

## 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

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>  | <b>IV</b> |
| <b>1 Einleitung</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 Motivation . . . . .  | 1         |
| 1.2 Problemstellung . . . . .   | 1         |
| 1.3 Zielsetzung . . . . .   | 1         |
| 1.4 Vorgehensweise . . . . .  | 1         |
| <b>2 Theoretische Grundlagen und aktueller Forschungsstand</b>          | <b>2</b>  |
| 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 Messabweichung und Fehlerfortpflanzung . . . . .                    | 11        |
| 2.5 Aufbau Niederspannungsschaltanlagen . . . . .                       | 12        |
| <b>3 Versuchsaufbau und Methodik</b>                                    | <b>13</b> |
| 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 Phasenmittendistanzen .    | 15        |
| <b>4 Experimentelle Untersuchung</b>                                    | <b>16</b> |
| 4.1 Inbetriebnahme und Plausibilitätsprüfung . . . . .                  | 16        |
| 4.2 Optimierung der Messdatenerfassung . . . . .                        | 16        |
| 4.3 Validierung des optimierten Systems . . . . .                       | 16        |
| <b>5 Auswertung und Diskussion</b>                                      | <b>17</b> |
| 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        |
| <b>6 Zusammenfassung der Ergebnisse</b>                                 | <b>18</b> |
| 6.1 Bewertung der Prüfstands-Optimierung . . . . .                      | 18        |
| 6.2 Konstruktionsempfehlung für zukünftige Wandler-Einbauten . . . . .  | 18        |
| <b>7 Ausblick</b>   | <b>19</b> |
| <b>A Anhang</b>   | <b>20</b> |

## 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 zentralen 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 Signalpfaden . . . . .                 | 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 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.

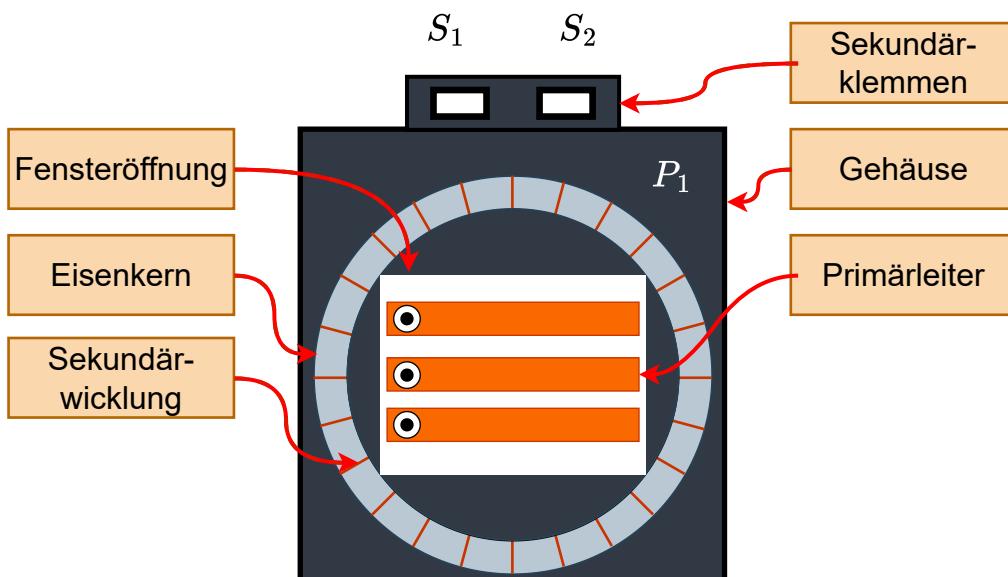


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau eines Aufsteckstromwandlers

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 3.2.2. 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 ( $\mu_r$ ). 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 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.

