

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 19. Januar 2026

Inhaltsverzeichnis

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 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 Physikalische Grundlagen	6
2.3.1 Magnetfelder und Induktion	7
2.3.2 Magnetische Stoffeigenschaften	7
2.3.3 Hysterese	8
2.3.4 Störeinflüsse bei Messstromwandlern	8
2.4 Exzentrische Positionierung der Kupferschiene	11
2.5 Messabweichung und Fehlerfortpflanzung	12
2.6 Aufbau Niederspannungsschaltanlagen	12
3 Versuchsaufbau und Methodik	13
3.1 Hochstrom-Prüfstand	13
3.1.1 Aufbau und Funktionsweise	13
3.1.2 Regelungskonzept	14
3.2 Messtechnisches Konzept und Durchführung	15
3.2.1 Versuchsaufbau zur Ermittlung der Messabweichung	15
3.2.2 Konstruktive Gestaltung der Primärleiterführung	15
3.2.2.1 Geometrische Anordnung: Parallel- vs. Dreieckskonfiguration	15
3.2.2.2 Spezifikation der Kupferschienen und Phasenmittenabstände	15
4 Experimentelle Untersuchung	16
4.1 Inbetriebnahme und Plausibilitätsprüfung	16
4.2 Optimierung der Messdatenerfassung	16
4.3 Validierung des optimierten Systems	16
5 Auswertung und Diskussion	17
5.1 Durchführung der Messreihen am optimierten Prüfstand	17
5.2 Messergebnisse: Einfluss der Leitergeometrie	17
5.3 Messergebnisse: Vergleich der Wandlertechnologien	17
5.4 Auswertung der Messergebnisse	17
6 Zusammenfassung der Ergebnisse	18
6.1 Bewertung der Prüfstands-Optimierung	18
6.2 Konstruktionsempfehlung für zukünftige Wandler-Einbauten	18
7 Ausblick	19

A Anhang	20
Eigenständigkeitserklärung	21

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	Einfluss von Kerngröße und Stromstärke auf den zusätzlichen Streufluss	10
2.7	Einfluss der Leiterpositionierung auf die Flussverteilung im Kern	11
3.1	Blockschaltbild des Hochstrom-Prüfstandes mit Leistungs- und Signalfaden . . .	14
3.2	Schematischer Aufbau der Messstrecke zur Ermittlung der Messabweichung . . .	15

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.

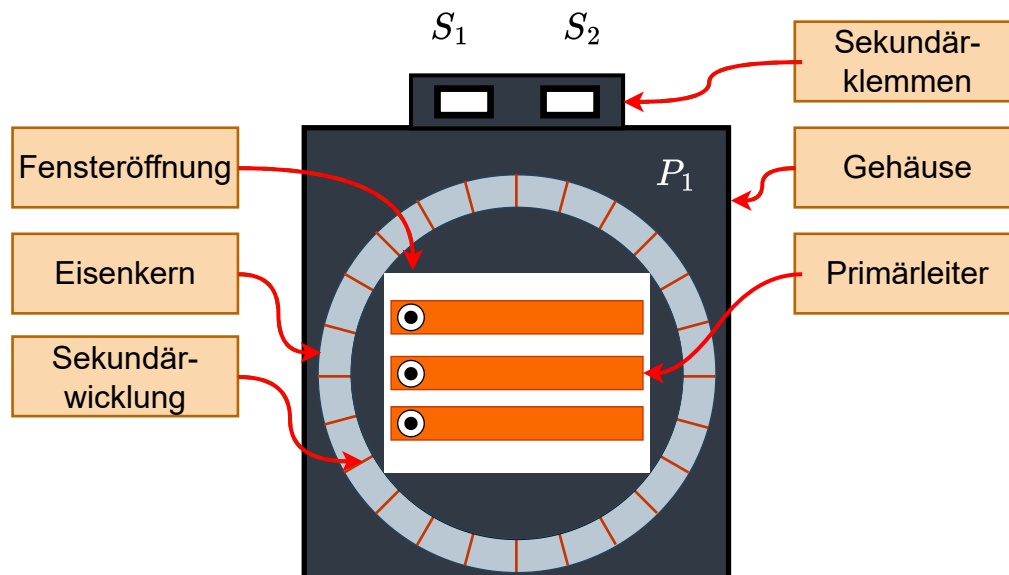


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau eines Aufsteckstromwandlers

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 2.3.4 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.

