

BACHELORARBEIT

im Studiengang Elektrotechnik

Fremdfeldbeeinflussung auf Messstromwandler in der Niederspannung

Vorgelegt von:

Oliver-Luca 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 6. Februar 2026

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Diagrammverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
Formelzeichenverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung	1
1.3 Zielsetzung der Arbeit	2
1.4 Vorgehensweise	2
2 Theoretische Grundlagen und Stand der Technik	4
2.1 Grundlagen Messstromwandler	4
2.2 Aufbau und Bauformen	4
2.2.1 Unterscheidung zwischen Mess- und Schutzstromwendlern	5
2.2.2 Kompensationswicklungen	5
2.2.3 Normative Anforderungen und Genauigkeitsklassen	6
2.2.4 Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers	8
2.3 Physikalische Grundlagen	9
2.3.1 Magnetfelder und Induktion	9
2.3.2 Magnetische Stoffeigenschaften	11
2.3.3 Hysterese und reales Verhalten	12
2.3.4 Störeinflüsse bei Messstromwendlern	14
2.4 Messabweichung und Fehlerfortpflanzung	17
3 Versuchsaufbau und Methodik	19
3.1 Hochstromprüfstand	19
3.1.1 Aufbau und Funktionsweise	19
3.1.2 Regelungskonzept	20
3.1.3 Ursprünglicher Aufbau der Messstrecke	21
3.1.4 Schwachstellen im Messkonzept	21
3.2 Optimierte Messsystem	22
3.2.1 Systemintegration und Programmentwicklung	23
3.2.2 Softwaregestützte Prozesskette zur Datenauswertung	25
3.2.3 Auswertung der neuen Messstrecke	27
3.2.4 Auswahl und Spezifikation der Messstromwandler	29
3.2.5 Geometrische Anordnung der Primärleiter	30
4 Auswertung und Diskussion	34
4.1 Einfluss der Leitergeometrie auf die Messgenauigkeit	34
4.1.1 Referenzanalyse bei 2000 A Einfluss der Leitergeometrie auf verschiedene Wandlerkonzepte	34
4.1.2 Einfluss der Leitergeometrie auf das Sättigungsverhalten bei 2500 A	37
4.1.3 Einfluss von Geometrie und Bürde bei 3000 A	39
4.1.4 Skalierung der Geometrieffekte bei 4000 A	42
4.1.5 Grenzbereich der Messgenauigkeit bei 5000 A	43

4.2	Ökonomische Evaluation und Technologie-Ranking	46
4.2.1	Wirtschaftlichkeit im Nennstrombereich (2000 A bis 2500 A)	46
4.2.2	Verschiebung der Kosteneffizienz bei Hochstrom (3000 A bis 4000 A)	48
4.2.3	Verschiebung der Kosteneffizienz bei Hochstrom (5000 A)	50
4.2.4	Einfluss des Bauvolumens auf die Gesamtwirtschaftlichkeit	50
5	Zusammenfassung der Ergebnisse	52
5.1	Bewertung der Prüfstands-Optimierung	52
5.2	Konstruktionsempfehlung für zukünftige Wandler-Einbauten	52
6	Ausblick	53
A	Messergebnisse	54
A.1	Messreihe 2000 A	54
A.2	Messreihe 2500 A	56
A.3	Messreihe 3000 A	57
A.4	Messreihe 4000 A	58
A.5	Messreihe 5000 A	59
A	SPS-Programmierung (Step7)	64
A.1	Datenbausteine	64
A.1.1	DB1	65
A.1.2	DB2	66
A.1.3	DB51	67
A.1.4	DB52	68
A.2	Funktionsbausteine und Funktionen	69
A.2.1	FB1	70
A.2.2	FB1	71
A.2.3	FB1	72
A.2.4	FB1	73
A.2.5	FB1	74
A.2.6	FB1	75
A.2.7	FB1	76
A.2.8	FB1	77
A.2.9	FB1	78
A.2.10	FB1	79
A.2.11	FB1	80
A.2.12	FB1	81
A.2.13	FB1	82
A.2.14	FB1	83
A.2.15	FB1	84
A.2.16	FB1	85
A.2.17	FB1	86
A.2.18	FC1	87
A.2.19	FC1	88
A.2.20	FC2	89
A.2.21	FC2	90
A.2.22	FC3	91
A.2.23	FC3	92
A.2.24	FC4	93
A.2.25	FC4	94
A.2.26	FC4	95

