

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 15. 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 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	4
2.2.4 Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers	6
2.3 Physikalisches Wirkprinzip	6
2.3.1 Entstehung und Ausbreitung magnetischer Störfelder	7
2.4 Messabweichung und Fehlerfortpflanzung	7
2.5 Aufbau Niederspannungsschaltanlagen	8
3 Versuchsaufbau und Methodik	9
3.1 Hochstrom-Prüfstand	9
3.1.1 Aufbau und Funktionsweise	9
3.1.2 Regelungskonzept	10
3.2 Messtechnisches Konzept und Durchführung	11
3.2.1 Versuchsaufbau zur Ermittlung der Messabweichung	11
3.2.2 Konstruktive Gestaltung der Primärleiterführung	11
3.2.2.1 Geometrische Anordnung: Parallel- vs. Dreieckskonfiguration	11
3.2.2.2 Spezifikation der Kupferschienen und Phasenmittenabstände	11
4 Experimentelle Untersuchung	12
4.1 Inbetriebnahme und Plausibilitätsprüfung	12
4.2 Optimierung der Messdatenerfassung	12
4.3 Validierung des optimierten Systems	12
5 Auswertung und Diskussion	14
5.1 Durchführung der Messreihen am optimierten Prüfstand	14
5.2 Messergebnisse: Einfluss der Leitergeometrie	14
5.3 Messergebnisse: Vergleich der Wandlertechnologien	14
5.4 Auswertung der Messergebnisse	14
6 Zusammenfassung der Ergebnisse	15
6.1 Bewertung der Prüfstands-Optimierung	15
6.2 Konstruktionsempfehlung für zukünftige Wandler-Einbauten	15
7 Ausblick	16
A Anhang	17
Eigenständigkeitserklärung	18

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematischer Aufbau eines Aufsteckstromwandlers	2
2.2	Schematischer Aufbau eines Wandlers mit zusätzlichen Kompensationswicklungen	3
2.3	Schematische Darstellung der zentrischen und exzentrischen Positionierung der Kupferschiene	4
2.4	Vollständiges Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers	6
2.5	Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers	6
2.6	Vergleich der Simulationsergebnisse bei zentrischer und exzentrischer Leiteranordnung im Wandler	7
3.1	Blockschaltbild des Hochstrom-Prüfstandes mit Leistungs- und Signalfaden . . .	10
3.2	Schematischer Aufbau der Messstrecke zur Ermittlung der Messabweichung . . .	11

1 Einleitung

1.1 Motivation

1.2 Problemstellung

1.3 Zielsetzung

1.4 Vorgehensweise

2 Theoretische Grundlagen und aktueller Forschungsstand

2.1 Grundlagen Messstromwandler

Ein Stromwandler 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.

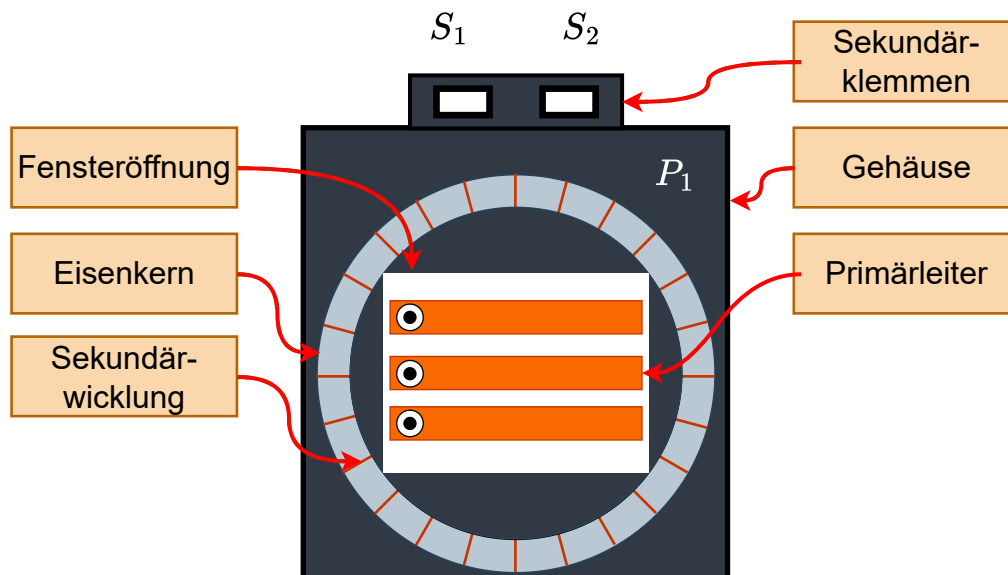


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau eines Aufsteckstromwandlers

