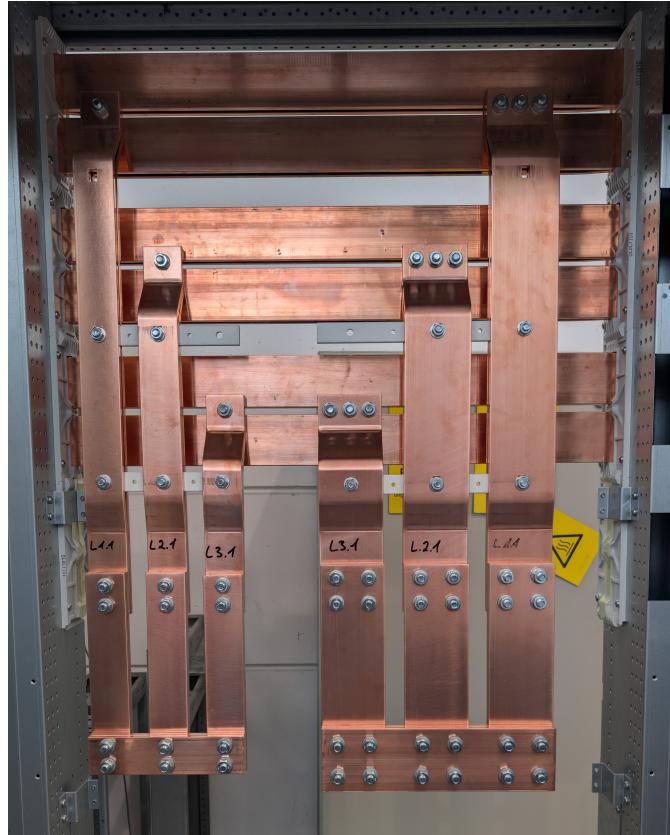


Abbildung 2.3: Messaufbau des Erwärmungsprüfstands ohne Messstromwandler

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 (Leerlaufbetrieb (Stromwandler)). 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.

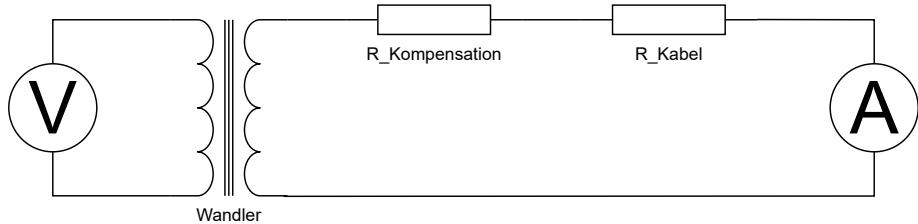


Abbildung 2.5: Ersatzschaltbild der sekundärseitigen Bürde (Kabel, Messgerät und ggf. Kompensation)

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 digitaler Messgeräte. Diese sind im Strommessbereich extrem niederohmig (die Impedanz liegt oft deutlich unter 1Ω). 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 $R_{Kompensation}$ 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.