A.3 Organisationsbausteine	96
A.3.1 OB1	97
A.3.2 OB1	98
A.3.3 OB1	99
A.3.4 OB1	100
A.4 Strukturgramme	101
A.4.1 Struktogramm FB1	102

Literaturverzeichnis

Eigenständigkeitserklärung

Tabellenverzeichnis

2.1 Grenzwerte für Schutzwandler der Klassen P und PR	7
2.2 Grenzwerte für die Übersetzungsmessabweichung	7
2.3 Grenzwerte für den Fehlwinkel	8
2.4 Magnetische Stoffklassen und typische Bereiche der relativen Permeabilität μ_r nach [9, Tab. 48]	12
3.1 Detaillierte Spezifikation der Komponenten	20
3.2 Vergleichende Übersicht der normierten Fehleranteile und des resultierenden Fehler Scores	29
3.3 Erweiterte Spezifikationen und wirtschaftliche Kennwerte der Prüflinge	30
3.4 Übersicht der Schienenkonfigurationen und Phasenmittenabstände mit 4000 A bei 3WA13	31
4.1 Vergleich der Fehlströme und Genauigkeitsgewinn (Celsa ALO 10030, Phase L2)	38
4.2 Berechnetes Nettovolumen der untersuchten Wandler	39
4.3 Übersicht der untersuchten Bürdenkonfigurationen bei 3000 A	40
4.4 Verbesserungsfaktor der Messgenauigkeit (Parallel / Dreieck) bei 5000 A	45
A.1 Messergebnisse Redur 13A1030.3ffp, 8,1 Ω , 2000 A, Dreieck & Parallel	54
A.2 Messergebnisse Celsa ALO 10030, 1,35 Ω , 2000 A, Dreieck & Parallel	54
A.3 Messergebnisse Celsa ALO 8030 K, 8,1 Ω , 2000 A, Dreieck & Parallel	54
A.4 Messergebnisse MBS ASK101.4, 8,1 Ω , 2000 A, Dreieck & Parallel	55
A.5 Messergebnisse Celsa ALO 10050 K, 2,8 Ω , 2500 A, Dreieck & Parallel	56
A.6 Messergebnisse Celsa ALO 10030, 1,35 Ω , 2500 A, Dreieck & Parallel	56
A.7 Messergebnisse Celsa ALO 12070, 10,8 Ω , 3000 A, Dreieck & Parallel	57
A.8 Messergebnisse Celsa ALO 12070 K, 10,8 Ω , 3000 A, Dreieck & Parallel	57
A.9 Messergebnisse Celsa ALO 12070, Asymmetrische Bürde ($R_{L2} = 0 \Omega$), 3000 A, Parallel	57
A.10 Messergebnisse Celsa ALO 12070, Minimale Bürde (0, 0 Ω), 3000 A, Parallel	57
A.11 Messergebnisse Celsa ALO 12070, 0,0 Ω , 4000 A, Dreieck & Parallel	58
A.12 Messergebnisse Celsa ALO 12070 K, 0,0 Ω , 4000 A, Dreieck & Parallel	58
A.13 Messergebnisse Celsa ALO 20060, 0,0 Ω , 5000 A, Dreieck & Parallel	59
A.14 Messergebnisse Celsa ALO E 16050 K, 0,0 Ω , 5000 A, Dreieck & Parallel	59
A.15 Messergebnisse Redur 20A1456.5FFP, 0,0 Ω / 8,1 Ω , 5000 A, Parallel & Dreieck	59
A.16 Messergebnisse MBS ASK129.10, 0,0 Ω / 10,8 Ω , 5000 A, Parallel & Dreieck	59
A.17 Tabellarisches Ranking der Wandlertechnologien (2000 A)	60
A.18 2000 A Performance-Index Ranking	60
A.19 Tabellarisches Ranking der Wandlertechnologien (2500 A)	60
A.20 2500 A Performance-Index Ranking	60
A.21 Tabellarisches Ranking der Wandlertechnologien (3000 A)	61
A.22 3000 A Performance-Index Ranking	61
A.23 Tabellarisches Ranking der Wandlertechnologien (4000 A)	61
A.24 4000 A Performance-Index Ranking	61
A.25 Tabellarisches Ranking der Wandlertechnologien (5000 A)	62
A.26 5000 A Performance-Index Ranking	62
A.27 Tabellarisches Ranking nach Kosten/Volumen (2000 A)	62
A.28 2000 A Performance-Index Ranking	62
A.29 Tabellarisches Ranking nach Kosten/Volumen (5000 A)	63
A.30 5000 A Performance-Index Ranking	63

