

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 22. 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 | 9 |
| 2.3.3 Hysterese und reales Verhalten | 9 |
| 2.3.4 Störeinflüsse bei Messstromwandlern | 10 |
| 2.4 Messabweichung und Fehlerfortpflanzung | 13 |
| 2.5 Niederspannungsschaltanlagen | 14 |
| 2.5.1 Aufbau einer Niederspannungsschaltanlagen | 14 |
| 2.5.2 Kupferschienensystem und Geometrie | 14 |
| 3 Versuchsaufbau und Methodik | 16 |
| 3.1 Hochstrom-Prüfstand | 16 |
| 3.1.1 Aufbau und Funktionsweise | 16 |
| 3.1.2 Regelungskonzept | 17 |
| 3.1.3 Ursprünglicher Aufbau der Messstrecke | 17 |
| 3.1.4 Schwachstellen im Messkonzept | 18 |
| 3.2 Optimierte Messsystem | 19 |
| 3.2.1 Systemintegration und Programmentwicklung | 20 |
| 3.2.2 Auswertung der neuen Messstrecke | 21 |
| 3.3 Konstruktive Gestaltung der Primärleiterführung | 22 |
| 3.3.1 Geometrische Anordnung: Parallel- vs. Dreieckskonfiguration | 23 |
| 3.3.2 Spezifikation der Kupferschienen und Phasenmittenabstände | 23 |
| 4 Auswertung und Diskussion | 24 |
| 4.1 Durchführung der Messreihen am optimierten Prüfstand | 24 |
| 4.2 Messergebnisse: Einfluss der Leitergeometrie | 24 |
| 4.3 Messergebnisse: Vergleich der Wandlertechnologien | 24 |
| 4.4 Auswertung der Messergebnisse | 24 |
| 5 Zusammenfassung der Ergebnisse | 25 |
| 5.1 Bewertung der Prüfstands-Optimierung | 25 |
| 5.2 Konstruktionsempfehlung für zukünftige Wandler-Einbauten | 25 |
| 6 Ausblick | 26 |
| A Anhang | 27 |

Eigenständigkeitserklärung

28

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Schematischer Aufbau eines Aufsteckstromwandlers | 2 |
| 2.2 | Schematischer Aufbau eines Wandlers mit zusätzlichen Kompensationswicklungen | 3 |
| 2.3 | Schematische Darstellung der zentralen und exzentrischen Positionierung der Kupferschiene | 4 |
| 2.4 | Vollständiges Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers | 6 |
| 2.5 | Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers | 6 |
| 2.6 | Schematische Darstellung der magnetischen Kopplung im Wandler | 7 |
| 2.7 | | 11 |
| 2.8 | Einfluss von Kerngröße und Stromstärke auf den zusätzlichen Streufluss | 12 |
| 2.9 | Einfluss der Leiterpositionierung auf die Flussverteilung im Kern | 13 |
| 2.10 | Darstellung der Phasenmittendistanzen in Abhängigkeit von der Schienenkonfiguration | 15 |
| 3.1 | Blockschaltbild des Hochstrom-Prüfstandes mit Leistungs- und Signalpfaden | 16 |
| 3.2 | Schematischer Aufbau der Messstrecke zur Ermittlung der Messabweichung | 17 |
| 3.3 | Analyse der Messabweichung und Standardabweichung der Phasen L1, L2 und L3 im ursprünglichen Versuchsaufbau | 18 |
| 3.4 | Schematischer Aufbau der optimierten Messstrecke mit Siemens SENTRON Messgeräten | 19 |
| 3.5 | Struktogramm der Schrittkette zur automatisierten Kennlinienaufnahme (FB1) | 21 |
| 3.6 | Vergleichende Analyse der Messabweichung (oben) und Standardabweichung (unten) unter Einsatz des PAC 4220 | 22 |

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 transformiert hohe Wechselströme aus dem Primärnetz in kleine und messbare Ströme auf der Sekundärseite. Er fungiert als Bindeglied zwischen dem Hochstrombereich und den Mess- oder Schutzeinrichtungen. Das grundlegende Funktionsprinzip beruht auf der galvanischen Trennung zwischen Primär- und Sekundärkreis. Dies ermöglicht den Anschluss standardisierter Messgeräte, Zähler oder Schutzrelais für Nennströme von 1 A oder 5 A, ohne diese dem hohen Potenzial oder den hohen Strömen des Primärleiters auszusetzen.

2.2 Aufbau und Bauformen

Der betrachtete Messstromwandler setzt sich konstruktiv im Wesentlichen aus sechs in Abbildung 2.1 dargestellten Hauptkomponenten zusammen.

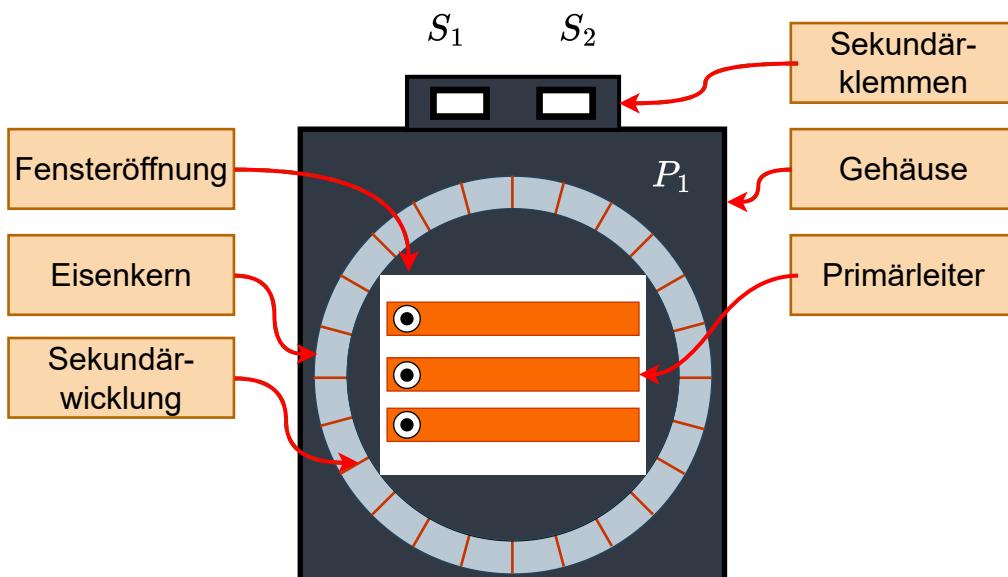


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau eines Aufsteckstromwandlers

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 3.3. Dieser Primärleiter wird durch die Fensteröffnung des Wandlers geführt. Diese Bauform ohne integrierte Primärwicklung wird als Durchsteck- oder Aufsteckstromwandler bezeichnet. Sie entspricht physikalisch einer Windungszahl von Eins ($N_1 = 1$) und dominiert aufgrund der einfachen Montage im Bereich mittlerer bis hoher Ströme. Zur Gewährleistung einer zentrierten Leiterführung bieten einige Hersteller spezielle Vorrichtungen zur Fixierung unterschiedlicher Schienengeometrien im Fensterausschnitt an.

Das zentrale Element der Übertragung bildet der Magnetkern. Ist dieser als geschlossener Toroid ohne Luftspalt ausgeführt, wird er als Ringkern bezeichnet. Der Kern besteht zur Minimierung der Übertragungsverluste aus einem ferromagnetischen Werkstoff mit hoher Permeabilität (μ_r). Die magnetischen Eigenschaften des Kernmaterials bestimmen maßgeblich die Genauigkeit und das Sättigungsverhalten des Wandlers. Als Werkstoffe kommen üblicherweise Siliziumeisen, Nikel-eisen oder nanokristalline Legierungen zum Einsatz [1, S. 63].

Die Sekundärwicklung ist direkt auf diesen Ringkern aufgebracht, transformiert den magnetischen Fluss zurück in einen elektrischen Strom und ist mit den externen Anschlussklemmen verbunden. Das Gehäuse umschließt 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 die zwei Hauptkategorien Messstromwandler und Schutzstromwandler unterteilen. Obwohl beide auf demselben physikalischen Prinzip basieren, unterscheiden sie sich maßgeblich durch ihr Sättigungsverhalten. Der Messstromwandler dient primär der Erfassung von Strömen innerhalb des Nennstrombereichs zur Speisung von beispielsweise Energiezählern. Ein entscheidendes Kriterium ist hierbei der schnelle Übergang des Kerns in die Sättigung bei hohen Überströmen. Dies begrenzt den Sekundärstrom und schützt die angeschlossene empfindliche Messtechnik vor Zerstörung [2, Kap. 2.2].

Im Gegensatz dazu dient der Schutzstromwandler der Ansteuerung von Schutzeinrichtungen wie Relais. Er muss gewährleisten, dass der sekundäre Strom auch weit über den Nennbereich hinaus proportional zum Primärstrom bleibt. Der Kern darf folglich nicht frühzeitig sättigen, um eine zuverlässige Schutzauslösung sicherzustellen [2, Kap. 2.2]. Eine weitere spezielle Wandlerart stellen die im folgenden Abschnitt 2.2.2 behandelten Kompensationswicklungen dar.