Im Niederspannungsbereich fungiert meist eine Kupferschienenanordnung als Primärleiter. Diese weist in der Regel ein Rechteckprofil auf und kann aus mehreren Einzelschienen bestehen. Eine detaillierte Betrachtung der Schienenanordnung erfolgt in Abschnitt 3.2.2. Dieser Primärleiter wird durch die Fensteröffnung des Wandlers geführt. Diese Bauform ohne integrierte Primärwicklung bezeichnet man als Durchsteck- oder Aufsteckstromwandler. Sie entspricht physikalisch einer Windungszahl von eins ($N_1 = 1$) und dominiert aufgrund der einfachen Montage im Bereich mittlerer bis hoher Ströme. 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. Ist dieser Kern als geschlossener Toroid ohne Luftspalt ausgeführt, spricht man von einem Ringkern. Der Kern 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 Ringkern 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 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 proportional zum Primärstrom bleibt. Der Kern darf also nicht frühzeitig sättigen, damit die Schutzauslösung zuverlässig erfolgt [2, Kap. 2.2]. Eine weitere spezielle Wandlerart stellen die im folgenden Abschnitt behandelten Kompensationswicklungen dar.

2.2.2 Kompensationswicklungen

Kompensationswicklungen dienen primär dazu, zwei signifikante Störeinflüsse bei Messstromwandlern zu minimieren. Dies sind der Lagefehler, verursacht durch eine exzentrische Positionierung des Primärleiters (siehe Abbildung 2.3), sowie die Einwirkung externer Fremdfelder. Die physikalischen Grundlagen zu letzterem Aspekt werden in Kapitel 2.3.1 detailliert. Eine exzentrische Leiteranordnung tritt in der Praxis häufig auf, insbesondere wenn die Fensteröffnung des Wandlers deutlich größer dimensioniert ist als der Querschnitt der verwendeten Stromschiene. Aufgrund des geometrischen Spielraums ist eine exakte Zentrierung bei der Montage oft nicht gewährleistet.

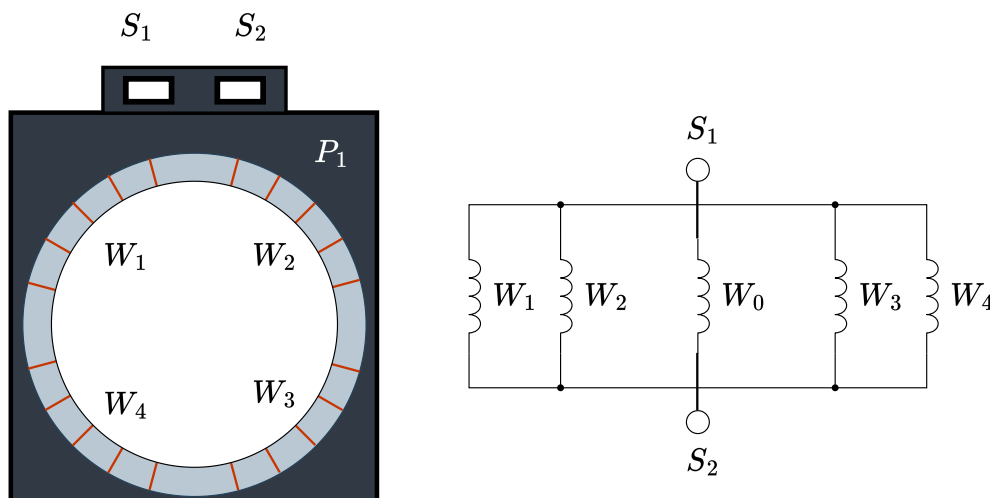


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau eines Wandlers mit zusätzlichen Kompensationswicklungen

Abbildung 2.2 veranschaulicht das grundlegende Funktionsprinzip. Die Wicklungen W_1 bis W_4 sind symmetrisch über den Umfang des Eisenkerns verteilt. Technisch wird dies realisiert, indem Teilwicklungen zusätzlich zur eigentlichen Sekundärwicklung W_0 aufgebracht und parallel geschaltet werden. Diese Parallelschaltung ermöglicht den Fluss von Ausgleichsströmen zwischen den Segmenten, wodurch lokale Sättigungserscheinungen und Asymmetrien im Magnetfluss kompensiert werden [1, S. 77]. Es ist zu beachten, dass die Abbildung lediglich die allgemeine Kompensationswicklungstechnik darstellt. In der Praxis setzen Hersteller oft individuelle, teils proprietäre Wicklungsdesigns ein, weshalb die tatsächliche technische Ausführung von dieser schematischen Darstellung abweichen kann.

