

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 4. Februar 2026

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Diagrammverzeichnis

3.1	Analyse der Messabweichung und Standardabweichung der Phasen L1, L2 und L3 im ursprünglichen Versuchsaufbau	19
3.2	Vergleichende Analyse der Messabweichung (oben) und Standardabweichung (unten) unter Einsatz des PAC 4220	24
3.3	Kumulierter Vergleich der Fehleranteile (Ökonomie-Ranking) der verschiedenen Messsysteme über drei Lastbereiche	25
4.1	Zusammenfassender Vergleich der Leitergeometrien bei 2000 A	32
4.2	Messfehlerverlauf des Celsa ALO 10030 in Abhängigkeit vom Primärstrom	33
4.3	Zusammenfassender Vergleich der Leitergeometrien bei 2500 A	34
4.4	Vergleich von Geometrie und Bürdeneinfluss bei 3000 A	37
4.5	Vergleich der Fehlerkurven bei variabler Bürde und 3000 A	38
4.6	Ranking der Konfigurationen basierend auf dem Performance Index	39
4.7	Zusammenfassender Vergleich der Leitergeometrien bei 4000 A	40
4.8	Zusammenfassender Vergleich der Leitergeometrien bei 5000 A	41
4.9	Wirtschaftliches Ranking der Wandlertechnologien bei 2000 A	43
4.10	Wirtschaftliches Ranking der Wandlertechnologien bei 2500 A	44
4.11	Wirtschaftliches Ranking der Wandlertechnologien bei 3000 A	45
4.12	Wirtschaftliches Ranking der Wandlertechnologien bei 4000 A	46
4.13	Wirtschaftliches Ranking der Wandlertechnologien bei 5000 A	47
4.14	Wirtschaftliches Ranking unter Berücksichtigung des Volumens bei 2000 A	48
4.15	Wirtschaftliches Ranking unter Berücksichtigung des Volumens bei 5000 A	48

1 Einleitung

1.1 Motivation

1.2 Problemstellung

An moderne Niederspannungsschaltanlagen wird die Anforderung gestellt, eine hohe Stromtragfähigkeit bei gleichzeitig möglichst kompakter Bauweise zu gewährleisten. Aufgrund der daraus resultierenden räumlichen Nähe der Leiter zueinander und der hohen Betriebsströme sind Messstromwandler verstärkt magnetischen Fremdfeldern ausgesetzt. Physikalisch ist dies darin begründet, dass die magnetische Feldstärke mit abnehmendem Abstand zur Quelle ansteigt.

Diese Fremdfeldeinflüsse wirken sich auf die Zuverlässigkeit der Messung aus. Bereits ab einem Nennstrom von 2500 A ist eine Beeinflussung der Messwerte festzustellen. Diese Abweichung nimmt mit steigender Stromstärke zu, sodass bei Nennströmen im Bereich von 5000 A bis 6000 A betragsmäßige Messabweichungen von bis zu 400 A auftreten. Eine derartige Ungenauigkeit ist unbedingt zu vermeiden, da der Markt zunehmend präzisere Messwerte für Schutzeinrichtungen, die Anlagenüberwachung und insbesondere für Verrechnungszwecke fordert. Ist die Messung durch Fremdfelder verfälscht, können Schutzorgane fehlauflösen oder Energiekosten fehlerhaft abgerechnet werden.

Zwar existieren am Markt Lösungsansätze wie kompensierte Wandler oder zusätzliche Schirmungen (z.B. durch ferromagnetische Bleche), doch sind diese Maßnahmen oft mit Nachteilen verbunden. Kompensierte Wandler sind in der Regel kostenintensiver und benötigen durch zusätzliche Wicklungen mehr Bauraum, der in kompakten Anlagen oft nicht vorhanden ist. Zudem ist bislang nicht hinreichend geklärt, ob diese teureren Spezialwandler bei sehr hohen Strömen tatsächlich die notwendige Messsicherheit bieten oder ob wirtschaftlichere Standardwandler unter bestimmten Bedingungen vergleichbare Ergebnisse liefern.

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Vor dem Hintergrund der Neuentwicklung einer Schaltanlagengeneration ist es das Ziel dieser Arbeit, eine technisch zuverlässige und zugleich wirtschaftliche Lösung für die Strommessung unter Fremdfeldeinfluss zu identifizieren.

Dazu soll systematisch untersucht werden, wie sich verschiedene Wandlertypen – von Standardausführungen bis hin zu herstellerspezifischen Speziallösungen – bei hohen Strömen verhalten. Ein zentraler Fokus liegt dabei auf der Überprüfung, ob der Einsatz kostenintensiver kompensierter Wandler in diesem Hochstrombereich erforderlich ist. Darüber hinaus wird als alternativer Lösungsansatz untersucht, ob eine Anpassung der Leitergeometrie innerhalb der Schaltanlage den Fremdfeldeinfluss konstruktiv minimieren kann. Die Ergebnisse sollen direkt in den Entwicklungsprozess der neuen Schaltanlage einfließen, um die Messgenauigkeit und Betriebssicherheit der neuen Schaltanlagengeneration zu steigern.

1.4 Vorgehensweise

2 Theoretische Grundlagen und aktueller Forschungsstand

Dieses Kapitel legt das theoretische Fundament für die vorliegende Arbeit und führt in die Thematik der Strommessung unter dem Einfluss magnetischer Störfelder ein. Zunächst erfolgt eine detaillierte Betrachtung der Messstromwandler, wobei neben dem konstruktiven Aufbau und den verschiedenen Bauformen insbesondere die Unterscheidung zwischen Mess- und Schutzwandlern sowie die Funktionsweise von Kompensationswicklungen erläutert werden. Darauf aufbauend werden die physikalischen Gesetzmäßigkeiten hergeleitet, die das Übertragungsverhalten und die Induktion durch Fremdfelder beschreiben. Dies ist essenziell, um die Ursachen für Sättigungseffekte und die daraus resultierenden Messabweichungen zu verstehen. Im weiteren Verlauf werden die normativen Definitionen der Genauigkeitsklassen vorgestellt, die als Bewertungsgrundlage für die späteren Untersuchungen dienen. Abschließend erfolgt eine Beschreibung der Niederspannungsschaltanlagen, da deren konstruktive Geometrie und Stromschieneanordnung die maßgeblichen Einflussfaktoren für die magnetische Umgebung und somit für die Fremdfeldbeeinflussung der Wandler darstellen.

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 ?? dargestellten Hauptkomponenten zusammen.

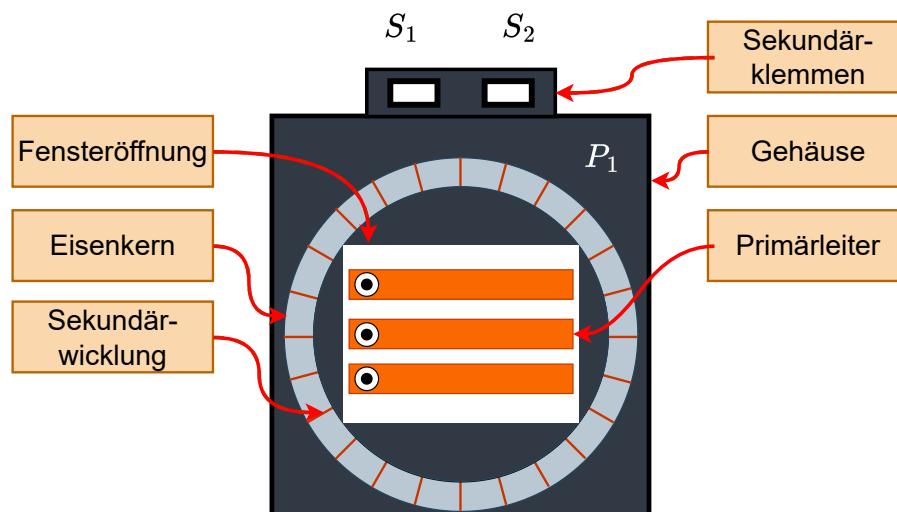


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau eines Aufsteckstromwandlers

Aufgabe

Im anhang muss der code wieder einkommentiert werden! Es muss expliziert erwähnt werden, das Messstromwandler in einem Drehstromsystem (L1 L2 L3) analysiert werden, um zu prüfen, ob die Wandler unter der Rahmbedinung die Messgenauigkeit einhalten können.

Im Niederspannungsbereich fungiert meist eine Kupferschienenenanordnung als Primärleiter. Diese weist in der Regel ein Rechteckprofil auf und kann aus mehreren Einzelschienen bestehen. Eine detaillierte Betrachtung der Schienenenanordnung erfolgt in Abschnitt ???. 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 ($N_{pri} = 1$) 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, Nickeleisen 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 deutlicher Störeinflüsse bei Messstromwandlern. Dabei handelt es sich um den durch eine exzentrische Positionierung des Primärleiters verursachten Lagefehler (siehe Abbildung ??) sowie die Einwirkung externer Fremdfelder. Die physikalischen Grundlagen zu letzterem Aspekt werden in Kapitel ?? 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.

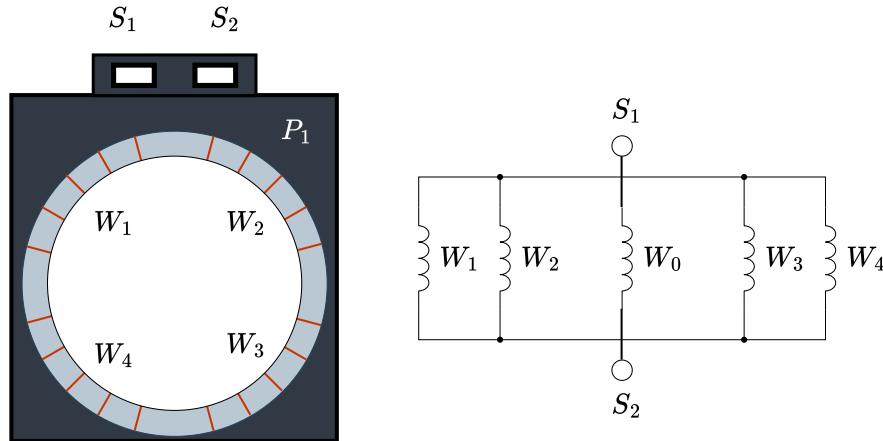


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau eines Wandlers mit zusätzlichen Kompensationswicklungen

Abbildung ?? 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.

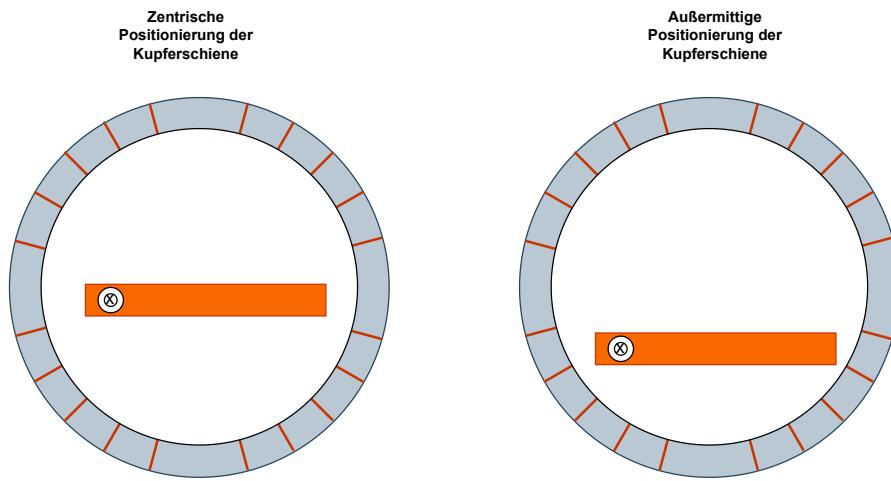


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der zentralen und außenmittige Positionierung der Kupferschiene

2.2.3 Normative Anforderungen und Genauigkeitsklassen

Messstromwandler werden in unterschiedlichen Genauigkeitsklassen gefertigt. Die Anforderungen hierfür sind in der Deutschen Institut für Normung (DIN) Europäische Norm (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 Ver-

halten 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 (Accuracy Limit Factor (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 Luftspralte 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 ?? 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)	Gesamtmessabweichung bei $ALF \cdot I_n$ (%)
5P und 5PR	1	60	1,8
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 ε als prozentuale Abweichung des Sekundärstroms vom idealen Wert (siehe Tabelle ??).

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 ?? 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							
	± Minuten				± Zentiradian			
	bei Strom (% von I_n)		bei Strom (% von I_n)		5	20	100	120
	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	15	8	5	5	0,45	0,24	0,15	0,15
0,2	30	15	10	10	0,90	0,45	0,30	0,30
0,5	90	45	30	30	2,70	1,35	0,90	0,90
1	180	90	60	60	5,40	2,70	1,80	1,80

2.2.4 Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers

Ein Messstromwandler entspricht physikalisch einem Transformator. Sein Verhalten lässt sich daher mithilfe des Transformator-Ersatzschaltbildes beschreiben. In der Darstellung ?? 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.

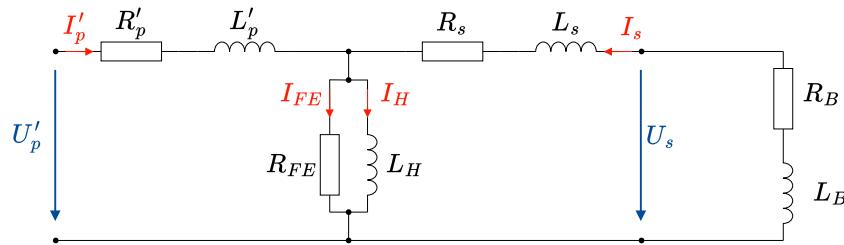


Abbildung 2.4: Vollständiges Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers

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 ?? dargestellt.

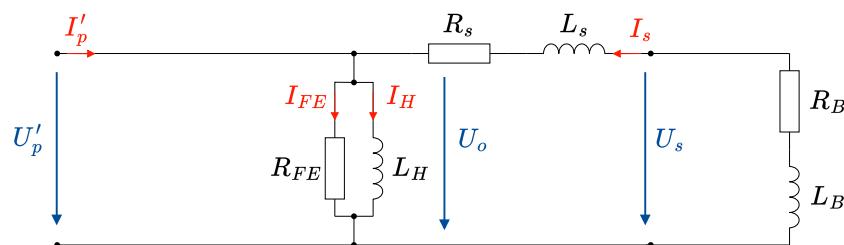


Abbildung 2.5: Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers

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 ideale 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 ?? schematisch dargestellt ist.

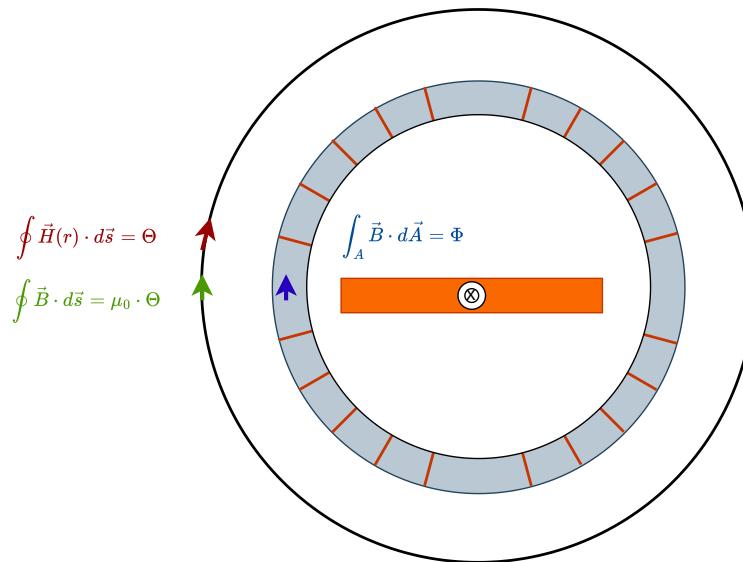


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung der magnetischen Kopplung im Wandler

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

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

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 $2\pi r$:

$$\oint_S \vec{H} \cdot d\vec{s} = H \cdot \oint_S ds = H \cdot 2\pi r = I_{pri}$$

$$\Rightarrow H = \frac{I_{pri}}{2\pi r} \quad (2)$$

Die magnetische Flussdichte 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 (??) 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 (??), 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 ?? 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 deutliche 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.

2.3.4.1 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

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

wobei der Restwiderstand definiert ist als

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

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 (??) und (??) sowie anschließendes Auflösen nach Φ ergibt sich

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

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

2.3.4.2 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]

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

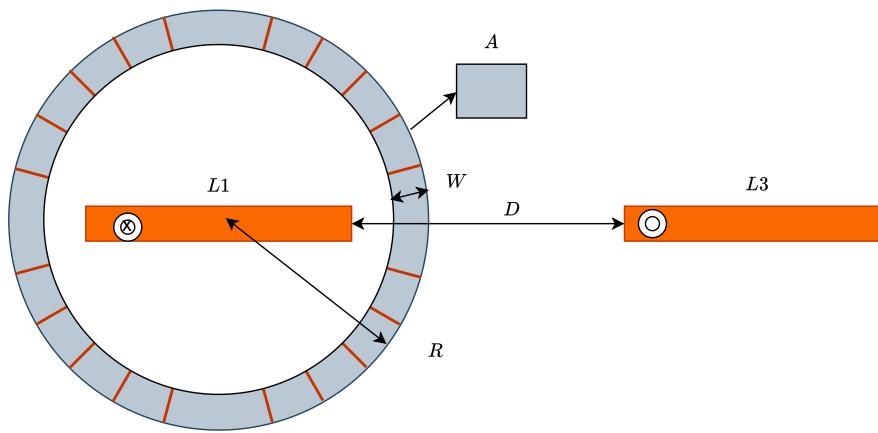


Abbildung 2.7: Geometrische Parameter zur Berechnung des Fremdfeldeinflusses

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

Abbildung ?? 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 deutlich 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 großen Querschnitt, wodurch der Anstieg der Flussdichte B begrenzt bleibt.

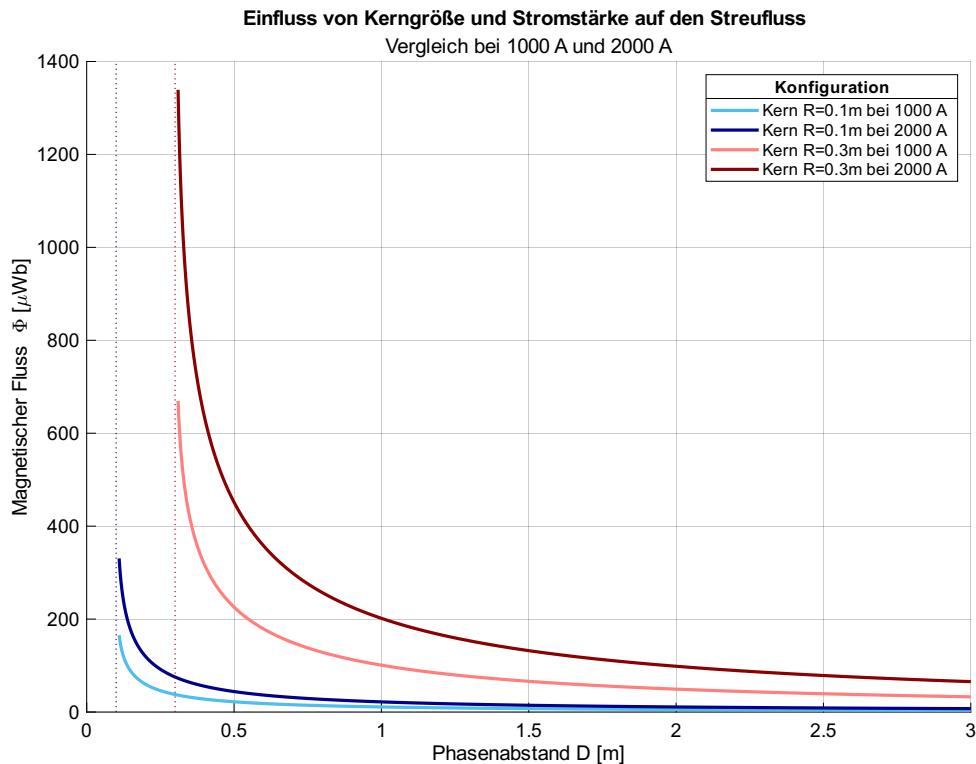


Abbildung 2.8: Einfluss von Kerngröße und Stromstärke auf den zusätzlichen Streufluss

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

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

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.

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

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 deutlich an, während sie auf der gegenüberliegenden Seite abfällt.