2.2.2 Kompensationswicklungen

Kompensationswicklungen dienen primär der Minimierung zweier signifikanter Störeinflüsse bei Messstromwandlern. Dabei handelt es sich um den durch eine exzentrische Positionierung des Primärleiters verursachten Lagefehler (siehe Abbildung 2.3) sowie die Einwirkung externer Fremdfelder. Die physikalischen Grundlagen zu letzterem Aspekt werden in Kapitel 2.3.4 erläutert. Eine exzentrische Leiteranordnung tritt in der Praxis häufig auf, wenn die Fensteröffnung des Wandlers deutlich größer als der Querschnitt der verwendeten Stromschiene dimensioniert ist. Aufgrund des geometrischen Spielraums ist eine exakte Zentrierung bei der Montage oft nicht gewährleistet.

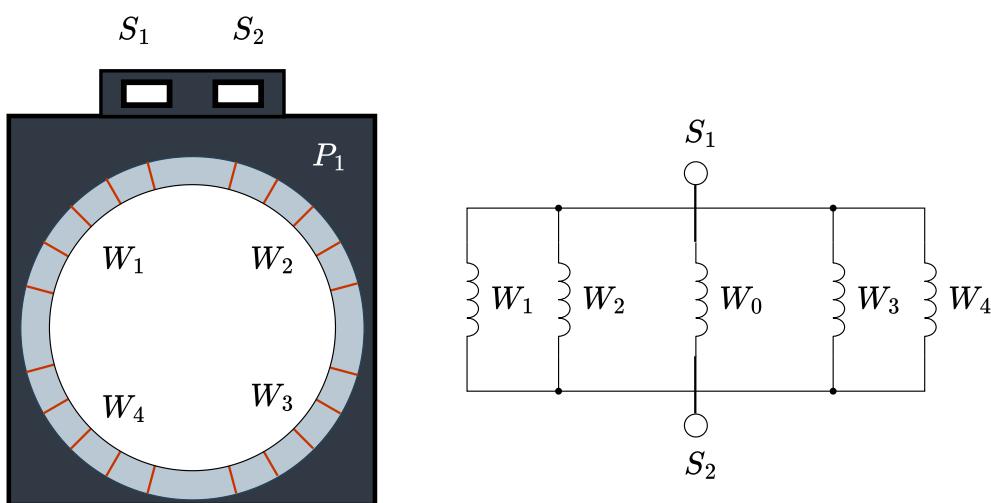


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau eines Wandlers mit zusätzlichen Kompensationswicklungen

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 durch zusätzlich zur eigentlichen Sekundärwicklung W_0 aufgebrachte und parallel geschaltete Teilwicklungen realisiert. Diese Parallelschaltung ermöglicht den Fluss von Ausgleichsströmen zwischen den Segmenten zur Kompensation lokaler Sättigungserscheinungen und Asymmetrien im Magnetfluss [1, S. 77]. Die Abbildung stellt lediglich die allgemeine Kompensationswicklungstechnik dar. Da Hersteller in der Praxis oft individuelle und teils proprietäre Wicklungsdesigns einsetzen, kann die tatsächliche technische Ausführung von dieser schematischen Darstellung abweichen.

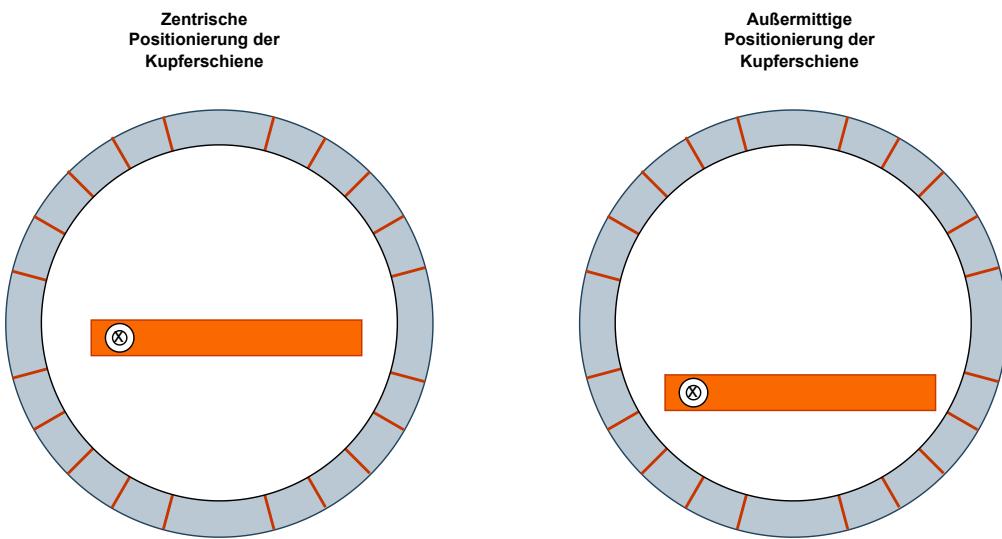


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der zentralen und exzentrischen Positionierung der Kupferschiene

2.2.3 Normative Anforderungen und Genauigkeitsklassen

Messstromwandler werden in unterschiedlichen Genauigkeitsklassen gefertigt. Die Anforderungen hierfür sind in der DIN EN 61869-2 [3, S. 22] festgelegt. 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 sowie dem Kennbuchstaben und dem Genauigkeitsgrenzfaktor (ALF) zusammen [3, S. 23–24]. Die Klasse P beschreibt Standard-Schutzwandler ohne definierten Grenzwert für den Remanenzfluss. Im Gegensatz dazu kennzeichnet die Klasse PR Schutzwandler mit begrenztem Remanenzfluss. Diese müssen nach dem Abschalten von Fehlerströmen eine geringe Remanenz aufweisen. Dies wird in der Praxis häufig durch konstruktive Maßnahmen wie Luftspalte im Kern erreicht [1, S. 82]. Der Genauigkeitsgrenzfaktor gibt an, bis zum Wievielfachen des Nennstroms die Fehlertoleranzen 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])

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

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 Fehlertoleranzen ist 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 als prozentuale Abweichung des Sekundärstroms vom idealen Wert (siehe Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2: Grenzwerte für die Übersetzungsmessabweichung (gemäß DIN EN 61869-2 Tabelle 201 [3, 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 als Maß für die Phasenverschiebung entscheidend. 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])

| Genauigkeitsklasse | Fehlwinkel | | | | | | | |
|--------------------|--------------------------|----|-----|-----|--------------------------|------|------|------|
| | \pm Minuten | | | | \pm Zentiradian | | | |
| | bei Strom (% von I_n) | | | | bei Strom (% von I_n) | | | |
| | 5 | 20 | 100 | 120 | | 5 | 20 | 100 |
| 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. Sein Verhalten lässt sich daher mithilfe des Transformator-Ersatzschaltbildes beschreiben. 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 aus Eisenverlustwiderstand R_{FE} und Hauptinduktivität L_H modelliert den Eisenkern, während R_B und L_B die externe Bürde abbilden.

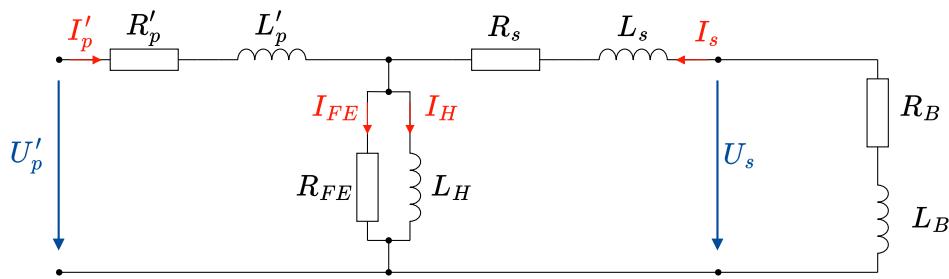


Abbildung 2.4: Vollständiges Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers

Bei einem Aufsteckstromwandler bildet der durch die Fensteröffnung geführte Leiter die Primärwicklung. Da dieser Leiterabschnitt sehr kurz ist und keine Wicklung im herkömmlichen Sinn 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.

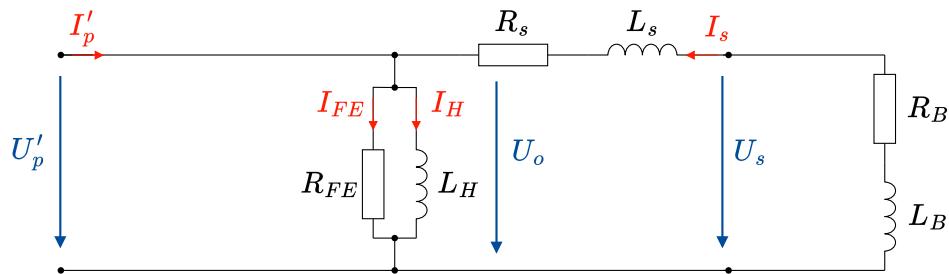


Abbildung 2.5: Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers

Theoretisch ließe sich auch die sekundäre Streuinduktivität L_s bei zentrierter Lage des Primärleiters und gleichmäßiger Verteilung der Sekundärwicklung über den Umfang vernachlässigen [1, S. 65]. Da in der Praxis weder eine ideale Zentrierung des Leiters noch eine perfekte Wicklungsverteilung durch den Hersteller garantiert werden kann, wird L_s in der vorliegenden Betrachtung berücksichtigt.