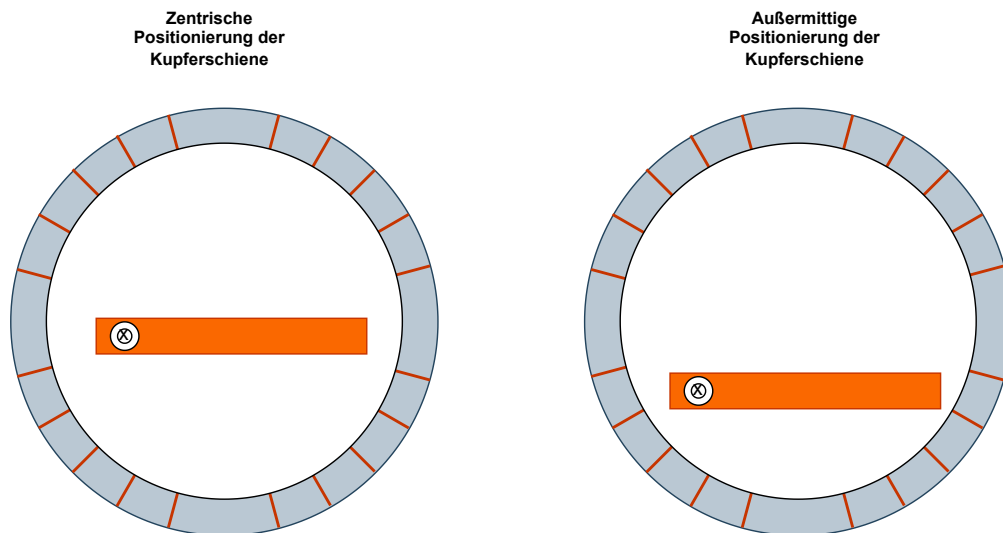


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der zentrischen und exzentrischen Positionierung der Kupferschiene

2.2.3 Normative Anforderungen und Genauigkeitsklassen

Messstromwandler werden in unterschiedlichen Genauigkeitsklassen gefertigt, deren Anforderungen in der DIN EN 61869-2 [3, S. 22] festgelegt sind. Diese Klassen definieren die maximal zulässigen Messabweichungen und bilden die Entscheidungsgrundlage für die Auswahl eines Wandlers. Wie bereits erläutert, unterscheiden sich die Anforderungen an Mess- und Schutzwandler grundlegend.

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 aus der höchstzulässigen prozentualen Gesamtmessabweichung, dem Kennbuchstaben und dem Genauigkeitsgrenzfaktor (ALF) zusammen [3, S. 23–24]. Die Klasse P beschreibt dabei Standard-Schutzwandler, für die kein Grenzwert für den Remanenzfluss definiert ist. Im Gegensatz dazu kennzeichnet die Klasse PR Schutzwandler mit begrenztem Remanenzfluss. Diese müssen nach dem Abschalten von Fehlerströmen eine geringe Remanenz aufweisen, was in der Praxis häufig durch konstruktive Maßnahmen wie Luftspalte [1, S. 82] im Kern erreicht wird. Der Genauigkeitsgrenzfaktor gibt an, bis zum Wievielfachen des Nennstroms die Fehlergrenzen eingehalten werden. Eine Bezeichnung wie „5P20“ bedeutet demnach eine Gesamtmessabweichung von 5 % 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 [3, S. 24])

Genauigkeits- klasse	Übersetzung- messabweichung bei I_n (\pm %)	Fehlwinkel bei I_n		Gesamtmess- abweichung bei $ALF \cdot I_n$ (%)
		(\pm min)	(\pm centigrad)	
5P und 5PR	1	60	1,8	5
10P und 10PR	3	–	–	10