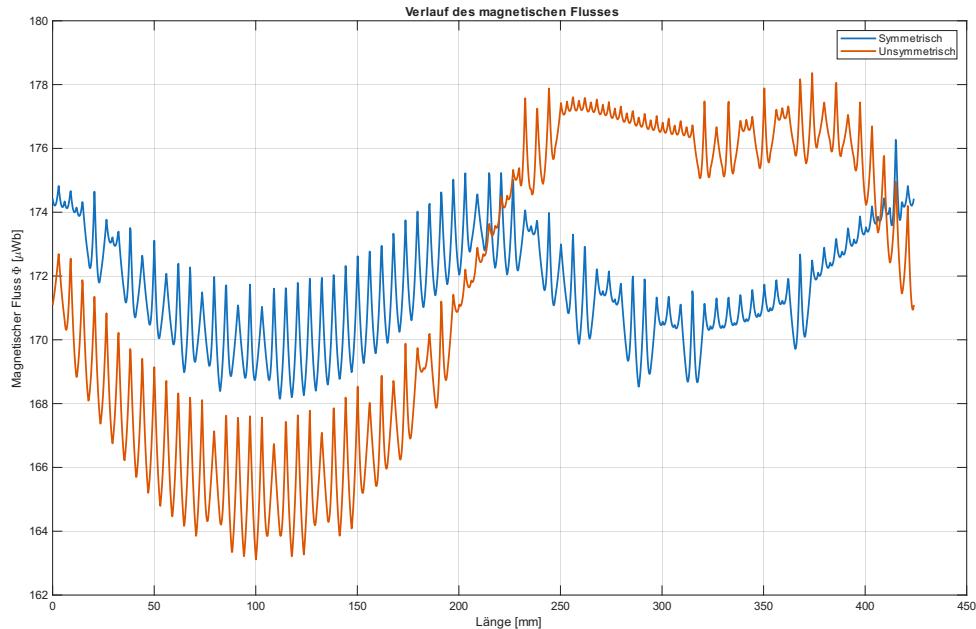


Abbildung 2.9: Einfluss der Leiterpositionierung auf die Flussverteilung im Kern

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

$$\varepsilon = \frac{k_n \cdot I_{sec} - I_{pri}}{I_{pri}} \cdot 100 \% \quad (20)$$

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 Hauptsammelschienensystem im Rücken der Anla-

ge 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 hohen Belastungen, wie einem Kurzschlussstrom von $I_k = 100 \text{ kA}$, 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 Kupferschienensystem und Geometrie

Das Kupferschienensystem 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 ?? aufgeführt sind. Die geometrische Anordnung des Schienensystems, insbesondere der Phasenmittlenabstand, 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.

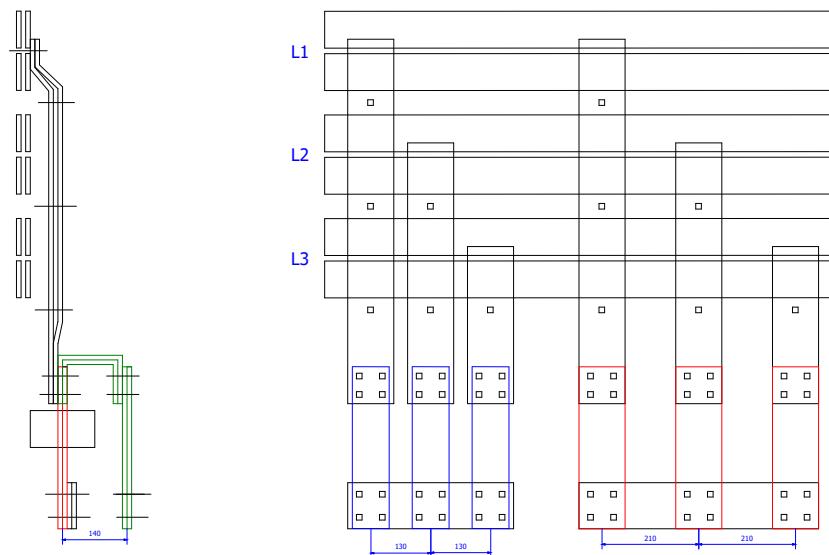


Abbildung 2.10: Darstellung der Phasenmittlenabstände in Abhängigkeit von der Schienenkonfiguration

Abbildung ?? verdeutlicht diesen Zusammenhang für zwei gängige Konfigurationen. Hierbei wird ein Phasenmittlenabstand von 130 mm für Ströme bis zu 4000 A eingesetzt, was bei einem 2500-A-Feld durch ein Kupferschienensystem aus zwei Leitern der Dimension $100 \times 10 \text{ mm}$ realisiert wird. Für höhere Anforderungen bis zu 6300 A wird hingegen ein Phasenmittlenabstand 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	Kupferschienenpaket
2000 A	130 mm	2 × 80 × 10 mm
2500 A	130 mm	2 × 100 × 10 mm
3200 A	210 mm	3 × 100 × 10 mm
4000 A	210 mm	4 × 100 × 10 mm
5000 A	210 mm	5 × 120 × 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.

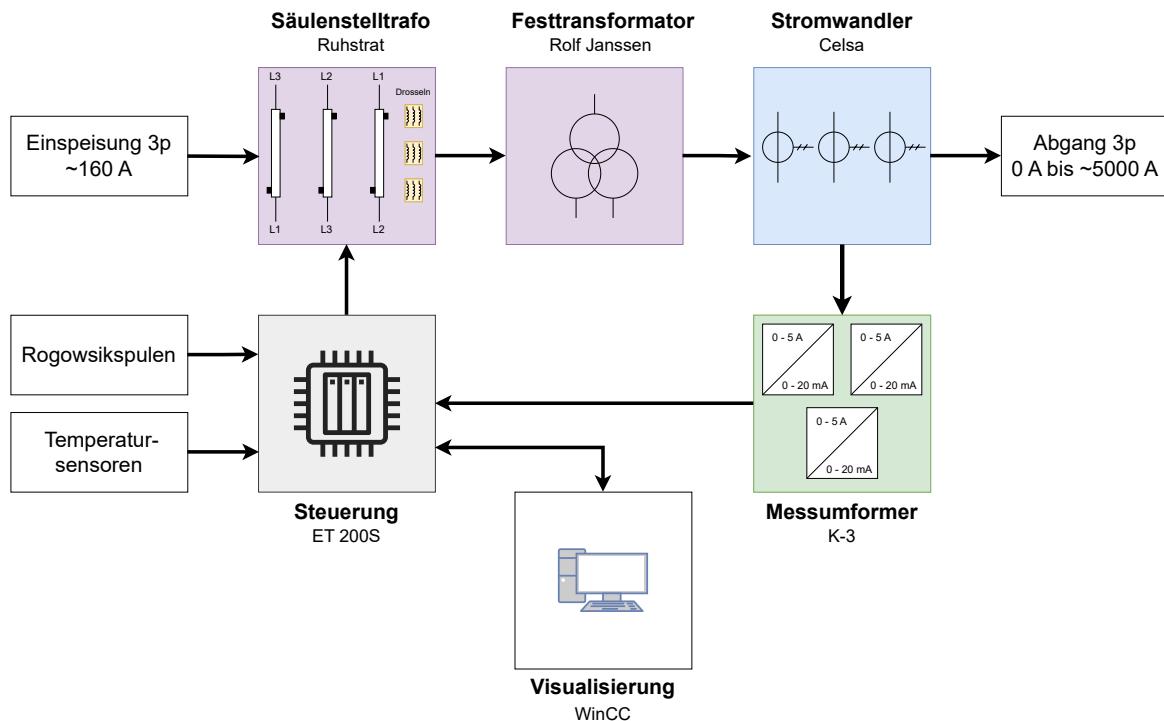


Abbildung 3.1: Blockschaltbild des Hochstrom-Prüfstandes mit Leistungs- und Signalpfaden

3.1.2 Regelungskonzept

Die Stromregelung ist als digitaler Proportional-Integral-Derivative (Regler) (PID)-Regelkreis innerhalb der Siemens Dezentrales Peripheriesystem von Siemens (ET 200S) realisiert. Der Anwender gibt über die Windows Control Center (WinCC)-Visualisierung den gewünschten Sollstrom vor, welchen die Speicherprogrammierbare Steuerung (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 ?? zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Detaillierte Spezifikation der Komponenten

Komponente	Typ	Leistung / Bürde	Primär / Input	Sekundär / Output
Säulenstelltransformator	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

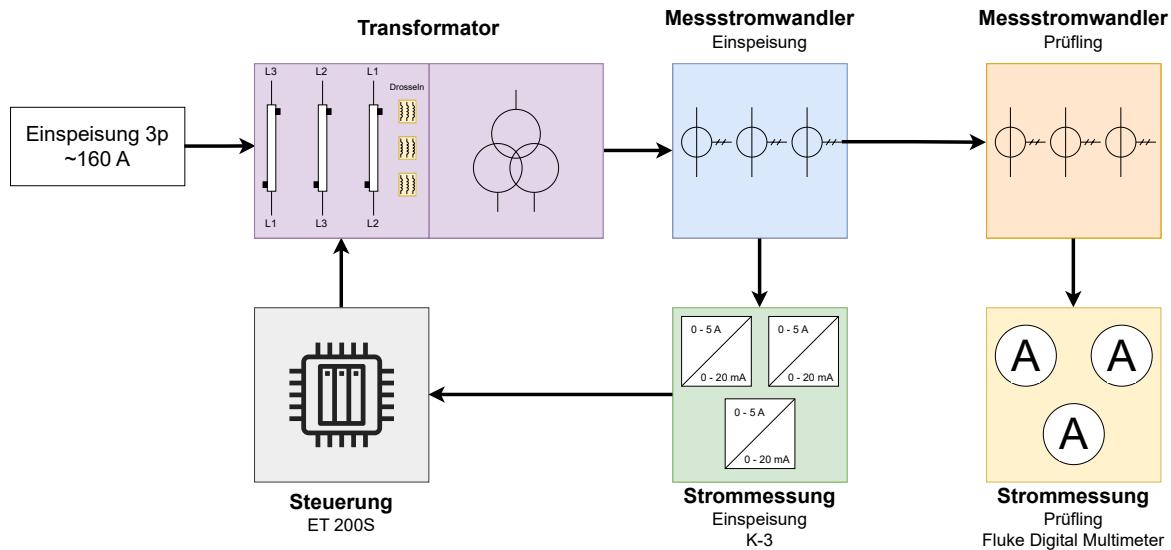


Abbildung 3.2: Schematischer Aufbau der Messstrecke zur Ermittlung der Messabweichung

Der erste Aufbau der Messstrecke (siehe Abbildung ??) 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 ?? 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.

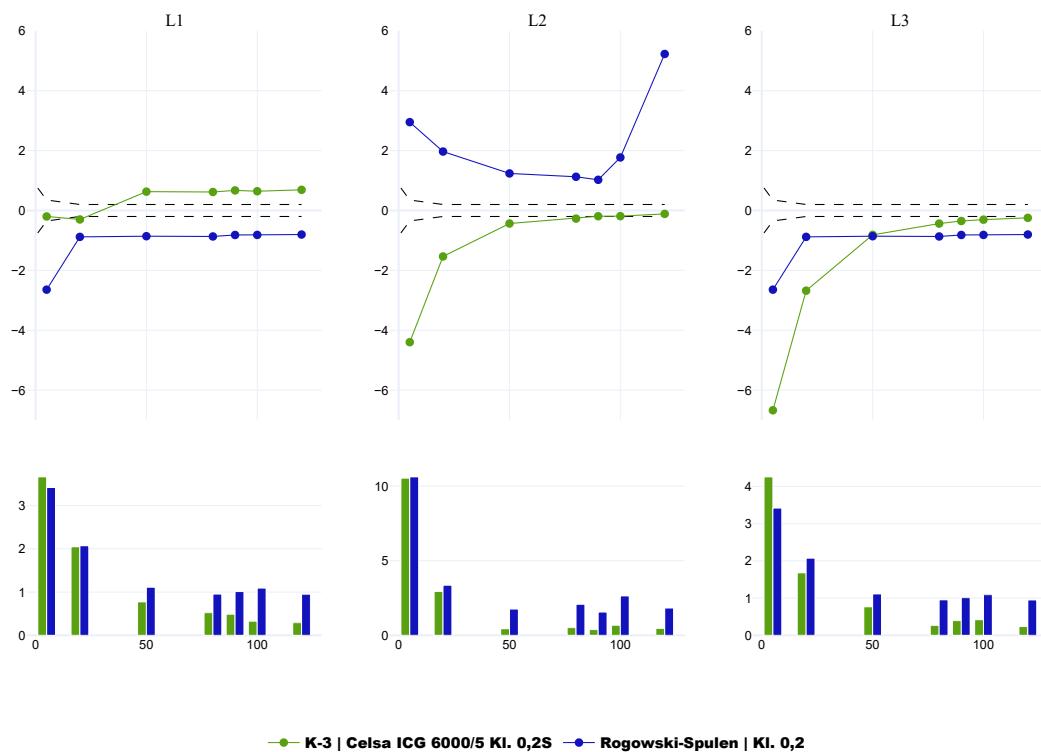
4000 A | Messabweichung und Standardabweichung | Vorheriger Versuchsaufbau


Diagramm 3.1: Analyse der Messabweichung und Standardabweichung der Phasen L1, L2 und L3 im ursprünglichen Versuchsaufbau

Die im unteren Teil der Abbildung ?? 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 Rogowskispuhen. Aufgrund dieser Ergebnisse sind beide Messverfahren für eine Referenzmessung im Rahmen der Genauigkeitsprüfung unzureichend. Im folgenden Abschnitt ?? 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.

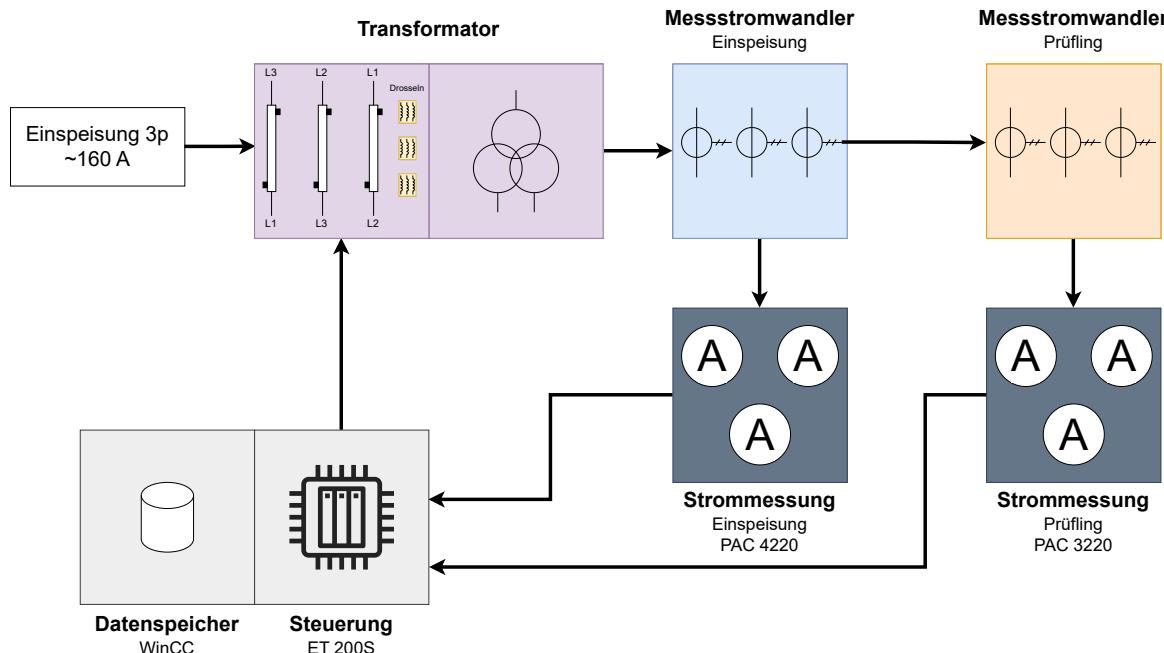


Abbildung 3.3: Schematischer Aufbau der optimierten Messstrecke mit Siemens SENTRON Messgeräten

Die in Abbildung ?? 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 Comma-Separated Values (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 Anwenderprogramm der Steuerung aus dem Peripheriebereich ausgelesen und in Datenbaustein (DB)s übertragen. Der gesamte Quellcode der verwendeten Programmbausteine ist hierfür in Abschnitt ?? aufgeführt. 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 ent-

sprechenden 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.

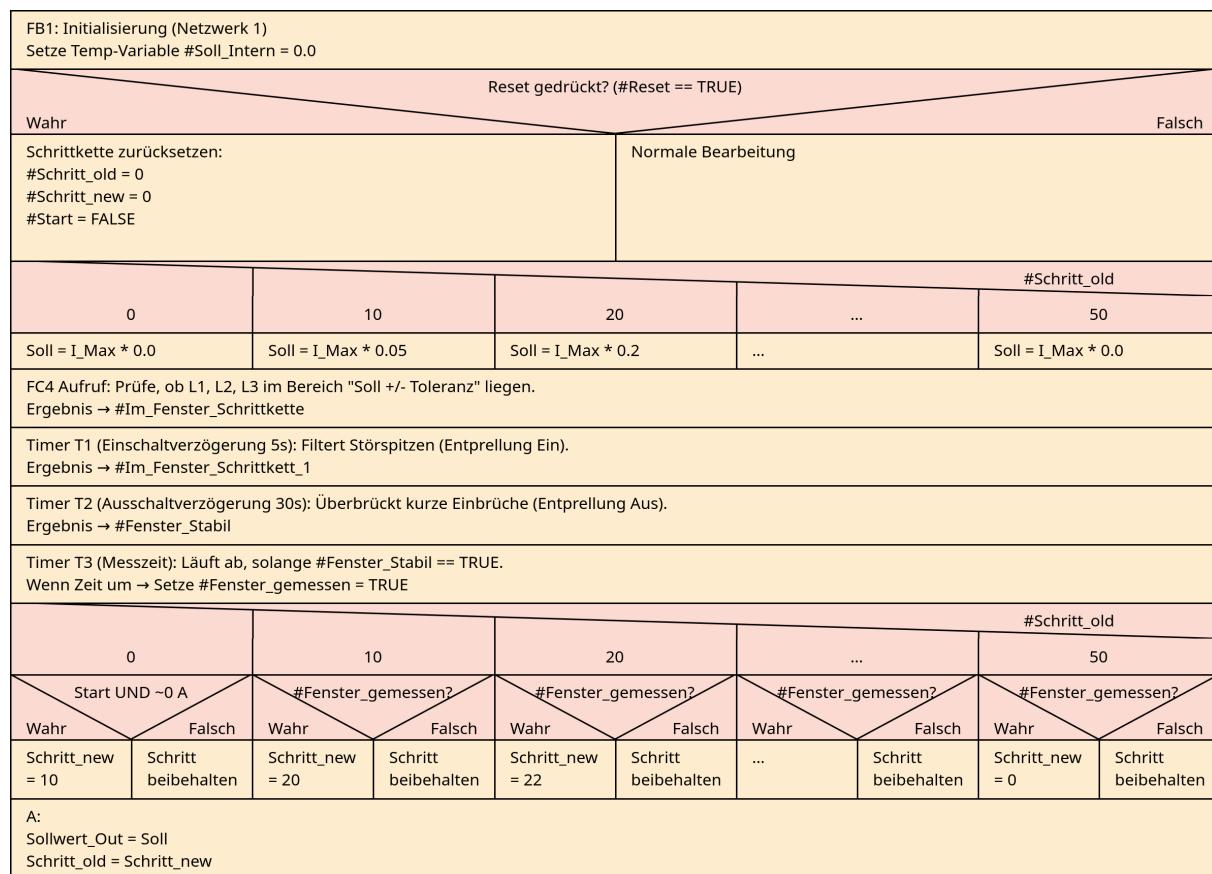


Abbildung 3.4: Struktogramm der Schrittkette zur automatisierten Kennlinienaufnahme (Funktionsbaustein (FB)1)

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 Schrittwert 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 Funktion (STEP 7 Baustein) (FC)4 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 Softwaregestützte Prozesskette zur Datenauswertung

Die vom Prüfstand exportierten Rohdaten liegen im CSV-Format vor und enthalten die zeitlichen Verläufe der Ströme I_{prim} (Referenz) und I_{sek} (Prüfling). Angesichts des Umfangs der Untersuchung, die 31 Konfigurationen mit jeweils zwei Messgeräten und drei Phasen umfasst, ergaben sich insgesamt über 180 auszuwertende Einzelmessreihen. Eine manuelle Verarbeitung dieser Datenmenge mittels Tabellenkalkulation wäre zeitaufwendig und anfällig für Übertragungsfehler gewesen. Aus diesem Grund wurde eine spezialisierte Auswertungssoftware in Python entwickelt.

Extraktion und Filterung der Messdaten

Der erste Schritt der Auswertung erfolgt im Modul „*Manueller Rohdaten-Export*“ (siehe Abbildung ??). Da die Datenerfassung am Prüfstand mit einer Abtastrate von 2 Hz (zwei Messwerte pro Sekunde) erfolgt, entstehen umfangreiche Zeitreihen. Die zentrale Funktion des Rohdaten-Selektors besteht darin, die aufgezeichneten Laststufen zu analysieren und die stationären Messbereiche zu isolieren. Hierbei werden die transienten Ein- und Ausschwingvorgänge aus dem Datensatz entfernt, sodass ausschließlich die stabilen Phasen in die weiterführende Genauigkeitsberechnung einfließen.