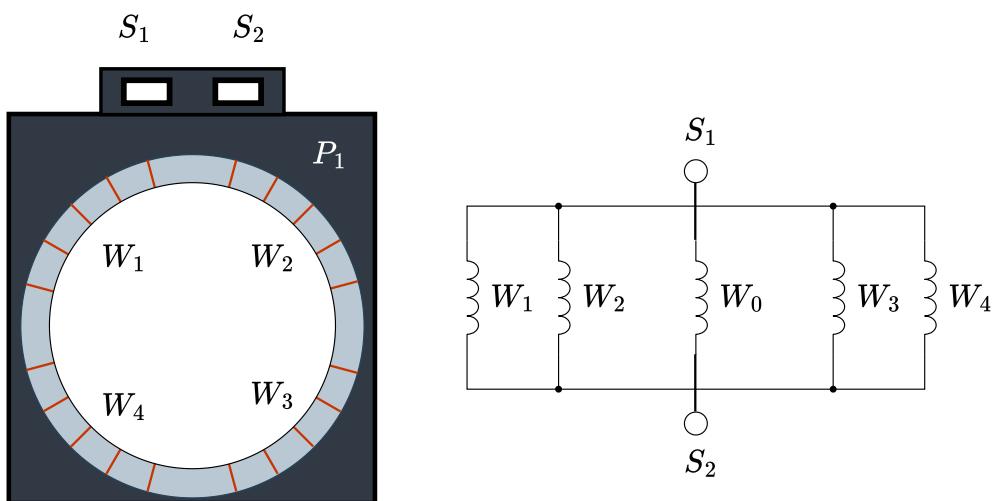


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau eines Wandlers mit zusätzlichen Kompensationswicklungen

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.

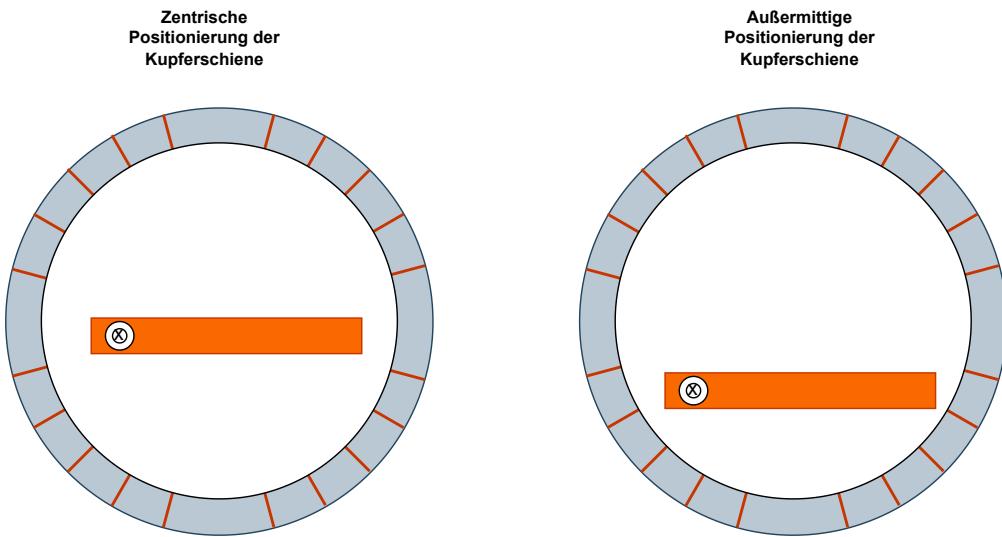


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der zentralen und exzentrischen Positionierung der Kupferschiene

### 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 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])

| Genauigkeitsklasse | Übersetzungsmessabweichung bei $I_n$ ( $\pm \%$ ) | Fehlwinkel bei $I_n$ ( $\pm$ min) | ( $\pm$ centigrad) | Gesamtmessabweichung bei $ALF \cdot I_n$ (%) |
|--------------------|---|-----------------------------------|--------------------|--|
| 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 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  $\varepsilon$  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.