Messwandler untergliedern sich in die Standardklassen 0,1 bis 1, die Sonderklassen 0,2S und 0,5S für präzise Messungen weit unter Nennstrom sowie die Klassen 3 und 5 für weniger genaue Betriebsmessungen. Die Einhaltung der Fehlergrenzen ist dabei an die angeschlossene Bürde gekoppelt. Für die Standard- sowie die Sonderklassen dürfen die Grenzwerte im Bürdenbereich von 25 % bis 100 % der Bemessungsleistung nicht überschritten werden. Für die Klassen 3 und 5 gilt hingegen ein Bereich von 50 % bis 100 % [3, S. 21]. Ein wesentliches Kriterium ist die Übersetzungsmessabweichung ε , 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 [3, S. 22])

Genauigkeits- klasse	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 [3, 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 [3, S. 22])

Genauigkeits- klasse	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 Quersweig, 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.

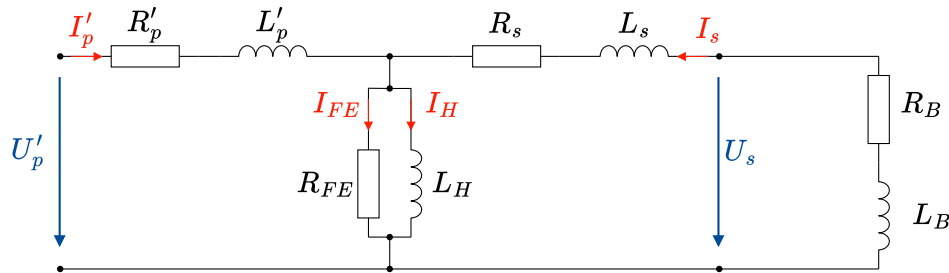


Abbildung 2.4: Vollständiges Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers

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.

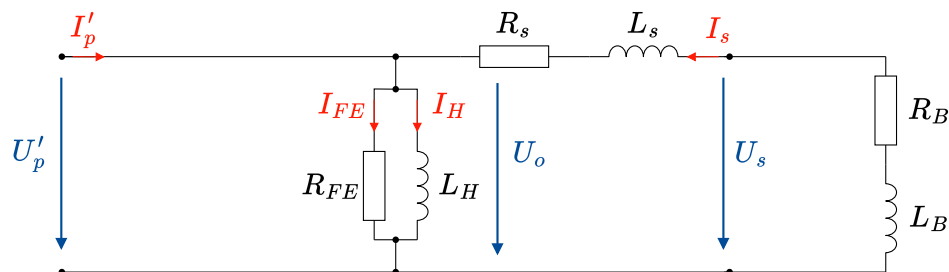


Abbildung 2.5: Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers

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 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.

