

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 12. Januar 2026

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
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	6
2.3 Physikalisches Wirkprinzip	7
2.3.1 Entstehung und Ausbreitung magnetischer Störfelder	8
2.4 Messabweichung und Fehlerfortpflanzung	8
2.5 Aufbau Niederspannungsschaltanlagen	8
3 Versuchsaufbau und Methodik	9
3.1 Prüfverfahren zur Bestimmung der Genauigkeit	9
3.2 Hochstrom-Prüfstand	9
3.2.1 Aufbau und Verwendungszweck	9
3.3 Messtechnisches Konzept und Durchführung	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 zentrischen und exzentrischen Positionierung der Kupferschiene	4
2.4	Vollständiges Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers	6
2.5	Vollständiges Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers	7
2.6	Vergleich der Simulationsergebnisse bei zentrischer und exzentrischer Leiteranordnung im Wandler	8
3.1	Aufbau des Hochstrom-Prüfstandes	10

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.

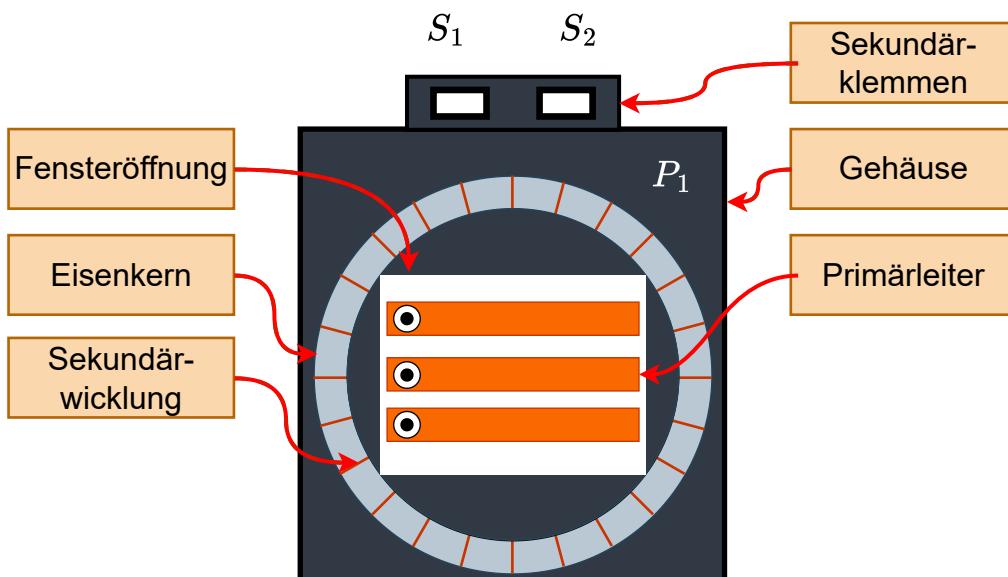


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau eines Aufsteckstromwandlers

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 [MS2020, 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 [Red2121, 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 [Red2121, Kap. 2.2]. Technisch wird dies oft durch Eisenkernmaterialien mit hoher Sättigungsflussdichte oder Luftspalte im Kern realisiert.

Eine weitere spezielle Wandlertyp wird im folgenden Kapitel 2.2.2 Kompensationswicklungen erklärt.

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 2.3.1 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.