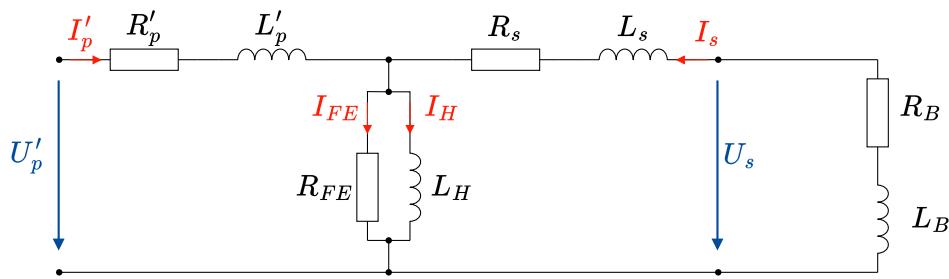


Abbildung 2.4: Vollständiges Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers

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.

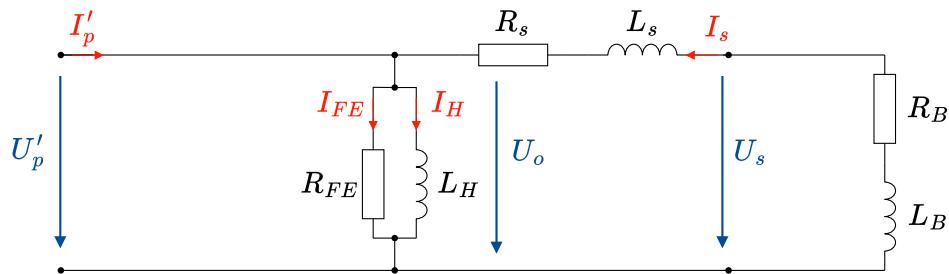


Abbildung 2.5: Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers

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

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 und 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 als 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  $\Phi$  im Weg mit dem geringsten magnetischen Widerstand  $R_m$  (Reluktanz) im hochpermeablen Eisenkern. Dieser Widerstand ist umgekehrt proportional zur relativen Permeabilität  $\mu_r$  des Mediums

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

In einem Medium mit hohem  $\mu_r$  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  $\Phi$  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 gleicht 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  $I_\mu$  zum Aufbau des Flusses im Kern benötigt, 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  $\mu_r$  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 [5, Tab. 48]

| Eigenschaft          | Permeabilität $\mu_r$ | 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  $\mu_r$  bei Ferromagnetika jedoch feldstärkeabhängig ist, führen starke Felder zu Sättigungseffekten und somit zu einer massiven Beeinträchtigung der Genauigkeit bei Fremdfeldeinfluss.

### 2.3.3 Hysterese

### 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  $\varepsilon$  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

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

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  $\Phi$

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

Durch Gleichsetzen von (5) und (7) sowie anschließendes Auflösen nach  $\Phi$  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  $R_{\text{Komp}}$  bei eingeprägtem Strom  $I_s$  zu einer linearen Erhöhung des magnetischen Flusses  $\Phi$  führt. Bei Überschreitung des Sättigungsflusses  $\Phi_{\text{sat}}$  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

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

Hierbei beschreibt  $\mu_0$  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 [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  $B_{\text{Fremd}}$ , 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 definiert als zusätzlich induzierte magnetische Flussdichte im Kern  $B_{\text{Fremd}}$  (in T), Strom im Nachbarleiter  $I_p$  (in A), äußerer Radius  $R$  (in m), Breite  $W$  (in m), Querschnitt des Eisenkerns  $A$  (in  $\text{m}^2$ ) und Außenphasenabstand  $D$  (in m).

