

BACHELORARBEIT

im Studiengang Elektrotechnik

Fremdfeldbeeinflussung auf Messstromwandler in der Niederspannung

Vorgelegt von:

Oliver Schmidt

Matrikelnummer: 7023462

Durchgeführt bei:

Rolf Janssen Elektrotechnische Werke GmbH
Emsstraße 4
26603 Aurich

Erstprüfer: Dr. Sandro Günter

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Rainer Ludewig

Abgabedatum: Emden, den 6. Januar 2026

Abstract

Inhaltsverzeichnis

Abstract	I
Abbildungsverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung	1
1.3 Zielsetzung	1
1.4 Vorgehensweise	1
2 Theoretische Grundlagen und aktueller Forschungsstand	2
2.1 Grundlagen induktiver Messstromwandler	2
2.2 Aufbau und Bauformen	2
2.2.1 Unterscheidung zwischen Mess- und Schutzstromwandlern	3
2.2.2 Kompensationswicklungen	3
2.2.3 Normative Anforderungen und Genauigkeitsklassen	5
2.2.4 Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers	5
2.3 Physikalisches Wirkprinzip	6
2.4 Entstehung und Ausbreitung magnetischer Störfelder	7
2.5 Physikalische Auswirkungen von Fremdfeldern auf den Wandlerkern	8
2.6 Messabweichung und Fehlerfortpflanzung	8
3 Versuchsaufbau und Methodik	9
3.1 Prüfung der Genauigkeit von Messstromwandlern	9
3.1.1 Fehlwinkel	9
3.1.2 Übersetzungsmessabweichung	10
3.2 Beschreibung des Hochstrom-Prüfstands	10
3.3 Messtechnisches Konzept	10
4 Experimentelle Untersuchung	11
4.1 Inbetriebnahme und Plausibilitätsprüfung	11
4.2 Optimierung der Messdatenerfassung	11
4.3 Validierung des optimierten Systems	11
5 Auswertung und Diskussion	12
5.1 Durchführung der Messreihen am optimierten Prüfstand	12
5.2 Messergebnisse: Einfluss der Leitergeometrie	12
5.3 Messergebnisse: Vergleich der Wandlertechnologien	12
5.4 Auswertung der Messergebnisse	12

6 Zusammenfassung der Ergebnisse	13
6.1 Bewertung der Prüfstands-Optimierung	13
6.2 Konstruktionsempfehlung für zukünftige Wandler-Einbauten	13
7 Ausblick	14
A Anhang	15
Eigenständigkeitserklärung	16

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematischer Aufbau eines Aufsteckstromwandlers	2
2.2	Schematischer Aufbau eines Wandlers mit zusätzlichen Kompensationswicklungen	4
2.3	Schematische Darstellung der zentralen und exzentrischen Positionierung der Kupferschiene	5
2.4	Vollständiges Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers	6
2.5	Vollständiges Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers	6
2.6	Vergleich der Simulationsergebnisse bei zentraler und exzentrischer Leiteranordnung im Wandler	7

1 Einleitung

- 1.1 Motivation**
- 1.2 Problemstellung**
- 1.3 Zielsetzung**
- 1.4 Vorgehensweise**

2 Theoretische Grundlagen und aktueller Forschungsstand

2.1 Grundlagen induktiver Messstromwandler

Ein induktiver Messstromwandler dient dazu, hohe Wechselströme aus dem Primärnetz in kleine, messbare Ströme auf der Sekundärseite zu transformieren. Dabei fungiert er als Bindeglied zwischen dem Hochstrombereich und den Mess- oder Schutzeinrichtungen. Das grundlegende Funktionsprinzip basiert auf der galvanischen Trennung zwischen dem Primär- und dem Sekundärkreis. Dies ermöglicht den Anschluss von standardisierten Messgeräten, Zählern oder Schutzrelais, die üblicherweise für Nennströme von 1 A oder 5 A ausgelegt sind, ohne diese dem hohen Potenzial oder den hohen Strömen des Primärleiters auszusetzen.