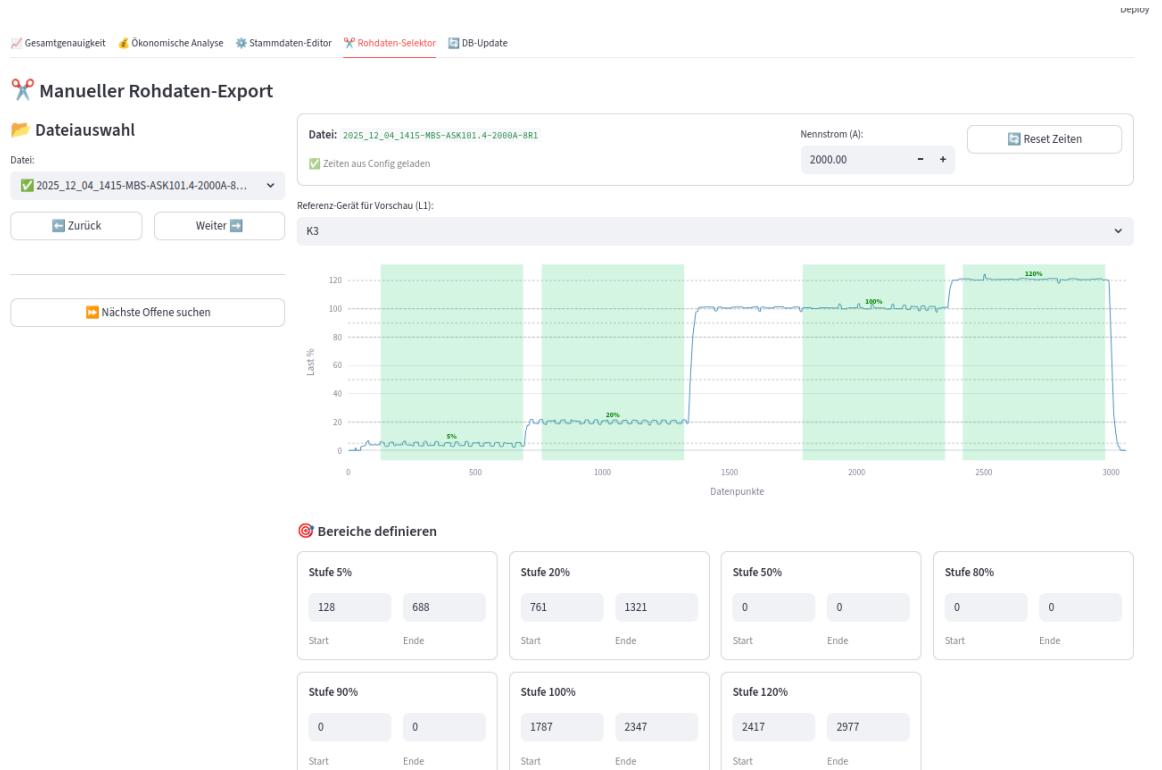


Abbildung 3.5: Benutzeroberfläche des manuellen Rohdaten-Exports zur Selektion stabiler Messbereiche

Für die Berechnung werden pro Laststufe exakt 560 Messpunkte herangezogen, was einem Zeitfenster von 4 Minuten und 40 Sekunden entspricht. Dies gewährleistet, dass für alle Messreihen eine identische statistische Basis vorliegt. Die so selektierten Bereiche werden als sortierte Datensätze in der Datenbank für die Weiterverarbeitung gespeichert.

Mathematische Berechnung

Die mathematische Grundlage für die in der Software dargestellten Werte bildet die Berechnung der prozentualen Messabweichung ε gemäß Abschnitt ???. Für die automatisierte Auswertung werden zunächst die arithmetischen Mittelwerte der Ströme über das stabile Zeitfenster (560 Messpunkte) gebildet und anschließend verrechnet:

$$\varepsilon = \frac{\bar{I}_{ist} - \bar{I}_{ref}}{\bar{I}_{ref}} \cdot 100 \% \quad (21)$$

Hierbei beschreibt \bar{I}_{ist} den arithmetischen Mittelwert der gemessenen Stromstärke des Prüflings und \bar{I}_{ref} den Mittelwert des Referenzmessgerätes im gleichen Zeitraum. Ergänzend hierzu berechnet die Software die Standardabweichung σ auf Basis der Einzelmesswerte x_i , um die Signalstabilität (Rauschen) innerhalb des Plateaus zu quantifizieren:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (22)$$

Diese statistische Kenngröße dient als Indikator für die Güte der Regelung und die Ruhe des Messsignals.

Analyse und Visualisierung

Nachdem die Berechnungen abgeschlossen und in der Datenbank gespeichert sind, stehen die Ergebnisse in zwei spezialisierten Analyse-Tabs zur Verfügung.

Der Reiter „**Gesamtgenauigkeit**“ ermöglicht den detaillierten technischen Vergleich. Hier wird die prozentuale Messabweichung über dem Primärstrom aufgetragen. Die Darstellung ist frei konfigurierbar, sodass verschiedene Wandlertechnologien oder Messreihen direkt übereinandergelegt und visuell mit den normativen Fehlergrenzen (z. B. Klasse 1) verglichen werden können.

Für eine bewertende Übersicht dient der Reiter „**Ökonomische Analyse**“. Um die Komplexität der Kennlinien für einen direkten Vergleich zu reduzieren, fasst die Software die Messabweichungen in drei signifikante Betriebsbereiche zusammen:

- **Niederstrombereich:** Erfasst das Anlaufverhalten und die Genauigkeit bei geringer Last (z. B. 5 % und 20 % I_n).
- **Nennstrombereich:** Bildet den Hauptarbeitsbereich um den Nennstrom ab (z. B. 50 % bis 100 % I_n).
- **Überstrombereich:** Visualisiert das Verhalten bei Überlast (z. B. 120 % I_n).

Um für diese Bereiche einen einzelnen, vergleichbaren Gütfaktor zu erhalten, werden die prozentualen Messabweichungen ε der zugehörigen Lastpunkte aggregiert. Hierfür wird der arithmetische Mittelwert der Absolutbeträge gebildet. Dies verhindert, dass sich positive und negative Abweichungen gegenseitig kompensieren (z. B. +0,5 % und -0,5 %), und stellt die durchschnittliche Betragsabweichung des Wandlers in diesem Arbeitsbereich dar:

$$\bar{\varepsilon}_{Bereich} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k |\varepsilon_j| \quad (23)$$

Dabei ist k die Anzahl der angefahrenen Lastpunkte innerhalb des definierten Bereichs und $|\varepsilon_j|$ der Betrag der Messabweichung am jeweiligen Prüfpunkt.

In dieser Ansicht werden zudem konstruktive und wirtschaftliche Parameter, wie das Gehäusevolumen und der Preis der Wandler, den aggregierten Genauigkeitswerten gegenübergestellt. Dies ermöglicht eine multidimensionale Bewertung der Prüflinge hinsichtlich ihres Preis-Leistungs-Verhältnisses.

Durch diese Auswahl an Visualisierungen kann der Anwender je nach Fragestellung – ob rein technisch, wirtschaftlich oder konstruktiv – die geeignete Darstellungsform wählen, um eine fundierte Auswahlentscheidung für den optimalen Stromwandler zu treffen.

3.2.3 Auswertung der neuen Messstrecke

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

4000 A | Messabweichung und Standardabweichung | Vorheriger Versuchsaufbau

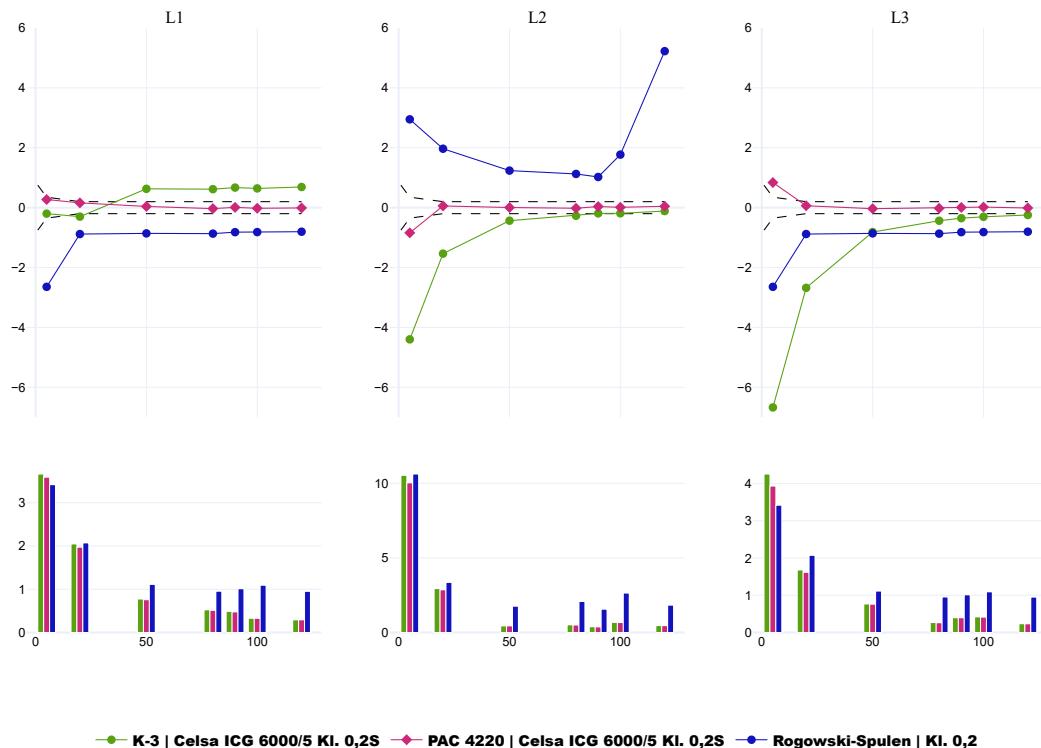


Diagramm 3.2: Vergleichende Analyse der Messabweichung (oben) und Standardabweichung (unten) unter Einsatz des PAC 4220

Eine Abweichung außerhalb der Normgrenzen ist lediglich im Bereich geringer Ströme (5 %) erkennbar. Wie in Abschnitt ?? erläutert, resultiert dieser Effekt aus dem begrenzten Stellbe-

reich des Säulenstelltransformators, der bei minimaler Auslenkung keine stabile Stromvorgabe ermöglicht. Durch die hohe Auflösung des PAC 4220 lässt sich diese physikalische Grenze des Prüfstandes messtechnisch präzise erfassen.

Die im unteren Teil der Abbildung ?? visualisierte Standardabweichung dient als Maß für die Präzision und Reproduzierbarkeit der Messsysteme. Hierbei weisen das PAC 4220 und der Messumformer K-3 ein ähnliches Verhalten mit einer geringen Streuung auf. Ab einer Last von 50 % sinkt die Standardabweichung für beide Geräte auf ein Niveau von unter 0,5 %. Im Gegensatz dazu zeigen die Rogowskispulse über den gesamten Messbereich eine höhere Streuung. Obwohl die K-3-Umformer eine vergleichbare Präzision wie das PAC-Messgerät erzielen, verbleiben sie aufgrund ihrer hohen systematischen Abweichung außerhalb der geforderten Genauigkeitsklasse.

Ergänzend zur Analyse der Einzelabweichungen ermöglicht das Ökonomie-Ranking in Abbildung ?? eine zusammenfassende Bewertung der Messsysteme.

4000 A | Performance Index | Vorheriger Versuchsaufbau

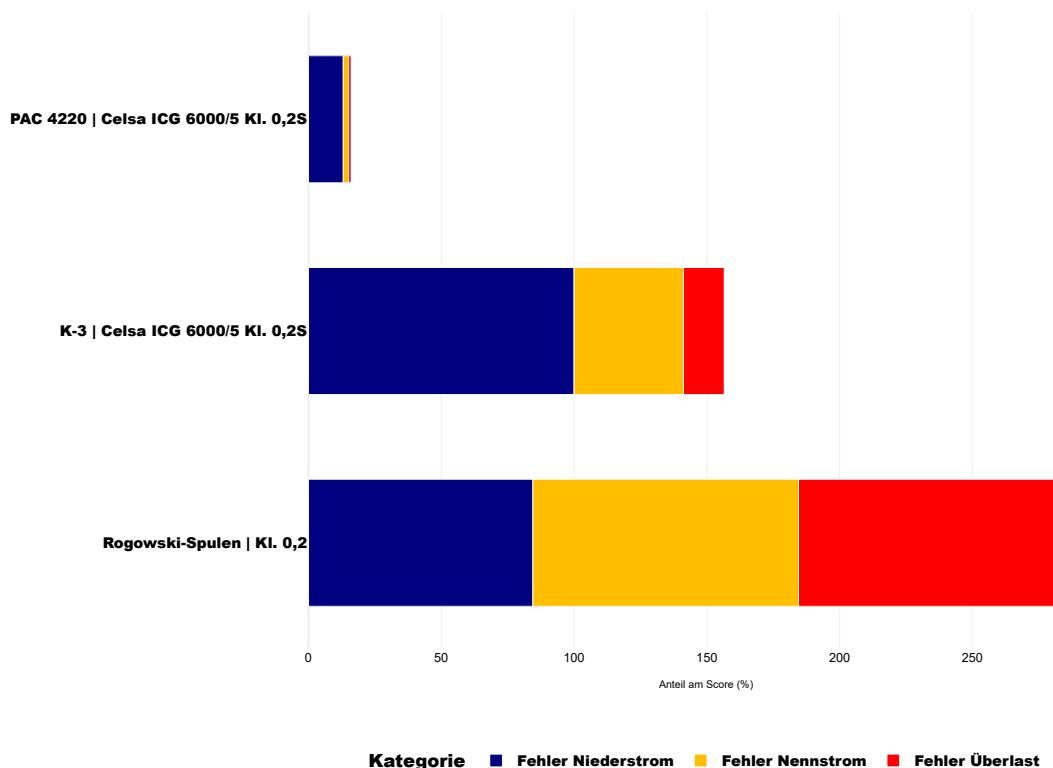


Diagramm 3.3: Kumulierter Vergleich der Fehleranteile (Ökonomie-Ranking) der verschiedenen Messsysteme über drei Lastbereiche

Hierbei werden die kumulierten Fehleranteile in den Bereichen Niederstrom (blau), Nennstrom (rot) und Überlast (gelb) gegenübergestellt. Zur quantitativen Bewertung dieser Anteile dient der in Tabelle ?? ausgewiesene Fehler-Score.

Tabelle 3.2: Vergleichende Übersicht der Fehleranteile und des resultierenden Fehler-Scores der Messsysteme.

Messsystem	Niederstrom [%]	Nennstrom [%]	Überlast [%]	Fehler-Score [%]
PAC 4220	13,10	2,00	0,96	16,06
K-3	100,00	41,19	15,36	156,55
Rogowski-Spulen	84,50	100,00	100,00	284,50

Dieser Score berechnet sich aus der Summe der Abweichungen über alle Lastbereiche, wobei ein niedriger Wert eine höhere Gesamtgenauigkeit indiziert. Im direkten Vergleich erreicht das PAC 4220 einen Fehler-Score von 16,06 %, während der Messumformer K-3 einen kumulierten Anteil von 156,55 % aufweist. Die Rogowski-Spulen markieren mit 284,50 % die größte Abweichung im Vergleich. Diese Ergebnisse bestätigen, 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.

3.2.4 Auswahl und Spezifikation der Messstromwandler

Für die experimentellen Untersuchungen werden Stromwandler der Hersteller MBS, Celsa und Redur eingesetzt. Die Auswahl deckt ein Spektrum von marktüblichen Standardwandlern bis hin zu spezialisierten Modellen mit integriertem Fremdfeldschutz ab. Ziel dieser Zusammenstellung ist es, eine belastbare Datenbasis für die Analyse der Beeinflussungseffekte unter verschiedenen technologischen Voraussetzungen zu schaffen. Tabelle ?? fasst die technischen Kenndaten der Prüflinge zusammen. Neben dem Nennstrom I_n und der Bemessungsleistung S_n ist das Gehäusevolumen aufgeführt. Dieses dient als Vergleichsgröße für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und errechnet sich aus dem Produkt der maximalen äußeren Gehäuseabmessungen (Höhe \times Breite \times Tiefe). Es ist anzumerken, dass es sich hierbei um eine Vereinfachung handelt, die den Wandler auf seinen quaderförmigen Hüllkörper reduziert. Spezifische Geometrien, wie etwa Verjüngungen oder Abrundungen am Gehäuse, werden in dieser Berechnung vernachlässigt, sodass das tatsächliche Materialvolumen geringer ausfallen kann. Für die konstruktive Bewertung in Schaltanlagen ist diese Betrachtungsweise jedoch maßgeblich, da für die Montageplanung der maximale Platzbedarf (Bauraum) reserviert werden muss, den der Wandler im Anschlussraum effektiv beansprucht.

Tabelle 3.3: Erweiterte Spezifikationen und wirtschaftliche Kennwerte der Prüflinge

Hersteller	Typ	Technologie	I_n [A]	S_n [VA]	Volumen [cm ³]	Preis [€]
Celsa	ALO 10030	Standard	2000	2,5	634,3	45,50
Celsa	ALO 8030 K	Kompensiert	2000	10,0	710,2	95,95
Celsa	ALO 10030	Standard	2500	2,5	634,3	45,50
Celsa	ALO 10050 K	Kompensiert	2500	5,0	1027,0	104,20
Celsa	ALO 12070	Standard	3000	15,0	1520,0	71,51
Celsa	ALO 12070 K	Kompensiert	3000	15,0	1520,0	346,06
Celsa	ALO 12070	Standard	4000	15,0	1520,0	71,51
Celsa	ALO 12070 K	Kompensiert	4000	15,0	1520,0	401,91
Celsa	ALO 20060	Standard	5000	40,0	1989,0	124,76
Celsa	ALO E 16050 K	Kompensiert	5000	40,0	1903,0	414,56
MBS	ASK 101.4	Standard	2000	10,0	733,2	141,90
MBS	ASK 129.10	Standard	5000	15,0	6175,0	303,10
Redur	13A1030.3ffp	FFP	2000	10,0	778,7	??
Redur	20A1456.5vfp	VFFP	5000	15,0	1600,0	??

Die eingesetzten Wandler lassen sich technologisch in drei Kategorien unterteilen. Als Basis dienen Standardwandler, die einen klassischen Aufbau ohne zusätzliche konstruktive Schutzmaßnahmen gegen externe Felder aufweisen (siehe Abschnitt ??). Eine weiterführende Bauform stellen die kompensierten Wandler dar. Diese Modelle verfügen über eine modifizierte Wicklungsanordnung, die gezielt zur Reduktion von Messabweichungen bei asymmetrischer Primärleiterlage eingesetzt wird (siehe Abschnitt ??). Die dritte Gruppe bilden die spezialisierten Fremdfeld-Protektor (Schirmungstechnologie) (FFP)- und VFFP-Wandler der Firma Redur, die die Technologie der Fremdfeldprotektoren nutzen. Die Bezeichnung FFP steht für *Fremdfeldprotektoren*. Diese Technologie wurde entwickelt, um den Eintritt magnetischer Fremdfelder in den Wandlerkern zu verringern. Der Hersteller unterteilt die Protektoren in Klassen wie FFP1, FFP5 und FFP10, welche den Grad der Schirmwirkung definieren. Technisch wird dies durch die Integration eines Werkstoffs mit hoher magnetischer Permeabilität am oder im Gehäuse des Wandlers realisiert. Diese Schirmung fungiert als magnetischer Shunt, der die Feldlinien benachbarter Leiter um den Messkern herumleitet. Infolgedessen bleibt die magnetische Induktion im Kernmaterial weitgehend unbeeinflusst von äußeren Feldern [9]. Um die Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten, entsprechen alle ausgewählten Wandler der Genauigkeitsklasse 1,0. Die in der Tabelle aufgeführten Nennbüren sind so gewählt, dass sie die Anforderungen für die in Abschnitt ?? beschriebene thermische Dauerbelastung erfüllen.

3.2.5 Geometrische Anordnung der Primärleiter

In Niederspannungsschaltanlagen werden Kupferschienen vorwiegend parallel angeordnet. Diese Bauweise zeichnet sich durch Platzersparnis und eine geringe Montagekomplexität aus. Die Führung der Schienen wird konstruktiv maßgeblich durch die Anschlüsse des Leistungsschalters bestimmt. Daher sind Variationen der Geometrie im realen Anlagenbau nur eingeschränkt möglich. Die Messstromwandler werden üblicherweise dem Hauptschalter nachgelagert im Anschlussraum installiert. Aufgrund des begrenzten Bauraums stellt die Realisierung abweichender Leiteranordnungen wie etwa einer Dreieckskonfiguration zur Reduktion von Fremdfeldern eine konstruktive Herausforderung dar.