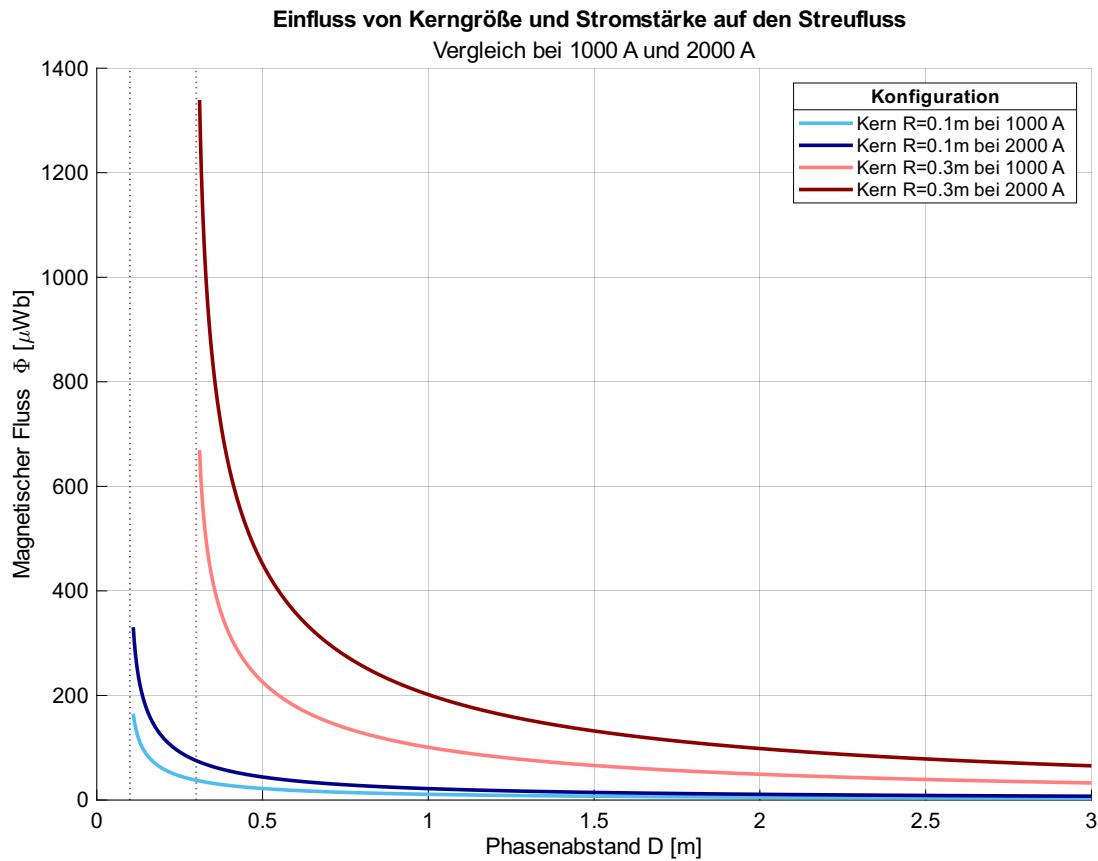


Abbildung 2.6: Einfluss von Kerngröße und Stromstärke auf den zusätzlichen Streufluss

Abbildung 2.6 visualisiert den durch den benachbarten Leiter in den Kern eingekoppelten zusätzlichen magnetischen Fluss  $\Phi_{\text{Fremd}}$ . 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  $\Phi$ , sondern durch die resultierende Flussdichte  $B$  bestimmt

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

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  $A$ . Dies führt zu einer starken Erhöhung der Flussdichte  $B_{\text{Fremd}}$  und zum schnellen Erreichen der Sättigungsgrenze. Der große Kern kompensiert die höhere Flussaufnahme (Diagramm, rot) durch seinen massiven Querschnitt, wodurch der Anstieg der Flussdichte  $\Delta B$  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  $\Phi_{\text{Fremd}}$  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 2.7 verdeutlicht.