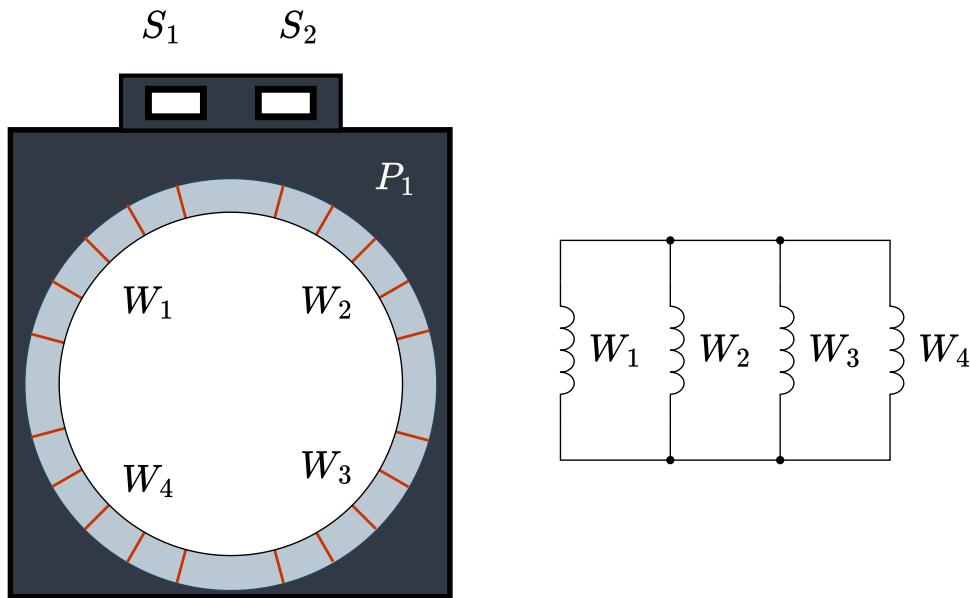


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau eines Wandlers mit zusätzlichen Kompensationswicklungen

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.

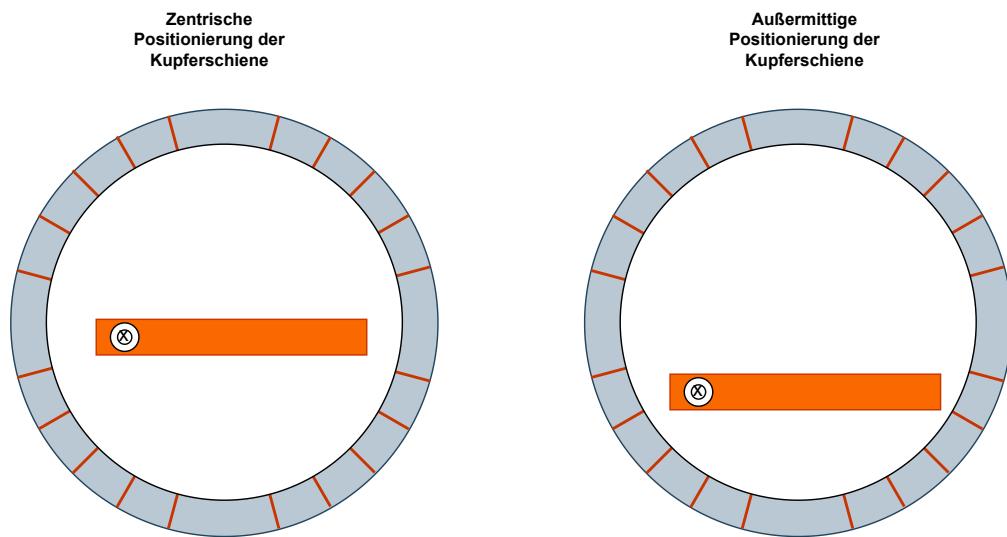


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der zentrischen und exzentrischen Positionierung der Kupferschiene

Hier bin ich gerade aktuelle.

2.2.3 Normative Anforderungen und Genauigkeitsklassen

Messstromwandler werden in unterschiedlichen Genauigkeitsklassen gefertigt, deren Anforderungen in der DIN EN 61869-2 festgelegt sind [DIN1313, S. 22]. Diese Klassen definieren die maximal zulässigen Messabweichungen und bilden die Entscheidungsgrundlage für die Auswahl eines Wandlers.

Wie bereits in Abschnitt 2.2.1 erläutert, unterscheiden sich die Anforderungen an Mess- und Schutzwandler grundlegend.

Schutzwandler Für Schutzwandler ist das Verhalten bei hohen Kurzschlussströmen entscheidend. Sie werden in die Klassen **P** (Protection) und **PR** (Protection, niedrige Remanenz) eingeteilt.

Die Bezeichnung der Genauigkeitsklasse setzt sich bei diesen Wandlern aus der höchstzulässigen prozentualen Gesamtmessabweichung, dem Kennbuchstaben und dem Genauigkeitsgrenzfaktor (ALF – Accuracy Limit Factor) zusammen [DIN1313, S. 23–24]:

- **Klasse P:** Standard-Schutzwandler (z. B. 5P, 10P). Hier ist kein Grenzwert für den Remanenzfluss definiert.
- **Klasse PR:** Schutzwandler mit begrenztem Remanenzfluss (z. B. 5PR, 10PR). Diese müssen nach dem Abschalten von Fehlerströmen eine geringe Remanenz aufweisen, was oft durch Luftspalte im Kern erreicht wird.