2.2 Aufbau und Bauformen

Konstruktiv setzt sich der betrachtete Messstromwandler im Wesentlichen aus sechs Hauptkomponenten zusammen, die in Abbildung 2.1 dargestellt sind.

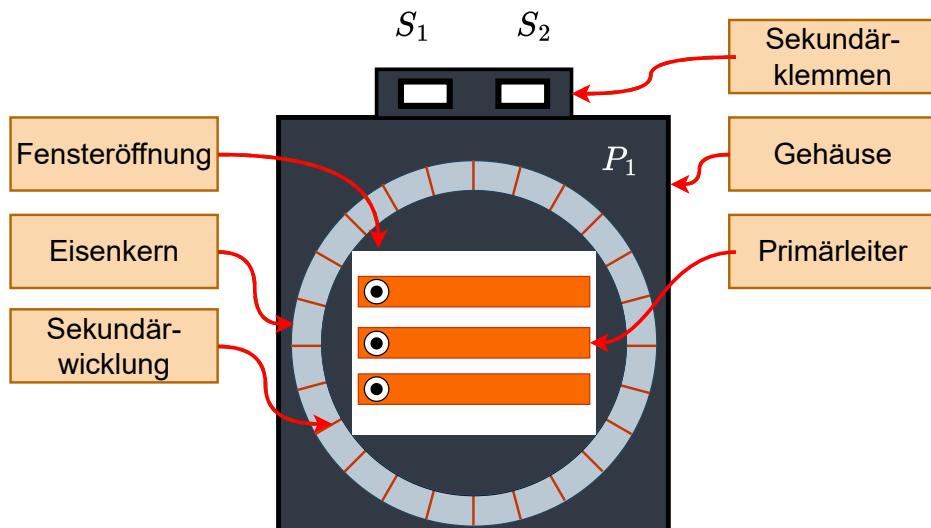


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau eines Aufsteckstromwandlers

Im Niederspannungsbereich fungiert meist eine Kupferschienenenanordnung als Primärleiter. Diese weist in der Regel ein Rechteckprofil auf und kann aus mehreren Einzelschienen bestehen; eine detaillierte Betrachtung der Schienenanordnung erfolgt in Abschnitt 3.2

(Hochstromprüfstand). Dieser Primärleiter wird durch die Fensteröffnung des Wandlers geführt. Um dabei eine zentrierte Leiterführung zu gewährleisten, bieten einige Hersteller spezielle Vorrichtungen an, mit denen sich unterschiedliche Schienengeometrien im Fensterausschnitt fixieren lassen.

Das zentrale Element der Übertragung bildet der Magnetkern. Er hat die Aufgabe, den magnetischen Fluss bei geringstmöglichen magnetischen Widerstand zu bündeln und besteht aus einem ferromagnetischen Werkstoff mit hoher Permeabilität (μ_r), um die Übertragungsverluste zu minimieren. Die magnetischen Eigenschaften des Kernmaterials bestimmen dabei maßgeblich die Genauigkeit und das Sättigungsverhalten des Wandlers. Als Werkstoffe kommen üblicherweise Siliziumeisen, Nickeleisen oder nanokristalline Legierungen zum Einsatz [1, S. 63].

Direkt auf diesen Kern ist die Sekundärwicklung aufgebracht. Sie transformiert den magnetischen Fluss zurück in einen elektrischen Strom und ist mit den externen Anschlussklemmen verbunden. Das Gehäuse umschließt schließlich den gesamten Eisenkern samt Sekundärwicklung und gewährleistet die notwendige elektrische Isolation sowie den mechanischen Schutz.

2.2.1 Unterscheidung zwischen Mess- und Schutzstromwandlern

Stromwandler lassen sich je nach Anwendungszweck in zwei Hauptkategorien unterteilen: Messstromwandler und Schutzstromwandler. Zwar basieren beide auf dem gleichen physikalischen Prinzip, sie unterscheiden sich jedoch maßgeblich durch ihr Sättigungsverhalten.