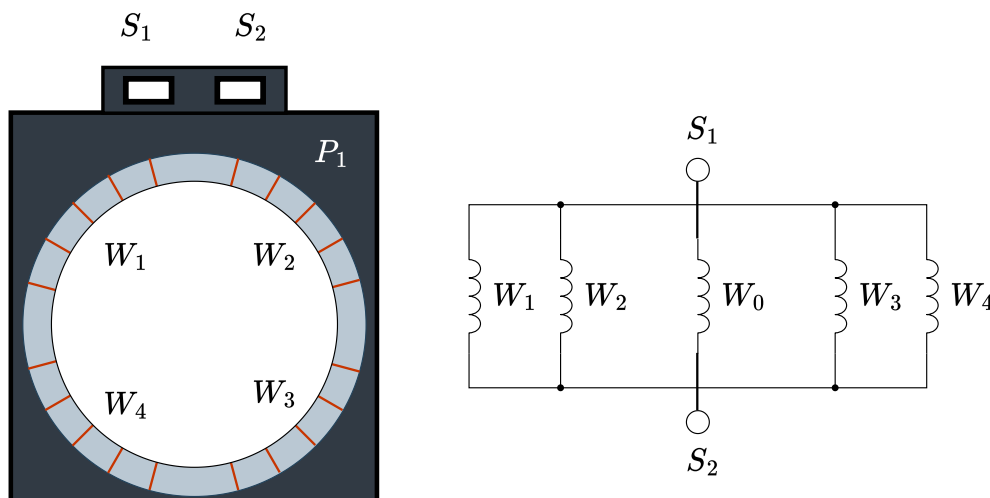


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau eines Wandlers mit zusätzlichen Kompensationswicklungen

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.

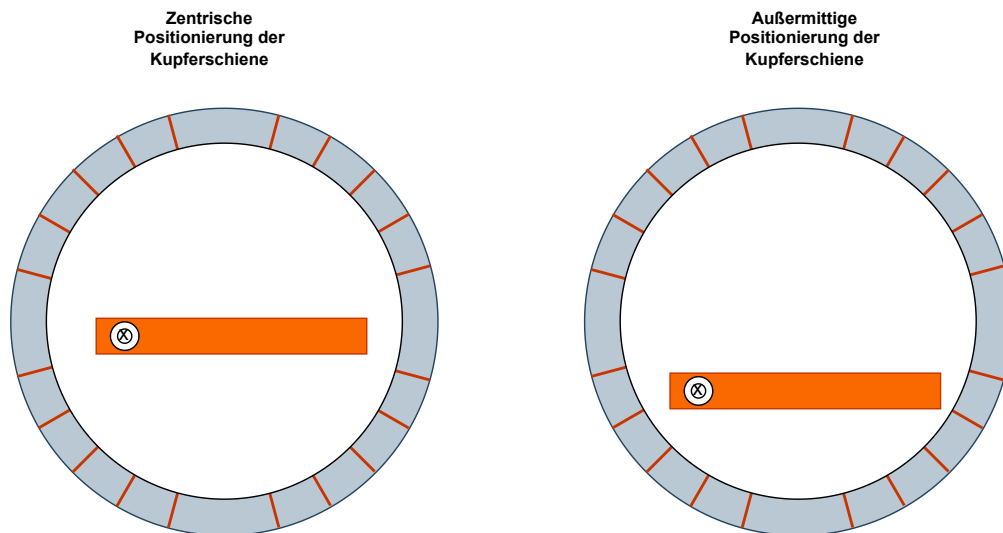


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der zentrischen und exzentrischen Positionierung der Kupferschiene

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.

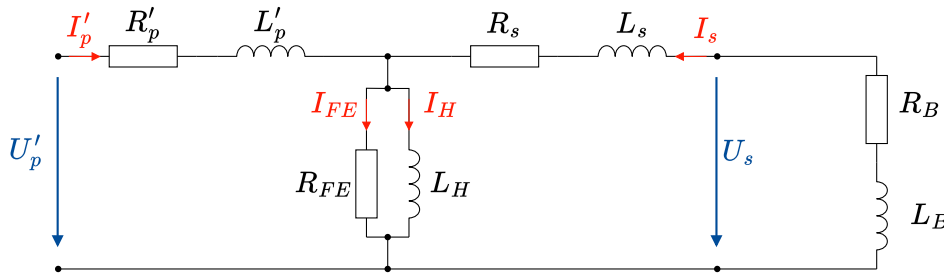


Abbildung 2.4: Vollständiges Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers

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.