Der **Genauigkeitsgrenzfaktor (ALF)** gibt an, bis zum Wievielfachen des Nennstroms die Fehlergrenzen eingehalten werden. Die Normwerte für den ALF sind 5, 10, 15, 20 und 30 [DIN1313, S. 23]. Eine Bezeichnung wie „5P20“ bedeutet demnach: 5 % Gesamtmessabweichung bei 20-fachem Nennstrom.

Tabelle 2.1 zeigt die Grenzwerte für die gängigen Schutzklassen.

Tabelle 2.1: Grenzwerte der Messabweichung für Stromwandler für Schutzzwecke der Klassen P und PR (gemäß DIN EN 61869-2 Tabelle 205 [DIN1313, S. 24])

Genauigkeitsklasse	Übersetzungsmessabweichung bei I_n (\pm %)	Fehlwinkel bei I_n (\pm min)	Gesamtmessabweichung bei $ALF \cdot I_n$ (%)
5P und 5PR	1	60	1,8
10P und 10PR	3	–	5

Messwandler Messwandler untergliedern sich in die Standardklassen **0,1 – 0,2 – 0,5 – 1**, die Sonderklassen **0,2S – 0,5S** (für präzise Messungen auch weit unter Nennstrom) sowie die Klassen **3 – 5** für weniger genaue Betriebsmessungen.

Die Einhaltung der Fehlergrenzen ist dabei an die angeschlossene Bürde gekoppelt. Für die Standardklassen (0,1 bis 1) sowie die Sonderklassen (0,2S und 0,5S) dürfen die Grenzwerte im Bürdenbereich von 25 % bis 100 % der Bemessungsleistung nicht überschritten werden. Für die größeren Klassen 3 und 5 gilt hingegen ein eingeschränkter Bereich von 50 % bis 100 % der Bemessungsleistung [DIN1313, S. 21]. Zudem sind für die Klassen 3 und 5 normativ keine Grenzwerte für den Fehlwinkel definiert.

Im Folgenden werden die spezifischen Grenzwerte für die Standardklassen betrachtet. Ein wesentliches Kriterium ist die **Übersetzungsmessabweichung ε** (Stromfehler), die die prozentuale Abweichung des Sekundärstroms vom idealen Wert angibt (siehe Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2: Grenzwerte für die Übersetzungsmessabweichung (gemäß DIN EN 61869-2 Tabelle 201 [DIN1313, S. 22])

Genauigkeitsklasse	Übersetzungsmessabweichung $\pm \%$ bei Strom (% von I_n)			
	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

Neben dem Stromfehler ist der **Fehlwinkel** entscheidend, der die Phasenverschiebung beschreibt. Die Einhaltung der Grenzwerte ist insbesondere für Schutzeinrichtungen mit Richtungsbestimmung von Bedeutung [DIN1313, S. 51]. Tabelle 2.3 fasst die zulässigen Fehlwinkel für die Klassen 0,1 bis 1 zusammen.

Tabelle 2.3: Grenzwerte für den Fehlwinkel (gemäß DIN EN 61869-2 Tabelle 201 [DIN1313, S. 22])

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

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.

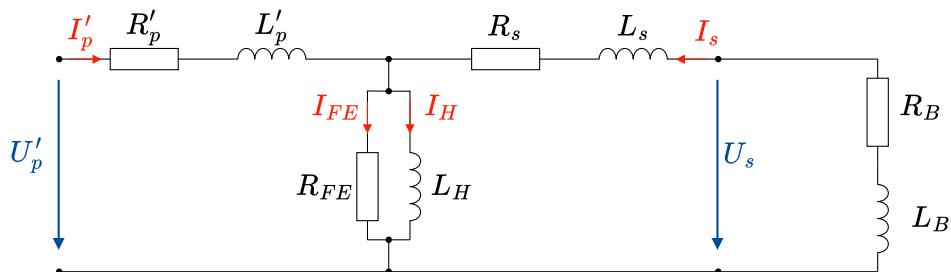


Abbildung 2.4: Vollständiges Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers

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.

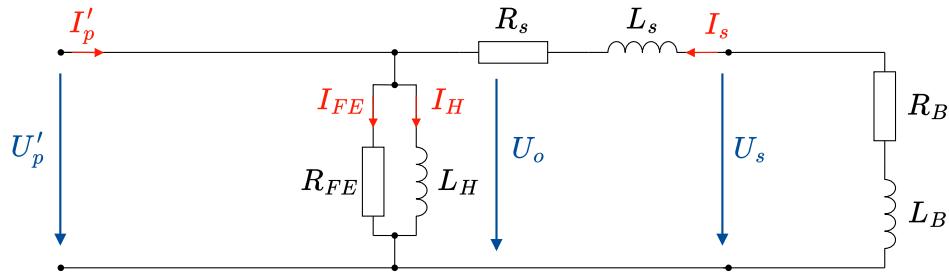


Abbildung 2.5: Vollständiges Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers

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 [MS2020, 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 .