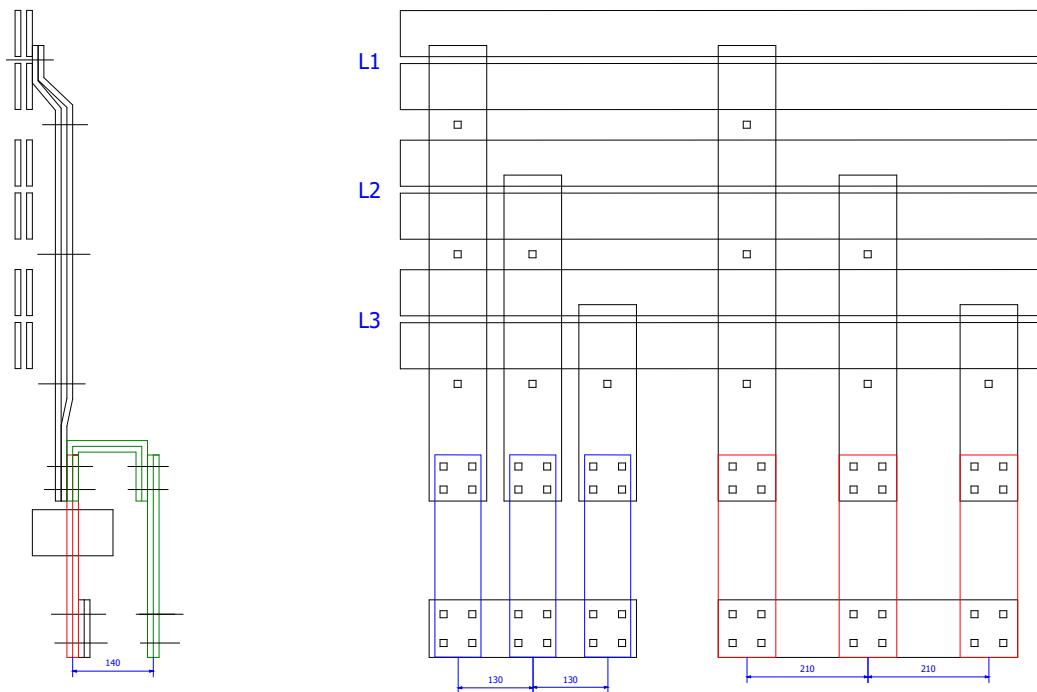


Abbildung 3.6: Technische Zeichnung des Kupferschienensystems in paralleler und dreiecksförmiger Anordnung

Abbildung ?? zeigt die konstruktive Umsetzung der untersuchten Geometrien. In der Frontalansicht ist die horizontale Führung der drei Außenleiter L1, L2 und L3 zu sehen. Die Abgangsschienen haben dabei unterschiedliche Phasenmittenabstände. Im linken Bereich (blaue Schine) beträgt der Abstand 130 mm und im rechten Teil der Anlage (rote Schine) sind es 210 mm. Die Seitenansicht zeigt die Umsetzung der Dreiecksanordnung. Hier ist erkennbar, dass die Schienen (grün) zur Kontaktierung der Anschlussebene zweifach gekröpft sind. Der vertikale Versatz von 140 mm ermöglicht die räumliche Staffelung der Leiter für die Dreieckskonfiguration.

Um den Einfluss der Leitergeometrie experimentell zu untersuchen, wurde das Kupferschienensystem des Hochstromprüfstandes auf Basis dieser Zeichnung flexibel gestaltet. Dies ermöglicht den direkten Vergleich zwischen der konventionellen Parallelanordnung und einer optimierten Dreiecksanordnung bei identischen elektrischen Parametern.

Die im Versuchsaufbau gewählten Dimensionen orientieren sich an realen Industriestandards. Tabelle ?? gibt hierzu eine Übersicht der Phasenmittenabstände für die Leistungsschalter der Reihen 3WA12 und 3WA13, welche als Grundlage für die Konstruktion dienten.

Tabelle 3.4: Übersicht der Schienenkonfigurationen und Phasenmittenabstände mit 4000 A bei 3WA13

Modell	Nennstrom [A]	Schienenkonfiguration	Phasenmittenabstand [mm]
3WA12	2000	2x 80x10	
	2500	2x 100x10	130
	3000	3x 100x10	
3WA13	4000	4x 100x10	
	5000	5x 120x10	210

Parallelanordnung

Als Referenz fungiert die Parallelanordnung der drei Phasenleiter L1, L2 und L3 in einer Ebene. Dieser in Abbildung ?? gezeigte Aufbau bildet die realen Bedingungen in Siemens SIVACON S8 Schaltfeldern nach. Die verwendeten Abstände entsprechen dabei den in Tabelle ?? aufgeführten Herstellervorgaben. In dieser Konfiguration ist der Prüfling, hier beispielhaft der Messstromwandler Redur 20A1456.5vfp (5000 A), den maximalen magnetischen Fremdfeldern der benachbarten Leiter ausgesetzt.



Abbildung 3.7: Versuchsaufbau in paralleler Schienenanordnung mit montiertem Messstromwandler (Typ: Redur 20A1456.5vfp)

Dreieckskonfiguration

Für die Realisierung der Dreiecksanordnung wurde der Aufbau gemäß Abbildung ?? modifiziert. Ein speziell gefertigter Kupferadapter führt hierbei die mittlere Phase L2 geometrisch aus der Ebene der Außenleiter heraus. Der Adapter versetzt die Schiene um 140,0 mm nach vorne. Durch diesen Versatz spannen die Mittelpunkte der drei Leiter im Querschnitt ein Dreieck auf. Ziel dieser Anordnung ist eine symmetrischere Gestaltung der magnetischen Kopplung sowie die teilweise Kompensation der vektoriellen Anteile der Fremdfelder im Bereich des Wandlerkerns. Auch in dieser Konfiguration wurde der 5000 A-Wandler von Redur vermessen.



Abbildung 3.8: Modifizierter Versuchsaufbau in Dreieckskonfiguration durch räumlichen Versatz der Phase L2 mittels Kupferadapter

4 Auswertung und Diskussion

Dieses Kapitel widmet sich der Untersuchung, wie verschiedene Leitergeometrien die Messgenauigkeit der Stromwandler beeinflussen. Der Schwerpunkt liegt zunächst auf der allgemeinen Einwirkung durch die Anordnung. Im Anschluss folgen eine detaillierte Analyse der einzelnen Außenleiter sowie eine ökonomische Bewertung der Resultate.

4.1 Einfluss der Leitergeometrie auf die Messgenauigkeit

Die folgenden Diagramme visualisieren die Messabweichungen der Stromwandler in Abhängigkeit vom Primärstrom sowie der Leiteranordnung. Der Vergleich erfolgt jeweils zwischen Wandlern mit identischem Nennstrom. Eine genaue Beschreibung der verwendeten Leiteranordnungen findet sich in Abschnitt ??.

Zur visuellen Unterscheidung gelten in den Diagrammen folgende Konventionen

- Die **Parallelanordnung** wird durch eine durchgezogene Linie in Kombination mit einem Kreissymbol dargestellt
- Die **Dreiecksanordnung** ist durch eine gepunktete oder gestrichelte Linie sowie ein Dreieckssymbol gekennzeichnet
- Die **Farbgebung** verbleibt für ein spezifisches Wandlermodell in beiden Anordnungen gleich um den direkten Vergleich zu ermöglichen

Diese Darstellungsweise erlaubt die direkte Bewertung des Geometrieeinflusses auf den jeweiligen Wandlertyp.

4.1.1 Referenzanalyse bei 2000 A Einfluss der Leitergeometrie auf verschiedene Wandlerkonzepte

Die Untersuchung der Stromwandler bei einem Nennstrom von 2000 A liefert differenzierte Ergebnisse für die verschiedenen Modelle und Leiteranordnungen. Abbildung ?? stellt die Verläufe der vier Prüflinge gegenüber und verdeutlicht die Einhaltung der Genauigkeitsklasse 1 für den Großteil der Messpunkte. Der grafische Vergleich hebt hervor dass insbesondere zwei Konfigurationen erkennbare Abweichungen aufweisen. Dies betrifft den Redur 13A1030.ffp in der Dreiecksanordnung sowie den Celsa ALO 10030 in der Parallelanordnung. Beide Wandler verlassen in diesen spezifischen Szenarien die vorgegebenen Toleranzbereiche.

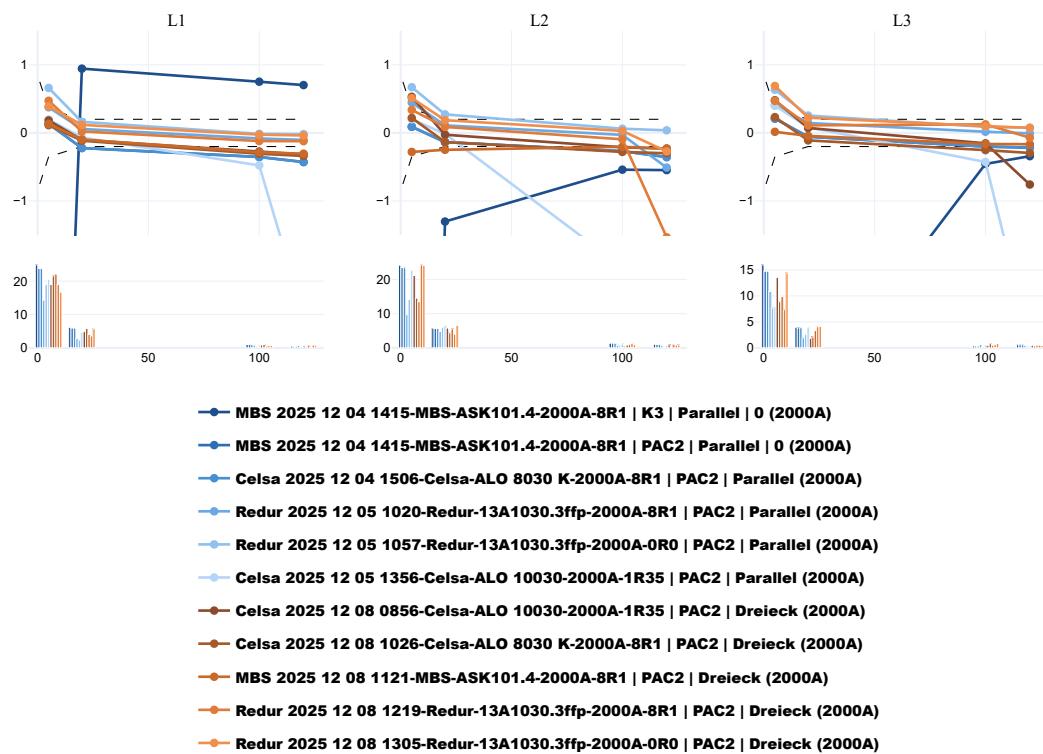
2000 A | Fehlerkurve | Phasen-Vergleich


Diagramm 4.1: Zusammenfassender Vergleich der Leitergeometrien bei 2000 A

Eine bauliche Besonderheit weist der Redur 13A1030.ffp auf. Wie in Abbildung ?? zu erkennen ist befinden sich die Fremdfeldprotektoren (FFP) an den seitlichen Flanken des Gehäuses. Diese Positionierung schirmt den Eisenkern gegen magnetische Streufelder benachbarter Leiter ab sofern diese seitlich angeordnet sind. In der parallelen Leiterführung resultiert dies in normkonformen Messergebnissen da die Beeinflussung durch die Nachbarphasen minimiert wird.

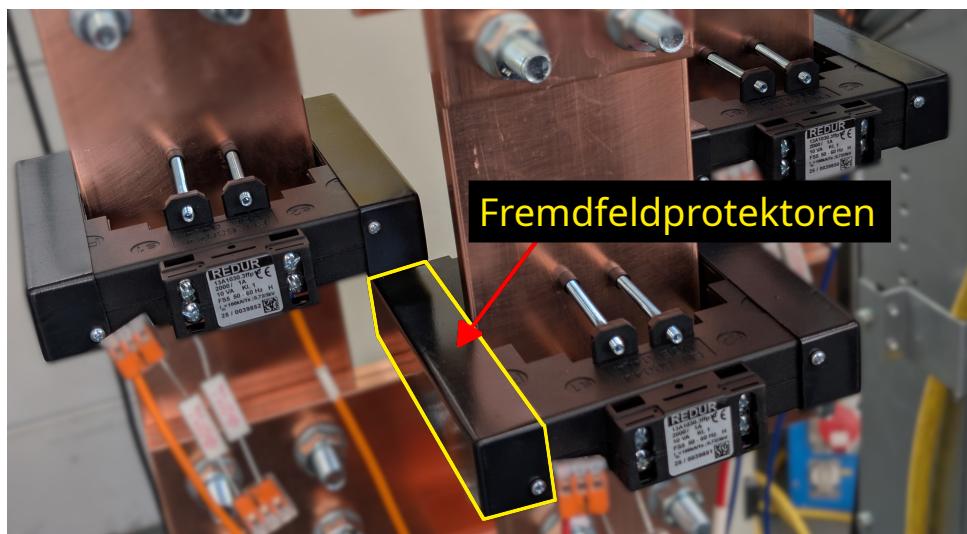


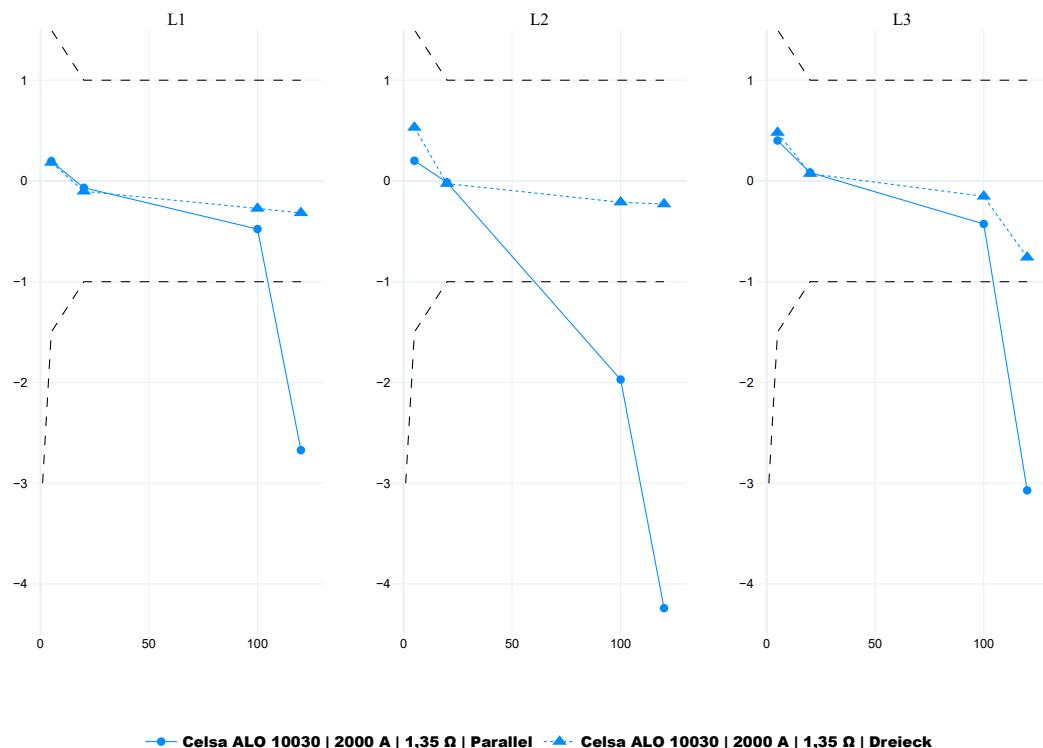
Abbildung 4.1: Seitliche Fremdfeldprotektoren am Redur Wandler

Die Grenzen dieser Schirmungstechnologie offenbaren sich in der Dreiecksanordnung. Die de-

taillierten numerischen Ergebnisse für diesen Aufbau sind in Tabelle ?? im Anhang zu finden. Die Phase L2 weist bei 120 % des Nennstroms eine Abweichung von $-1,5\%$ auf. Dieser Wert liegt außerhalb der zulässigen Toleranz der Genauigkeitsklasse 1. Ursächlich hierfür ist die fehlende magnetische Schirmung auf der Rückseite des Wandlergehäuses. In der Dreiecksgeometrie können die Magnetfelder der benachbarten Leiter an dieser ungeschützten Stelle in den Eisenkern eindringen und sättigen diesen partiell. Im Gegensatz dazu bleibt die Phase L1 mit einer Abweichung von lediglich $-0,1\%$ im selben Lastpunkt weit innerhalb der Normgrenzen.

Ein konträres Verhalten ist beim Modell Celsa ALO 10030 zu beobachten. Tabelle ?? im Anhang dokumentiert die Messergebnisse für diesen Wandler und belegt substantielle Einbußen der Genauigkeit in der parallelen Leiteranordnung. Bereits bei Nennstrom verletzt die Phase L2 mit $-2,0\%$ den zulässigen Grenzwert. Bei einer Überlast von 120 % steigt die Abweichung weiter auf $-4,2\%$ an. Auch die Außenleiter L1 und L3 zeigen in der Parallelanordnung bei 120 % Last mit Werten von $-2,7\%$ beziehungsweise $-3,1\%$ erkennbare Fehler. Die Änderung der Geometrie hin zur Dreiecksanordnung bewirkt bei diesem Modell eine Verbesserung. Der Fehler der Phase L2 reduziert sich hierbei bei 120 % Last auf einen unkritischen Wert von $-0,2\%$.

Diese Abhängigkeit des Fehlers vom Primärstrom wird in Abbildung ?? grafisch aufbereitet. Das Diagramm veranschaulicht den steilen Abfall der Messkurven für die Parallelanordnung ab etwa 20 % des Nennstroms. Im Vergleich dazu verlaufen die Kurven der Dreiecksanordnung weitestgehend linear und verbleiben im Toleranzbereich.

2000 A | Fehlerkurve | Parallel und Dreieck

Diagramm 4.2: Messfehlerverlauf des Celsa ALO 10030 in Abhängigkeit vom Primärstrom

Im Gegensatz zu den Abweichungen der vorangegangenen Modelle zeigen der Celsa ALO 8030 K und der MBS ASK101.4 eine hohe Stabilität gegenüber externen Feldern. Diese Unempfindlichkeit lässt sich beim Celsa ALO 8030 K auf die Bauweise als kompensierter Wandler zurückführen wie in Abschnitt ?? erläutert wird. Tabelle ?? im Anhang fasst die Ergebnisse für dieses Modell

zusammen. Selbst unter Volllast und Überstrom bleiben alle Phasen in beiden geometrischen Anordnungen sicher innerhalb der Klasse 1. Die maximale Abweichung tritt in der Parallelanordnung bei Phase L1 mit einem Wert von $-0,4\%$ auf.

Ein ähnlich robustes Verhalten bestätigt Tabelle ?? im Anhang für den MBS ASK101.4. Auch hier sind keine signifikanten Einflüsse durch die Leiteranordnung erkennbar. Die Messwerte liegen konstant auf einem Niveau vergleichbar mit dem Celsa 8030 K. In der Dreiecksanordnung erreicht die Phase L1 bei 120 % Last beispielsweise eine Abweichung von $-0,3\%$ und demonstriert damit die Unempfindlichkeit dieses Modells gegenüber den untersuchten geometrischen Anordnungen.

4.1.2 Einfluss der Leitergeometrie auf das Sättigungsverhalten bei 2500 A

Die Analyse der Messreihe bei 2500 A verdeutlicht den Einfluss der Leitergeometrie auf unterschiedliche Wandlertechnologien. Im Fokus steht der Vergleich zwischen dem kompensierten Wandler Celsa ALO 10050 K und dem Standardwandler Celsa ALO 10030 in Bezug auf ihre Stabilität in Parallel- und Dreiecksanordnungen.

Aufgabe

Hier möchte ich noch eine Simulation machen. Es sollen die Sättigungseffekte des Eisenkernes betrachtet werden.

2500 A | Fehlerkurve | Parallel und Dreieck

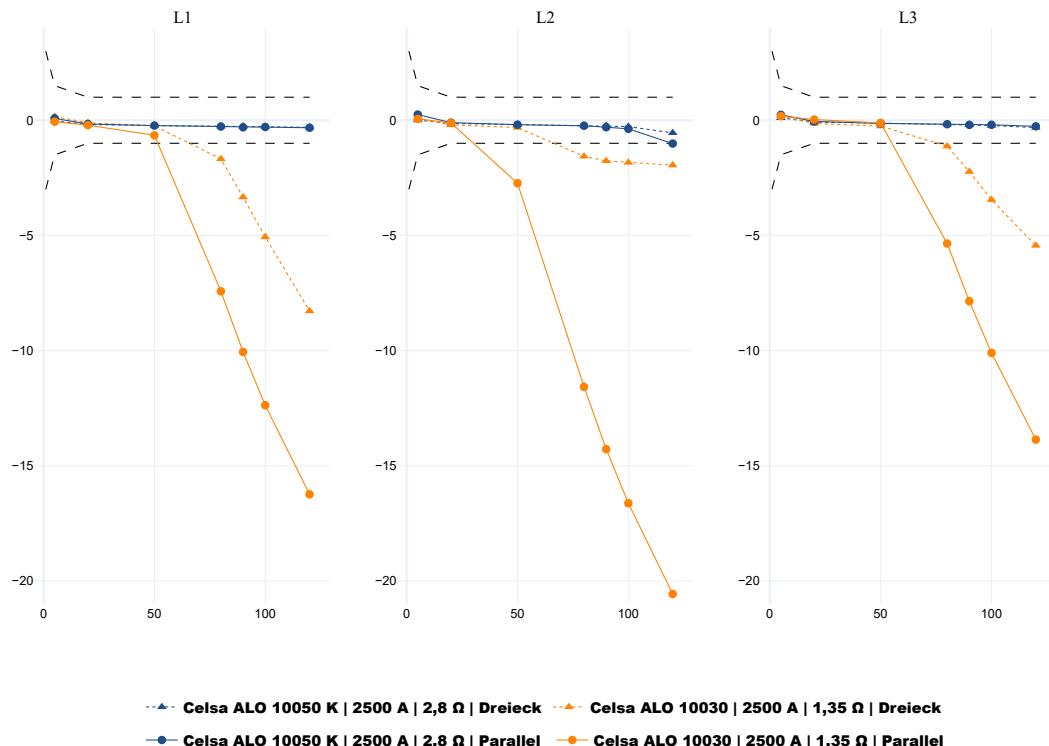


Diagramm 4.3: Zusammenfassender Vergleich der Leitergeometrien bei 2500 A

Die Messergebnisse des kompensierten Wandlers Celsa ALO 10050 K belegen dass dieser über den Großteil des Messbereichs eine hohe Genauigkeit aufweist (siehe Tabelle ?? im Anhang). In der Parallelanordnung bewegt sich der Wandler fast durchgehend innerhalb der Normvorgaben. Eine

Ausnahme bildet die Phase L2 im Überlastbereich (120 % I_n). Hier überschreitet der Wandler den Grenzwert mit einer Abweichung von rund -1,0% knapp was einem absoluten Fehlstrom von rund 30 A entspricht. In der Dreiecksanordnung reduziert sich dieser Messfehler auf etwa -0,55% wodurch die Norm wieder eingehalten wird. Dies zeigt dass selbst ein kompensierter Wandler nicht vollständig immun gegen externe Magnetfelder ist die Auswirkungen jedoch im Vergleich zu Standardwandlern gering bleiben. Da sich der Fehlerbetrag hierbei fast halbiert führt die Dreiecksgeometrie in diesem kritischen Lastpunkt zu einer annähernden Verdopplung der Messgenauigkeit.