Abbildungsverzeichnis

1.1	Gesamtansicht des Schaltschranks	1
2.1	Schematischer Aufbau eines Aufsteckstromwandlers	4
2.2	Schematischer Aufbau eines Wandlers mit zusätzlichen Kompensationswicklungen	6
2.3	Schematische Darstellung der zentrischen und exzentrischen (außermittigen) Positionierung der Kupferschiene	6
2.4	Vollständiges Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers	8
2.5	Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers	8
2.6	Schematische Darstellung der magnetischen Kopplung im Wandler	9
2.7	Schematische Darstellung der Domänenentwicklung bei Anlegen eines äußeren Magnetfeldes, nach [10]	12
2.8	Schematische Darstellung von Neukurve und Hystereseschleife im <i>B-H</i> -Diagramm	13
2.9	Geometrische Parameter zur Berechnung des Fremdfeldeinflusses	15
2.10	Einfluss von Kerngröße und Stromstärke auf den zusätzlichen Streufluss	15
2.11	Simulierter Verlauf des magnetischen Flusses entlang des mittleren Kernumfangs bei zentriert er (symmetrisch) und exzentrischer (unsymmetrisch) Primärleiterposition	17
3.1	Blockschaltbild des Hochstromprüfstandes mit Leistungs und Signalpfaden	20
3.2	Schematischer Aufbau der Messstrecke zur Ermittlung der Messabweichung	21
3.3	Schematischer Aufbau der optimierten Messstrecke mit Siemens SENTRON Messgeräten	23
3.4	Struktogramm der Schrittkette zur automatisierten Kennlinienaufnahme (Funktionsbaustein (FB)1)	24
3.5	Benutzeroberfläche des manuellen Rohdaten Exports zur Selektion stabiler Messbereiche	25
3.6	Technische Zeichnung des Kupferschienensystems in paralleler und dreiecksförmiger Anordnung	31
3.7	Versuchsaufbau in paralleler Schienenanordnung mit montiertem Messstromwandler (Typ: Redur 20A1456.5FFP)	32
3.8	Modifizierter Versuchsaufbau in Dreieckskonfiguration durch räumlichen Versatz der Phase L2 mittels Kupferadapter	33
4.1	Seitliche Fremdfeldprotektoren am Redur Wandler	35

Diagrammverzeichnis

3.1	Analyse der Messabweichung und Standardabweichung der Phasen L1 L2 und L3 im ursprünglichen Versuchsaufbau	22
3.2	Vergleichende Analyse der Messabweichung (oben) und Standardabweichung (unten) unter Einsatz des PAC 4220	27
3.3	Kumulierter Vergleich der Fehleranteile (Ökonomie Ranking) der verschiedenen Messsysteme über drei Lastbereiche	28
4.1	Zusammenfassender Vergleich der Leitergeometrien bei 2000 A	35
4.2	Messfehlerverlauf des Celsa ALO 10030 in Abhängigkeit vom Primärstrom	36
4.3	Zusammenfassender Vergleich der Leitergeometrien bei 2500 A	37
4.4	Vergleich von Geometrie und Bürdeneinfluss bei 3000 A	40
4.5	Vergleich der Fehlerkurven bei variabler Bürde und 3000 A	41
4.6	Ranking der Konfigurationen basierend auf dem Performance Index	42
4.7	Zusammenfassender Vergleich der Leitergeometrien bei 4000 A	43
4.8	Zusammenfassender Vergleich der Leitergeometrien bei 5000 A	44
4.9	Wirtschaftliches Ranking der Wandlertechnologien bei 2000 A	46
4.10	Wirtschaftliches Ranking der Wandlertechnologien bei 2500 A	47
4.11	Wirtschaftliches Ranking der Wandlertechnologien bei 3000 A	48
4.12	Wirtschaftliches Ranking der Wandlertechnologien bei 4000 A	49
4.13	Wirtschaftliches Ranking der Wandlertechnologien bei 5000 A	50
4.14	Wirtschaftliches Ranking unter Berücksichtigung des Volumens bei 2000 A	51
4.15	Wirtschaftliches Ranking unter Berücksichtigung des Volumens bei 5000 A	51