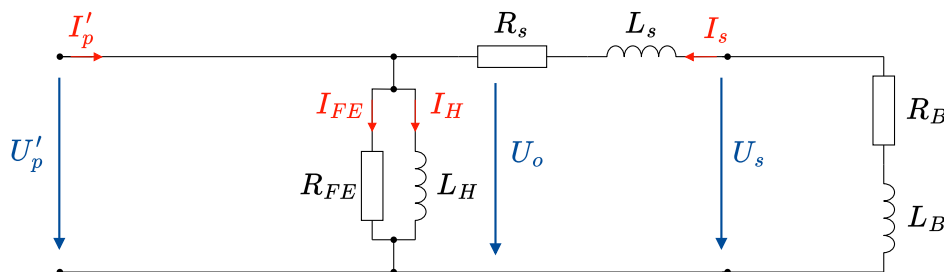


Abbildung 2.5: Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers

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 Physikalische Grundlagen

Physikalisch betrachtet arbeitet der Messstromwandler nach dem Prinzip eines kurzgeschlossenen Transformators. Die Wandlung basiert auf der elektromagnetischen Kopplung zwischen dem Primärleiter und der Sekundärwicklung über einen Magnetkern.

2.3.1 Magnetfelder und Induktion

Jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem magnetischen Kraftfeld umgeben. Nach dem Durchflutungsgesetz (Ampèresches Gesetz) erzeugt der Primärstrom I_p im Leiter eine magnetische Feldstärke H . Für einen unendlich langen, geraden Leiter im Abstand r ergibt sich diese zu:

$$H = \frac{I_p}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (1)$$

Das Magnetfeld ist ein wesentlicher Bestandteil der elektromagnetischen Wechselwirkung, einer der vier fundamentalen Grundkräfte der Natur. Historisch prägten Michael Faraday durch die Definition von Feldlinien und James Clerk Maxwell durch die mathematische Vereinheitlichung der Elektrodynamik das heutige Verständnis dieser Kraftwirkung [4].

In einem Messstromwandler konzentriert sich dieser magnetische Fluss Φ im Weg mit dem geringsten magnetischen Widerstand R_m (Reluktanz), also im hochpermeablen Eisenkern. Dieser Widerstand ist umgekehrt proportional zur relativen Permeabilität μ_r des Mediums:

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A} \quad (2)$$

In einem Medium mit hohem μ_r führt eine vorhandene magnetische Feldstärke H zu einer wesentlich höheren magnetischen Flussdichte B :

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad (3)$$

Da Messstromwandler mit Wechselstrom betrieben werden, erzeugt der zeitlich veränderliche magnetische Fluss Φ im Kern gemäß dem Induktionsgesetz eine Spannung u_s in der Sekundärwicklung:

$$u_s = -N_s \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (4)$$

Hierbei entspricht N_s der Windungszahl der Sekundärwicklung. Im Idealfall entspricht die primäre Durchflutung der sekundären Durchflutung ($I_p \cdot N_p = I_s \cdot N_s$). In der Realität wird jedoch ein Teil des Primärstroms als Magnetisierungsstrom I_μ benötigt, um den Fluss im Kern aufzubauen, was die grundlegende Ursache für Messabweichungen darstellt.

2.3.2 Magnetische Stoffeigenschaften

Die magnetischen Eigenschaften von Materie lassen sich anhand ihrer Reaktion auf ein äußeres Magnetfeld charakterisieren. Maßgeblich hierfür ist die relative Permeabilität μ_r , welche das Verhältnis der Flussdichte im Medium zur Flussdichte im Vakuum beschreibt. In Tabelle 2.4 sind die verschiedenen Stoffeigenschaften nach Kuchling zusammengefasst.

Tabelle 2.4: Magnetische Stoffeigenschaften und ihre Permeabilitätszahlen [5, Tab. 48]

Eigenschaft	Permeabilität μ_r	Verhalten	Materialien
Diamagnetismus	$\mu_r < 1$	Feldschwächung	Bi, Cu, Ag, Au, H_2O
Paramagnetismus	$\mu_r > 1$	Schwache Verstärkung	Al, Pt, Mg, Luft
Ferromagnetismus	$\mu_r \gg 1$	Starke Verstärkung	Fe, Co, Ni, Mu-Metall
Ferrimagnetismus	$\mu_r \gg 1$	Permanente Magnetisierung	Ferrite, Magnetit
Antiferromagnetismus	$\mu_r \approx 1$	Keine äußere Wirkung	Mn, Cr, MnO

Stoffe mit einer Permeabilität von $\mu_r < 1$ werden als diamagnetisch bezeichnet (z. B. Kupfer oder Wasser). In der Elektrotechnik werden Diamagnetika und Paramagnetika meist näherungsweise wie das Vakuum ($\mu_r \approx 1$) behandelt. Für die Funktion von Messstromwandlern sind ferromagnetische Stoffe aufgrund ihrer extrem hohen Permeabilität von entscheidender Bedeutung, da sie den magnetischen Fluss im Kern führen. Da μ_r bei Ferromagnetika jedoch feldstärkeabhängig ist, führen starke Felder zu Sättigungseffekten, welche die Genauigkeit bei Fremdfeldeinfluss massiv beeinträchtigen können.