Der Messstromwandler dient primär dazu, Ströme innerhalb des Nennstrombereichs zu erfassen, um beispielsweise Energiezähler zu speisen. Ein entscheidendes Kriterium ist hierbei, dass der Kern bei hohen Überströmen (z. B. im Kurzschlussfall) schnell in die Sättigung geht. Dies begrenzt den Sekundärstrom und schützt so die angeschlossene empfindliche Messtechnik vor Zerstörung [2, Kap. 2.2].

Im Gegensatz dazu wird der Schutzstromwandler verwendet, um Schutzeinrichtungen (wie Relais) anzusteuern. Er muss gewährleisten, dass der sekundäre Strom auch weit über den Nennbereich hinaus (im Fehlerfall) proportional zum Primärstrom bleibt. Der Kern darf also nicht frühzeitig sättigen, damit die Schutzauslösung zuverlässig erfolgt [2, Kap. 2.2]. Technisch wird dies oft durch Eisenkernmaterialien mit hoher Sättigungsflussdichte oder Luftspalte im Kern realisiert.

2.2.2 Kompensationswicklungen

Kompensationswicklungen werden eingesetzt, um zwei wesentliche Störeinflüsse bei Messstromwandlern zu reduzieren: den Lagefehler durch eine exzentrische Positionierung des

Primärleiters (siehe Abbildung 2.3) und die Einwirkung von externen Fremdfeldern. Die physikalischen Hintergründe zu letzteren werden in Kapitel 2.5 erläutert.

Eine exzentrische Anordnung der Stromschiene tritt in der Praxis häufig auf, wenn die Fensteröffnung des Wandlers deutlich größer dimensioniert ist als der Querschnitt der verwendeten Kupferschiene. Durch diesen geometrischen Spielraum ist eine exakte Zentrierung bei der Montage oft nicht gewährleistet.

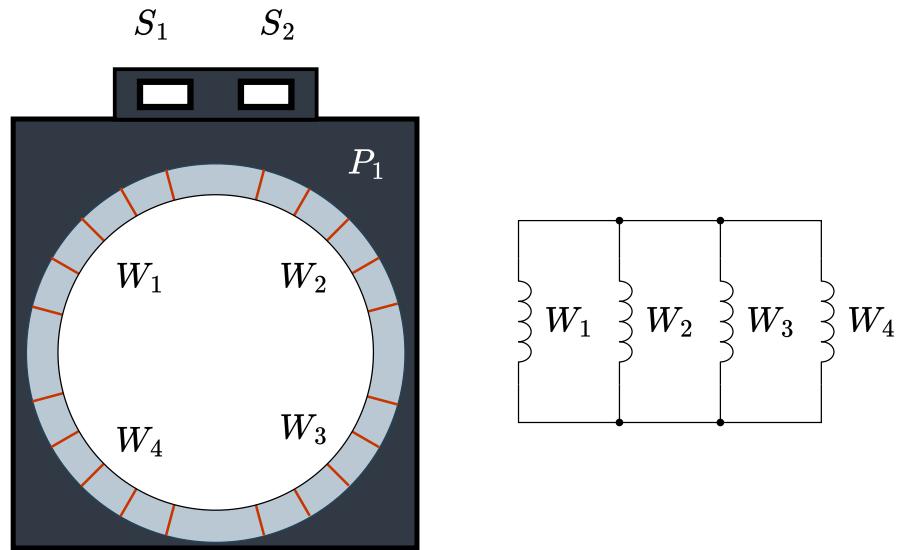


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau eines Wandlers mit zusätzlichen Kompensationswicklungen

Die Abbildung 2.2 zeigt schematisch, wie diese Wicklungen (W_1 bis W_4) symmetrisch auf dem Umfang des Eisenkerns verteilt sind. Technisch ist diese Anordnung so realisiert, dass die Teilwicklungen zusätzlich zur eigentlichen Sekundärwicklung aufgebracht und – wie im rechten Teil der Grafik dargestellt – parallel geschaltet werden. Durch diese Parallelschaltung können sich Ausgleichsströme zwischen den Wicklungssegmenten ausbilden, welche lokale Sättigungserscheinungen oder Asymmetrien im Magnetfluss kompensieren.