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

Die physikalische Grundlage eines Stromwandlers bildet die elektromagnetische Kopplung zwischen dem Primärleiter und dem Sekundärkreis über einen magnetischen Kern. Dieser Zusammenhang wird durch die Maxwell-Gleichungen beschrieben und lässt sich idealisiert am Modell des magnetischen Kreises herleiten, wie in Abbildung 2.6 schematisch dargestellt ist.

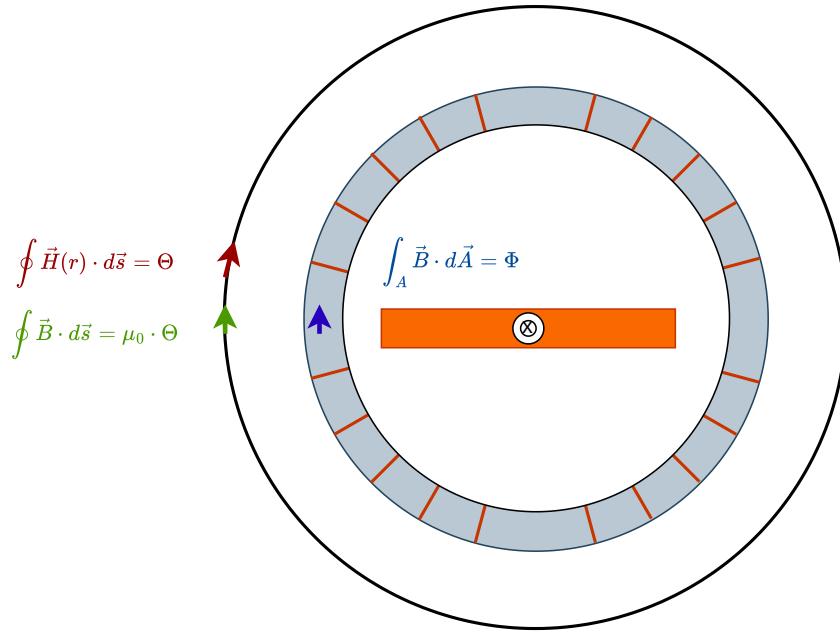


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung der magnetischen Kopplung im Wandler

Ein durch den Ringkern geführter Primärstrom I_{pri} erzeugt gemäß dem Ampèreschen Durchflutungsgesetz ein magnetisches Feld. Das Linienintegral der magnetischen Feldstärke \vec{H} entlang eines geschlossenen Weges \mathcal{S} entspricht dabei der umschlossenen Durchflutung Θ :

$$\oint_{\mathcal{S}} \vec{H} \cdot d\vec{s} = I_{pri} = \Theta \quad (1)$$

Der Stromwandler nutzt einen Ringkern aus ferromagnetischem Material mit einer hohen relativen Permeabilität $\mu_r \gg 1$. Unter der Annahme eines torusförmigen Kerns mit dem mittleren Radius r verläuft der Integrationsweg kreisförmig entlang der mittleren Feldlinie. Aufgrund der Rotationssymmetrie ist der Betrag der Feldstärke H konstant. Das Wegintegral entspricht somit dem Produkt aus H und dem Kreisumfang $2\pi r$:

$$\begin{aligned} \oint_{\mathcal{S}} \vec{H} \cdot d\vec{s} &= H \cdot \oint_{\mathcal{S}} ds = H \cdot 2\pi r = I_{pri} \\ \Rightarrow H &= \frac{I_{pri}}{2\pi r} \end{aligned} \quad (2)$$

Die magnetische Flussdichte \vec{B} im Kernmaterial ergibt sich aus der Feldstärke und den Materialeigenschaften. Mit der magnetischen Feldkonstante μ_0 und der relativen Permeabilität μ_r folgt:

$$B = \mu_0 \mu_r \cdot H = \mu_0 \mu_r \cdot \frac{I_{pri}}{2\pi r} \quad (3)$$

Für die Funktion des Stromwandlers ist entscheidend, welcher magnetische Fluss Φ den Eisenquerschnitt A durchsetzt, da dieser in der Sekundärwicklung die Spannung induziert. Der Fluss berechnet sich durch Integration der Flussdichte über die Querschnittsfläche:

$$\Phi = \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (4)$$

Geht man vereinfacht von einer über den Querschnitt konstanten Flussdichte aus ($\vec{B} \parallel d\vec{A}$), ergibt sich der direkte Zusammenhang zwischen dem verursachenden Primärstrom und dem resultierenden magnetischen Fluss im Kern:

$$\Phi = B \cdot A = \mu_0 \mu_r \frac{A}{2\pi r} \cdot I_{pri} \quad (5)$$

Dieser Ausdruck zeigt, dass der magnetische Fluss im Wandlerkern – solange keine Sättigung eintritt – proportional zum Primärstrom I_{pri} ist. Der Faktor $\mu_0 \mu_r \frac{A}{2\pi r}$ fasst dabei die Geometrie (Querschnitt A und Umfang $2\pi r$) sowie die magnetischen Eigenschaften des Kerns zusammen.

Der in Gleichung (5) hergeleitete Zusammenhang zwischen Fluss und Strom lässt sich in Analogie zum elektrischen Stromkreis (Ohmsches Gesetz) betrachten. Der Term, der die Geometrie und die Materialeigenschaften des Kerns beschreibt, stellt den magnetischen Widerstand R_m dar:

$$R_m = \frac{2\pi r}{\mu_0 \mu_r A} \quad (6)$$

Damit lässt sich der magnetische Fluss Φ vereinfacht über das Hopkinsonsche Gesetz ausdrücken, welches das magnetische Äquivalent zum Ohmschen Gesetz bildet. Die magnetische Durchflutung Θ entspricht dabei der elektrischen Spannung und der magnetische Fluss dem elektrischen Strom:

$$\Phi = \frac{\Theta}{R_m} \quad (7)$$

Im Betrieb des Stromwandlers wirkt nicht nur der Primärstrom auf den magnetischen Kreis. Auf der Sekundärseite befindet sich eine Wicklung mit der Windungszahl N_{sec} . Der magnetische Fluss induziert in dieser Wicklung eine Spannung, die bei geschlossenem Sekundärkreis einen Strom I_{sec} treibt.

Nach der Lenzschen Regel ist dieser Sekundärstrom seiner Ursache entgegengerichtet. Er erzeugt eine magnetische Gegendurchflutung Θ_{sec} , die den Fluss im Kern schwächt. Die resultierende magnetische Durchflutung Θ_{res} , die effektiv den Fluss im Kern treibt, ist somit die Differenz aus Primär- und Sekundärdurchflutung:

$$\Theta_{res} = \Theta_{pri} - \Theta_{sec} = N_{pri} \cdot I_{pri} - N_{sec} \cdot I_{sec} \quad (8)$$

Dabei ist N_{pri} die Windungszahl der Primärseite (bei Durchsteckwandlern ist $N_{pri} = 1$). Setzt man die resultierende Durchflutung in das Hopkinsonsche Gesetz ein, erhält man:

$$\Phi \cdot R_m = N_{pri} \cdot I_{pri} - N_{sec} \cdot I_{sec} \quad (9)$$

Für die ideale Betrachtung eines Stromwandlers wird ein Kernmaterial mit sehr hoher Permeabilität ($\mu_r \rightarrow \infty$) angenommen. Daraus folgt gemäß Gleichung (6), dass der magnetische Widerstand gegen Null geht ($R_m \rightarrow 0$). Damit der magnetische Fluss Φ einen endlichen Wert annimmt, muss die resultierende Durchflutung Θ_{res} ebenfalls gegen Null gehen. Es stellt sich ein fast ideales Durchflutungsgleichgewicht ein:

$$0 = N_{pri} \cdot I_{pri} - N_{sec} \cdot I_{sec}$$

$$N_{sec} \cdot I_{sec} = N_{pri} \cdot I_{pri} \quad (10)$$

Durch Umstellen dieser Gleichung ergibt sich der Sekundärstrom in Abhängigkeit vom Primärstrom und dem Übersetzungsverhältnis der Windungszahlen:

$$I_{sec} = I_{pri} \cdot \frac{N_{pri}}{N_{sec}} \quad (11)$$

Diese Beziehung beschreibt das ideale Übertragungsverhalten des Stromwandlers, bei dem der Sekundärstrom proportional zum Primärstrom ist und lediglich durch das Windungszahlverhältnis skaliert wird.

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 als Verhältnis der Flussdichte im Medium zur Flussdichte im Vakuum. In Tabelle 2.4 sind die verschiedenen Stoffeigenschaften nach Kuchling zusammengefasst.

Tabelle 2.4: Magnetische Stoffeigenschaften und ihre Permeabilitätszahlen [4, 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 und somit zu einer massiven Beeinträchtigung der Genauigkeit bei Fremdfeldeinfluss.

2.3.3 Hysterese und reales Verhalten

Aufgabe

Wird später geschrieben!