2.3.3 Hysterese

2.3.4 Störeinflüsse bei Messstromwandlern

Die Genauigkeit von Messstromwandlern im Betrieb wird maßgeblich von externen und systembedingten Faktoren beeinflusst. Die wesentlichen Störeinflüsse lassen sich in drei Kategorien unterteilen: die fehlerhafte Bürdenbeschaltung, die Einwirkung externer magnetischer Fremdfelder sowie die geometrische Positionierung des Primärleiters.

Einfluss der Bürde

Die Impedanz der Bürde bestimmt das Betriebsverhalten des Stromwandlers. Ein erhöhter Widerstand im Sekundärkreis, verursacht durch Leitungswiderstände oder Messgeräte, erfordert eine höhere induzierte Sekundärspannung zur Aufrechterhaltung des Stromflusses. Dies resultiert gemäß dem Induktionsgesetz in einer Zunahme der magnetischen Flussdichte im Kern. Bei einer Überschreitung der Bemessungsbürde erreicht der Eisenkern die Sättigung, wodurch die Messabweichung ε ansteigt.

Der Einfluss des Kompensationswiderstandes auf die Sättigung lässt sich über die induzierte Spannung U_i herleiten. Diese entspricht der Summe der Spannungsabfälle über der gesamten Sekundärbürde

$$U_i = I_s \cdot (R_{\text{Wicklung}} + R_{\text{Leitung}} + R_{\text{Mess}} + R_{\text{Komp}}) \quad (5)$$

wobei der Restwiderstand definiert ist als

$$R_{\text{Rest}} = R_{\text{Wicklung}} + R_{\text{Leitung}} + R_{\text{Mess}} \quad (6)$$

Nach dem Induktionsgesetz (Transformator-Hauptgleichung) besteht ein proportionaler Zusammenhang zwischen der induzierten Spannung und dem magnetischen Fluss Φ

$$U_i = 4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi \quad (7)$$

Durch Gleichsetzen von (5) und (7) sowie anschließender Auflösung nach Φ ergibt sich

$$\Phi = \frac{I_s \cdot (R_{\text{Rest}} + R_{\text{Komp}})}{4,44 \cdot f \cdot N_s} \quad (8)$$

Aus dieser Beziehung geht hervor, dass ein Anstieg von R_{Komp} bei eingepprägtem Strom I_s zu einer linearen Erhöhung des magnetischen Flusses Φ führt. Bei Überschreitung des Sättigungsflusses Φ_{sat} verlässt der Wandler den linearen Arbeitsbereich.

Magnetische Fremdfelder

Jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem konzentrischen Magnetfeld umgeben. Befinden sich mehrere Leiter in unmittelbarer Nähe zueinander, überlagern sich deren magnetische Felder gemäß dem Superpositionsprinzip. Die Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte B vom Abstand r zu einem geraden, unendlich langen Leiter wird durch das Gesetz von Biot-Savart beschrieben:

$$B(r) = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot r} \quad (9)$$

Hierbei beschreibt μ_0 die magnetische Feldkonstante und I die Stromstärke im Leiter.

Ein Stromwandler ist idealerweise so konstruiert, dass sein Kern nur den magnetischen Fluss des umschlossenen Primärleiters führt. In der Praxis, insbesondere in Hochstrom-Schaltanlagen, verlaufen die Sammelschienen der drei Phasen jedoch oft parallel und mit geringem Abstand zueinander [6]. Die von den Nachbarleitern erzeugten starken Magnetfelder können als Streufluss in den Eisenkern des betrachteten Wandlers eindringen und sich dem Nutzfluss überlagern.

Die durch den Störleiter verursachte Erhöhung der Flussdichte kann in den benachbarten Kernsegmenten zu einer lokalen Sättigung führen. Zur Quantifizierung dieses Effekts wird eine Näherungsgleichung der MBS AG herangezogen. Diese berechnet explizit den zusätzlichen Anteil der Flussdichte B_{Fremd} , der durch das externe Feld induziert wird [7]:

$$B_{\text{Fremd}} \approx 10^{-6} \cdot I_p \cdot \frac{R + 0,5 \cdot W}{A} \cdot \log_{10} \left(\frac{D + R}{D - R} \right) \quad (10)$$

Die Variablen sind gemäß der MBS-Spezifikation wie folgt definiert: B_{Fremd} ist die zusätzlich induzierte magnetische Flussdichte im Kern (in T), I_p der Strom im Nachbarleiter (in A), R der äußere Radius (in m), W die Breite (in m), A der Querschnitt des Eisenkerns (in m²) und D der Außenphasenabstand (in m).