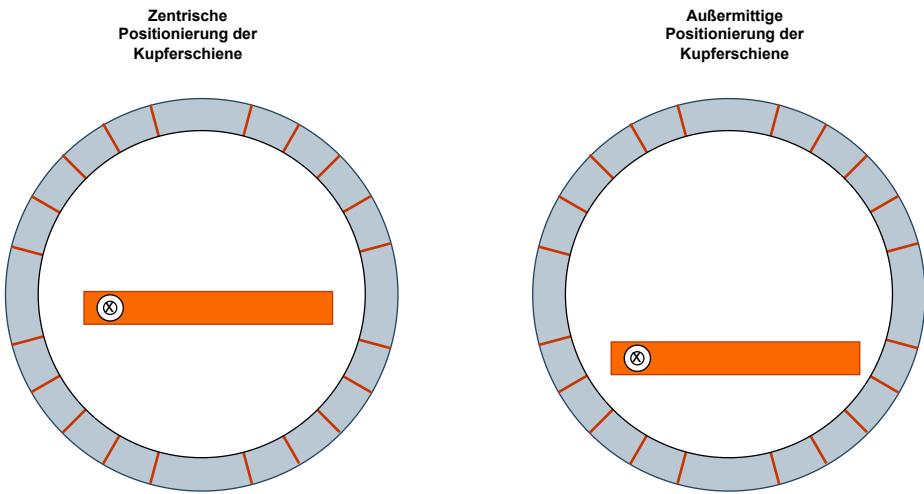


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der zentrischen und exzentrischen Positionierung der Kupferschiene

Hier bin ich gerade aktuelle.

2.2.3 Normative Anforderungen und Genauigkeitsklassen

Messstromwandler werden in unterschiedlichen Genauigkeitsklassen gefertigt, die in der Norm DIN EN 61869-2 festgelegt sind [3, S. 22, Tab. 201–203]. Diese Klassen definieren die zulässigen Messabweichungen (Strom- und Fehlwinkel) und sind entscheidend für die Auswahl des geeigneten Wandlers für die jeweilige Anwendung:

2.2.4 Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers

Ein Messstromwandler entspricht physikalisch einem Transformator, weshalb sich sein Verhalten mithilfe des Transformator-Ersatzschaltbildes beschreiben lässt. In der Darstellung 2.4 sind die Größen der Primärseite auf die Sekundärseite bezogen. Dabei repräsentieren R'_p den Widerstand und L'_p die Streuinduktivität der Primärseite. Die Sekundärseite wird durch den Wicklungswiderstand R_s und die Streuinduktivität L_s gebildet. Der Querzweig, bestehend aus dem Eisenverlustwiderstand R_{FE} und der Hauptinduktivität L_H , modelliert den Eisenkern. Die externe Bürde wird durch R_B und L_B abgebildet.

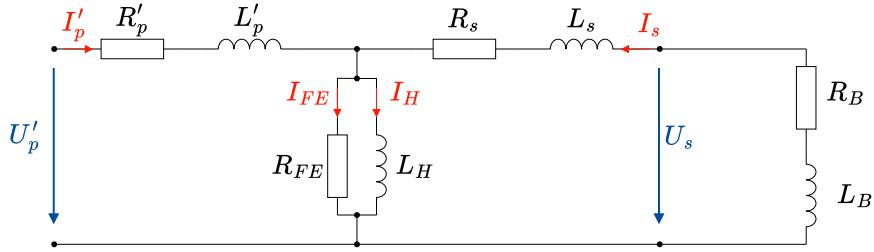


Abbildung 2.4: Vollständiges Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers