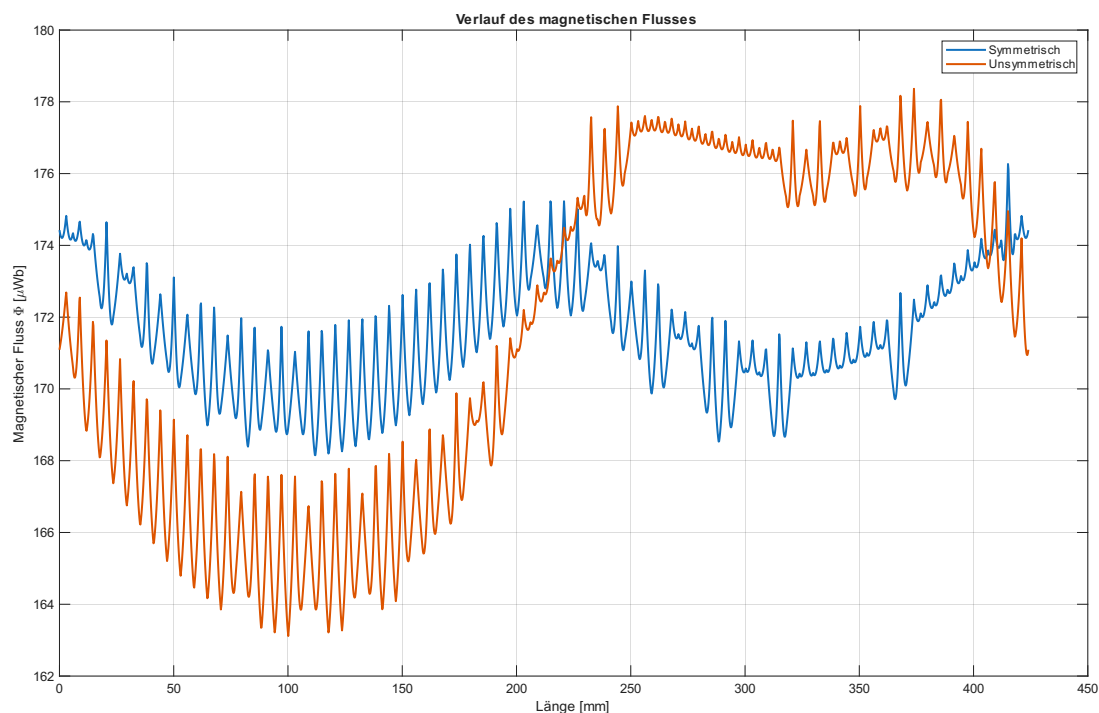


Abbildung 2.6: Vergleich der Simulationsergebnisse bei zentrischer und exzentrischer Leiteranordnung im Wandler

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 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.

2.4 Messabweichung und Fehlerfortpflanzung

Zur Sicherstellung der normativ geforderten Genauigkeitsklassen wird in der Prüftechnik das Prinzip der Vergleichsmessung angewendet. Hierbei werden der zu prüfende Wandler und ein hochgenaues Referenznormal primärseitig vom identischen Strom durchflossen. Da die Fehlercharakteristik des Normals bekannt und dessen Eigenabweichung vernachlässigbar klein ist, lässt sich die Messabweichung des Prüflings direkt aus der Differenz der sekundärseitigen Ausgangssignale ableiten.

Gemäß DIN EN 61869-2 müssen dabei zwei zentrale Kenngrößen ermittelt werden. Die Übersetzungsmessabweichung ε beschreibt die prozentuale Differenz der Stromamplituden und wird nach folgender Gleichung berechnet:

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

Hierbei entspricht k_n dem Bemessungsübersetzungsverhältnis. Der zweite Parameter ist der Fehlwinkel $\Delta\phi$, der die Phasenverschiebung zwischen dem primären und dem sekundären Stromvektor definiert. Für die Validierung ist zudem die Belastung mit der Nennbürde entscheidend, da die Impedanz des Sekundärkreises die magnetische Aussteuerung des Kerns und somit die Fehlerwerte maßgeblich beeinflusst.

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 ermöglicht die Analyse der magnetischen Eigenschaften sowie der Messgenauigkeit unter realitätsnahen Betriebsbedingungen. Das methodische Vorgehen untergliedert sich dabei in zwei wesentliche Bereiche. Zunächst erfolgt in Abschnitt 3.1 eine detaillierte technische Beschreibung des Prüfstandsbaus sowie der verwendeten Systemkomponenten. Darauf aufbauend stellt Abschnitt 3.2 das konkrete Versuchskonzept dar, welches die praktische Umsetzung der Vergleichsmessung sowie die Variation der Prüfparameter wie Stromstärke, Bürde und Leiterpositionierung definiert.

3.1 Hochstrom-Prüfstand

Der Hochstrom-Prüfstand dient der Erzeugung und Regelung hoher Wechselströme für thermische und elektrodynamische Untersuchungen an elektrischen Betriebsmitteln. Als Prüflinge fungieren in der Regel Niederspannungsschaltanlagen oder deren Teilkomponenten, die unter realitätsnahen Lastbedingungen auf ihre thermische Belastbarkeit und Festigkeit geprüft werden. Die Anlage ermöglicht die Bereitstellung von Strömen bis 6000 A bei einer geringen Sekundärspannung. Im Folgenden werden der elektrotechnische Aufbau sowie die Implementierung der Stromregelung detailliert beschrieben.

3.1.1 Aufbau und Funktionsweise

Der Leistungspfad beginnt primärseitig mit einem motorbetriebenen Säulenstelltransformator der Firma Ruhstrat, der mit einer Leistung von 90 kVA als zentrales Stellglied fungiert. Dem Transformator sind Netzdrosseln nachgeschaltet, die zur Entkopplung von Stromspitzen dienen. Die Spannungsstellung erfolgt stufenlos über verstellbare Kohlerollbürsten, wodurch eine variable Ausgangsspannung zwischen 0 V und 380 V bereitgestellt wird. Diese Spannung speist den nachgeschalteten Hochstrom-Festtransformator von Rolf Janssen (Typ UI 260/420 M). Mit einer Nennleistung von 30 kVA transformiert dieser die Spannung auf eine Kleinspannung von 6 V herab, was sekundärseitig die Realisierung von Prüfströmen bis zu 5000 A am dreiphasigen Abgang ermöglicht.