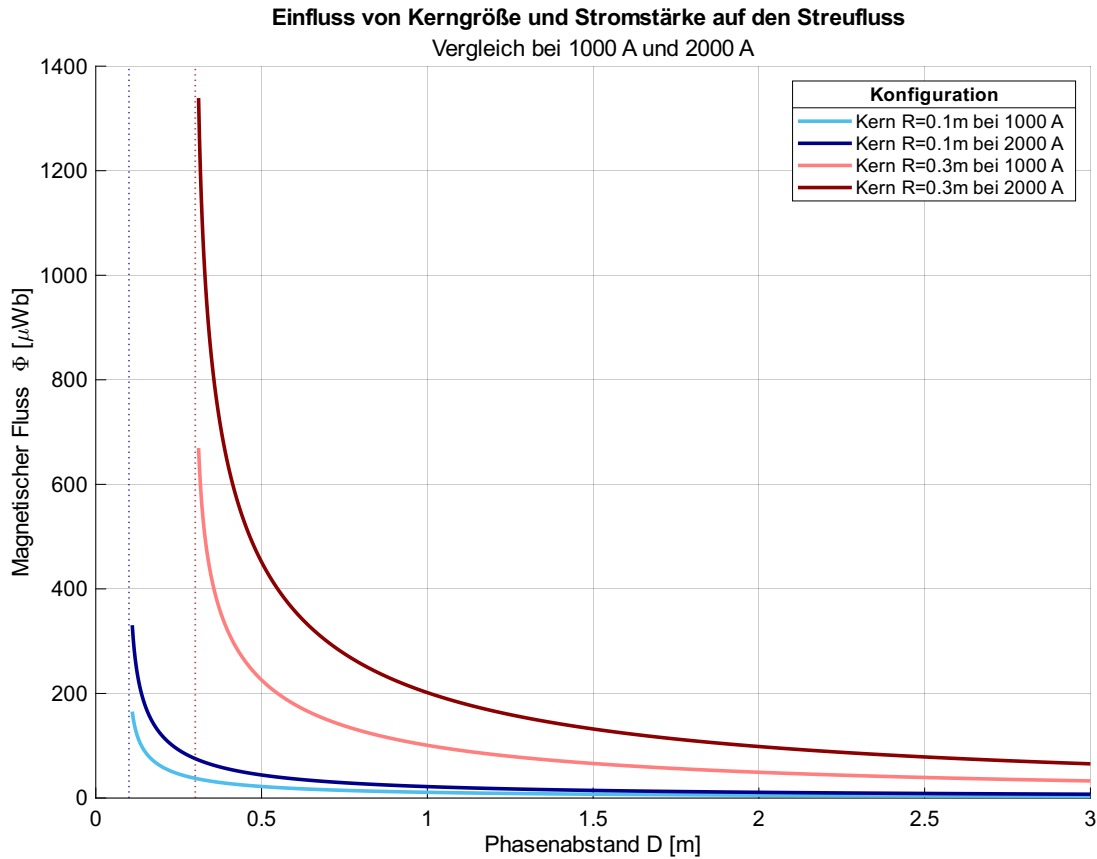


Abbildung 2.6: Einfluss von Kerngröße und Stromstärke auf den zusätzlichen Streufluss

Die Abbildung 2.6 visualisiert den zusätzlichen magnetischen Fluss Φ_{Fremd} , der durch den benachbarten Leiter in den Kern eingekoppelt wird. Es werden zwei Szenarien verglichen: Ein kleiner Kern (blau) und ein großer Kern (rot).

Aus den Verläufen wird deutlich, dass ein geometrisch größerer Kern (rote Kurve) aufgrund seiner größeren räumlichen Ausdehnung absolut gesehen deutlich mehr Störfluss aufnimmt als ein kleinerer Kern. Dieser im Diagramm dargestellte Fluss addiert sich im Betrieb zum Nutzfluss des Wandlers.