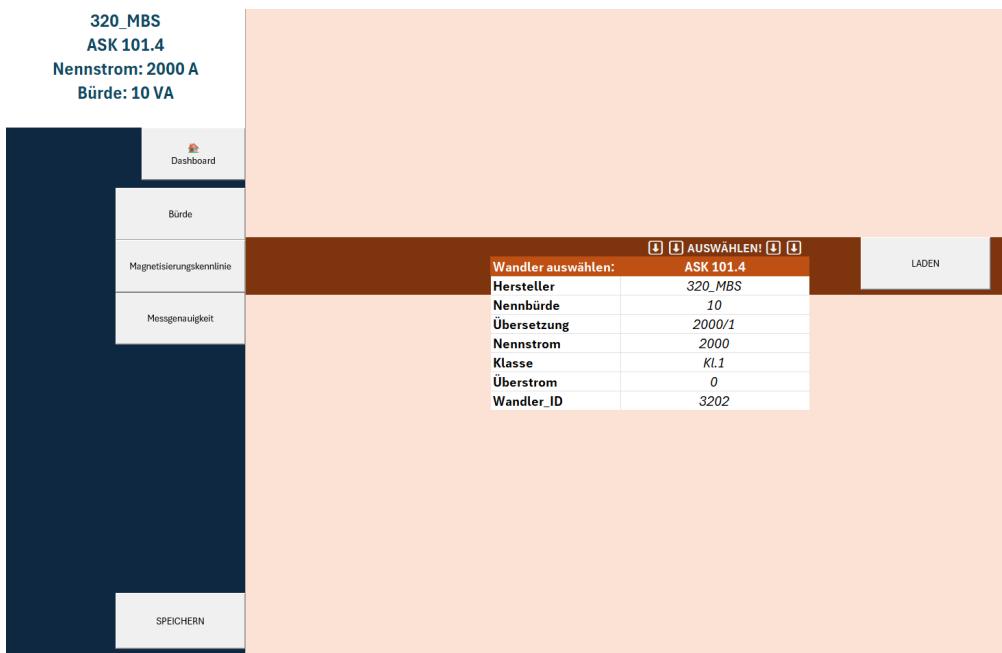


Abbildung 2.6: Dashboard des VBA-Messprotokolls

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 Klasse – lädt man direkt aus der Datenbank. Nach Abschluss aller Messungen und Berechnungen wird das Dashboard ebenfalls genutzt, um die bearbeiteten Daten wieder zu speichern.

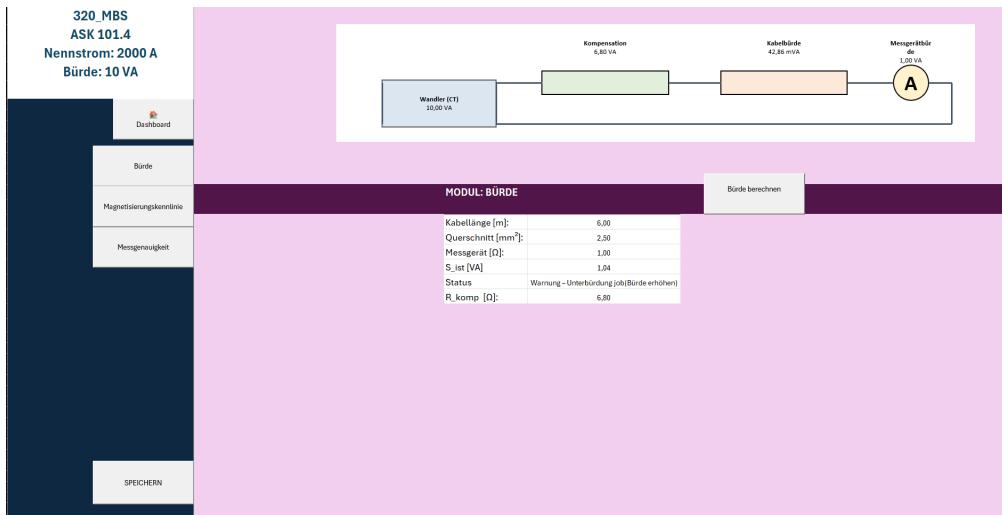


Abbildung 2.7: Modul zur Bürdenberechnung

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 Kompensationswiderstand (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 Kniepunkt der Kennlinie zu identifizieren.