Im Gegensatz dazu zeigt der nicht kompensierte Standardwandler Celsa ALO 10030 in beiden Anordnungen erhebliche Abweichungen die auf eine magnetische Sättigung hindeuten (siehe Tabelle ?? im Anhang). In der Parallelanordnung steigt der Fehler bereits ab 50% Nennstrom erkennbar an. Bei 100% Last liegen die Abweichungen zwischen -10% und -16%. Um das Ausmaß dieser Sättigungseffekte im Hochlastbereich zu verdeutlichen stellt Tabelle ?? die absoluten Fehlströme der Phase L2 gegenüber und quantifiziert den Gewinn durch die geometrische Optimierung.

Tabelle 4.1: Vergleich der Fehlströme und Genauigkeitsgewinn (Celsa ALO 10030, Phase L2)

Lastpunkt [% I_n]	Primärstrom [A]	Fehlstrom Dreieck [A]	Fehlstrom Parallel [A]	Verbesserung [%]
80	2000	31,35	231,42	10,0
90	2250	39,67	321,22	12,5
100	2500	45,85	415,59	14,8
120	3000	58,49	616,96	18,6

Wie den Werten zu entnehmen ist bricht die Genauigkeit im Überlastbereich bei 120% ein. Während in der Parallelanordnung ein Fehlstrom von über 600 A auftritt sinkt dieser in der Dreiecksanordnung auf rund 58 A. Dies entspricht einer Verbesserung der Genauigkeit um 18,6 Prozentpunkte. Auch die Phasen L1 und L3 liegen in der Parallelanordnung mit -16,2% beziehungsweise -13,9% weit außerhalb der Toleranzgrenzen profitieren jedoch in ähnlichem Maße von der Umstellung auf die Dreiecksgeometrie.

Dennoch muss konstatiert werden dass selbst die optimierte Dreiecksanordnung nicht ausreicht um die normativen Vorgaben zu erfüllen. Trotz der Fehlerminimierung verbleibt der Wandler außerhalb der Genauigkeitsklasse 1.

Diese verbleibende Abweichung deutet auf eine grundsätzliche Unterdimensionierung des magnetischen Kreises hin. Ein Vergleich mit den Ergebnissen aus Abschnitt ?? stützt diese Hypothese da bereits dort der Wandlertyp Sättigungstendenzen im Nennstrombereich zeigte. Bei dem hier untersuchten 2500 A-Modell wird anhand von Tabelle ?? ersichtlich dass der Fehleranstieg bereits bei 80% der Nennlast einsetzt. Dies entspricht einem Primärstrom von 2000 A.

Damit korreliert der Sättigungsbeginn exakt mit den Beobachtungen der vorherigen Messreihe. Dies lässt den Schluss zu dass das physikalische Eisenkernvolumen dieses Bauteils unabhängig von der Nennstromangabe auf dem Typenschild für Ströme oberhalb von 2000 A nicht ausreichend dimensioniert ist.

Dieser empirische Befund bestätigt die theoretischen Zusammenhänge die durch Gleichung ?? in Abschnitt ?? beschrieben werden. Wie dort hergeleitet führt der geringe Eisenquerschnitt A des kleinen Wandlers dazu dass sich der magnetische Fluss auf eine zu kleine Fläche konzentriert. Dies bewirkt trotz der absolut gesehen geringeren Störflussaufnahme einen kritischen Anstieg der resultierenden Flussdichte B_{res} wodurch die Sättigungsgrenze des Materials frühzeitig erreicht wird.

Tabelle ?? untermauert diese Vermutung durch die Berechnung des effektiven Materialvolumens. Während der Typ ALO 10050 über ein Nettovolume von $623,6 \text{ cm}^3$ verfügt weist der hier betrachtete ALO 10030 lediglich $265,5 \text{ cm}^3$ auf. Damit steht diesem Wandler weniger als die Hälfte des Volumens zur Verfügung was die frühe Sättigung physikalisch plausibilisiert.

Tabelle 4.2: Berechnetes Nettovolume der untersuchten Wandler

Modell	Gehäusemaße ($H \times B \times T$)	Fenstergeometrie	Nettovolume [cm 3]
ALO 10030	$31 \times 129 \times 141 \text{ mm}$	$\varnothing 55 \text{ mm}$	265,5
ALO 10050 K	$50 \times 130 \times 141 \text{ mm}$	$50 \times 101 \text{ mm}$	623,6

Einschränkend ist anzumerken dass das berechnete Volumen auf der Gehäusegeometrie basiert und nicht exakt dem Volumen des Eisenkerns entspricht. Da jedoch ein beachtlicher Unterschied im Volumenfaktor vorliegt ist der Vergleich als Näherung für die verfügbare Eisenkern zulässig.

Der Celsa ALO 10050 K dient an dieser Stelle lediglich als geometrische Referenzgröße. Es ist nicht zulässig die höhere Genauigkeit dieses Typs allein auf das größere Volumen zurückzuführen da dessen Messstabilität primär durch die Kompensationstechnik erreicht wird.

4.1.3 Einfluss von Geometrie und Bürde bei 3000 A

Die Messreihe bei einer Stromstärke von 3000 A fungiert als zentrale Fallstudie um das Verhalten der Wandler im Grenzbereich ihrer Leistungsfähigkeit zu charakterisieren. Zentraler Gegenstand dieser Betrachtung ist der technologische Vergleich zwischen dem Standardwandler Celsa ALO 12070 und der kompensierte Ausführung ALO 12070 K unter dem Einfluss der Leitergeometrie. Ergänzend wird untersucht inwiefern eine Reduktion des sekundären Bürdenwiderstands die Sättigungseffekte in der kritischen Parallelanordnung abmildern kann.

4.1.3.1 Vergleich der Wandlertechnologien und Geometrien Abbildung ?? stellt die Fehlerverläufe beider Wandlertypen in Dreiecks- und Parallelanordnung gegenüber.

Die Untersuchung des Standardwandlers ALO 12070 in der Parallelanordnung offenbart dass der Leiter L2 als einziger die Genauigkeitsanforderungen nicht erfüllen kann. Wie in Tabelle ?? im Anhang ersichtlich fällt der Messwert bereits bei 80 % des Nennstromes mit $-1,1\%$ unter den Grenzwert. Dieser Fehler verstärkt sich linear bis in den Überlastbereich wo er bei 120 % Last einen Wert von $-5,4\%$ erreicht was einem absoluten Fehlstrom von rund 195,3 A entspricht.

Demgegenüber belegt der kompensierte Typ ALO 12070 K dass die zusätzliche Wicklung die Erfassung bei L2 stabilisiert und die Normeininhaltung gewährleistet. Im Überlastbereich ist in der Parallelanordnung eine Abweichung in den positiven Bereich zu beobachten was auf Effekte ähnlich einer Unterbürdung durch Flussveränderungen im Kern schließen lässt. Die Außenleiter L1 und L3 weisen hingegen in beiden Konfigurationen ein nahezu identisches Verhalten auf. Der direkte Vergleich der Geometrien beim kompensierte Wandler verdeutlicht den Vorteil der Dreiecksanordnung bei Phase L2 merklich. Der Fehler reduziert sich von 0,9 % in der Parallelanordnung auf 0,1 % in der Dreiecksanordnung was einer Verbesserung um den Faktor zehn gleichkommt.

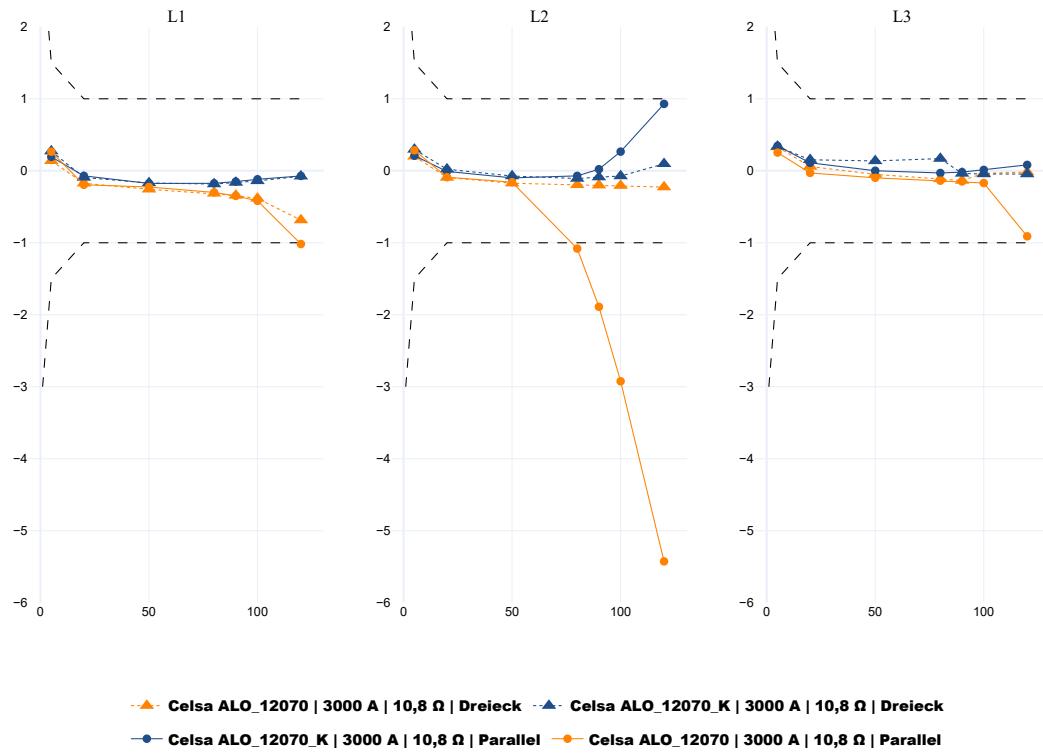
3000 A | Fehlerkurve | Parallel und Dreieck


Diagramm 4.4: Vergleich von Geometrie und Bürdeneinfluss bei 3000 A

4.1.3.2 Analyse der Büdenabhängigkeit Da der Standardwandler in der Parallelanordnung erkennbare Sättigungserscheinungen zeigte wurde in einer vertiefenden Untersuchung analysiert ob eine Reduktion der sekundären Büre diese Effekte kompensieren kann. Hierzu wurden drei Konfigurationen verglichen die Nennbüre (Referenzlast) der Betrieb ohne Vorwiderstand (Minimallast) und eine asymmetrische Belastung bei der nur der kritische Leiter L2 entlastet wurde (siehe Tabelle ??).

Tabelle 4.3: Übersicht der untersuchten Büdenkonfigurationen bei 3000 A

Konfiguration	Büdenwiderstand R_B [Ω]			Ziel der Untersuchung
	L1	L2	L3	
Referenzlast	10,8	10,8	10,8	Basisvergleich Geometrieeinfluss
Minimallast	0,0	0,0	0,0	Bestimmung maximaler Sättigungsgrenze
Asymmetrische Last	10,8	0,0	10,8	Selektive Entlastung des Mittelleiters

Abbildung ?? visualisiert die Ergebnisse dieser Variation. Für die Außenleiter L1 und L3 ist kaum eine Abhängigkeit von der Büre festzustellen da ihre Abweichungen im Nieder- und Nennstrombereich konstant gering bleiben. Anders stellt sich die Situation beim mittleren Leiter L2 dar.

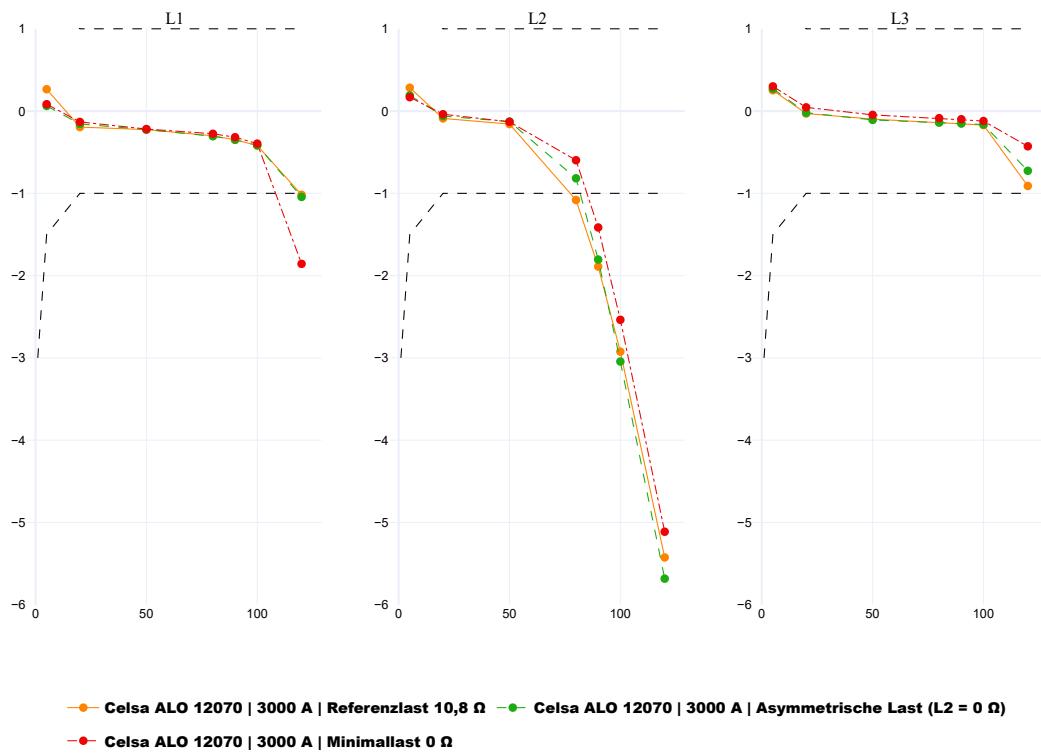
3000 A | Fehlerkurve | Parallelanordnung mit unterschiedlichen Bürdenwiderständen


Diagramm 4.5: Vergleich der Fehlerkurven bei variabler Bürde und 3000 A

Ein Vergleich zwischen der Referenzlast (Tabelle ?? im Anhang) und der asymmetrischen Last (Tabelle ?? im Anhang) zeigt bei L2 ein nahezu identisches Verhalten da beide Konfigurationen stark sättigen. Während die asymmetrische Last bei 100 % des Nennstromes bei $-3,0\%$ liegt weist die Referenzlast mit $-2,9\%$ eine fast gleiche Abweichung auf was einer Differenz von lediglich 0,1 % entspricht. Auch im Überlastbereich bei 120 % bleiben die Werte vergleichbar da die asymmetrische Last hier $-5,7\%$ und die Referenzlast $-5,4\%$ erreicht.

Die Konfiguration der Minimallast (Tabelle ?? im Anhang) erweist sich für den kritischen Leiter L2 als die stabilste Variante. Bei 80 % des Nennstromes liegt der Fehler von L2 hier bei nur $-0,6\%$ wohingegen die Referenzlast bereits auf $-1,1\%$ abfällt was eine Verbesserung von rund 0,5 % durch die minimale Bürde bedeutet. Dennoch reicht auch die Minimallast nicht aus um den Standardwandler in der Parallelanordnung bei Nennstrom in die Genauigkeitsklasse 1 zurückzuführen ($-2,5\%$ Abweichung).

Der Performance Index in Abbildung ?? fasst die Ergebnisse zusammen. Zwar erzielt die Messung mit der Minimallast über alle Strombereiche hinweg die besten Ergebnisse doch zeigt der Vergleich mit dem vorangegangenen Abschnitt dass die Wahl der Wandlertechnologie (Kompen-sation) und der Geometrie (Dreieck) einen weitaus größeren Einfluss auf die Messgüte hat als die Optimierung der Bürde. Die Reduktion des Widerstands zögert die Sättigung physikalisch bedingt zwar hinaus kann die systembedingten Schwächen der Parallelanordnung bei Standard-wandlern jedoch nicht vollständig kompensieren.

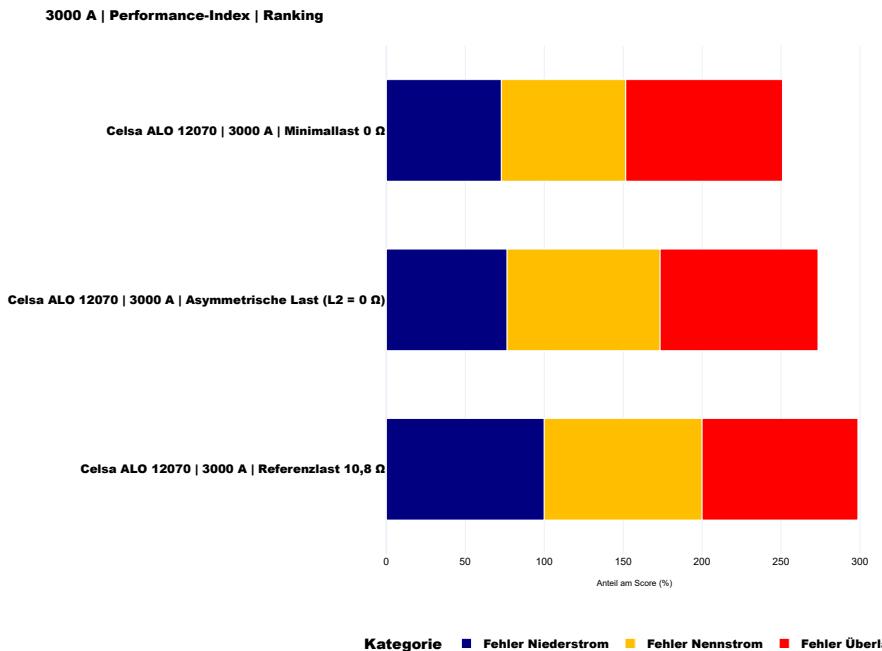


Diagramm 4.6: Ranking der Konfigurationen basierend auf dem Performance Index

4.1.4 Skalierung der Geometrieffekte bei 4000 A

Für diese Messreihe wurde der Phasenmittelabstand gemäß Tabelle ?? vergrößert. Mit der Steigerung des Primärstroms auf 4000 A rückt die Reproduzierbarkeit der geometrischen Einflüsse bei gleicher Wandlerbauform in den Vordergrund. Betrachtet werden erneut die Typen der Reihe ALO 12070 in Standardausführung sowie in der kompensierten Variante. Die Ergebnisse dienen dazu das Verhalten der Wandler bei weiter steigender Sättigung ohne den Einfluss variabler Burdenwiderstände zu verifizieren.

Abbildung ?? skizziert einen Verlauf der qualitativ stark den Beobachtungen aus Abschnitt ?? ähnelt. Sowohl in der Parallelanordnung als auch in der Dreiecksanordnung stößt der Standardwandler Celsa ALO 12070 hier an seine Leistungsgrenzen wenngleich zu unterschiedlichen Zeitpunkten.

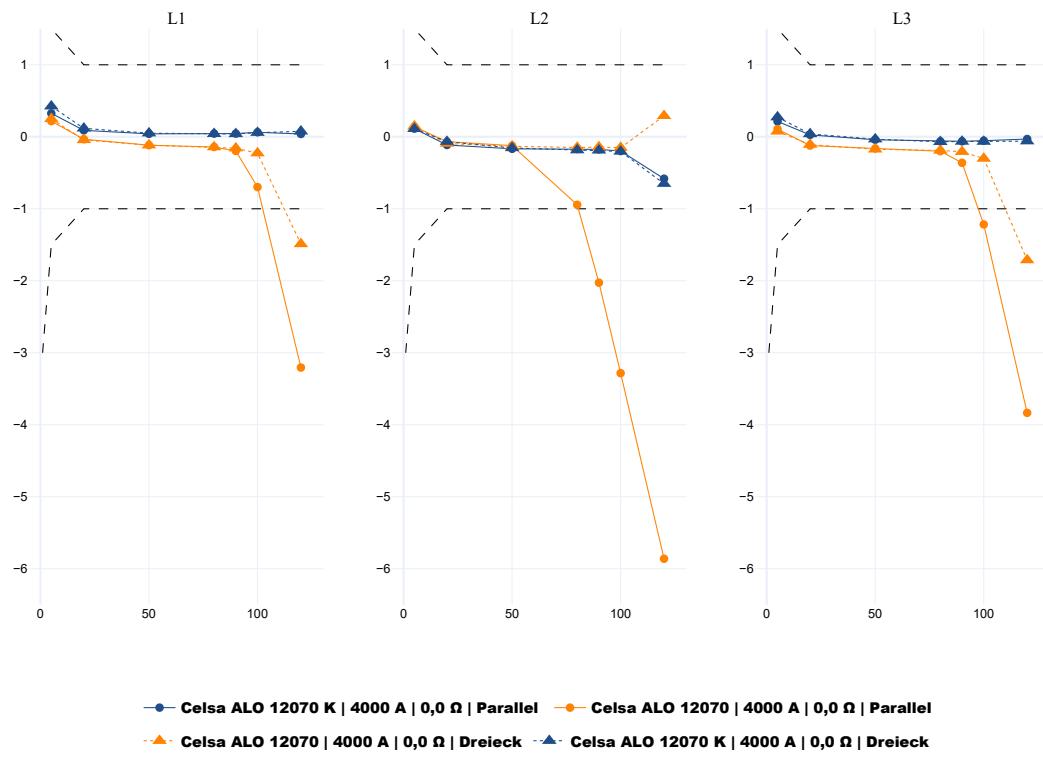
4000 A | Fehlerkurve | Parallel und Dreieck


Diagramm 4.7: Zusammenfassender Vergleich der Leitergeometrien bei 4000 A

Besonders augenfällig wird dies in der Parallelanordnung. Wie die Werte in Tabelle ?? belegen bricht die Genauigkeit ab 80 % des Nennstroms ein. Bei 3200 A weist der mittlere Leiter L2 bereits eine Abweichung von $-0,9\%$ auf und verlässt bei weiterer Lasterhöhung den Toleranzbereich. Bei Nennstrom (4000 A) liegt der Fehler bei $-3,3\%$. Dieser Einbruch bei etwa 3200 A korreliert mit den Sättigungseffekten der 3000 A-Messreihe was darauf hindeutet dass die physikalische Sättigungsgrenze dieses Eisenkerns in der Parallelgeometrie in diesem Strombereich liegt. Dieses Verhalten spiegelt die Problematik wider welche bereits beim Typ ALO 10030 bei 2000 A und 2500 A beobachtet wurde wo die Parallelanordnung ebenfalls zu einer vorzeitigen Sättigung führte.