2.3.4 Störeinflüsse bei Messstromwandlern

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

Einfluss der Bürde

Die Impedanz der Bürde bestimmt das Betriebsverhalten des Stromwandlers. Ein erhöhter Widerstand im Sekundärkreis 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 und die Messabweichung ε steigt an.

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

$$U_i = I_s \cdot (R_{\text{Wicklung}} + R_{\text{Leitung}} + R_{\text{Mess}} + R_{\text{Komp}}) \quad (12)$$

wobei der Restwiderstand definiert ist als

$$R_{\text{Rest}} = R_{\text{Wicklung}} + R_{\text{Leitung}} + R_{\text{Mess}} \quad (13)$$

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

$$U_i = 4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi \quad (14)$$

Durch Gleichsetzen von (12) und (14) sowie anschließendes Auflösen nach Φ ergibt sich

$$\Phi = \frac{I_s \cdot (R_{\text{Rest}} + R_{\text{Komp}})}{4,44 \cdot f \cdot N_s} \quad (15)$$

Aus dieser Beziehung geht hervor, dass ein Anstieg von R_{Komp} bei eingeprägtem 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 und unendlich langen Leiter wird durch das Gesetz von Biot-Savart beschrieben

$$B(r) = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot r} \quad (16)$$

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 verlaufen die Sammelschienen der drei Phasen

in Hochstrom-Schaltanlagen jedoch oft parallel und mit geringem Abstand zueinander [5]. 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 [6]

$$B_{\text{Fremd}} \approx 10^{-6} \cdot I_p \cdot \frac{R + 0,5 \cdot W}{A} \cdot \log_{10} \left(\frac{D + R}{D - R} \right) \quad (17)$$

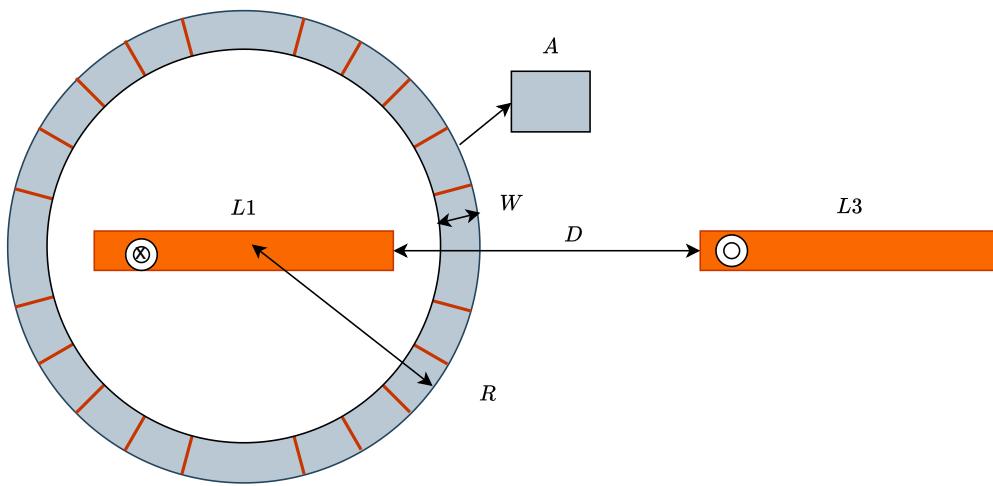


Abbildung 2.7

Die Variablen sind gemäß der MBS-Spezifikation definiert als zusätzlich induzierte magnetische Flussdichte im Kern B_{Fremd} (in T), Strom im Nachbarleiter I_p (in A), äußerer Radius R (in m), Breite W (in m), Querschnitt des Eisenkerns A (in m^2) und Außenphasenabstand D (in m).

Aufgabe

Diagramm vorläufig – Anpassung möglich.

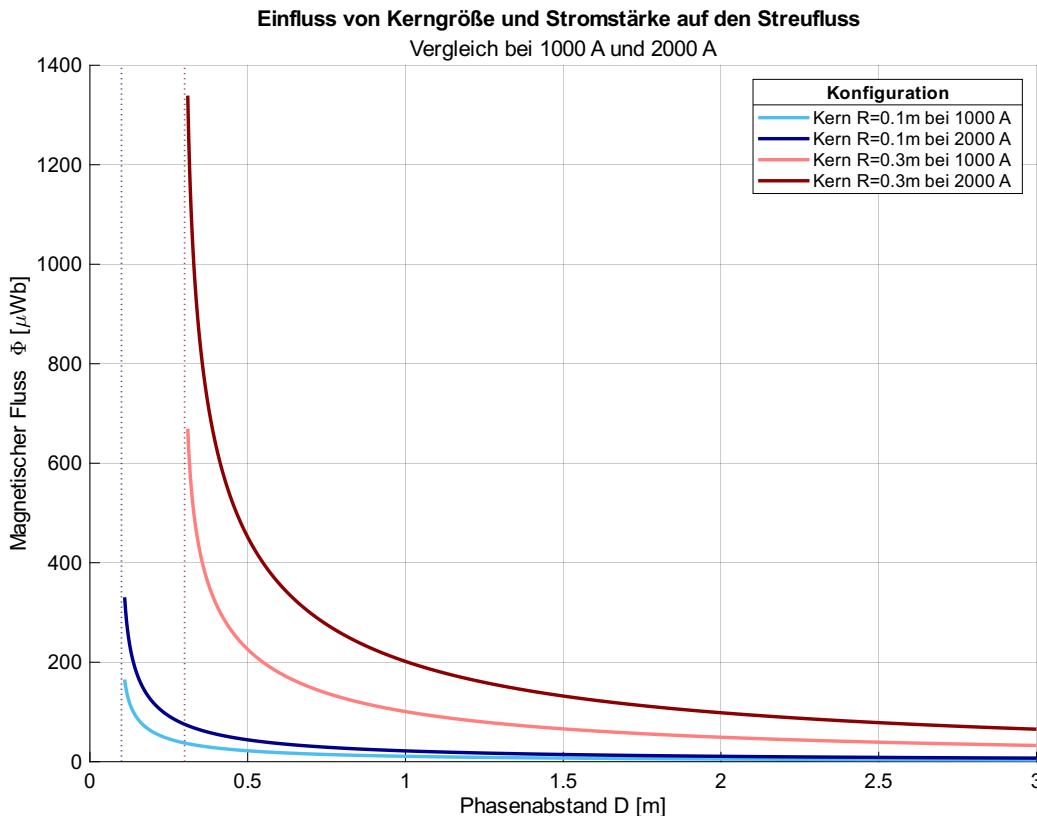


Abbildung 2.8: Einfluss von Kerngröße und Stromstärke auf den zusätzlichen Streufluss

Abbildung 2.8 visualisiert den durch den benachbarten Leiter in den Kern eingekoppelten zusätzlichen magnetischen Fluss Φ_{Fremd} . Es werden die zwei Szenarien eines kleinen Kerns (blau) und eines großen Kerns (rot) verglichen.

Aus den Verläufen wird deutlich, dass ein geometrisch größerer Kern (rote Kurve) aufgrund seiner größeren räumlichen Ausdehnung absolut gesehen 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

$$B_{\text{res}} = B_{\text{Nutz}} + \underbrace{\frac{\Phi_{\text{Fremd}}}{A}}_{B_{\text{Fremd}}} \quad (18)$$

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 . Dies führt zu einer starken Erhöhung der Flussdichte B_{Fremd} und zum schnellen Erreichen der Sättigungsgrenze. 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 (17) in die Flussdefinition herleiten. Dabei kürzt sich der Querschnitt A heraus

$$\Phi_{\text{Fremd}} \approx 10^{-6} \cdot I_p \cdot (R + 0,5 \cdot W) \cdot \log_{10} \left(\frac{D + R}{D - R} \right) \quad (19)$$

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 folglich nicht aus einer geringeren Einkopplung, sondern aus ihrer höheren Kapazität zur Aufnahme dieses Zusatzflusses.

Exzentrische Positionierung der Kupferschiene

Wie bereits in Abschnitt 2.2.2 dargelegt, ist eine ideal zentrierte Installation der Primärleiter (Kupferschienen) in der Praxis konstruktionsbedingt oft nicht realisierbar. Eine Abweichung von der zentralen Lage führt zu einer inhomogenen Feldverteilung im Eisenkern und begünstigt lokale Sättigungserscheinungen. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 2.9 verdeutlicht.