Abkürzungsverzeichnis

ALF Accuracy Limit Factor (Genauigkeitsgrenzfaktor).

CSV Comma-Separated Values.

DB Datenbaustein.

DC Direct Current (Gleichstrom).

DIN Deutsches Institut für Normung.

EN Europäische Norm.

ET 200S Dezentrales Peripheriesystem von Siemens.

FB Funktionsbaustein.

FC Funktion (STEP 7 Baustein).

FFP Fremdfeld-Protektor (Schirmungstechnologie).

HMI Human Machine Interface.

PID Proportional-Integral-Derivative (Regler).

PROFINET Process Field Network.

SPS Speicherprogrammierbare Steuerung.

WinCC Windows Control Center.

Formelzeichenverzeichnis

A Querschnittsfläche (z. B. des Eisenkerns).

B Magnetische Flussdichte (Einheit: T).

B_{Fremd} Durch Fremdfeld induzierte Flussdichte.

D Außenphasenabstand der Stromschienen.

ε Übersetzungsmessabweichung (Stromfehler).

H Magnetische Feldstärke (Einheit: A m⁻¹).

I_n Bemessungsstrom (Nennstrom).

I_{pri} Primärstrom.

I_s Sekundärstrom.

k_n Bemessungsübersetzungsverhältnis.

μ_0 Magnetische Feldkonstante ($\mu_0 \approx 1,257 \cdot 10^{-6}$ H m⁻¹).

μ_r Relative Permeabilität.

N Windungszahl (z. B. N_{pri} , N_{sec}).

Φ Magnetischer Fluss (Einheit: Wb).

$\Delta\phi$ Fehlwinkel (Phasenverschiebung).

R_m Magnetischer Widerstand.

Θ Magnetische Durchflutung (Einheit: A).

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die fortschreitende Energiewende und die zunehmende Dezentralisierung der Energieversorgung stellen wachsende Anforderungen an die elektrische Energieverteilung [1]. Niederspannungsschaltanlagen bilden hierbei als zentrale Knotenpunkte das Rückgrat der industriellen Infrastruktur. Neben der reinen Betriebssicherheit rückt die präzise Erfassung von Energieströmen immer stärker in den Fokus. Dies ist nicht nur für den genauen Abrechnungsverkehr essenziell sondern auch für modernes Energiemanagement und die Netzstabilität [2].

Gleichzeitig stehen Hersteller von Schaltanlagen wie die Rolf Janssen Elektrotechnische Werke GmbH unter einem hohen wirtschaftlichen und konstruktiven Druck. Der in technischen Betriebsräumen zur Verfügung stehende Platz ist oft begrenzt weshalb Schaltanlagen möglichst kompakt dimensioniert werden müssen [3, Kap. 1.4]. Dies führt zu einer hohen Packungsdichte der Komponenten. Leiterbahnen die hohe Ströme von mehreren Tausend Ampere führen verlaufen in unmittelbarer Nähe zu empfindlichen Messstromwandlern.