Die Umstellung auf die Dreiecksanordnung bewirkt bei Nennstrom eine Verbesserung. Der Fehler der Phase L2 reduziert sich hierbei von $-3,3\%$ in der Parallelanordnung auf $-0,15\%$ in der Dreiecksanordnung womit die Genauigkeitsklasse 1 bei 100 % Last eingehalten wird. Allerdings zeigt sich im Überlastbereich bei 120 % dass auch die Dreiecksanordnung die Sättigung nicht vollständig verhindern kann da hier die Außenleiter L1 und L3 mit $-1,5\%$ beziehungsweise $-1,7\%$ die Klassengrenzen überschreiten.

4.1.5 Grenzbereich der Messgenauigkeit bei 5000 A

Die abschließenden Untersuchungen widmen sich dem Hochstrombereich von 5000 A in dem Standardwandler solchen mit Fremdfeldprotektoren gegenübergestellt werden. Der kompensierte Typ von Celsa (ALO E 16050 K) entfällt in dieser Betrachtung aufgrund eines technischen Defekts. Abbildung ?? gibt einen Überblick über die Fehlerverläufe aller untersuchten Typen in beiden Geometrien.

Aufgabe

Ich kann nicht erklären warum die Messungen bei L1 so unterschiedlich sind zu andern Leitern.

5000 A | Fehlerkurve | Parallel und Dreieck

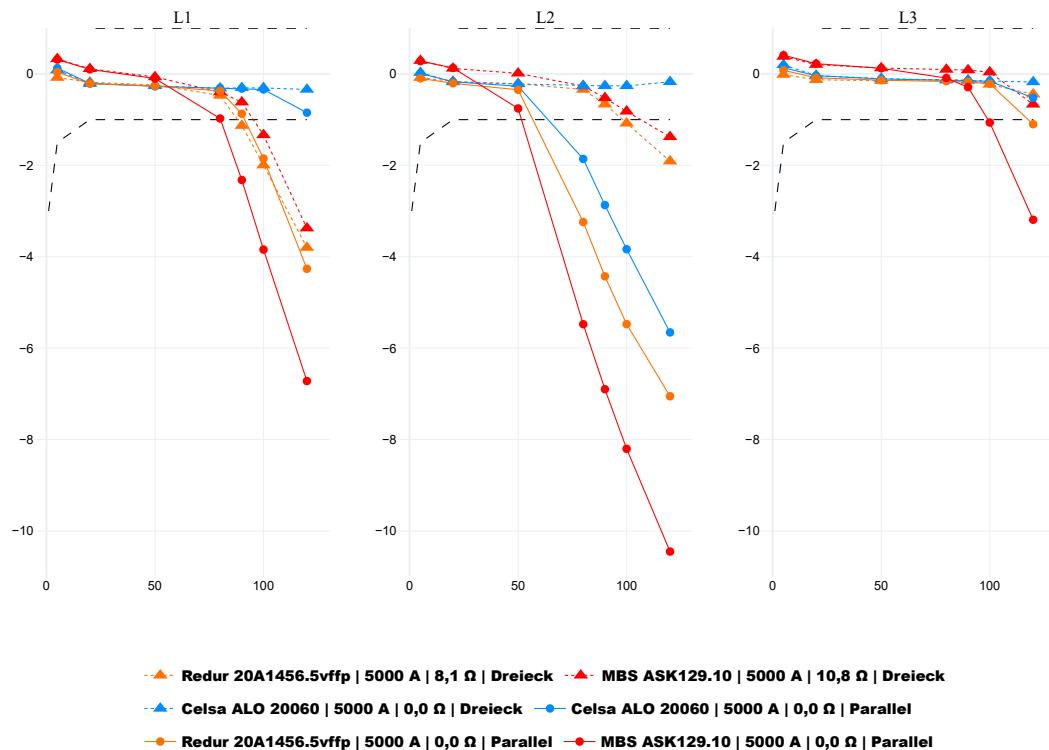


Diagramm 4.8: Zusammenfassender Vergleich der Leitergeometrien bei 5000 A

Bei der Analyse des MBS ASK129.10 (Details in Tabelle ?? im Anhang) offenbaren sich über alle drei Phasen hinweg Schwierigkeiten bei der Einhaltung der geforderten Messgenauigkeit was sich insbesondere in der Parallelanordnung zeigt. Während Phase L1 den Toleranzbereich bereits bei 90 % des Nennstroms mit einer Abweichung von $-2,32\%$ verlässt und im Überlastfall sogar auf $-6,72\%$ abfällt bricht die Genauigkeit der Phase L2 noch früher ein. Schon bei 80 % I_n treten hier massive Messabweichungen von rund $-5,5\%$ auf. Im Kontrast dazu zeigt sich Phase L3 in der gleichen Anordnung deutlich robuster und hält die Vorgaben weitestgehend ein wobei der Nennpunkt mit $-1,06\%$ nur marginal die Norm verfehlt.

Einen direkten technologischen Vergleich ermöglicht der Redur 20A1456.5vfp dessen Messwerte in Tabelle ?? (Anhang) dokumentiert sind. Zwar zeigt dieser Wandler in der Parallelanordnung ein qualitativ ähnliches Verhalten wie das Modell von MBS schneidet jedoch quantitativ präziser ab. Eine Anomalie offenbart sich jedoch beim Wechsel in die Dreiecksanordnung. Während die Phasen L2 und L3 wie erwartet signifikant an Genauigkeit gewinnen bleibt dieser Effekt bei L1 aus. Wie die Messwerte zeigen verschlechtert sich der Fehler bei L1 im Nennpunkt sogar leicht von $-1,85\%$ in der Parallelanordnung auf $-2,00\%$ im Dreieck. Dies deutet auf eine spezifische magnetische Asymmetrie oder eine Sättigungsgrenze hin die durch die Geometrieveränderung allein nicht kompensiert werden kann.

Als überraschend leistungsfähig erweist sich in diesem Hochstromszenario der Standardwandler Celsa ALO 20060 (Tabelle ?? im Anhang). Er übertrifft die beiden zuvor betrachteten Modelle

deutlich. In der Parallelanordnung verbleiben die Außenleiter L1 und L3 über den gesamten Messbereich innerhalb der Genauigkeitsklasse 1. Lediglich der mittlere Leiter L2 zeigt ab 50 % des Nennstroms Sättigungstendenzen und fällt bei Nennlast auf -3,84 % ab. Die Umstellung auf die Dreiecksanordnung eliminiert diese Schwäche vollständig und stabilisiert die Messwerte auf einem bemerkenswert hohen Niveau. So verbessert sich der Fehler bei L2 um den Faktor 14 auf -0,26 % und auch L1 sowie L3 liefern mit -0,31 % und -0,15 % nahezu ideale Werte.

Tabelle ?? fasst die Wirksamkeit der geometrischen Optimierung für alle drei Wandlertypen zusammen. Der Faktor beschreibt das Verhältnis des Fehlers in Parallelanordnung zum Fehler in Dreiecksanordnung (Werte > 1 bedeuten eine Verbesserung).

Tabelle 4.4: Verbesserungsfaktor der Messgenauigkeit (Parallel / Dreieck) bei 5000 A

Wandler	Phase	80 %	90 %	100 %	120 %
MBS ASK129.10	L1	2,46	3,75	2,88	1,99
	L2	20,71	13,14	10,01	7,59
	L3	0,93	3,42	27,69	4,79
Redur 20A1456	L1	0,79	0,77	0,93	1,12
	L2	9,51	6,68	5,06	3,69
	L3	1,36	1,26	0,94	2,48
Celsa ALO 20060	L1	5,93	1,14	1,11	2,49
	L2	15,12	10,68	14,75	32,51
	L3	1,06	0,69	1,10	2,96

Die Messreihe bei einem Nennstrom von 5000 A stellt keinen Optimierungs- oder Vergleichsfall im engeren Sinne dar, sondern dient der Untersuchung des Grenzverhaltens der betrachteten Stromwandlerkonzepte unter extremen Betriebsbedingungen. Bereits bei Lastströmen deutlich unterhalb des Nennwertes verlassen mehrere Wandler die spezifizierte Genauigkeitsklasse, was auf eine systematische Überforderung der magnetischen Kerne hindeutet.

Im Vergleich zu den Messreihen bei geringeren Nennströmen treten bei 5000 A verstärkt nichtlineare Effekte auf, die sich in einer erhöhten Streuung der Messergebnisse sowie in einer ausgeprägten Phasenabhängigkeit äußern. Insbesondere die Abweichungen einzelner Phasen lassen sich nicht mehr allein durch die Leitergeometrie oder die Anordnung der Leiter erklären. Vielmehr ist davon auszugehen, dass im Hochstrombereich lokale Sättigungsphänomene auftreten, bei denen bereits geringe geometrische Asymmetrien, Fertigungstoleranzen oder Inhomogenitäten im Kernmaterial einen überproportionalen Einfluss auf das Messergebnis haben.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei dieser Stromstufe selbst konstruktiv robuste Wandlertypen an ihre physikalischen Grenzen stoßen. Eine weitere Verbesserung der Messgenauigkeit wäre nur durch eine deutliche Vergrößerung des magnetischen Querschnitts, den Einsatz alternativer Kernmaterialien oder eine grundlegende Anpassung des Messkonzepts zu erwarten. Die Messreihe verdeutlicht somit, dass die Skalierung bestehender Wandlerlösungen auf sehr hohe Nennströme nicht beliebig möglich ist und ab einem bestimmten Stromniveau durch fundamentale magnetische Effekte begrenzt wird.

4.2 Ökonomische Evaluation und Technologie-Ranking

In diesem Abschnitt werden die technischen Messergebnisse in Relation zu den Anschaffungskosten gesetzt, um eine ökonomische Bewertung der verschiedenen Wandlertechnologien vorzunehmen. Hierfür wurde ein *Performance-Score* ermittelt, der sich aus der gewichteten Summe des absoluten Messfehlers und des Marktpreises zusammensetzt. Ziel ist die Identifikation des optimalen Preis-Leistungs-Verhältnisses für den jeweiligen Anwendungsfall.

4.2.1 Wirtschaftlichkeit im Nennstrombereich (2000 A bis 2500 A)

Im Nennstrombereich zwischen 2000 A und 2500 A werden unterschiedliche Wandlertechnologien erstmals direkt miteinander vergleichbar, da alle untersuchten Typen ihre Messaufgabe grundsätzlich innerhalb oder nahe der geforderten Genauigkeitsklasse erfüllen. Der wirtschaftliche Vergleich stellt somit weniger eine Frage der grundsätzlichen Funktionstüchtigkeit dar, sondern vielmehr der Effizienz des eingesetzten technischen Aufwands.

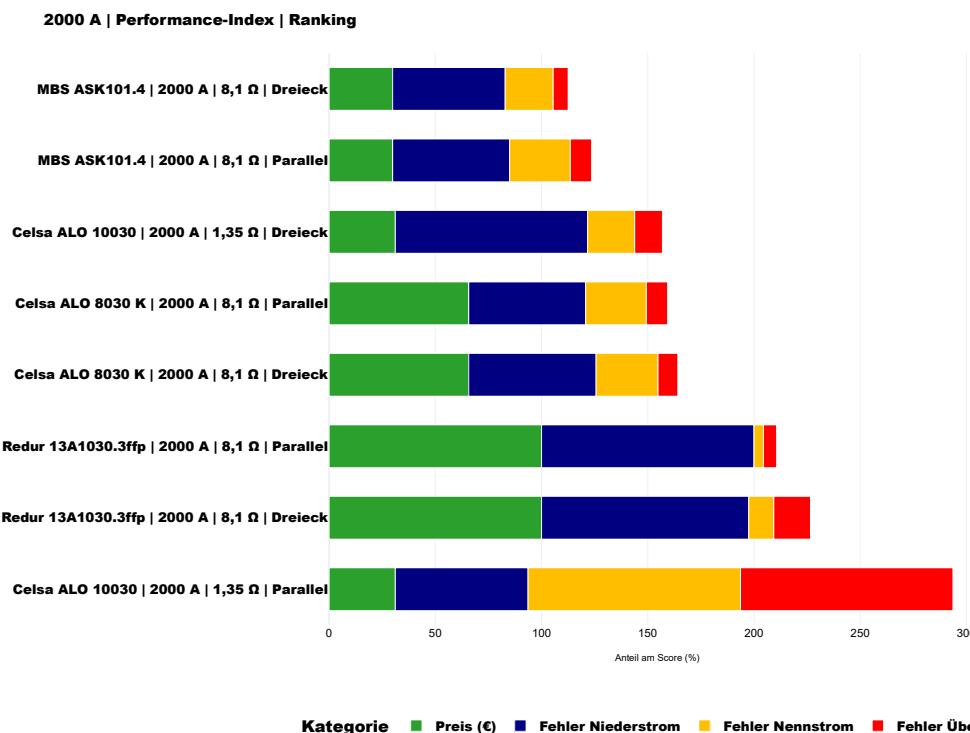


Diagramm 4.9: Wirtschaftliches Ranking der Wandlertechnologien bei 2000 A

Als preisliche Referenz dienen die Standardwandler ohne zusätzliche Kompensations- oder Abschirmmaßnahmen, exemplarisch vertreten durch den Celsa ALO 10030 sowie den MBS ASK101.4. Diese Modelle weisen die geringsten Anschaffungskosten auf, zeigen jedoch – insbesondere in der Parallelanordnung – eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber externen Magnetfeldern. Dies schlägt sich in einem erhöhten Fehleranteil im Performance-Score nieder, wodurch der ökonomische Vorteil teilweise relativiert wird (siehe Abbildung ??).

Demgegenüber stehen die kompensierten Wandler von Celsa (ALO 8030 K bzw. ALO 10050 K), die durch ihre zusätzliche Kompensationswicklung eine deutlich höhere Messstabilität erreichen. Die geringeren Fehleranteile führen trotz höherer Anschaffungskosten zu konkurrenzfähigen Performance-Scores, insbesondere bei 2500 A (Abbildung ??). In diesem Strombereich rechtfertigt der technische Mehraufwand somit erstmals ökonomisch den höheren Preis.

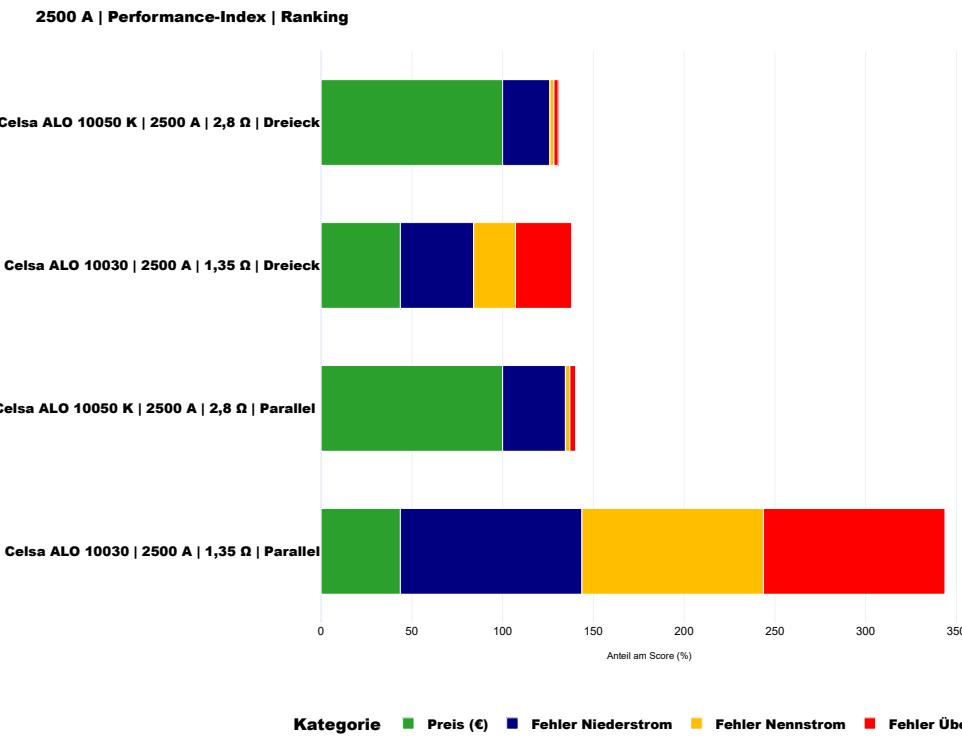


Diagramm 4.10: Wirtschaftliches Ranking der Wandlertechnologien bei 2500 A

Eine weitere Technologiestufe stellen Wandler mit Fremdfeldprotektoren dar, vertreten durch die Redur-Modelle. Diese zeichnen sich durch eine hohe geometrische Robustheit aus und zeigen selbst in ungünstigen Leiteranordnungen stabile Messwerte. Ökonomisch bewegen sie sich jedoch aufgrund der hohen Anschaffungskosten nur im oberen Mittelfeld, da der Zugewinn an Messgenauigkeit im Nennstrombereich begrenzt bleibt. Für den Nennstromfall 2000 A ist zudem die Parallelanordnung des Redur 13A1030.3fp hervorzuheben.

Die Fremdfeldprotektoren reduzieren in dieser Konfiguration die Messabweichungen insbesondere im Nenn- und Überlastbereich deutlich und adressieren damit gezielt den in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Einfluss benachbarter Leiterfelder. In der ökonomischen Bewertung wird dieser technische Vorteil jedoch durch den vergleichsweise hohen Anschaffungspreis teilweise kompensiert, sodass der Performance-Index trotz guter Messgüte nicht in jedem Fall führend ausfällt (vgl. Abb. ??). Ein zusätzlicher Vorteil der Protektor-Technologie besteht darin, dass Abschirmkörper prinzipiell auch als nachrüstbare Maßnahme in bestehenden Anlagen eingesetzt werden können. Damit eröffnet sich eine wirtschaftlich interessante Option zur Verbesserung der Messgenauigkeit, ohne den Stromwandler vollständig ersetzen zu müssen (vgl. [10]).

Ist die Realisierung einer Dreiecksanordnung aus konstruktiven, platzbedingten oder normativen Gründen nicht möglich, muss die Auswahl auf die Parallelanordnung beschränkt werden. In diesem Fall verlieren feldempfindliche Standardwandler ihren Kostenvorteil, da erhöhte Messabweichungen den Performance-Score dominieren.

Für den betrachteten Datensatz ergibt sich dabei ein differenziertes Bild: Bei 2000 A erzielt der MBS ASK101.4 in Parallelanordnung den geringsten Performance-Index und stellt damit die wirtschaftlich günstigste Lösung innerhalb der parallelen Verschaltung dar (vgl. Abb. ??).

Bei 2500 A verschiebt sich das Optimum hingegen zugunsten des kompensierten Celsa ALO 10050 K, der auch ohne geometrische Optimierung stabile Messwerte liefert und in der Parallelanordnung das beste Preis-Leistungs-Verhältnis erreicht (vgl. Abb. ??).

4.2.2 Verschiebung der Kosteneffizienz bei Hochstrom (3000 A bis 4000 A)

Die Messreihen bei 3000 A und 4000 A zeigen exemplarisch, wie sich die Wirtschaftlichkeit bei gleicher Wandlerbauform mit steigender Stromstärke verschiebt. In beiden Fällen werden die Baureihe ALO 12070 in Standardausführung sowie die kompensierte Variante ALO 12070 K gegenübergestellt. Dadurch lassen sich die beobachteten Rangfolgen primär auf die Stromskalierung und die damit verbundene Fehlerentwicklung zurückführen.