Dass ein größerer Wandler in der Praxis dennoch meist unkritischer gegenüber Fremdfeldern ist, liegt an der Relation zur Sättigungsgrenze. Die Sättigung wird nicht durch den absoluten Fluss Φ , sondern durch die resultierende Flussdichte B bestimmt:

$$B_{\text{res}} = B_{\text{Nutz}} + \underbrace{\frac{\Phi_{\text{Fremd}}}{A}}_{B_{\text{Fremd}}} \quad (11)$$

Ein größerer Kern verfügt in der Regel über einen signifikant größeren Eisenquerschnitt A . Während der kleine Kern zwar weniger Störfluss einfängt (siehe Diagramm, blau), verteilt sich dieser auf eine sehr kleine Fläche A , was zu einer starken Erhöhung der Flussdichte B_{Fremd} führt und die Sättigungsgrenze schnell erreichen lässt. Der große Kern kompensiert die höhere Flussaufnahme (Diagramm, rot) durch seinen massiven Querschnitt, wodurch der Anstieg der Flussdichte ΔB gering bleibt.

Die Unabhängigkeit des im Diagramm gezeigten absoluten Störflusses vom Kernquerschnitt lässt sich durch Einsetzen von Gleichung (10) in die Flussdefinition herleiten. Dabei kürzt sich der Querschnitt A heraus:

$$\Phi_{\text{Fremd}} \approx 10^{-6} \cdot I_p \cdot (R + 0,5 \cdot W) \cdot \log_{10} \left(\frac{D + R}{D - R} \right) \quad (12)$$

Diese Beziehung bestätigt, dass der reine Störfluss Φ_{Fremd} nur von der Geometrie (R, W, D) und dem Störstrom abhängt, nicht jedoch von der Kerntiefe (und damit dem Querschnitt). Die Robustheit großer Kerne resultiert also nicht aus einer geringeren Einkopplung (das Gegenteil ist der Fall, wie das Bild zeigt), sondern aus ihrer höheren Kapazität zur Aufnahme dieses Zusatzflusses.

2.4 Exzentrische Positionierung der Kupferschiene

Wie bereits in Abschnitt 2.2.2 dargelegt, ist eine ideal zentrierte Installation der Primärleiter (Kupferschienen) in der Praxis konstruktionsbedingt nicht immer realisierbar. Eine Abweichung von der zentrischen Lage führt jedoch zu einer inhomogenen Feldverteilung im Eisenkern, was wiederum lokale Sättigungserscheinungen begünstigen kann. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 2.7 verdeutlicht.