Bei einem Aufsteckstromwandler bildet der durch die Fensteröffnung geführte Leiter die Primärwicklung. Da dieser Leiteranteil sehr kurz ist und keine Wicklung im herkömmlichen Sinne darstellt, können der ohmsche Widerstand R'_p und die Streuinduktivität L'_p in der Regel vernachlässigt werden. Das daraus resultierende vereinfachte Ersatzschaltbild ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

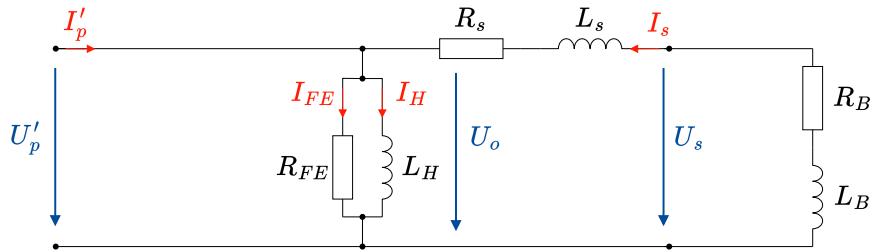


Abbildung 2.5: Vollständiges Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers

Theoretisch ließe sich auch die sekundäre Streuinduktivität L_s vernachlässigen, vorausgesetzt, der Primärleiter befindet sich zentriert im Eisenkern und die Sekundärwicklung ist gleichmäßig über den Umfang verteilt [1, S. 65]. Da in der Praxis jedoch weder eine ideale Zentrierung des Leiters noch eine perfekte Wicklungsverteilung durch den Hersteller garantiert werden kann, wird L_s in der hier vorliegenden Betrachtung – wie im vereinfachten Schaltbild ersichtlich – nicht vernachlässigt.

2.3 Physikalisches Wirkprinzip

Physikalisch betrachtet arbeitet der Messstromwandler wie ein kurzgeschlossener Transformator. Jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem magnetischen Feld umgeben. Nach dem Durchflutungssatz (Ampèresches Gesetz) erzeugt der Strom I_p im Primärleiter eine magnetische Feldstärke H .

Da der Primärleiter durch den Eisenkern geführt wird, konzentriert sich das Magnetfeld im Kernmaterial. Es entsteht ein magnetischer Fluss Φ , der durch die Fläche des Kerns

und die magnetische Flussdichte B bestimmt wird. Dieser magnetische Wechselstrom durchsetzt die Sekundärwicklung und induziert gemäß dem Induktionsgesetz eine Spannung u_{ind} .

Da der Sekundärkreis im Betrieb über eine niederohmige Bürde (Messgerät und Leitungen) nahezu kurzgeschlossen ist, bewirkt diese induzierte Spannung einen Sekundärstrom I_s . Dieser Sekundärstrom erzeugt wiederum einen magnetischen Fluss, der dem des Primärstroms entgegenwirkt (Lenzsche Regel). Im idealen Wandler heben sich die Durchflutungen Θ nahezu auf:

$$I_p \cdot N_p \approx I_s \cdot N_s \quad (1)$$

Daraus resultiert das Übersetzungsverhältnis, das antiproportional zu den Windungszahlen ist. In der Realität ist jedoch ein kleiner Teil des Primärstroms notwendig, um den magnetischen Fluss im Eisenkern aufrechtzuerhalten (Magnetisierungsstrom), was zu den typischen Übersetzungs- und Winkelfehlern führt.