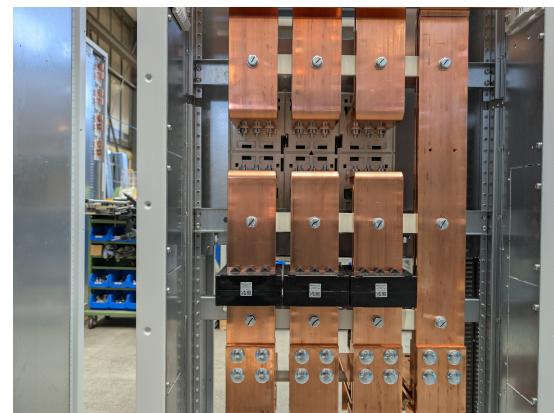
Aus dieser Konstellation ergibt sich ein physikalischer Zielkonflikt. Die kompakte Bauweise begünstigt die gegenseitige Beeinflussung durch magnetische Felder. Für den Ingenieur stellt sich daher die Frage wie unter diesen erschwerten Bedingungen die normativ geforderte Messgenauigkeit gewährleistet werden kann ohne die Wirtschaftlichkeit der Anlage durch überdimensionierte Spezialkomponenten zu gefährden. Die Untersuchung dieses Spannungsfeldes zwischen technischer Präzision kompakter Bauform und ökonomischer Effizienz bildet den Antrieb für die vorliegende Arbeit.

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 [4]. Dies ist besonders kritisch in einem Drehstromsystem da die Leiter der Phasen L1 L2 und L3 typischerweise parallel zueinander verlaufen. Durch diese Anordnung beeinflussen die magnetischen Wechselfelder der benachbarten Leiter die Messstellen der anderen Phasen.



(a) Frontansicht



(b) Rückansicht

Abbildung 1.1: Gesamtansicht des Schaltschranks

Diese Fremdfeldeinflüsse wirken sich auf die Zuverlässigkeit der Messung aus. Bereits ab einem

Nennstrom von 2500 A ist eine deutliche Beeinflussung der Messwerte festzustellen wie die Messdaten im Anhang zeigen (vgl. Tabelle A.6). Diese Abweichung nimmt mit steigender Stromstärke zu sodass bei Nennströmen im Bereich von 5000 A betragsmäßige Messabweichungen von mehreren Hundert Ampere auftreten können. Messungen an Standardwandlern in paralleler Schienenanordnung belegen hierbei Fehlerströme die 400 A überschreiten (siehe Tabelle A.16).

Eine derartige Ungenauigkeit ist zu vermeiden da der Markt zunehmend präzisere Messwerte für Schutzeinrichtungen die Anlagenüberwachung und insbesondere für Verrechnungszwecke fordert. Ist die Messung durch die Felder von L1 L2 und L3 verfälscht können Schutzorgane fehl auslösen oder Energiekosten fehlerhaft abgerechnet werden.

Zwar existieren am Markt Lösungsansätze wie kompensierte Wandler oder zusätzliche Schirmungen 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 analysieren. Der Kern der Untersuchung liegt darin Messstromwandler explizit in einem Drehstromsystem der Phasen L1 L2 und L3 zu betrachten. Es wird geprüft ob die Wandler unter den gegebenen Rahmenbedingungen und den magnetischen Einflüssen des Dreiphasensystems die geforderte Messgenauigkeit einhalten können.

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

Die Arbeit gliedert sich in einen theoretischen Grundlagenteil die Beschreibung des experimentellen Aufbaus sowie die Analyse und Bewertung der Messergebnisse.

In Kapitel 2 werden zunächst die theoretischen Grundlagen erarbeitet. Hierbei erfolgt eine Be trachtung des physikalischen Wirkprinzips von Stromwandlern sowie der Mechanismen der magnetischen Induktion und Sättigung. Zusätzlich werden die relevanten Normen und Genauigkeitsklassen vorgestellt die als Bewertungsgrundlage dienen.

Das dritte Kapitel widmet sich dem methodischen Vorgehen und dem Versuchsaufbau. Es wird der eingesetzte Hochstromprüfstand beschrieben und die Optimierung der Messstrecke durch den Einsatz präziser digitaler Messgeräte erläutert. Zudem erfolgt die Definition der untersuchten Leitergeometrien und die Vorstellung der ausgewählten Prüflinge für das Drehstromsystem.