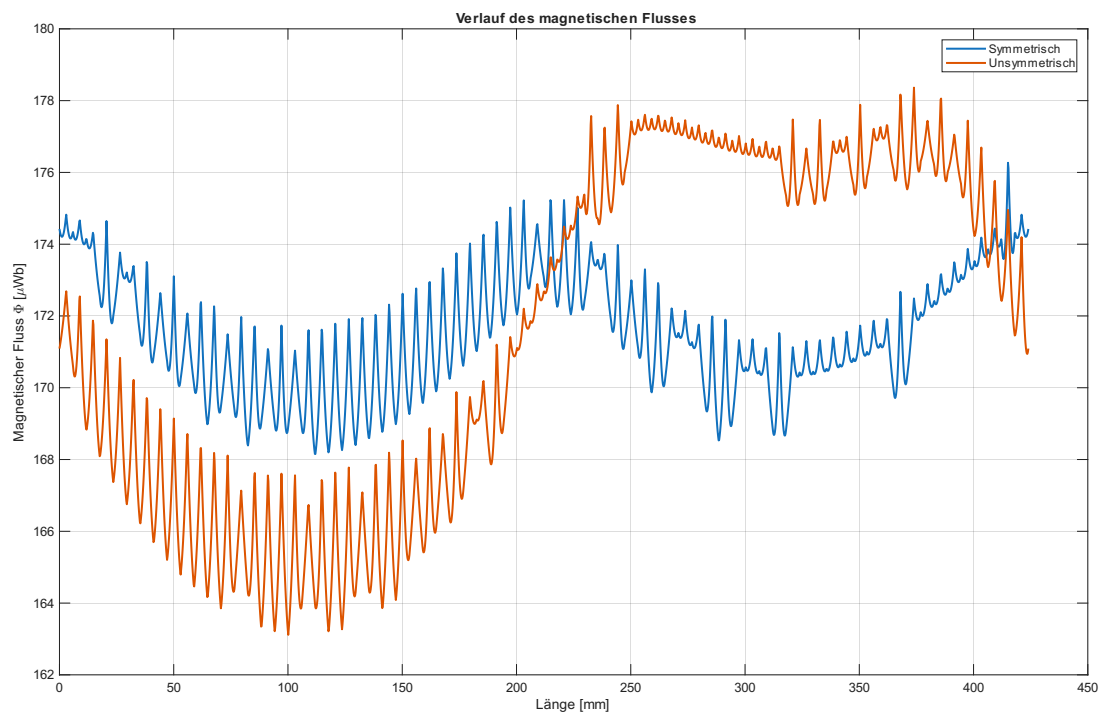


Abbildung 2.7: Einfluss der Leiterpositionierung auf die Flussverteilung im Kern

Auf der Abszisse (X-Achse) ist der Weg entlang des mittleren Kernumfangs aufgetragen. Der blaue Graph zeigt den Referenzverlauf bei zentrierter Leiteranordnung: Hier ist eine homogene, symmetrische Verteilung des magnetischen Flusses über den gesamten Kernumfang zu erkennen. Im Gegensatz dazu weist der orangefarbene Verlauf, der eine exzentrische Positionierung repräsentiert, eine starke Asymmetrie auf. Es wird deutlich, dass in den Bereichen, in denen der Leiter dem Kern näher liegt, die magnetische Belastung signifikant ansteigt, während sie auf der gegenüberliegenden Seite abfällt.

2.5 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:

$$\varepsilon = \frac{k_n \cdot I_s - I_p}{I_p} \cdot 100 \% \quad (13)$$

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.

2.6 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.

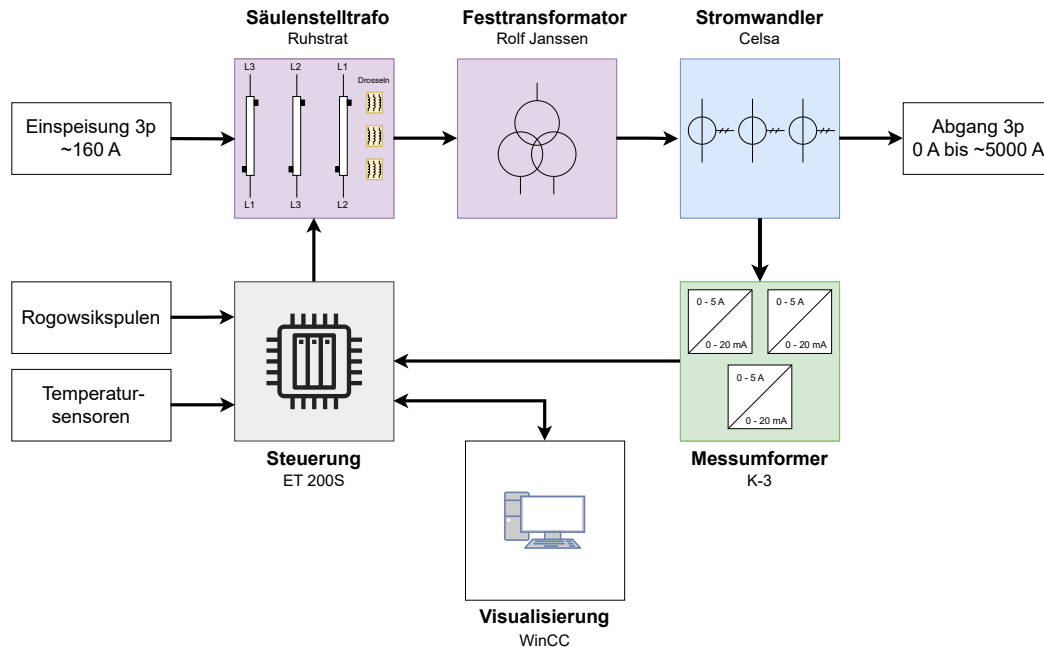


Abbildung 3.1: Blockschaltbild des Hochstrom-Prüfstandes mit Leistungs- und Signalfaden

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 Prüfings 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

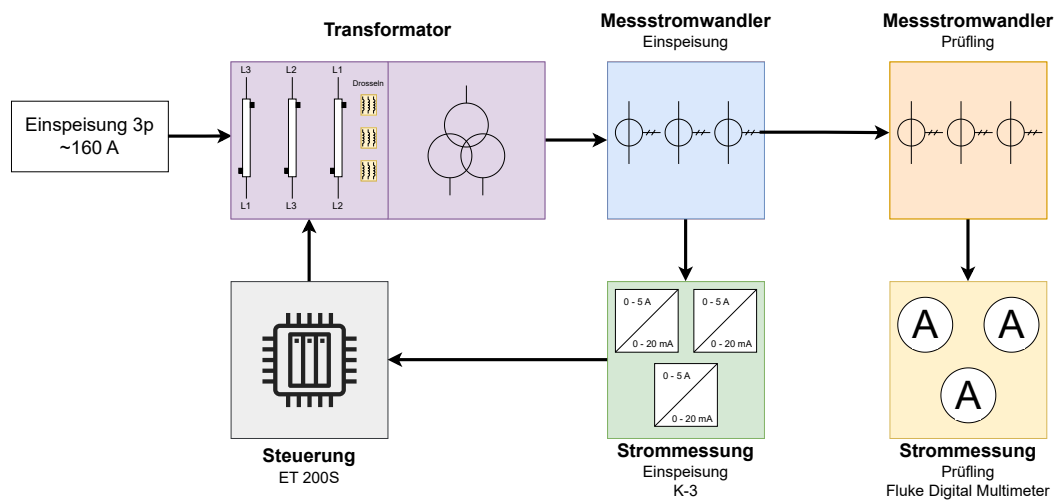


Abbildung 3.2: Schematischer Aufbau der Messstrecke zur Ermittlung der Messabweichung