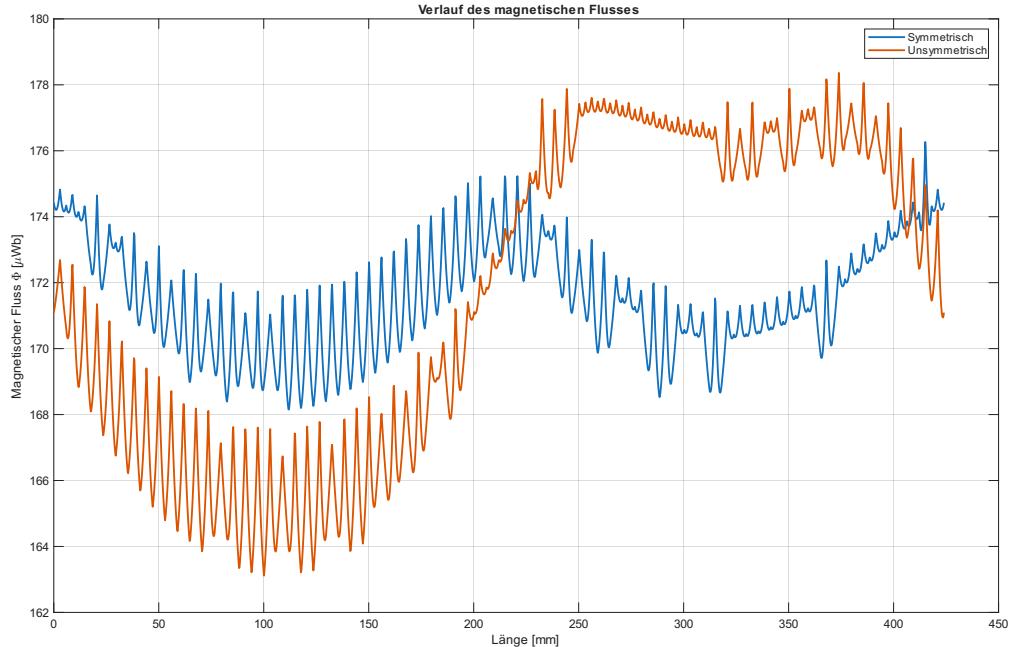


Abbildung 2.6: Vergleich der Simulationsergebnisse bei zentrischer und exzentrischer Leiteranordnung im Wandler

2.4 Entstehung und Ausbreitung magnetischer Störfelder

Die Fremdfelder, die in Niederspannungsschaltanlagen auftreten und Messergebnisse beeinflussen können, entstehen primär durch hohe Ströme in benachbarten Leitern (ab ca.

2000 A). In typischen Sammelschienensystemen ist dabei häufig der mittlere Leiter (L2) von den Einflüssen der Außenleiter am stärksten betroffen, da sich hier die Felder der benachbarten Phasen überlagern.

2.5 Physikalische Auswirkungen von Fremdfeldern auf den Wandlerkern

2.6 Messabweichung und Fehlerfortpflanzung

3 Versuchsaufbau und Methodik

Für die Charakterisierung der Messstromwandler wurde ein Hochstrom-Prüfstand verwendet, der Ströme von bis zu 6000 A erzeugen kann. Dies ermöglicht die Analyse der magnetischen Eigenschaften unter Realbedingungen. Das hierfür angewandte Prinzip der Vergleichsmessung zwischen Sekundär- und Referenzstrom wird einleitend in Abschnitt 3.1 erläutert. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 3.2 der detaillierte Aufbau und die Funktionsweise des Prüfstandes beschrieben. Abschließend legt Abschnitt 3.3 das konkrete messtechnische Konzept sowie die Durchführung der Messungen dar.

3.1 Prüfung der Genauigkeit von Messstromwandlern

Für die Bestimmung der Genauigkeit eines Messstromwandlers sind gemäß der DIN EN 61869-2 [3] für Wandler, die für Messzwecke bestimmt sind, zwei Prüfungen wesentlich: die der Übersetzungsmessabweichung ε und die des Fehlwinkels $\Delta\phi$.

Für die Messungen muss der Wandler mit seiner Nennbürde betrieben werden.