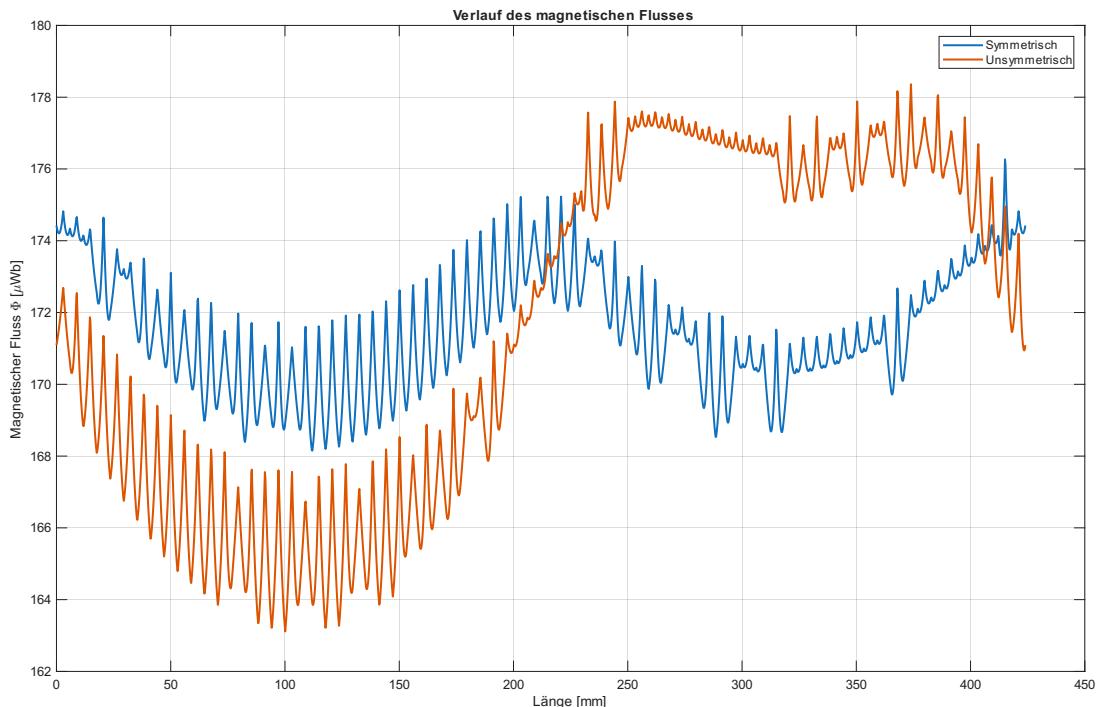


Abbildung 2.7: Einfluss der Leiterpositionierung auf die Flussverteilung im Kern

Auf der Abszisse (X-Achse) ist der Weg entlang des mittleren Kernumfangs aufgetragen. Der blaue Graph zeigt den Referenzverlauf bei zentrierter Leiteranordnung 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  $\varepsilon$  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.

## 2.5 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 Prüfstandsaufbaus 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.