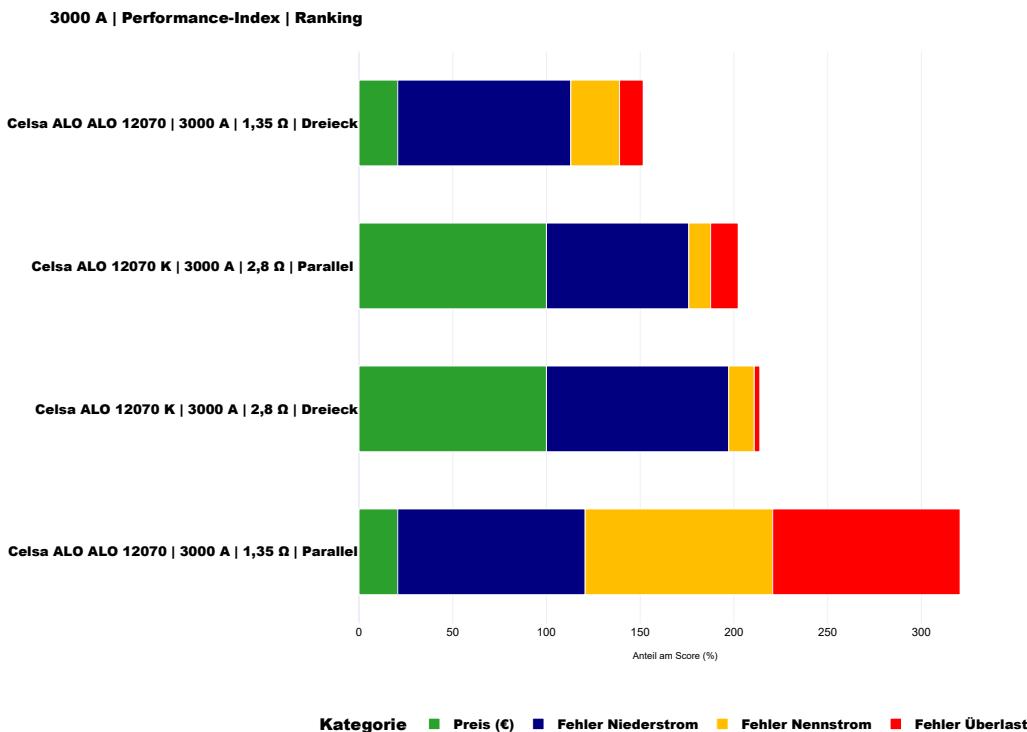


Diagramm 4.11: Wirtschaftliches Ranking der Wandlertechnologien bei 3000 A

Bei 3000 A (Abb. ??) wird der Performance-Score bereits deutlich durch den Messfehler beeinflusst. Insbesondere in der Parallelanordnung verliert der nicht kompensierte Standardwandler seinen anfänglichen Kostenvorteil, da erhöhte Abweichungen den Score dominieren. Die kompensierte Ausführung reduziert diesen Fehleranteil und erreicht dadurch trotz höherer Anschaffungskosten ein günstigeres Preis-Leistungs-Verhältnis.

Bei 4000 A (Abb. ??) verstärkt sich dieser Effekt. Mit steigender Strombeanspruchung wächst der Abstand zwischen kompensierter und nicht kompensierter Ausführung im Ranking, da der Messfehler stärker in den Performance-Score eingeht und die Kompensationstechnologie somit ökonomisch relevanter wird.

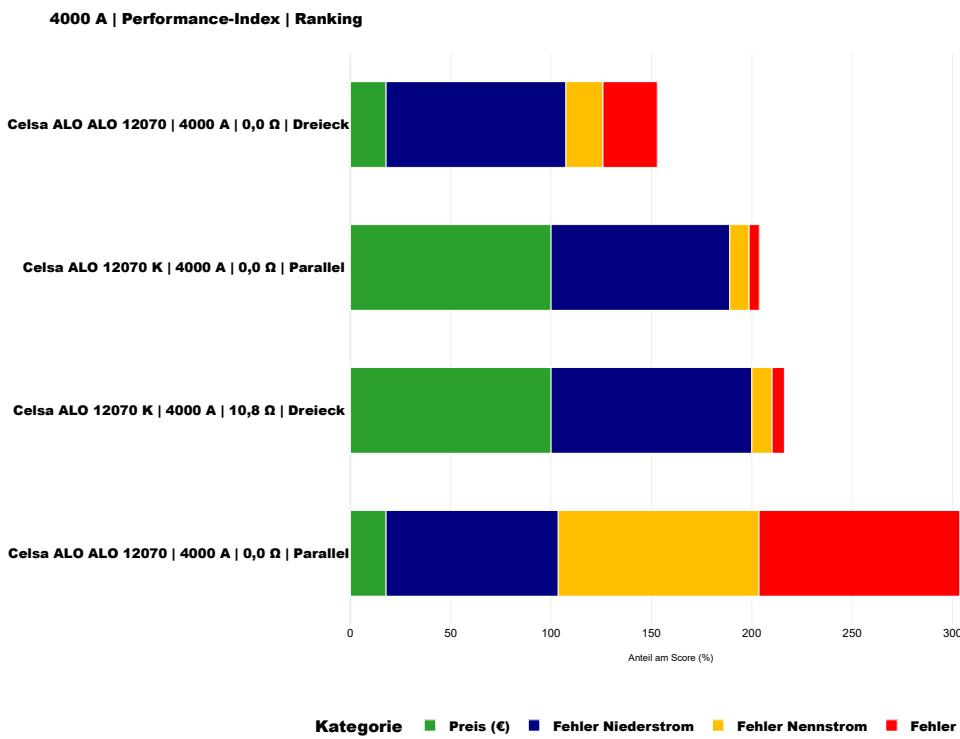


Diagramm 4.12: Wirtschaftliches Ranking der Wandlertechnologien bei 4000 A

Parallel dazu zeigt sich der Einfluss der Leitergeometrie als eigenständiger Hebel. Die Dreiecksanordnung senkt die Messabweichungen und verbessert damit den Performance-Score sowohl für Standard- als auch für kompensierte Wandler. Damit ergibt sich für den Hochstrombereich eine klare Reihenfolge der Maßnahmen. Eine geometrische Optimierung verbessert die Wirtschaftlichkeit innerhalb einer Technologieklasse deutlich. Die Wahl eines kompensierten Wandlers erhöht zusätzlich die Robustheit gegenüber Feld- und Sättigungseffekten.

4.2.3 Verschiebung der Kosteneffizienz bei Hochstrom (4000 A)

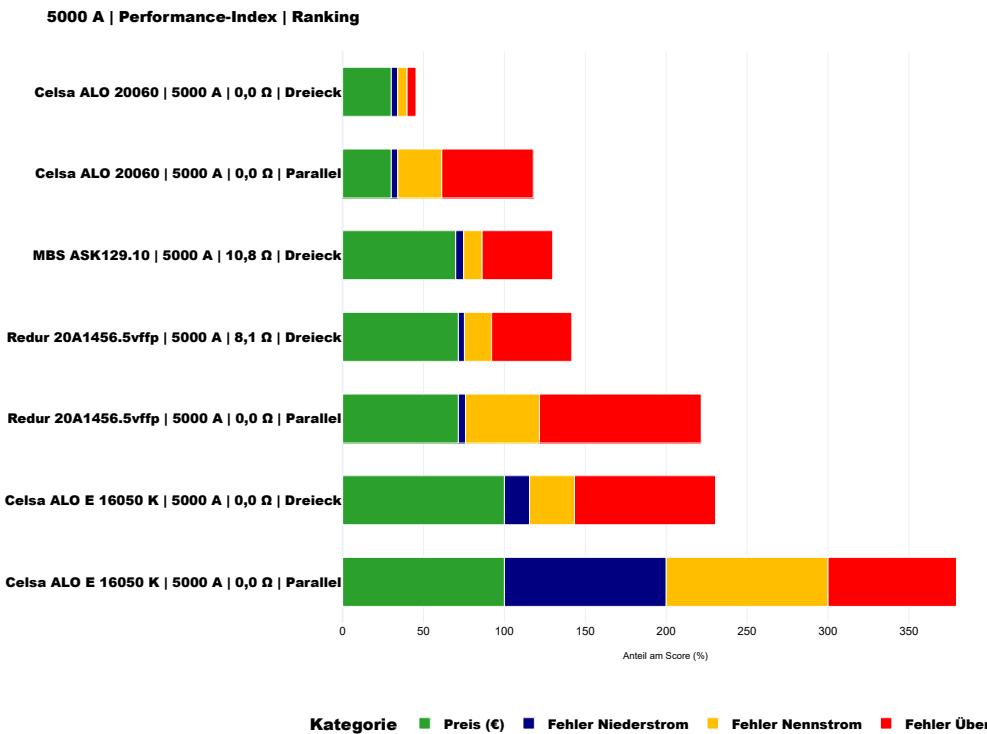


Diagramm 4.13: Wirtschaftliches Ranking der Wandlertechnologien bei 5000 A

4.2.4 Einfluss des Bauvolumens auf die Gesamtwirtschaftlichkeit

Abschließend wird der Faktor *Bauraum* in die Bewertung einbezogen. In modernen Schaltanlagen korreliert das Volumen eines Bauteils oft direkt mit indirekten Kosten (größere Felder, mehr Kupfer für Schienenabstände).

Vergleicht man die volumen-gewichteten Rankings bei 2000 A (Abbildung ??) und 5000 A (Abbildung ??), zeigt sich ein interessanter Zielkonflikt. Kompakte Wandler sind oft günstiger im Preis/Volumen-Verhältnis, erkaufen sich diese Kompaktheit jedoch durch geringere Eisenmengen und damit früher einsetzende Sättigung. Der großvolumige Standardwandler bei 5000 A ist aufgrund seiner hohen Präzision im Dreieck in der Gesamtbetrachtung dennoch führend. Dies belegt, dass eine reine Minimierung des Bauvolumens technisch kontraproduktiv sein kann, wenn dadurch die Messaufgabe gefährdet wird.

2000 A | Performance-Index | Ranking

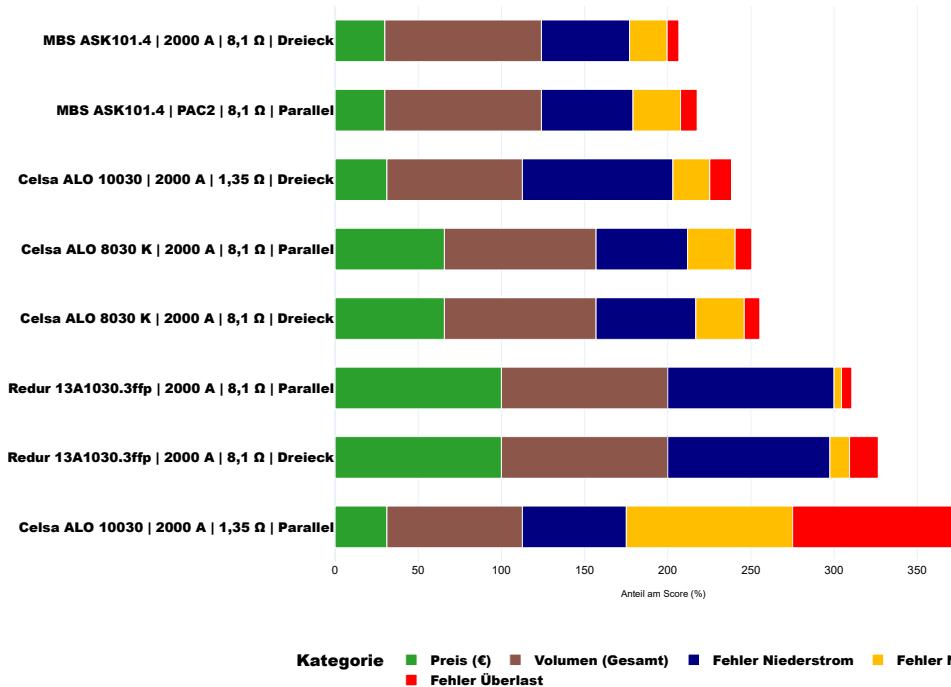


Diagramm 4.14: Wirtschaftliches Ranking unter Berücksichtigung des Volumens bei 2000 A

5000 A | Performance-Index | Ranking

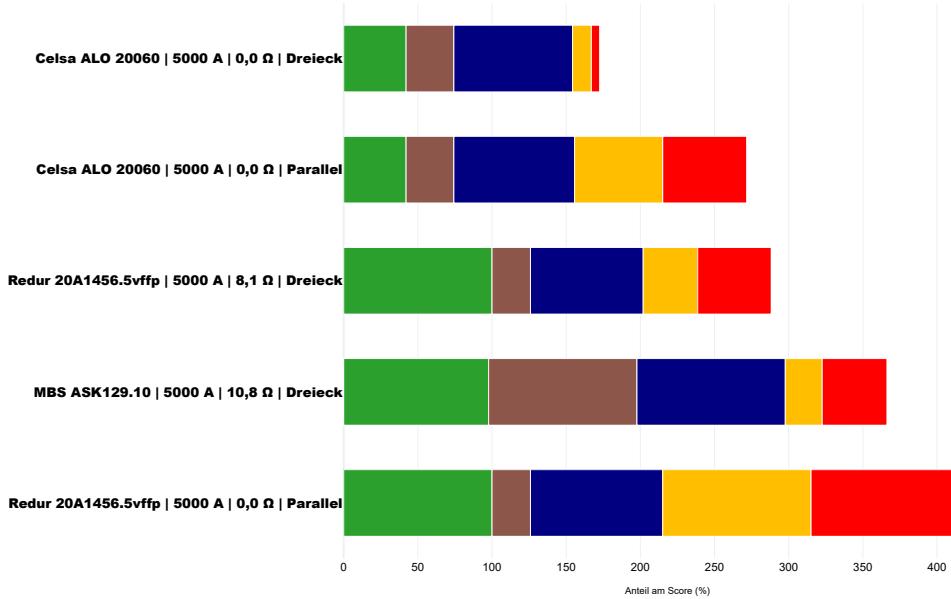


Diagramm 4.15: Wirtschaftliches Ranking unter Berücksichtigung des Volumens bei 5000 A

5 Zusammenfassung der Ergebnisse

5.1 Bewertung der Prüfstands-Optimierung

5.2 Konstruktionsempfehlung für zukünftige Wandler-Einbauten

6 Ausblick

A Messergebnisse

In diesem Anhang sind die detaillierten Messwerttabellen der durchgeführten Untersuchungen aufgeführt, gegliedert nach den untersuchten Primärnennströmen.

A.1 Messreihe 2000 A

Tabelle A.1: Messergebnisse Redur 13A1030.3ffp, 8,1 Ω, 2000 A, Dreieck & Parallel

Geometrie	Ph.	5 % I_n (100 A)		20 % I_n (400 A)		100 % I_n (2000 A)		120 % I_n (2400 A)	
		[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]
Dreieck	L1	0,473	0,47	0,022	0,09	-0,120	2,40	-0,121	2,90
Dreieck	L2	0,338	0,34	0,088	0,35	-0,094	1,88	-1,533	36,79
Dreieck	L3	0,471	0,47	0,111	0,44	0,126	2,52	-0,070	1,68
Parallel	L1	0,376	0,38	0,058	0,23	-0,081	1,62	-0,103	2,47
Parallel	L2	0,445	0,45	0,111	0,44	-0,029	0,58	-0,509	12,22
Parallel	L3	0,405	0,41	0,146	0,58	0,017	0,34	-0,007	0,17

Tabelle A.2: Messergebnisse Celsa ALO 10030, 1,35 Ω, 2000 A, Dreieck & Parallel

Geometrie	Ph.	5 % I_n (100 A)		20 % I_n (400 A)		100 % I_n (2000 A)		120 % I_n (2400 A)	
		[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]
Dreieck	L1	0,183	0,18	-0,103	0,41	-0,273	5,46	-0,317	7,61
Dreieck	L2	0,530	0,53	-0,026	0,10	-0,211	4,22	-0,230	5,52
Dreieck	L3	0,480	0,48	0,072	0,29	-0,153	3,06	-0,758	18,19
Parallel	L1	0,196	0,20	-0,068	0,27	-0,477	9,54	-2,671	64,10
Parallel	L2	0,201	0,20	-0,014	0,06	-1,971	39,42	-4,240	101,76
Parallel	L3	0,401	0,40	0,083	0,33	-0,427	8,54	-3,071	73,70

Tabelle A.3: Messergebnisse Celsa ALO 8030 K, 8,1 Ω, 2000 A, Dreieck & Parallel

Geometrie	Ph.	5 % I_n (100 A)		20 % I_n (400 A)		100 % I_n (2000 A)		120 % I_n (2400 A)	
		[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]
Dreieck	L1	0,114	0,11	-0,115	0,46	-0,306	6,12	-0,338	8,11
Dreieck	L2	0,220	0,22	-0,134	0,54	-0,279	5,58	-0,299	7,18
Dreieck	L3	0,232	0,23	-0,110	0,44	-0,252	5,04	-0,295	7,08
Parallel	L1	0,134	0,13	-0,222	0,89	-0,354	7,08	-0,428	10,27
Parallel	L2	0,091	0,09	-0,135	0,54	-0,268	5,36	-0,354	8,50
Parallel	L3	0,211	0,21	-0,055	0,22	-0,200	4,00	-0,217	5,21

Tabelle A.4: Messergebnisse MBS ASK101.4, 8,1 Ω , 2000 A, Dreieck & Parallel

Geometrie	Ph.	5 % I_n (100 A)		20 % I_n (400 A)		100 % I_n (2000 A)		120 % I_n (2400 A)	
		[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]
Dreieck	L1	0,133	0,13	-0,097	0,39	-0,284	5,68	-0,305	7,32
Dreieck	L2	-0,279	0,28	-0,248	0,99	-0,204	4,08	-0,232	5,57
Dreieck	L3	0,016	0,02	-0,044	0,18	-0,163	3,26	-0,166	3,98
Parallel	L1	0,134	0,13	-0,222	0,89	-0,353	7,06	-0,428	10,27
Parallel	L2	0,091	0,09	-0,135	0,54	-0,268	5,36	-0,355	8,52
Parallel	L3	0,211	0,21	-0,056	0,22	-0,200	4,00	-0,217	5,21

A.2 Messreihe 2500 A

 Tabelle A.5: Messergebnisse Celsa ALO 10050 K, $2,8\Omega$, 2500 A, Dreieck & Parallel

Geom.	Ph.	5 %		20 %		50 %		80 %		90 %		100 %		120 %	
		(125 A)	[%]	(500 A)	[%]	(1250 A)	[%]	(2000 A)	[%]	(2250 A)	[%]	(2500 A)	[%]	(3000 A)	[%]
Dreieck	L1	-0,029	0,04	-0,186	0,93	-0,229	2,86	-0,255	5,10	-0,259	5,83	-0,279	6,97	-0,305	9,16
Dreieck	L2	0,009	0,01	-0,140	0,70	-0,188	2,35	-0,222	4,44	-0,242	5,44	-0,275	6,87	-0,549	16,47
Dreieck	L3	0,102	0,13	-0,077	0,38	-0,126	1,57	-0,171	3,42	-0,192	4,33	-0,229	5,72	-0,317	9,52
Parallel	L1	0,081	0,10	-0,164	0,82	-0,232	2,90	-0,273	5,45	-0,306	6,89	-0,291	7,28	-0,326	9,77
Parallel	L2	0,247	0,31	-0,104	0,52	-0,192	2,40	-0,238	4,76	-0,301	6,78	-0,372	9,31	-1,012	30,35
Parallel	L3	0,234	0,29	-0,053	0,27	-0,135	1,68	-0,173	3,45	-0,199	4,49	-0,197	4,93	-0,264	7,92

 Tabelle A.6: Messergebnisse Celsa ALO 10030, $1,35\Omega$, 2500 A, Dreieck & Parallel

Geom.	Ph.	5 %		20 %		50 %		80 %		90 %		100 %		120 %	
		(125 A)	[%]	(500 A)	[%]	(1250 A)	[%]	(2000 A)	[%]	(2250 A)	[%]	(2500 A)	[%]	(3000 A)	[%]
Dreieck	L1	0,159	0,20	-0,107	0,53	-0,247	3,09	-1,678	33,56	-3,337	75,08	-5,066	126,65	-8,278	248,33
Dreieck	L2	0,073	0,09	-0,204	1,02	-0,316	3,95	-1,568	31,35	-1,763	39,67	-1,834	45,85	-1,950	58,49
Dreieck	L3	0,182	0,23	-0,139	0,69	-0,256	3,20	-1,126	22,53	-2,232	50,22	-3,452	86,29	-5,437	163,12
Parallel	L1	-0,061	0,08	-0,214	1,07	-0,653	8,17	-7,423	148,46	-10,056	226,26	-12,370	309,25	-16,238	487,15
Parallel	L2	0,060	0,08	-0,117	0,59	-2,732	34,15	-11,571	231,42	-14,277	321,22	-16,623	415,59	-20,565	616,96
Parallel	L3	0,180	0,23	0,031	0,16	-0,119	1,48	-5,352	107,03	-7,856	176,77	-10,099	252,46	-13,862	415,87

A.3 Messreihe 3000 A

 Tabelle A.7: Messergebnisse Celsa ALO 12070, $10,8\Omega$, 3000 A, Dreieck & Parallel