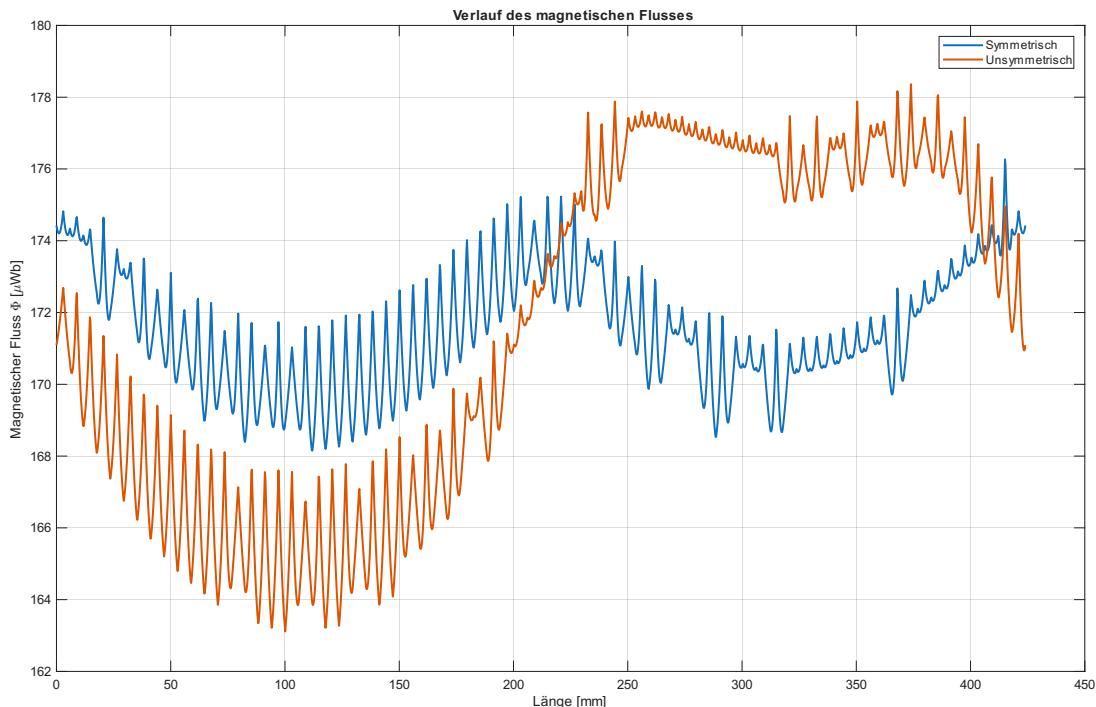


Abbildung 2.9: Einfluss der Leiterpositionierung auf die Flussverteilung im Kern

Auf der Abszisse (X-Achse) ist der Weg entlang des mittleren Kernumfangs aufgetragen. Der blaue Graph zeigt den Referenzverlauf bei zentrierter Leiteranordnung mit einer homogenen und symmetrischen Verteilung des magnetischen Flusses über den gesamten Kernumfang. Im Gegensatz dazu weist der orangefarbene Verlauf für die exzentrische Positionierung eine starke Asymmetrie auf. In den Bereichen, in denen der Leiter dem Kern näher liegt, steigt die magnetische Belastung signifikant an, während sie auf der gegenüberliegenden Seite abfällt.

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 zwei zentrale Kenngrößen ermittelt werden. Die Übersetzungsmessabweichung ε beschreibt die prozentuale Differenz der Stromamplituden und wird nach folgender Gleichung berechnet

$$\varepsilon = \frac{k_n \cdot I_s - I_p}{I_p} \cdot 100 \% \quad (20)$$

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 Niederspannungsschaltanlagen

Niederspannungsschaltanlagen dienen der Verteilung, Schaltung und Absicherung elektrischer Energie im Niederspannungsbereich bis 1000 V. Sie stellen die Verbindung zwischen der Einspeisung und den nachgelagerten Verbrauchern her und sind für hohe Dauerströme sowie mechanische und thermische Beanspruchungen infolge von Kurzschlägen ausgelegt.

2.5.1 Aufbau einer Niederspannungsschaltanlagen

Der konstruktive Aufbau einer Niederspannungsschaltanlage folgt einem modularen Prinzip, bei dem mehrere Felder über ein gemeinsames Hauptsammelschiensystem im Rücken der Anlage elektrisch miteinander verbunden sind. Diese Felder lassen sich funktional in drei wesentliche Kategorien unterteilen: Während Einspeisefelder die elektrische Energie beziehen und der Hauptsammelschiene zuführen, erfolgt über die Abgangsfelder die gezielte Verteilung an nachgelagerte Verbraucher. Kupplungsfelder ermöglichen zudem die galvanische Verbindung oder Trennung einzelner Sammelschienenabschnitte, um die Versorgungssicherheit und Flexibilität im Anlagenbetrieb zu erhöhen.

Neben der reinen Energieverteilung ist die mechanische und thermische Festigkeit gegenüber hohen Kurzschlussströmen ein entscheidendes Sicherheitsmerkmal der Konstruktion. Die Anlagen müssen technisch so ausgelegt sein, dass sie selbst extremen Belastungen, wie einem Kurzschlussstrom von $I_k = 100$ kA, standhalten. Ein wesentlicher Aspekt des Personenschutzes ist dabei das Störlichtbogen: Im Fehlerfall wird die entstehende Druckenergie kontrolliert über das Dach der Anlage abgeführt, um eine Gefährdung des Bedienpersonals zu verhindern und ein schnellstmögliche Erlöschen des Lichtbogens zu gewährleisten

2.5.2 Kupferschiensystem und Geometrie

Das Kupferschiensystem bildet das zentrale Element für den Energietransport innerhalb der Schaltanlage. Es übernimmt die elektrische Verbindung zwischen der Einspeisung, den Leistungsschaltern und den einzelnen Abgängen. Bei der Dimensionierung muss die geforderte Strombelastbarkeit sichergestellt sein, wobei die spezifischen Schienenquerschnitte und Bemessungsströme in Tabelle 2.5 aufgeführt sind.

Die geometrische Anordnung des Schienensystems, insbesondere der Phasenmittelpunktabstand, wird maßgeblich durch die Baugröße der eingesetzten Leistungsschalter bestimmt. Dieser Abstand definiert die minimale Breite eines Feldes und beeinflusst durch die räumliche Nähe der Leiter die magnetische Kopplung zwischen den Phasen.

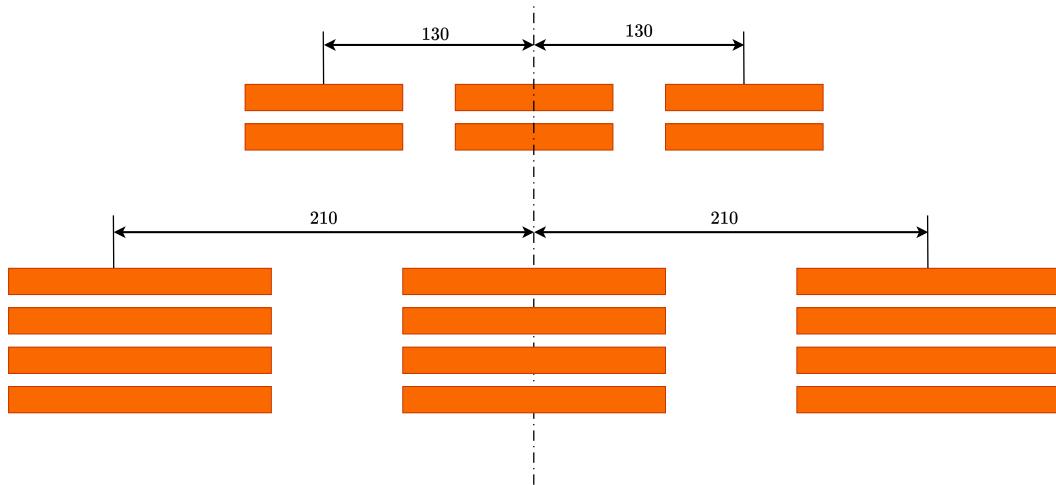


Abbildung 2.10: Darstellung der Phasenmittenabstände in Abhängigkeit von der Schienenkonfiguration

Abbildung 2.10 verdeutlicht diesen Zusammenhang für zwei gängige Konfigurationen. Hierbei wird ein Phasenmittenabstand von 130 mm für Ströme bis zu 4000 A eingesetzt, was bei einem 2500-A-Feld durch ein Kupferschienensystem aus zwei Leitern der Dimension 100×10 mm realisiert wird. Für höhere Anforderungen bis zu 6300 A wird hingegen ein Phasenmittenabstand von 210 mm gewählt. Dies ermöglicht die Montage von Paketen mit bis zu fünf parallelen Schienen pro Phase, wobei die Abbildung beispielhaft die Anordnung für ein 4000-A-Feld mit vier Einzelschienen darstellt.

Tabelle 2.5: Geometrische Daten und Schienenpakete für Siemens 3WA Leistungsschalter

| Bemessungsstrom | Phasenmittenabstand | Kupferschienensystem |
|-----------------|---------------------|-----------------------------|
| 2000 A | 130 mm | $2 \times 80 \times 10$ mm |
| 2500 A | 130 mm | $2 \times 100 \times 10$ mm |
| 3200 A | 210 mm | $3 \times 100 \times 10$ mm |
| 4000 A | 210 mm | $4 \times 100 \times 10$ mm |
| 5000 A | 210 mm | $5 \times 120 \times 10$ mm |

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 in die technische Beschreibung der Basiskomponenten, die kritische Analyse des ursprünglichen Messkonzepts sowie die daraus resultierende Systemoptimierung für die finalen Messreihen.

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 Lastbedingungen auf ihre thermische Belastbarkeit geprüft werden. Die Anlage ermöglicht die Bereitstellung von Strömen bis 6000 A bei einer geringen Sekundärspannung.

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 6000 A am dreiphasigen Abgang ermöglicht.