3.1.1 Fehlwinkel

Letzterer beschreibt die Phasenverschiebung zwischen dem primären und dem sekundären Strom über einen definierten Messbereich. Die Einhaltung der zulässigen Grenzwerte für den Fehlwinkel ist insbesondere für Schutzeinrichtungen mit Richtungsbestimmung von Bedeutung [3, S. 51]. In der Tabelle 3.1 sind die nach der Norm definierten Messbereiche für die Wandlerklassen von 0,1 bis 1 dargestellt.

Tabelle 3.1: Grenzwerte für den Fehlwinkel (gemäß DIN EN 61869-2 Tabelle 201 [3])

Genauigkeitsklasse	Fehlwinkel							
	\pm Minuten				\pm Zentiradian			
	bei Strom (% von I_n)				bei Strom (% von I_n)			
	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	15	8	5	5	0,45	0,24	0,15	0,15
0,2	30	15	10	10	0,90	0,45	0,30	0,30
0,5	90	45	30	30	2,70	1,35	0,90	0,90
1	180	90	60	60	5,40	2,70	1,80	1,80

3.1.2 Übersetzungsmessabweichung

Die Übersetzungsmessabweichung ε beschreibt die prozentuale Differenz zwischen dem auf die Primärseite bezogenen Sekundärstrom und dem tatsächlichen Primärstrom. Gemäß Gleichung (2) berechnet sich dieser Fehler aus der Nennübersetzung k_r , dem Sekundärstrom I_s und dem Primärstrom I_p .

$$\varepsilon = \frac{k_r \cdot I_s - I_p}{I_p} \cdot 100 \% \quad (2)$$

Tabelle 3.2: Grenzwerte für die Übersetzungsmessabweichung (gemäß DIN EN 61869-2 Tabelle 201 [3])

Genauigkeits- klasse	Übersetzungsmessabweichung $\pm\%$			
	5	20	100	120
0,1	0,40	0,20	0,1	0,1
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2
0,5	1,50	0,75	0,5	0,5
1	3,00	1,50	1,0	1,0

3.2 Beschreibung des Hochstrom-Prüfstands

3.3 Messtechnisches Konzept

Für die praktische Durchführung der Messungen am Hochstrom-Prüfstand wurde folgendes Konzept entwickelt. Die Messpunkte orientieren sich an den Vorgaben der DIN EN 61869-2 für die Genauigkeitsprüfung.

4 Experimentelle Untersuchung

- 4.1 Inbetriebnahme und Plausibilitätsprüfung**
- 4.2 Optimierung der Messdatenerfassung**
- 4.3 Validierung des optimierten Systems**

5 Auswertung und Diskussion

- 5.1 Durchführung der Messreihen am optimierten Prüfstand**
- 5.2 Messergebnisse: Einfluss der Leitergeometrie**
- 5.3 Messergebnisse: Vergleich der Wandlertechnologien**
- 5.4 Auswertung der Messergebnisse**

6 Zusammenfassung der Ergebnisse

6.1 Bewertung der Prüfstands-Optimierung

6.2 Konstruktionsempfehlung für zukünftige Wandler-Einbauten

7 Ausblick

A Anhang

Literaturverzeichnis

- [1] Ruthard Minkner und Joachim Schmid. *Technologie der Messwandler: Strom- und Spannungsmessung und Isolationssysteme*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020. ISBN: 978-3-658-30206-1. DOI: 10.1007/978-3-658-30207-8. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-30207-8>.
- [2] REDUR GmbH & Co. KG. *Das kleine Einmaleins der Stromwandler*. Unternehmenspublikation. Merzenich: REDUR GmbH & Co. KG, 2021. ISBN: 978-3-00-068179-0.
- [3] DIN EN 61869-2 (VDE 0414-9-2):2013-07, *Messwandler – Teil 2: Zusätzliche Anforderungen für Stromwandler*. Deutsche Fassung EN 61869-2:2012; IEC 61869-2:2012. Berlin, 2013. URL: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-61869-2/172722083>.

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ort, Datum

Unterschrift