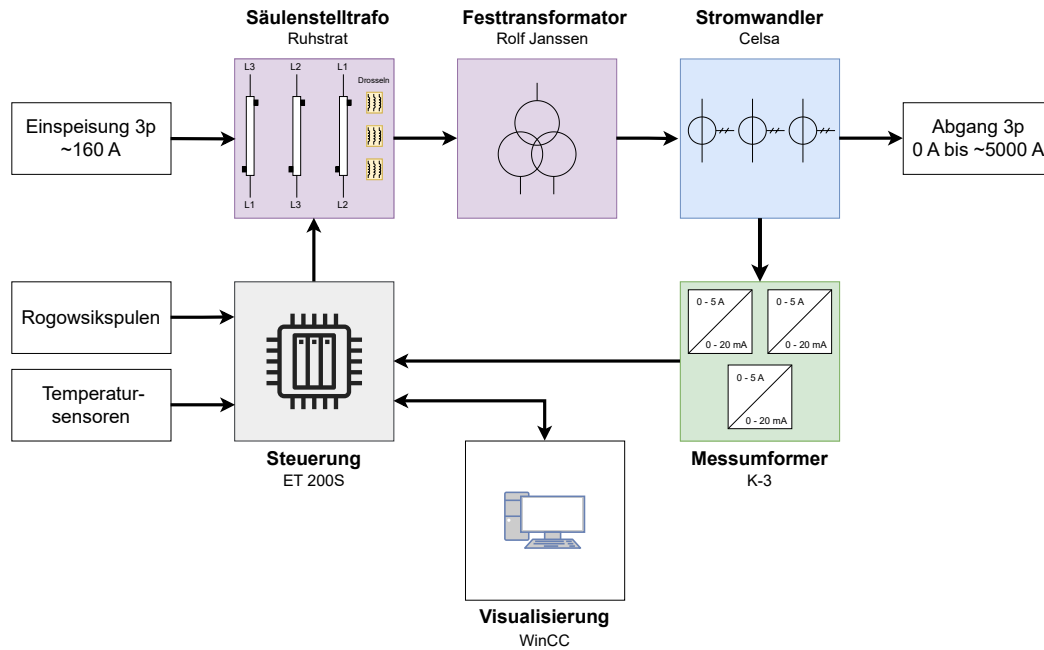


Abbildung 3.1: Blockschaltbild des Hochstrom-Prüfstandes mit Leistungs- und Signalfaden

Zur Überwachung und Regelung des Systems ist eine umfangreiche Sensorik integriert. Die Erfassung der Ströme erfolgt über Celsa-Stromwandler der Klasse 0,2S, deren Signale durch Messumformer des Typs K-3 in analoge Normsignale von 0 mA bis 20 mA gewandelt werden. Diese Signale dienen der dezentralen Peripherie Siemens ET 200S als Istwerte für die Stromregelung. Zusätzlich können Rogowskispulen zur Erfassung von Stromverläufen sowie Temperatursensoren zur thermischen Überwachung des Prüflings angeschlossen werden. Die gesamte Steuerung, Parametrierung und das Datenlogging erfolgen über ein HMI-System auf Basis von Siemens WinCC. Eine detaillierte Spezifikation der einzelnen Komponenten ist in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Detaillierte Spezifikation der Komponenten

Komponente	Typ	Leistung / Bürde	Primär / Input	Sekundär / Output
Säulenstelltrafo	Ruhstrat	90 kVA	380 V	0 V–380 V (70 A)
Festtransformator	Janssen	30 kVA	380 V	6 V (5000 A)
Stromwandler	Celsa ICG	5 VA	6000 A	5 A (Kl. 0,2S)
Messumformer (K-3)	3-K Elektrik	–	0 A–5 A AC	0 mA–20 mA DC
Leittechnik	Typ	Beschreibung		
Steuerung	Siemens ET 200S	Profinet-Anbindung, Stromregelung, Analogeingänge		
Visualisierung	Siemens WinCC	HMI-System, Prozessüberwachung, Datenlogging		