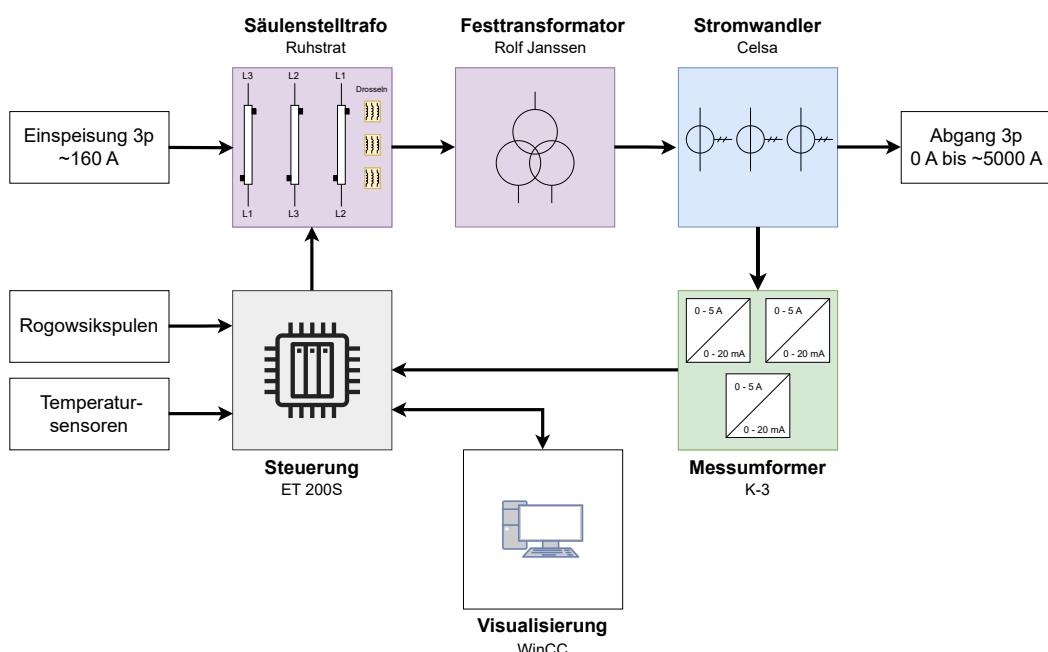


Abbildung 3.1: Blockschaltbild des Hochstrom-Prüfstandes mit Leistungs- und Signalpfaden

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 vergleicht. Als Stellgröße generiert die Steuerung Schaltbefehle für den Antriebsmotor des Säulenstelltransformators. Um permanentes Nachregeln zu minimieren, die starke Stromspitzen erzeugen, ist eine Hysterese als Totband in den Regelalgorithmus integriert. Die Visualisierung übernimmt dabei neben der Parametrierung auch das lückenlose Datenlogging der Versuchsverläufe. 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 | | |

3.1.3 Ursprünglicher Aufbau der Messstrecke

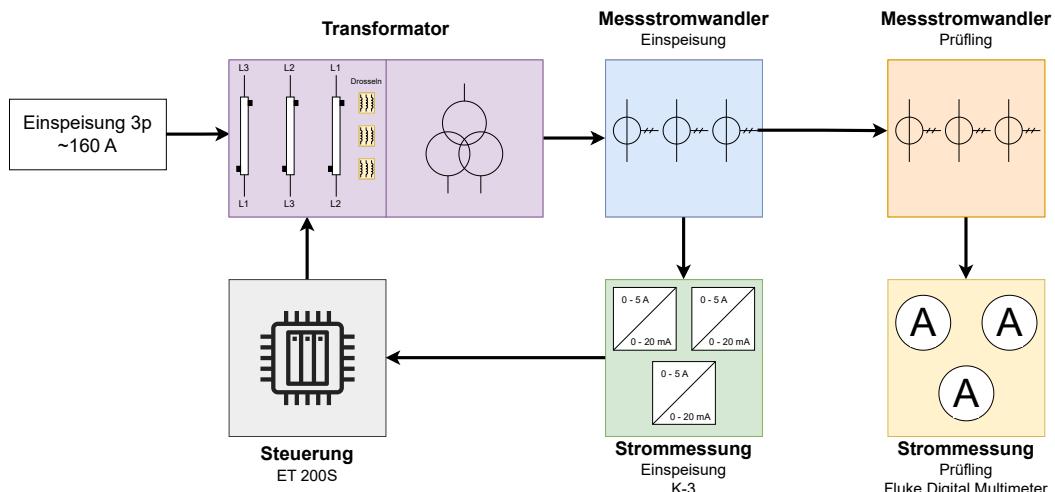


Abbildung 3.2: Schematischer Aufbau der Messstrecke zur Ermittlung der Messabweichung

Der erste Aufbau der Messstrecke (siehe Abbildung 3.2) sah zwei parallele Erfassungspfade vor. Zur Bestimmung des Referenzwertes der Einspeisung wurden die K-3-Messumformer genutzt, welche das Signal an die SPS übermittelten. Parallel dazu wurde das Ausgangssignal des Prüflings mit einem Digitalmultimeter von Fluke im Modus „Acquire“ erfasst.

3.1.4 Schwachstellen im Messkonzept

Die Auswertung der ersten Messreihen zeigt Abweichungen, die über den gesamten Messbereich auftreten. In Abbildung 3.3 sind die Verläufe der Messumformer K-3 (blau) und der Rogowskispulen (orange) dargestellt. Die Rogowskispulen wurden parallel eingesetzt, um deren Eignung für die Prüfung der Wandler zu untersuchen. Beide Systeme erfassten die Messwerte zeitgleich an einem Messpunkt hinter dem Festtransformator. Als Referenz dient die Genauigkeitsklasse 0,2, da die primärseitigen Stromwandler der Klasse 0,2S entsprechen.

Die grafische Darstellung verdeutlicht, dass beide Messsysteme die durch die Norm vorgegebenen Toleranzgrenzen (gestrichelte Linien) nicht einhalten. In Phase L1 überschreitet der Messumformer K-3 ab einer Last von 50 % den positiven Grenzwert, während die Rogowskispulen eine negative Abweichung zwischen -1 % und -2,5 % aufweisen. In Phase L2 zeigt der Messumformer K-3 bei 20 % Last einen Abfall der Genauigkeit auf circa -2 %, wohingegen die Rogowskispulen eine positive Abweichung von über 1 % erreichen. Da die Verläufe der beiden Messsysteme voneinander abweichen, kann kein eindeutiger Referenzwert für den Primärstrom bestimmt werden.

Aufgabe

Die Diagramme werden im Diagrammverzeichnis geführt und später hochauflösender dargestellt.

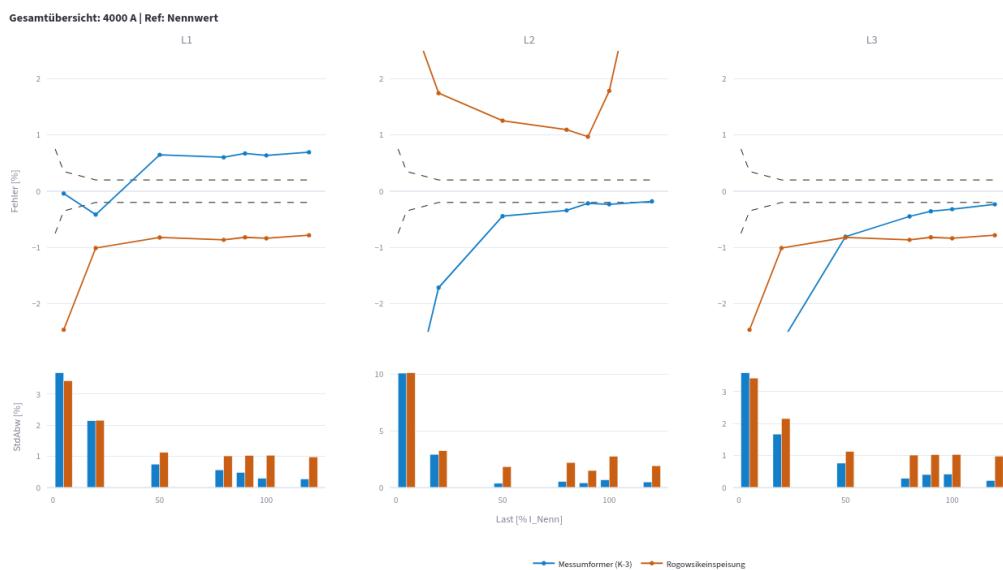


Abbildung 3.3: Analyse der Messabweichung und Standardabweichung der Phasen L1, L2 und L3 im ursprünglichen Versuchsaufbau

Die im unteren Teil der Abbildung 3.3 dargestellte Standardabweichung zeigt, dass beide Messgeräte im niedrigen Strombereich eine erhöhte Varianz aufweisen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Säulenstelltransformator bei geringen Strömen einen begrenzten Stellbereich besitzt, woraus eine geringere Stabilität des Stromwertes resultiert aus der Regelung. Mit zunehmender Stromstärke reduziert sich dieses Rauschen im Messsignal. Dabei weisen die K-3-Messumformer eine geringere Schwankungsbreite auf als die Rogowskispulen. Aufgrund dieser Ergebnisse sind beide Messverfahren für eine Referenzmessung im Rahmen der Genauigkeitsprüfung unzureichend. Im folgenden Abschnitt 3.2 wird die Systemoptimierung erläutert, um eine präzisere Messwerterfassung zu realisieren.