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

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.

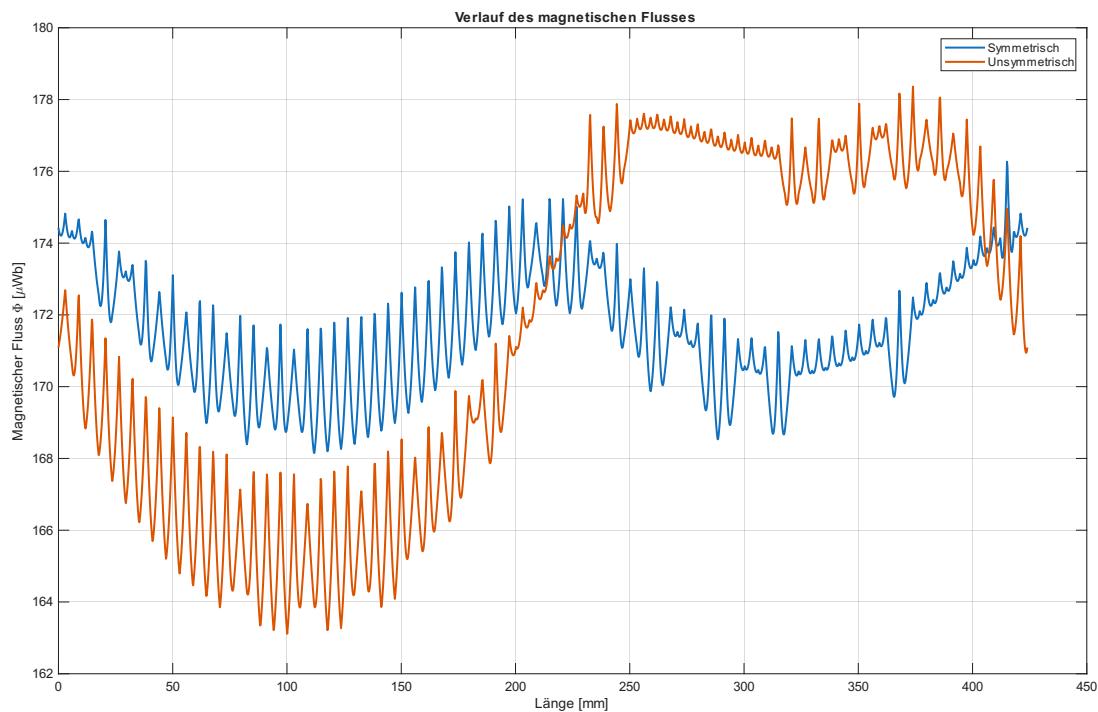


Abbildung 2.6: Vergleich der Simulationsergebnisse bei zentrischer und exzentrischer Leiteranordnung im Wandler

2.3.1 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 Sammelschiensystemen ist dabei häufig der mittlere Leiter (L2) von den Einflüssen der Außenleiter am stärksten betroffen, da sich hier die Felder der benachbarten Phasen überlagern.

2.4 Messabweichung und Fehlerfortpflanzung

2.5 Aufbau Niederspannungsschaltanlagen

3 Versuchsaufbau und Methodik

Zur Charakterisierung der Messstromwandler wurde ein Hochstrom-Prüfstand eingesetzt, der primäre Wechselströme von bis zu 6000 A generieren kann. Dies ermöglichte die Analyse der magnetischen Eigenschaften sowie der Messgenauigkeit unter realitätsnahen Betriebsbedingungen.

Das methodische Vorgehen untergliedert sich in drei Bereiche: Zunächst erläutert Abschnitt 3.1 das grundlegende Messprinzip der Fehlerbestimmung. Darauf aufbauend folgt in Abschnitt 3.2 eine detaillierte technische Beschreibung des Prüfstandsaufbaus. Abschließend stellt Abschnitt 3.3 das konkrete Versuchskonzept dar, welches die Variation der Prüfparameter (Stromstärke, Bürde, Leiterpositionierung) definiert.

3.1 Prüfverfahren zur Bestimmung der Genauigkeit

Die Bestimmung der Genauigkeit eines Messstromwandlers (Prüfling) erfolgt nach dem Prinzip der Vergleichsmessung gegen ein hochgenaues Referenznormal (Normalwandler).