3.1.2 Regelungskonzept

Die Stromregelung ist als digitaler PID-Regelkreis innerhalb der Siemens ET 200S realisiert. Der Anwender gibt über die WinCC-Visualisierung den gewünschten Sollstrom vor, welchen die SPS kontinuierlich mit dem rückgeführten Istwert der K-3 Messumformer vergleicht. Als Stellgröße generiert die Steuerung Schaltbefehle für den Antriebsmotor des Säulenstelltransformators. Um mechanischen Verschleiß durch permanentes Nachregeln zu minimieren, ist eine Hysterese als Totband in den Regelalgorithmus integriert. Die Visualisierung übernimmt dabei neben der

Parametrierung auch das lückenlose Datenlogging der Versuchsverläufe.

3.2 Messtechnisches Konzept und Durchführung

Der praktische Versuchsaufbau orientiert sich an dem in Abschnitt 2.x beschriebenen Prinzip der Vergleichsmessung. Für die vorliegende Untersuchung wird dabei primär die Übersetzungsmessabweichung ε betrachtet, da diese für die Genauigkeit in Niederspannungsschaltanlagen die kritische Kenngröße darstellt.

3.2.1 Versuchsaufbau zur Ermittlung der Messabweichung

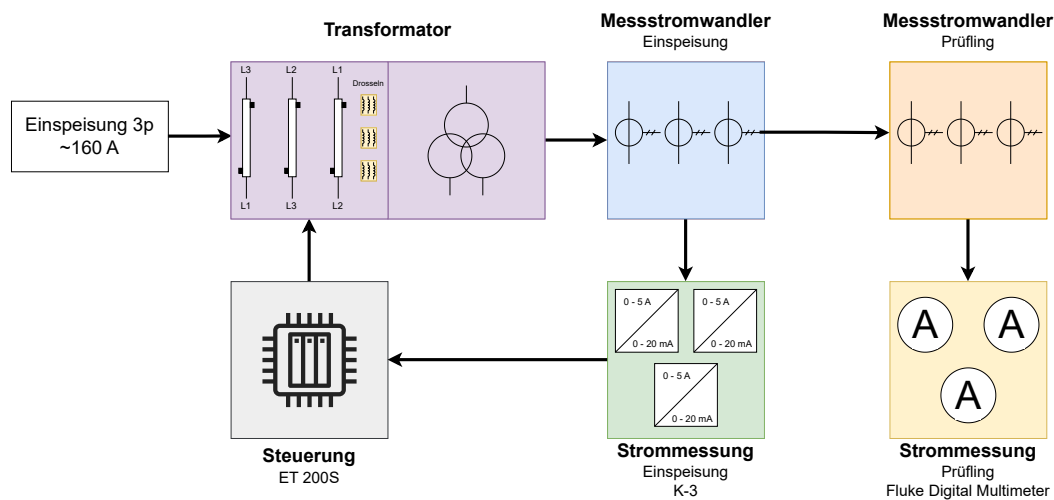


Abbildung 3.2: Schematischer Aufbau der Messstrecke zur Ermittlung der Messabweichung

Der Aufbau der Messstrecke (siehe Abbildung 3.2) realisiert die Vergleichsmessung durch zwei parallele Erfassungspfade, um eine direkte Vergleichbarkeit zwischen Referenz und Prüfling zu gewährleisten. Zur Bestimmung des Referenzwertes der Einspeisung werden die bereits beschriebenen K-3-Messumformer genutzt, welche das Primärsignal umformen und an die SPS übermitteln. Die anschließende Auswertung erfolgt im Visualisierungssystem WinCC, wobei der Messwert als zeitlicher Mittelwert über einen stabilen Messzeitraum aus einem Prozessdiagramm abgelesen wird.

Parallel dazu wird das Ausgangssignal des Prüflings mit einem Digitalmultimeter von Fluke erfasst. Um Messwertschwankungen auszugleichen und eine konsistente Datenbasis zur Referenzmessung zu schaffen, wird das Multimeter im Modus „Acquire“ betrieben. Dieser Modus ermöglicht ebenfalls eine Mittelwertbildung des Messsignals, sodass beide Pfade auf einer vergleichbaren statistischen Grundlage ausgewertet werden können.