3.2 Optimiertes Messsystem

Wie im vorangegangenen Abschnitt dargelegt, erfüllte die ursprüngliche Messstrecke nicht die Anforderungen an eine präzise Genauigkeitsprüfung von Messstromwandlern. Aus diesem Grund wurde eine Optimierung des Hochstrom-Prüfstandes durchgeführt. Das primäre Ziel dieser Maßnahmen war die Steigerung der Messgenauigkeit sowie die Automatisierung des Prüfablaufs, um reproduzierbare und direkt vergleichbare Ergebnisse sicherzustellen.

Zur technischen Umsetzung wurden zwei digitale Energiemessgeräte der Siemens-Produktfamilie ausgewählt. Das Modell PAC3220, welches für die Erfassung des Prüflingsstroms eingesetzt wird [7, S. 97], sowie das zur Überwachung der Einspeisung genutzte PAC4220 [8, S. 94] verfügen jeweils über die Genauigkeitsklasse 0,2 für die Strommessung. Diese Geräte ermöglichen durch optionale Erweiterungsmodulen eine direkte Integration in die Systemumgebung der Siemens ET 200S via PROFINET-Protokoll.

Ein wesentlicher Vorteil dieser Konfiguration liegt in der dezentralen Messwerterfassung unmittelbar am Messpunkt. Dadurch lassen sich parasitäre Effekte über lange Messleitungen minimieren. Die Einbindung in die SPS erfolgt durch eine direkte zyklische Datenübertragung, wodurch die manuelle Abfrage von Registern entfällt und eine zeitsynchrone Datenbasis für beide Messpunkte geschaffen wird.

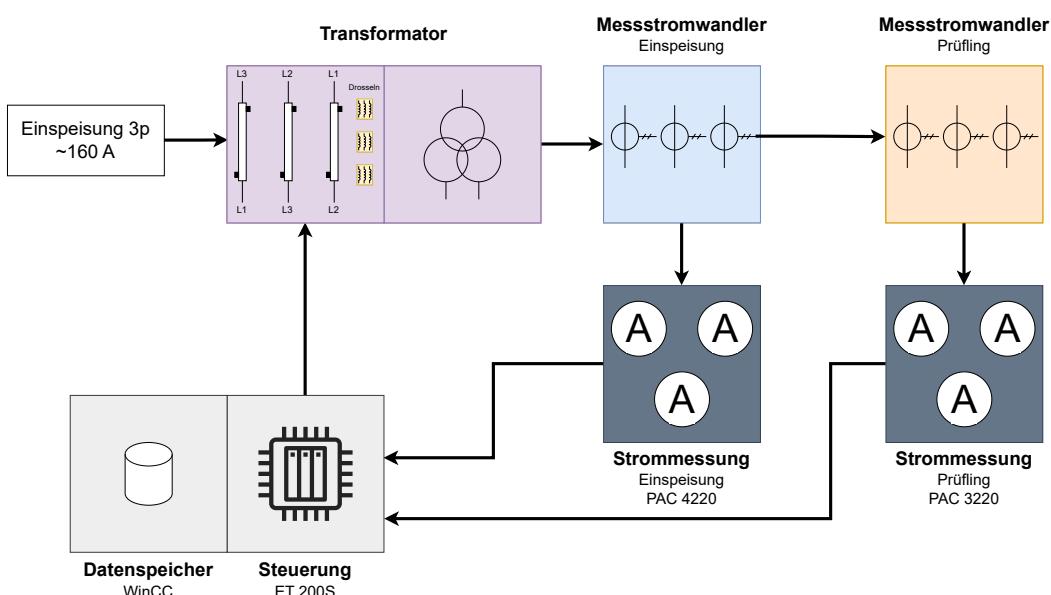


Abbildung 3.4: Schematischer Aufbau der optimierten Messstrecke mit Siemens SENTRON Messgeräten

Die in Abbildung 3.4 dargestellte Systemarchitektur verdeutlicht die informationstechnische Vernetzung des optimierten Messaufbaus. Während der obere Teil des Schemas den bereits beschriebenen Leistungspfad darstellt, erfolgt die messtechnische Erfassung der Primärströme zyklisch durch die Geräte PAC 4220 (Einspeisung) und PAC 3220 (Prüfling).

Die erfassten Stromwerte werden in WinCC archiviert und stehen dort für die Prozessüberwachung zur Verfügung. Über die Benutzeroberfläche (HMI) können diese Daten als CSV-Datei exportiert werden. Diese Datei dient als Grundlage für die anschließende Genauigkeitsmessung und die Auswertung der Versuchsreihen.

3.2.1 Systemintegration und Programmentwicklung

Die technische Umsetzung des optimierten Messsystems umfasst sowohl die informationstechnische Einbindung der Hardware-Komponenten als auch die Entwicklung der steuerungstechnischen Ablauflogik. Zur Adressierung der SENTRON-Messgeräte wird jedem Gerät in der Hardware-Konfiguration des Simatic Managers ein eindeutiger Gerätename sowie eine IP-Adresse zugewiesen. Diese Zuweisung ist notwendig, um die Kommunikation der Teilnehmer innerhalb des PROFINET-Netzwerks mit der SPS zu ermöglichen.

Innerhalb des Hardware-Konfigurators werden die spezifischen Messwerte der Geräte auf die Eingangsadressen der SPS abgebildet. Die so bereitgestellten Rohwerte werden im Anwendungsprogramm der Steuerung aus dem Peripheriebereich ausgelesen und in DBs übertragen.

Für die Erfassung der Daten in WinCC wird im Variablenhaushalt des Visualisierungssystems eine Kommunikationsverbindung zur Steuerung projektiert. Die Variablen für die gemessenen Ströme werden direkt mit den entsprechenden Speicheradressen innerhalb der DBs verknüpft. Über diese Verbindung werden die Werte der Ströme in regelmäßigen Abständen vom System ausgelesen, auf dem HMI angezeigt und für den späteren Export als CSV-Datei in der Datenbank gespeichert.

Die Automatisierung des Prüfablaufs wird über die SPS realisiert, wobei der vorhandene PID-Regler zur präzisen Stromeinstellung genutzt wird. Für die Genauigkeitsmessung eines Wandlers sind gemäß Norm primär die Prüfpunkte bei 5 %, 20 %, 100 % und 120 % des Primär-Nennstroms von Bedeutung. Um eine detailliertere Kennlinie zu erhalten und das Verhalten des Wandlers umfassender zu charakterisieren, wurden dem Prüfablauf weitere Messpunkte hinzugefügt. Die automatisierte Erfassung umfasst somit die Pegel 5 %, 20 %, 50 %, 80 %, 90 %, 100 % und 120 %. Um diese Messpunkte automatisiert anzufahren, wurde eine Schrittkette entwickelt. Diese durchläuft die Prüfpegel sequenziell und hält jeden Messpunkt für eine Dauer von fünf Minuten konstant. Dieser Zeitraum gewährleistet eine ausreichende thermische Sättigung des Wandlerkerns und ermöglicht eine valide Mittelwertbildung der Messdaten.

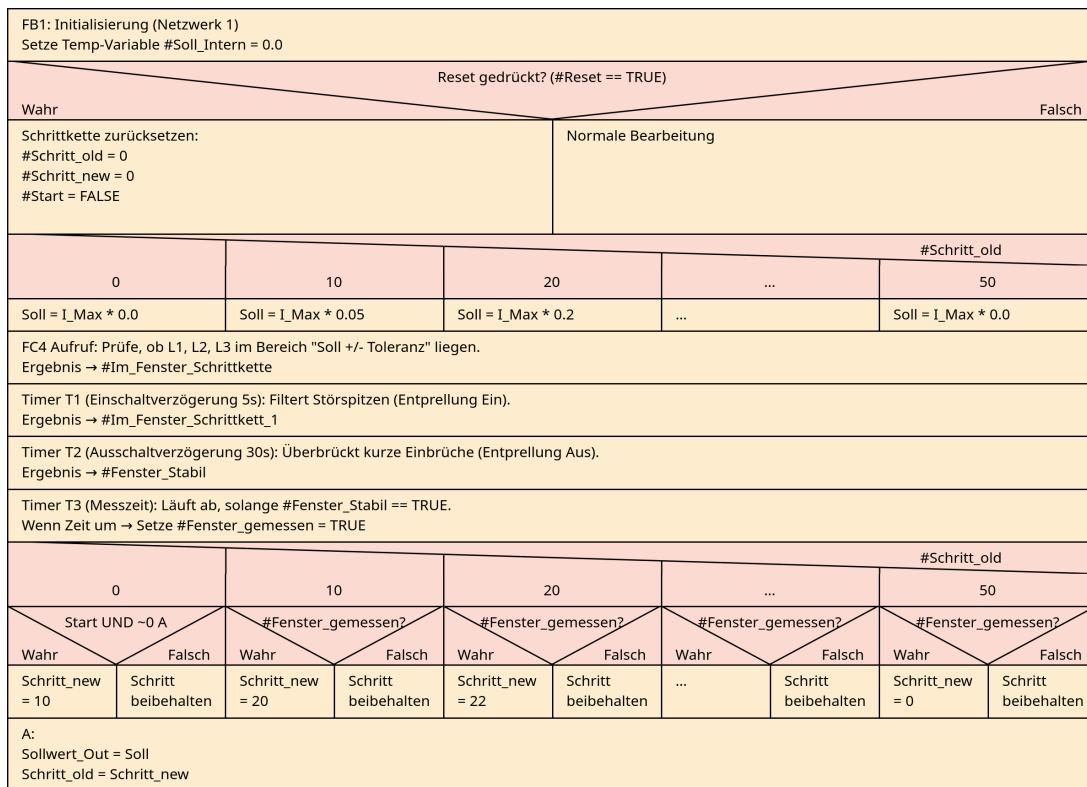


Abbildung 3.5: Struktogramm der Schrittkette zur automatisierten Kennlinienaufnahme (FB1)