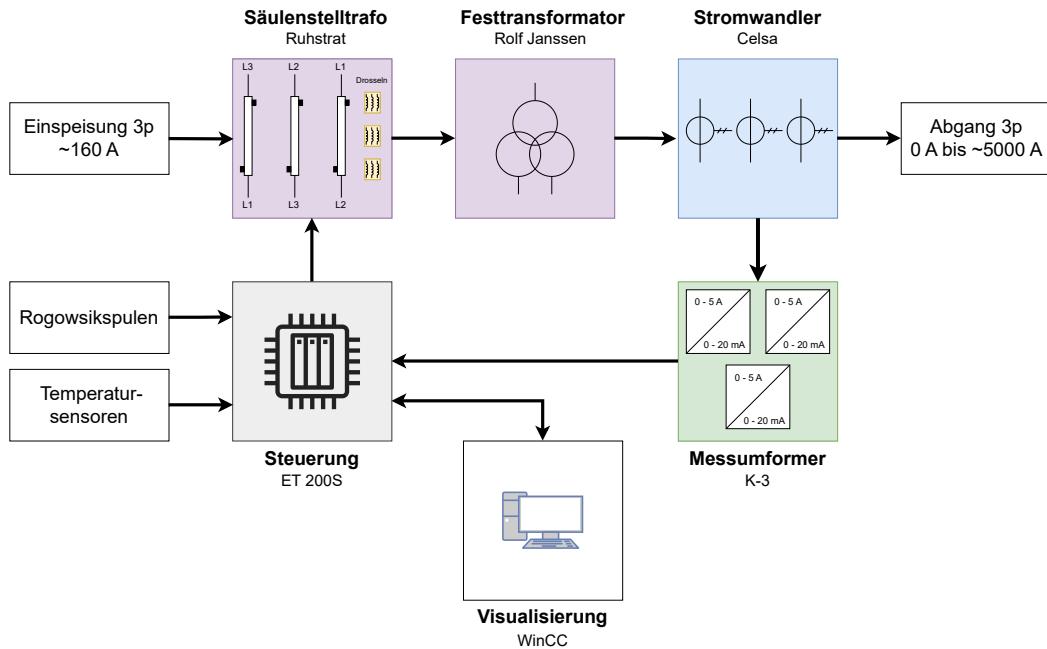


Abbildung 3.1: Blockschaltbild des Hochstrom-Prüfstandes mit Leistungs- und Signalpfaden

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 Rogowskisensoren 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 vorgibt, 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  $\varepsilon$  betrachtet, da diese für die Genauigkeit in Niederspannungsschaltanlagen die kritische Kenngröße darstellt.

#### 3.2.1 Versuchsaufbau zur Ermittlung der Messabweichung

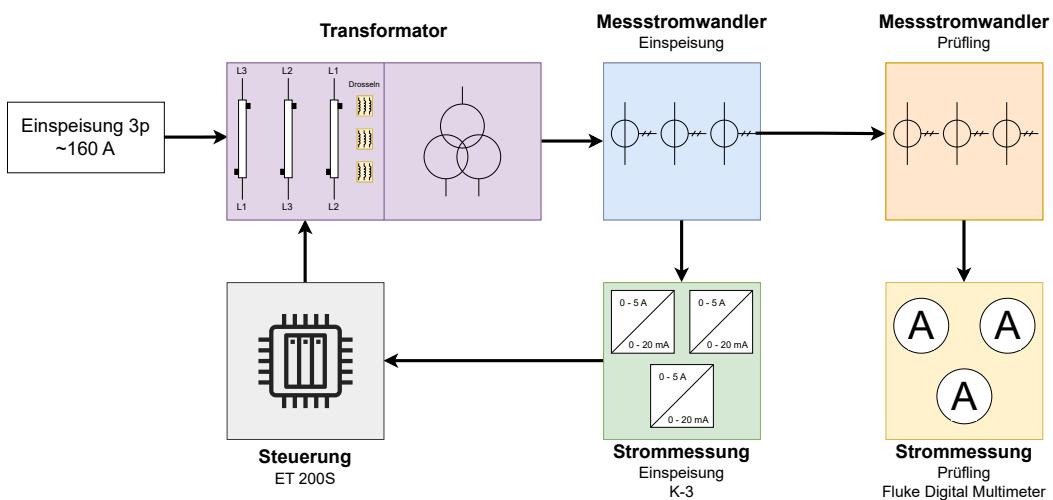


Abbildung 3.2: Schematischer Aufbau der Messstrecke zur Ermittlung der Messabweichung

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 Phasenmittendistanzen

## 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 Wandlersignale 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  $\epsilon$  gemäß Gleichung (2) geschaffen werden.

### 4.2 Optimierung der Messdatenerfassung

Um die Fehlerquellen zu eliminieren, wurde eine Neuausrichtung der Messtechnik vorgenommen. Anstelle der Signalpfade 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 Gerätekasse 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*, LEIFPhysik, 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-primerstrom>

## 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