Hierbei werden der Prüfling und der Normalwandler primärseitig vom selben Strom durchflossen. Sekundärseitig werden die Ausgangsströme beider Wandler einer Messbrücke oder einem Vektor-Netzwerkanalysator zugeführt. Da der Fehler des Normalwandlers vernachlässigbar klein und bekannt ist, kann aus der Differenz der beiden Sekundärströme direkt auf die Messabweichung des Prüflings geschlossen werden.

Zu ermitteln sind hierbei zwei zentrale Größen:

- Die **Übersetzungsmessabweichung** ε (Stromfehler), welche die Amplitudendifferenz beschreibt.
- Der **Fehlwinkel** $\Delta\phi$, welcher die Phasenverschiebung zwischen dem primären und dem sekundären Stromvektor angibt.

Um normkonforme Ergebnisse gemäß DIN EN 61869-2 zu gewährleisten, ist es zwingend erforderlich, den Prüfling mit seiner Nennbürde zu beladen, da die Impedanz des Sekundärkreises einen signifikanten Einfluss auf beide Fehlergrößen hat.

3.2 Hochstrom-Prüfstand

3.2.1 Aufbau und Verwendungszweck

Abbildung 3.1 zeigt den Aufbau des Prüfstandes. Die Anlage umfasst eine Netzeinspeisung, einen Säulenstelltransformator der Firma »RPT Ruhstrat Power Technology GmbH«, einen Festtransformator sowie die zugehörige Steuerung. Der Spannungsabgriff am Stelltransformator erfolgt über zwei Kohlerollbürsten, die auf den Säulen laufen. An einer Säule sind zwei Außenleiter angeschlossen, wobei die Abgriffe gegenläufig (entgegengesetzt) verfahren werden. Die abgegriffene Spannung wird über eine Netzdrossel an den Festtransformator weitergeleitet.

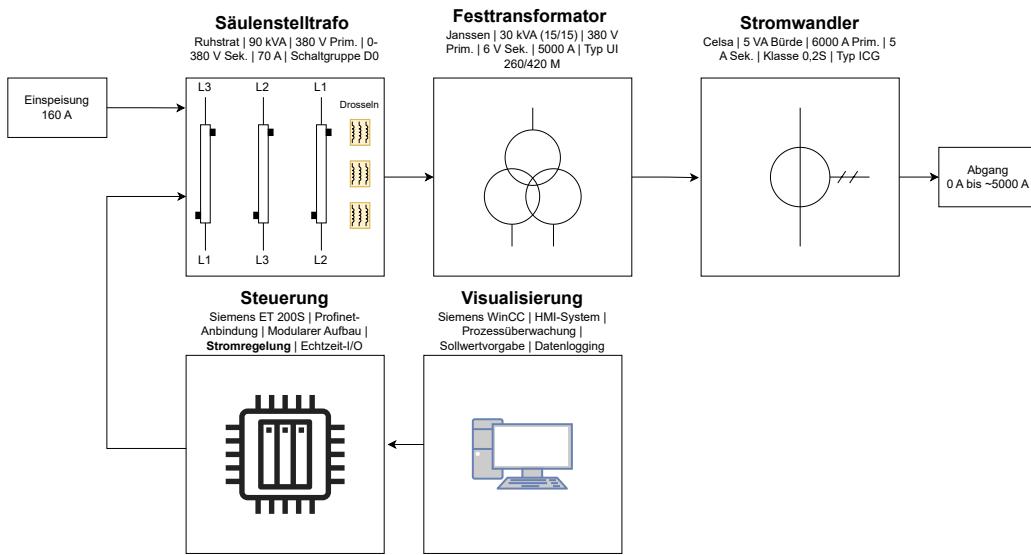


Abbildung 3.1: Aufbau des Hochstrom-Prüfstandes

3.3 Messtechnisches Konzept und Durchführung

Für die praktische Durchführung der Messreihen wurde ein systematisches Konzept entwickelt, das sich an den Prüfvorgaben der DIN EN 61869-2 orientiert, diese jedoch um die spezifischen Untersuchungsaspekte dieser Arbeit erweitert.

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

- [DIN1313] *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>.
- [MS2020] 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>.
- [Red2121] REDUR GmbH & Co. KG. *Das kleine Einmaleins der Stromwandler.* Unternehmenspublikation. Merzenich: REDUR GmbH & Co. KG, 2021. ISBN: 978-3-00-068179-0.

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