		5 % (150 A)		20 % (600 A)		50 % (1500 A)		80 % (2400 A)		90 % (2700 A)		100 % (3000 A)		120 % (3600 A)	
Geom.	Ph.	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]
Dreieck	L1	0,138	0,21	-0,174	1,04	-0,257	3,86	-0,314	7,53	-0,343	9,26	-0,385	11,54	-0,685	24,64
Dreieck	L2	0,201	0,30	-0,093	0,56	-0,173	2,60	-0,196	4,69	-0,201	5,43	-0,207	6,20	-0,227	8,16
Dreieck	L3	0,330	0,50	0,059	0,36	-0,050	0,75	-0,113	2,71	-0,136	3,67	-0,035	1,05	-0,018	0,65
Parallel	L1	0,265	0,40	-0,195	1,17	-0,225	3,38	-0,301	7,22	-0,349	9,43	-0,418	12,53	-1,017	36,63
Parallel	L2	0,285	0,43	-0,089	0,54	-0,158	2,37	-1,081	25,94	-1,890	51,02	-2,924	87,73	-5,426	195,33
Parallel	L3	0,253	0,38	-0,030	0,18	-0,098	1,47	-0,138	3,31	-0,149	4,02	-0,170	5,10	-0,910	32,77

 Tabelle A.8: Messergebnisse Celsa ALO 12070 K, $10,8\Omega$, 3000 A, Dreieck & Parallel

		5 % (150 A)		20 % (600 A)		50 % (1500 A)		80 % (2400 A)		90 % (2700 A)		100 % (3000 A)		120 % (3600 A)	
Geom.	Ph.	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]
Dreieck	L1	0,273	0,41	-0,093	0,56	-0,170	2,54	-0,184	4,43	-0,163	4,41	-0,141	4,23	-0,076	2,75
Dreieck	L2	0,296	0,44	0,022	0,13	-0,073	1,10	-0,108	2,58	-0,088	2,38	-0,073	2,20	0,097	3,48
Dreieck	L3	0,338	0,51	0,153	0,92	0,137	2,05	0,169	4,06	-0,037	1,01	-0,045	1,35	-0,046	1,65
Parallel	L1	0,194	0,29	-0,070	0,42	-0,176	2,64	-0,174	4,18	-0,150	4,05	-0,118	3,55	-0,072	2,59
Parallel	L2	0,209	0,31	-0,009	0,05	-0,099	1,48	-0,071	1,70	0,022	0,58	0,266	7,98	0,929	33,44
Parallel	L3	0,345	0,52	0,110	0,66	0,001	0,01	-0,031	0,73	-0,018	0,50	0,012	0,37	0,082	2,95

 Tabelle A.9: Messergebnisse Celsa ALO 12070, Asymmetrische Bürde ($R_{L2} = 0\Omega$), 3000 A, Parallel

		5 % (150 A)		20 % (600 A)		50 % (1500 A)		80 % (2400 A)		90 % (2700 A)		100 % (3000 A)		120 % (3600 A)	
Geom.	Ph.	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]
Parallel	L1	0,063	0,09	-0,157	0,94	-0,225	3,38	-0,306	7,34	-0,348	9,39	-0,417	12,51	-1,043	37,56
Parallel	L2	0,191	0,29	-0,061	0,37	-0,127	1,91	-0,817	19,61	-1,805	48,73	-3,044	91,33	-5,683	204,61
Parallel	L3	0,271	0,41	-0,020	0,12	-0,107	1,61	-0,139	3,34	-0,151	4,07	-0,163	4,90	-0,726	26,13

 Tabelle A.10: Messergebnisse Celsa ALO 12070, Minimale Bürde ($0,0\Omega$), 3000 A, Parallel

		5 % (150 A)		20 % (600 A)		50 % (1500 A)		80 % (2400 A)		90 % (2700 A)		100 % (3000 A)		120 % (3600 A)	
Geom.	Ph.	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]
Parallel	L1	0,084	0,13	-0,132	0,79	-0,218	3,27	-0,276	6,62	-0,318	8,58	-0,395	11,86	-1,857	66,85
Parallel	L2	0,169	0,25	-0,039	0,23	-0,131	1,96	-0,598	14,34	-1,415	38,20	-2,537	76,12	-5,113	184,08
Parallel	L3	0,300	0,45	0,045	0,27	-0,046	0,69	-0,086	2,07	-0,099	2,67	-0,121	3,63	-0,428	15,42

A.4 Messreihe 4000 A

 Tabelle A.11: Messergebnisse Celsa ALO 12070, 0,0 Ω , 4000 A, Dreieck & Parallel

Geom.	Ph.	5 % (200 A)		20 % (800 A)		50 % (2000 A)		80 % (3200 A)		90 % (3600 A)		100 % (4000 A)		120 % (4800 A)	
		[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]
Parallel	L1	0,218	0,44	-0,034	-0,27	-0,117	-2,34	-0,142	-4,55	-0,196	-7,06	-0,698	-27,93	-3,206	-153,87
Parallel	L2	0,139	0,28	-0,068	-0,54	-0,123	-2,46	-0,945	-30,23	-2,027	-72,97	-3,283	-131,33	-5,861	-281,35
Parallel	L3	0,107	0,21	-0,122	-0,98	-0,163	-3,25	-0,201	-6,42	-0,361	-13,00	-1,218	-48,72	-3,835	-184,08
Dreieck	L1	0,248	0,50	-0,044	-0,35	-0,117	-2,33	-0,143	-4,58	-0,159	-5,71	-0,227	-9,09	-1,489	-71,47
Dreieck	L2	0,146	0,29	-0,094	-0,75	-0,132	-2,64	-0,149	-4,76	-0,143	-5,14	-0,151	-6,06	0,291	13,97
Dreieck	L3	0,075	0,15	-0,109	-0,87	-0,174	-3,48	-0,190	-6,08	-0,208	-7,48	-0,302	-12,08	-1,713	-82,20

 Tabelle A.12: Messergebnisse Celsa ALO 12070 K, 0,0 Ω , 4000 A, Dreieck & Parallel

Geom.	Ph.	5 % (200 A)		20 % (800 A)		50 % (2000 A)		80 % (3200 A)		90 % (3600 A)		100 % (4000 A)		120 % (4800 A)	
		[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]
Parallel	L1	0,326	0,65	0,089	0,72	0,041	0,82	0,044	1,41	0,044	1,60	0,062	2,50	0,039	1,89
Parallel	L2	0,113	0,23	-0,114	-0,91	-0,167	-3,34	-0,170	-5,44	-0,175	-6,30	-0,198	-7,92	-0,582	-27,95
Parallel	L3	0,214	0,43	0,026	0,21	-0,041	-0,82	-0,064	-2,04	-0,063	-2,26	-0,054	-2,17	-0,031	-1,49
Dreieck	L1	0,424	0,85	0,117	0,94	0,050	1,00	0,041	1,33	0,039	1,42	0,057	2,28	0,076	3,65
Dreieck	L2	0,111	0,22	-0,068	-0,54	-0,155	-3,10	-0,185	-5,92	-0,189	-6,80	-0,203	-8,12	-0,651	-31,27
Dreieck	L3	0,273	0,55	0,039	0,31	-0,033	-0,66	-0,070	-2,24	-0,065	-2,34	-0,067	-2,68	-0,061	-2,93

A.5 Messreihe 5000 A

Tabelle A.13: Messergebnisse Celsa ALO 20060, 0,0 Ω, 5000 A, Dreieck & Parallel

Geom.	Ph.	5 % (250 A)		20 % (1000 A)		50 % (2500 A)		80 % (4000 A)		90 % (4500 A)		100 % (5000 A)		120 % (6000 A)	
		[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]
Parallel	L1	0,127	0,32	-0,205	-2,05	-0,272	-6,81	-0,309	-12,34	-0,321	-14,45	-0,340	-17,02	-0,848	-50,86
Parallel	L2	0,011	0,03	-0,171	-1,71	-0,269	-6,72	-1,860	-74,39	-2,870	-129,16	-3,836	-191,82	-5,656	-339,37
Parallel	L3	0,136	0,34	-0,039	-0,39	-0,108	-2,71	-0,135	-5,42	-0,144	-6,49	-0,161	-8,04	-0,521	-31,26
Dreieck	L1	0,083	0,21	-0,214	-2,14	-0,261	-6,53	-0,313	-12,50	-0,304	-13,69	-0,306	-15,29	-0,341	-20,43
Dreieck	L2	0,027	0,07	-0,176	-1,76	-0,219	-5,48	-0,261	-10,44	-0,261	-11,74	-0,260	-13,01	-0,174	-10,41
Dreieck	L3	0,198	0,49	-0,035	-0,35	-0,103	-2,57	-0,137	-5,46	-0,140	-6,30	-0,146	-7,32	-0,176	-10,58

Tabelle A.14: Messergebnisse Celsa ALO E 16050 K, 0,0 Ω, 5000 A, Dreieck & Parallel

Geom.	Ph.	5 % (250 A)		20 % (1000 A)		50 % (2500 A)		80 % (4000 A)		90 % (4500 A)		100 % (5000 A)		120 % (6000 A)	
		[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]
Parallel	L1	7,471	18,68	12,040	120,40	13,343	333,57	12,504	500,17	11,388	512,48	10,101	505,04	7,277	436,63
Parallel	L2	0,080	0,20	-0,071	-0,71	-0,136	-3,39	-0,264	-10,58	-0,560	-25,19	-1,010	-50,50	-2,135	-128,11
Parallel	L3	0,164	0,41	-0,015	-0,15	-0,093	-2,32	-0,206	-8,24	-0,289	-13,00	-0,393	-19,63	-0,448	-26,90
Dreieck	L1	0,131	0,33	-0,078	-0,78	-0,152	-3,81	-0,189	-7,56	-0,210	-9,44	-0,221	-11,04	-0,596	-35,77
Dreieck	L2	0,060	0,15	-0,076	-0,76	-0,231	-5,78	-1,446	-57,83	-2,269	-102,10	-3,485	-174,25	-7,234	-434,06
Dreieck	L3	-3,079	-7,70	0,385	3,85	0,989	24,73	0,194	7,75	-0,633	-28,48	-1,546	-77,31	-3,003	-180,20

Tabelle A.15: Messergebnisse Redur 20A1456.5vffp, 0,0 Ω / 8,1 Ω, 5000 A, Parallel & Dreieck

Geom.	Ph.	5 % (250 A)		20 % (1000 A)		50 % (2500 A)		80 % (4000 A)		90 % (4500 A)		100 % (5000 A)		120 % (6000 A)	
		[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]
Parallel	L1	0,041	0,10	-0,215	-2,15	-0,262	-6,55	-0,372	-14,87	-0,871	-39,18	-1,851	-92,53	-4,265	-255,89
Parallel	L2	-0,097	-0,24	-0,204	-2,04	-0,346	-8,65	-3,242	-129,66	-4,429	-199,31	-5,476	-273,80	-7,054	-423,26
Parallel	L3	0,080	0,20	-0,084	-0,84	-0,137	-3,42	-0,158	-6,31	-0,175	-7,86	-0,214	-10,68	-1,100	-66,02
Dreieck	L1	-0,080	-0,20	-0,181	-1,81	-0,241	-6,02	-0,471	-18,83	-1,132	-50,93	-1,996	-99,79	-3,801	-228,04
Dreieck	L2	-0,081	-0,20	-0,162	-1,62	-0,214	-5,35	-0,341	-13,63	-0,663	-29,83	-1,082	-54,08	-1,910	-114,61
Dreieck	L3	-0,014	-0,04	-0,128	-1,28	-0,149	-3,71	-0,116	-4,64	-0,139	-6,24	-0,228	-11,42	-0,444	-26,66

Tabelle A.16: Messergebnisse MBS ASK129.10, 0,0 Ω / 10,8 Ω, 5000 A, Parallel & Dreieck

Geom.	Ph.	5 % (250 A)		20 % (1000 A)		50 % (2500 A)		80 % (4000 A)		90 % (4500 A)		100 % (5000 A)		120 % (6000 A)	
		[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]
Parallel	L1	0,314	0,79	0,100	1,00	-0,099	-2,48	-0,974	-38,97	-2,321	-104,46	-3,843	-192,17	-6,720	-403,21
Parallel	L2	0,281	0,70	0,132	1,32	-0,755	-18,87	-5,477	-219,10	-6,900	-310,49	-8,204	-410,20	-10,452	-627,12
Parallel	L3	0,410	1,02	0,225	2,25	0,124	3,10	-0,090	-3,58	-0,290	-13,05	-1,063	-53,15	-3,190	-191,43
Dreieck	L1	0,329	0,82	0,112	1,12	-0,067	-1,68	-0,396	-15,86	-0,619	-27,84	-1,336	-66,78	-3,375	-202,52
Dreieck	L2	0,291	0,73	0,121	1,21	0,013	0,33	-0,264	-10,58	-0,525	-23,63	-0,819	-40,96	-1,378	-82,68
Dreieck	L3	0,380	0,95	0,203	2,03	0,129	3,22	0,096	3,86	0,085	3,82	0,038	1,92	-0,666	-39,95

Tabelle A.17: Tabellarisches Ranking der Wandlertechnologien (2000 A)

Tabelle A.18: 2000 A | Performance-Index | Ranking

Messsystem	Fehler Niederstrom	Fehler Nennstrom	Fehler Überlast	Preis (€)	Fehler-Score [%]
MBS ASK101.4 2000 A 8,1 Ω Dreieck	52,97	22,61	7,05	29,91	112,53
MBS ASK101.4 2000 A 8,1 Ω Parallel	55,06	28,58	10,02	29,91	123,56
Celsa ALO 10030 2000 A 1,35 Ω Dreieck	90,50	22,17	13,07	31,16	156,90
Celsa ALO 8030 K 2000 A 8,1 Ω Parallel	55,03	28,58	10,00	65,71	159,33
Celsa ALO 8030 K 2000 A 8,1 Ω Dreieck	59,97	29,13	9,33	65,71	164,15
Redur 13A1030.3ffp 2000 A 8,1 Ω Parallel	100,00	4,45	6,20	100,00	210,65
Redur 13A1030.3ffp 2000 A 8,1 Ω Dreieck	97,51	11,81	17,28	100,00	226,60
Celsa ALO 10030 2000 A 1,35 Ω Parallel	62,49	100,00	100,00	31,16	293,65

Tabelle A.19: Tabellarisches Ranking der Wandlertechnologien (2500 A)

Tabelle A.20: 2500 A | Performance-Index | Ranking

Messsystem	Fehler Nennstrom	Fehler Niederstrom	Fehler Überlast	Preis (€)	Fehler-Score [%]
Celsa ALO 10050 K 2500 A 2,8 Ω Dreieck	2,22	26,04	2,31	100,00	130,57
Celsa ALO 10030 2500 A 1,35 Ω Dreieck	23,06	40,36	30,92	43,67	138,01
Celsa ALO 10050 K 2500 A 2,8 Ω Parallel	2,46	34,58	3,16	100,00	140,20
Celsa ALO 10030 2500 A 1,35 Ω Parallel	100,00	100,00	100,00	43,67	343,67

Tabelle A.21: Tabellarisches Ranking der Wandlertechnologien (3000 A)

Tabelle A.22: 3000 A | Performance-Index | Ranking

Messsystem	Fehler Nennstrom	Fehler Überlast	Preis (€)	Fehler Niederstrom	Fehler-Score [%]
Celsa ALO ALO 12070 3000 A 1,35 Ω Dreieck	25,99	12,64	20,66	92,32	151,61
Celsa ALO 12070 K 3000 A 2,8 Ω Parallel	11,63	14,73	100,00	75,93	202,28
Celsa ALO 12070 K 3000 A 2,8 Ω Dreieck	13,60	2,98	100,00	97,23	213,81
Celsa ALO ALO 12070 3000 A 1,35 Ω Parallel	100,00	100,00	20,66	100,00	320,66

Tabelle A.23: Tabellarisches Ranking der Wandlertechnologien (4000 A)

Tabelle A.24: 4000 A | Performance-Index | Ranking

Messsystem	Fehler Nennstrom	Fehler Überlast	Fehler Niederstrom	Preis (€)	Fehler-Score [%]
Celsa ALO ALO 12070 4000 A 0,0 Ω Dreieck	18,43	27,07	89,60	17,79	152,89
Celsa ALO 12070 K 4000 A 0,0 Ω Parallel	9,64	5,06	89,00	100,00	203,70
Celsa ALO 12070 K 4000 A 10,8 Ω Dreieck	10,11	6,11	100,00	100,00	216,22
Celsa ALO ALO 12070 4000 A 0,0 Ω Parallel	100,00	100,00	85,77	17,79	303,56

Tabelle A.25: Tabellarisches Ranking der Wandlertechnologien (5000 A)

Tabelle A.26: 5000 A | Performance-Index | Ranking

Messsystem	Fehler Nennstrom	Fehler Überlast	Fehler Niederstrom	Preis (€)	Fehler-Score [%]
Celsa ALO 20060 5000 A 0,0 Ω Dreieck	5,79	5,56	3,94	30,09	45,39
Celsa ALO 20060 5000 A 0,0 Ω Parallel	27,17	56,56	4,01	30,09	117,84
MBS ASK129.10 5000 A 10,8 Ω Dreieck	11,38	43,63	4,92	69,91	129,85
Redur 20A1456.5vffp 5000 A 8,1 Ω Dreieck	16,80	49,56	3,74	71,56	141,66
Redur 20A1456.5vffp 5000 A 0,0 Ω Parallel	45,72	100,00	4,39	71,56	221,67
Celsa ALO E 16050 K 5000 A 0,0 Ω Dreieck	27,76	87,23	15,51	100,00	230,50
Celsa ALO E 16050 K 5000 A 0,0 Ω Parallel	100,00	79,40	100,00	100,00	379,40

Tabelle A.27: Tabellarisches Ranking nach Kosten/Volumen (2000 A)

Tabelle A.28: 2000 A | Performance-Index | Ranking

Messsystem	Fehler Niederstrom	Fehler Nennstrom	Fehler Überlast	Preis (€)	Volumen (Gesamt)	Feh...
MBS ASK101.4 2000 A 8,1 Ω Dreieck	52,97	22,61	7,05	29,91	94,15	94,15
MBS ASK101.4 PAC2 8,1 Ω Parallel	55,06	28,58	10,02	29,91	94,15	94,15
Celsa ALO 10030 2000 A 1,35 Ω Dreieck	90,50	22,17	13,07	31,16	81,45	81,45
Celsa ALO 8030 K 2000 A 8,1 Ω Parallel	55,03	28,58	10,00	65,71	91,20	91,20
Celsa ALO 8030 K 2000 A 8,1 Ω Dreieck	59,97	29,13	9,33	65,71	91,20	91,20
Redur 13A1030.3ffp 2000 A 8,1 Ω Parallel	100,00	4,45	6,20	100,00	100,00	100,00
Redur 13A1030.3ffp 2000 A 8,1 Ω Dreieck	97,51	11,81	17,28	100,00	100,00	100,00
Celsa ALO 10030 2000 A 1,35 Ω Parallel	62,49	100,00	100,00	31,16	81,45	81,45

Tabelle A.29: Tabellarisches Ranking nach Kosten/Volumen (5000 A)

Tabelle A.30: 5000 A | Performance-Index | Ranking

Messsystem	Fehler Nennstrom	Fehler Überlast	Fehler Niederstrom	Preis (€)	Volumen (Gesamt)	Feh...
Celsa ALO 20060 5000 A 0,0 Ω Dreieck	12,67	5,56	80,02	42,06	32,21	
Celsa ALO 20060 5000 A 0,0 Ω Parallel	59,44	56,56	81,37	42,06	32,21	
Redur 20A1456.5vffp 5000 A 8,1 Ω Dreieck	36,74	49,56	75,99	100,00	25,91	
MBS ASK129.10 5000 A 10,8 Ω Dreieck	24,90	43,63	100,00	97,69	100,00	
Redur 20A1456.5vffp 5000 A 0,0 Ω Parallel	100,00	100,00	89,16	100,00	25,91	

A SPS-Programmierung (Step7)

In diesem Abschnitt sind die Ausdrucke der verwendeten Programmsteine der Siemens Step7-Steuerung sowie das zugehörige Strukturgramm aufgeführt.

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. Pfunter, „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
- [9] Redur GmbH & Co. KG, „Fremdfeldstörungen bei Stromwandlern – Oft verkanntes Problem gebannt,“ *SCHALTSCHRANKBAU*, Nr. 6, 2021, Fachbeitrag zu Lösungen für hohe Ströme bei engen Platzverhältnissen. besucht am 24. Jan. 2026. Adresse: https://www.redur.de/fileadmin/user_upload/04_aktuelles/news_2021/ssb_218879_redur_gmbh___co_.kg.pdf
- [10] REDUR GmbH & Co. KG, „Niederspannungsabschirmkörper, Niederspannungsstromwandler, Niederspannungsstromwandleranordnung bzw. Niederspannungselektrikanordnung,“ Patent Application DE102021106843A1, Anmelder: REDUR GmbH & Co. KG; Priorität: 2021-03-19; Veröffentlichung: 2022-09-22. Abgerufen am 04. Februar 2026, 22. Sep. 2022. Adresse: <https://patentimages.storage.googleapis.com/03/7f/1e/50eb7828d085c8/DE102021106843A1.pdf>

Eidesstattliche Versicherung

Ich, der/die Unterzeichnende, erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Quellenangaben und Zitate sind richtig und vollständig wiedergegeben und in den jeweiligen Kapiteln und im Literaturverzeichnis wiedergegeben. Die vorliegende Arbeit wurde nicht in dieser oder einer ähnlichen Form ganz oder in Teilen zur Erlangung eines akademischen Abschlussgrades oder einer anderen Prüfungsleistung eingereicht.

Mit ist bekannt, dass falsche Angaben im Zusammenhang mit dieser Erklärung strafrechtlich verfolgt werden können.

Ort, Datum

Unterschrift