3.2.2 Konstruktive Gestaltung der Primärleiterführung

3.2.2.1 Geometrische Anordnung: Parallel- vs. Dreieckskonfiguration

3.2.2.2 Spezifikation der Kupferschienen und Phasenmittenabstände

4 Experimentelle Untersuchung

Nachdem der theoretische Rahmen und der technische Aufbau des Prüfstandes dargelegt wurden, befasst sich dieses Kapitel mit der praktischen Inbetriebnahme und der anschließenden Optimierung des Messsystems. [cite: 366, 370]

4.1 Inbetriebnahme und Plausibilitätsprüfung

Die initiale Inbetriebnahme des Hochstrom-Prüfstandes diente dazu, die Funktionalität der Regelung sowie die Genauigkeit der Messwerterfassung unter realen Lastbedingungen zu verifizieren. [cite: 367] Bei der Auswertung der ersten Messreihen wurde jedoch eine signifikante systematische Abweichung festgestellt, die außerhalb der zulässigen Toleranzen der angestrebten Genauigkeitsklassen lag.

Die detaillierte Fehleranalyse ergab zwei primäre Schwachstellen im ursprünglichen Messkonzept:

- **Signalumformung:** Die verwendeten 3-K Messumformer, welche die Wandler signale für die SPS aufbereiteten, wiesen Nichtlinearitäten und Skalierungsfehler auf. Dies führte dazu, dass der Steuerung bereits fehlerhafte Istwerte übermittelt wurden.
- **Messsynchro nität:** Die manuelle Erfassung der Prüflingsdaten mittels Fluke-Multimetern erfolgte nicht zeitgleich zur Referenzmessung der Einspeisung. Bedingt durch geringfügige Lastschwankungen im Hochstrompfad und menschliche Ablesefehler konnte keine konsistente Datenbasis für die Berechnung der Messabweichung ϵ gemäß Gleichung (2) geschaffen werden. [cite: 265]

4.2 Optimierung der Messdatenerfassung

Um die identifizierten Fehlerquellen zu eliminieren, wurde eine grundlegende technologische Neuausrichtung der Messtechnik vorgenommen. [cite: 368] Anstelle der analogen Signalfade kommen nun digitale Energiemessgeräte der Siemens SENTRON-Reihe zum Einsatz:

- **PAC 4220 (PAC 1):** Überwachung der Einspeisung.
- **PAC 3220 (PAC 2):** Erfassung der Messwerte des Prüflings.

Diese Geräte werden direkt über PROFINET in die Systemstruktur eingebunden. Hierdurch entfallen parasitäre Effekte, die bei der Übertragung analoger Normsignale in einer Hochstromumgebung auftreten können. Durch die Nutzung der Geräteklasse 0,2 wird eine hochpräzise und einheitliche Messbasis sichergestellt. Da beide Geräte ihre Daten zeitsynchron über den Bus an die CPU der Siemens ET 200S liefern, ist eine exakte zeitliche Korrelation der Messwerte für die Einspeisung und den Prüfling gewährleistet.

4.3 Validierung des optimierten Systems

Zur Validierung des optimierten Prüfstandes wurde ein automatisierter Messablauf implementiert. [cite: 369] Hierfür wurde ein Steuerungsprogramm in Siemens Step 7 (TIA Portal) entwickelt, welches die Kennlinienaufnahme vollständig automatisiert:

1. Das Programm fährt die in der DIN EN 61869-2 definierten relevanten Prozentwerte des Nennstroms (z.B. 5%, 20%, 100%, 120%) automatisch an.
2. An jedem Messpunkt wird eine Haltezeit von 5 Minuten eingehalten, um thermische Stabilität zu gewährleisten.

3. Während dieser Zeit erfolgt eine kontinuierliche Mittelwertbildung der Messdaten.
4. Die Ergebnisse werden automatisch in das WinCC-Datenlogging übernommen und für die abschließende Auswertung bereitgestellt.

Durch diesen automatisierten Ablauf werden menschliche Fehlereinflüsse minimiert und die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse signifikant gesteigert.

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] R. Minkner und J. 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 Adresse: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-30207-8>
- [2] REDUR GmbH & Co. KG, *Das kleine Einmaleins der Stromwandler*. Merzenich: REDUR GmbH & Co. KG, 2021, Unternehmenspublikation, 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. Adresse: <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