Der Aufbau der Messstrecke (siehe Abbildung 3.2) realisiert die Vergleichsmessung durch zwei parallele Erfassungspfade, um eine direkte Vergleichbarkeit zwischen Referenz und Prüfing 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 Prüfings 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 Rahmen und der Aufbau des Prüfstandes dargelegt wurden, befasst sich dieses Kapitel mit der Inbetriebnahme und der Optimierung des Messsystems. Die Inbetriebnahme des Prüfstandes diente dazu, die Funktionalität der Regelung sowie die Genauigkeit der Messwerterfassung unter Lastbedingungen zu verifizieren. Bei der Auswertung der Messreihen wurde jedoch eine Abweichung festgestellt, die außerhalb der Toleranzen der Genauigkeitsklassen lag.

4.1 Inbetriebnahme und Plausibilitätsprüfung

Die Fehleranalyse ergab zwei Schwachstellen im Messkonzept. Einerseits wiesen die Messumformer, welche die Wandler signale für die SPS aufbereiteten, Nichtlinearitäten und Skalierungsfehler auf. Dies führte dazu, dass der Steuerung bereits Istwerte übermittelt wurden. Andererseits erfolgte die Erfassung der Prüflingsdaten mittels Multimetern nicht zur Referenzmessung der Einspeisung. Bedingt durch Lastschwankungen im Pfad und Ablesefehler konnte keine Datenbasis für die Berechnung der Messabweichung ϵ gemäß Gleichung (2) geschaffen werden.

4.2 Optimierung der Messdatenerfassung

Um die Fehlerquellen zu eliminieren, wurde eine Neuausrichtung der Messtechnik vorgenommen. Anstelle der Signalfade kommen nun Energiemessgeräte der Siemens SENTRON-Reihe zum Einsatz, wie das PAC 4220 zur Überwachung der Einspeisung und das PAC 3220 zur Erfassung der Messwerte des Prüflings. Diese Geräte werden über PROFINET in die Systemstruktur eingebunden. Hierdurch entfallen Effekte, die bei der Übertragung von Normsignalen in einer Umgebung auftreten können. Durch die Nutzung der Geräteklasse wird eine Messbasis sichergestellt. Da beide Geräte ihre Daten über den Bus an die CPU liefern, ist eine Korrelation der Messwerte für die Einspeisung und den Prüfling gewährleistet.

4.3 Validierung des optimierten Systems

Zur Validierung des Prüfstandes wurde ein Messablauf implementiert. Hierfür wurde ein Steuerungsprogramm entwickelt, welches die Kennlinienaufnahme automatisiert. Das Programm fährt die in der DIN EN 61869-2 definierten Prozentwerte des Nennstroms automatisch an. An jedem Messpunkt wird eine Haltezeit von 5 Minuten eingehalten, um Stabilität zu gewährleisten. Während dieser Zeit erfolgt eine Mittelwertbildung der Messdaten. Die Ergebnisse werden in das WinCC-Datenlogging übernommen und für die Auswertung bereitgestellt. Durch diesen Ablauf werden Fehlereinflüsse minimiert und die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse 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>
- [4] Joachim Herz Stiftung, *Magnetfeld und Feldlinien*, LEIFIphysik, Abgerufen am 15. Januar 2026, 2026. Adresse: <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/permanentmagnetismus/grundwissen/magnetfeld-und-feldlinien>
- [5] H. Kuchling, *Taschenbuch der Physik*, 21. Leipzig: Hanser Fachbuchverlag, 2014.
- [6] R. A. Pfuntner, „The Accuracy of Current Transformers Adjacent to High-Current Busses,“ *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, Jg. 70, Nr. 2, S. 1656–1661, 1951.
- [7] MBS AG, *Fremdfeldkompensierte Stromwandler für hohe Primärströme*, Technische Information und Produktbroschüre, MBS AG, o.J. Adresse: <https://www.schutztechnik.com/posts/fremdfeldkompensierte-stromwandler-fur-hohe-primarstrom>

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