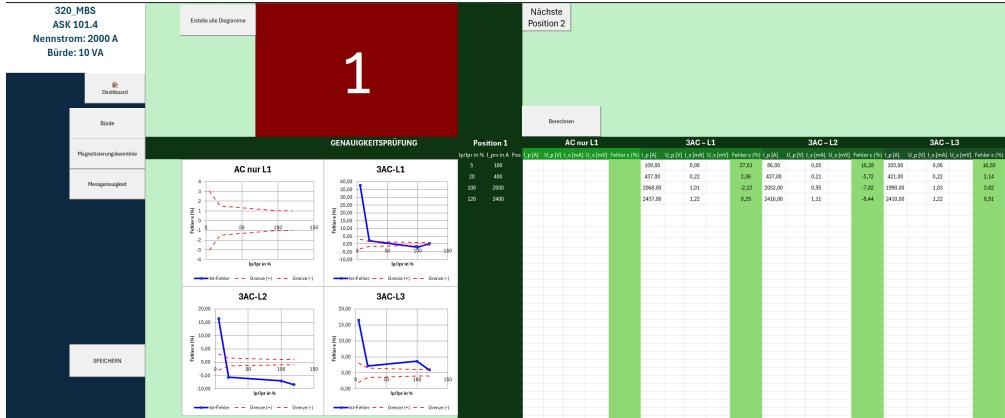


Abbildung 2.9: Modul zur Genaugkeitsprüfung

Abbildung 2.9 zeigt das Kernmodul zur Genaugkeitsprüfung. 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 Grenzlinien (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 (Magnetisierungskennlinie, Wicklungswiderstand) und die eigentliche Genaugkeitsmessung unter Last und Fremdfeldeinfluss.

Kennlinien- und Widerstandsmessung Zuerst werden die internen Parameter des Wandlers bestimmt. Für die Aufnahme der Magnetisierungskennlinie 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).

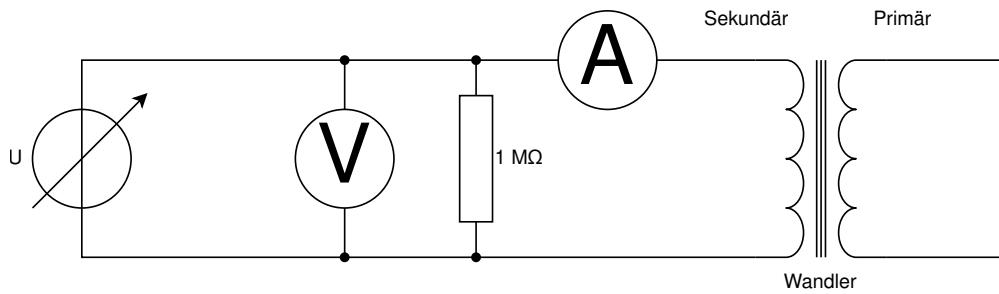


Abbildung 2.10: Messschaltung zur Aufnahme der Magnetisierungskennlinie

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 Sättigung des Kerns deutlich eintritt. Um den Verlauf der Kennlinie im Bereich des Kniepunkts 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 Nennstrom) 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.

2.6. Ergebnisse

Der grobe Aufbau der Simulation gliedert sich in drei Kategorien: die Erstellung der Bauteile, die Durchführung der Simulation und die visuelle Darstellung der Simulationsergebnisse.

3. Reflexion

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-stationäre 50-Hz-Wechselfelder nutzbar zu machen. Ich verstehe nun detailliert, wie komplexe physikalische Vorgänge, inklusive nichtlinearer Materialeigenschaften (BH-Kennlinien) und Sättigungseffekte, in einem 2D-Modell abgebildet werden.

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 Kompressionswiderständen) und die systematische Durchführung von Genauigkeitsmessungen unter verschiedenen geometrischen Anordnungen.

Theoretisch konnte ich mein im Studium erworbene 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-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-stationäre 50-Hz-Simulation 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 unstruk-

turiert. 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 Privattem 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 "Webbrowser") hätte sich womöglich in kürzerer Zeit und mit einer ähnlichen grafischen Oberfläche direkt in Excel mittels VBA realisieren lassen.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Hier fasst du die zentralen Erkenntnisse deiner Arbeit zusammen und gibst einen Ausblick auf mögliche weiterführende Schritte.

A. Zusätzliche Messdaten und Grafiken

Literaturverzeichnis

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. 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.

Mit ist bekannt, dass falsche Angaben im Zusammenhang mit dieser Erklärung strafrechtlich verfolgt werden können.

Ort, Datum

Unterschrift