Der logische Ablauf dieser Automatisierung ist im Struktogramm des Funktionsbausteins FB1 dargestellt. Der Baustein übernimmt die zentrale Steuerung, wobei zu Beginn eine Initialisierung erfolgt, bei der die interne Sollwert-Variable auf Null gesetzt wird. Im Falle eines aktiven Reset-Signals wird die gesamte Schrittkette zurückgesetzt, indem die Schrittzähler auf Null und das Startsignal auf den Zustand Falsch gesetzt werden. Während der normalen Bearbeitung wird basierend auf dem aktuellen Schrittewert der entsprechende Sollwert für den Primärstrom vorgegeben. So entspricht beispielsweise Schritt 10 einer Last von 5 % und Schritt 20 einer Last von 20 % des Maximalstroms.

Zur Überprüfung der Messwertstabilität wird die Funktion FC4 aufgerufen, welche kontrolliert, ob die Phasenströme innerhalb eines definierten Toleranzfensters um den Sollwert liegen. Ein Zeitglied T1 dient dabei der Entprellung beim Eintritt in das Fenster, während das Zeitglied T2 kurze Einbrüche überbrückt, um eine stabile Datenbasis sicherzustellen. Die eigentliche Messzeit wird durch den Timer T3 gesteuert, der nach Ablauf die Messung am aktuellen Punkt als abgeschlossen markiert. Die Weiterschaltlogik der Schrittkette wertet diesen Status aus: Im Ausgangszustand wird auf die Startbedingungen gewartet, während in den aktiven Prüfschritten der Übergang zum nächsten Pegel erst nach erfolgreichem Ablauf der Messzeit erfolgt. Abschließend werden der ermittelte Sollwert an den Regler ausgegeben und der Schrittstatus für den nächsten Zyklus aktualisiert.

3.2.2 Auswertung der neuen Messstrecke

Die Validierung der optimierten Messstrecke belegt eine signifikante Steigerung der Messgüte im Vergleich zu den ursprünglichen Komponenten. In Abbildung 3.6 ist der Fehlerverlauf des neu installierten Energiemessgerätes PAC 4220 (magenta) im direkten Vergleich zum Messumformer K-3 (blau) und den Rogowskispulen (orange) dargestellt.

Der magenta Kurvenverlauf verdeutlicht, dass das PAC 4220 über nahezu den gesamten Lastbereich innerhalb des normativen Toleranzbandes der Genauigkeitsklasse 0,2 verbleibt. Ab einer Last von 20 % des Nennstroms stabilisiert sich die Messabweichung nahe der Nulllinie. Lediglich im Bereich geringer Ströme (5 %) ist eine Abweichung außerhalb der Normgrenzen erkennbar. Wie bereits in Abschnitt 3.1.4 analysiert, resultiert dieser Effekt aus dem begrenzten Stellbereich des Säulenstelltransformators, der bei minimaler Auslenkung keine stabile Stromvorgabe ermöglicht. Durch die hohe Auflösung des PAC 4220 kann diese physikalische Grenze des Prüfstandes nun präzise messtechnisch erfasst werden.

Aufgabe

Die Diagramme werden im Diagrammverzeichnis geführt und später hochauflösender dargestellt.

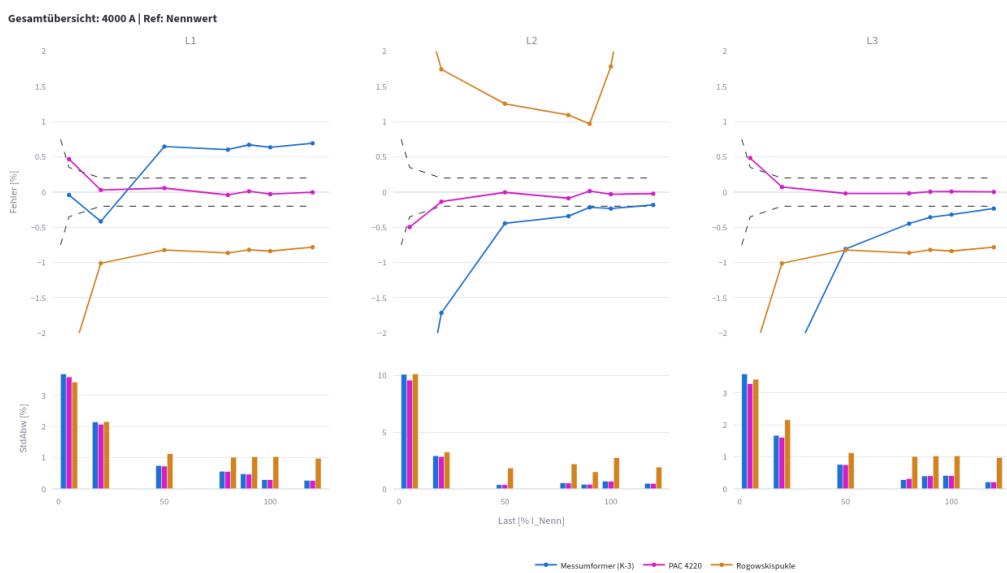


Abbildung 3.6: Vergleichende Analyse der Messabweichung (oben) und Standardabweichung (unten) unter Einsatz des PAC 4220

Die im unteren Teil der Abbildung 3.6 visualisierte Standardabweichung verdeutlicht die Präzision der Messsysteme bezüglich der Streuung. Hierbei zeigt sich, dass das PAC 4220 und der Messumformer K-3 ein sehr ähnliches Verhalten mit einer vergleichbar geringen Streuung aufweisen. Ab einer Last von 50 % sinkt die Standardabweichung für beide Geräte auf ein Niveau von unter 0,5 % ab. Im Gegensatz dazu weisen die Rogowskispulen über den gesamten Messbereich eine deutlich höhere Streuung auf, was auf eine geringere Reproduzierbarkeit der Messwerte hindeutet.

Obwohl die K-3-Umformer eine ähnlich geringe Streuung wie das PAC-Messgerät erzielen, verbleiben sie aufgrund ihrer hohen systematischen Abweichung außerhalb der geforderten Genauigkeitsklasse. Die Ergebnisse bestätigen somit, dass erst durch den Einsatz der digitalen PAC-Messgeräte eine valide Datenbasis geschaffen wurde, die sowohl eine geringe Streuung als auch eine normgerechte Genauigkeit für die Charakterisierung der Stromwandler vereint.

3.3 Konstruktive Gestaltung der Primärleiterführung

Zusätzlich zur messtechnischen Optimierung wird die geometrische Anordnung des Primärleiters variiert, um deren Einfluss auf die Fremdfeldbeeinflussung zu untersuchen.

3.3.1 Geometrische Anordnung: Parallel- vs. Dreieckskonfiguration

3.3.2 Spezifikation der Kupferschienen und Phasenmittenabstände

4 Auswertung und Diskussion

4.1 Durchführung der Messreihen am optimierten Prüfstand

4.2 Messergebnisse: Einfluss der Leitergeometrie

4.3 Messergebnisse: Vergleich der Wandlertechnologien

4.4 Auswertung der Messergebnisse

5 Zusammenfassung der Ergebnisse

5.1 Bewertung der Prüfstands-Optimierung

5.2 Konstruktionsempfehlung für zukünftige Wandler-Einbauten

6 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] H. Kuchling, *Taschenbuch der Physik*, 21. Leipzig: Hanser Fachbuchverlag, 2014.
- [5] 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.
- [6] MBS AG, *Fremdfeldkompensierte Stromwandler für hohe Primärströme*, Technische Information und Produktbroschüre, MBS AG. Adresse: <https://www.schutztechnik.com/posts/fremdfeldkompensierte-stromwandler-fur-hohe-primarstrome>.
- [7] Siemens AG, *Gerätehandbuch SENTRON Messgerät 7KM PAC3120 und PAC3220*, Dokument-Bestellnummer: L1V30425208E-01, Okt. 2019. Adresse: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/307/109767307/att_984482/v1/MAN_L1V30425208E-01_de_de-DE.pdf.
- [8] Siemens AG, *Gerätehandbuch SENTRON Multifunktionsmessgerät 7KM PAC4220*, Dokument-Bestellnummer: L1V30827278A-02, Mai 2024. Adresse: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/026/109823026/att_1155887/v4/MAN_L1V30827278A-01_de_de-DE.pdf.

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