In Kapitel 4 erfolgt die detaillierte Auswertung der durchgeführten Messreihen. Die Ergebnisse werden nach Stromstärken von 2000 A bis 5000 A gestaffelt analysiert. Dabei liegt der Fokus auf

dem direkten Vergleich der Messabweichungen zwischen den verschiedenen Wandlertechnologien und den geometrischen Anordnungen. Ergänzend wird eine ökonomische Evaluation durchgeführt die die technische Performance in Relation zu den Kosten setzt.

Abschließend fasst Kapitel 5 die gewonnenen Erkenntnisse zusammen und leitet daraus konkrete Handlungsempfehlungen für die Konstruktion von Niederspannungsschaltanlagen ab. Ein Ausblick auf weiterführende Fragestellungen rundet die Arbeit ab.

2 Theoretische Grundlagen und Stand der Technik

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 Stromschienenanordnung 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 2.1 dargestellten Hauptkomponenten zusammen.

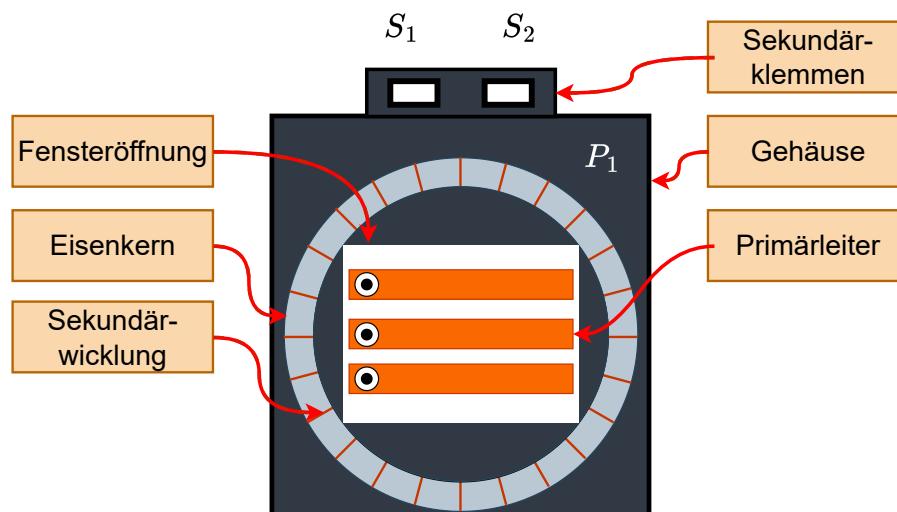


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau eines Aufsteckstromwandlers

Im Niederspannungsbereich fungiert meist eine Kupferschienenanordnung als Primärleiter. Diese weist in der Regel ein Rechteckprofil auf und kann aus mehreren Einzelschienen bestehen. Eine

detaillierte Betrachtung der Schienenanordnung erfolgt in Abschnitt 3.2.5. 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 ($N_p = 1$) 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, Nickleisen oder nanokristalline Legierungen zum Einsatz [5, 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 [6, 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 [6, Kap. 2.2]. Eine weitere spezielle Wandlerart stellen die im folgenden Abschnitt 2.2.2 behandelten Kompensationswicklungen dar.

2.2.2 Kompensationswicklungen

Kompensationswicklungen dienen primär der Minimierung zweier deutlicher Störeinflüsse bei Messstromwandlern. Dabei handelt es sich um den durch eine exzentrische Positionierung des Primärleiters verursachten Lagefehler (siehe Abbildung 2.3) sowie die Einwirkung externer Fremdfelder. Die physikalischen Grundlagen zu letzterem Aspekt werden in Kapitel 2.3.4 erläutert. Eine exzentrische Leiteranordnung tritt in der Praxis häufig auf, wenn die Fensteröffnung des Wandlers deutlich größer als der Querschnitt der verwendeten Stroomschiene dimensioniert ist. Aufgrund des geometrischen Spielraums ist eine exakte Zentrierung bei der Montage oft nicht gewährleistet. Abbildung 2.2 veranschaulicht das grundlegende Funktionsprinzip. Die Wicklungen W_1 bis W_4 sind symmetrisch über den Umfang des Eisenkerns verteilt. Technisch wird dies durch zusätzlich zur eigentlichen Sekundärwicklung W_0 aufgebrachte und parallel geschaltete Teilwicklungen realisiert. 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.

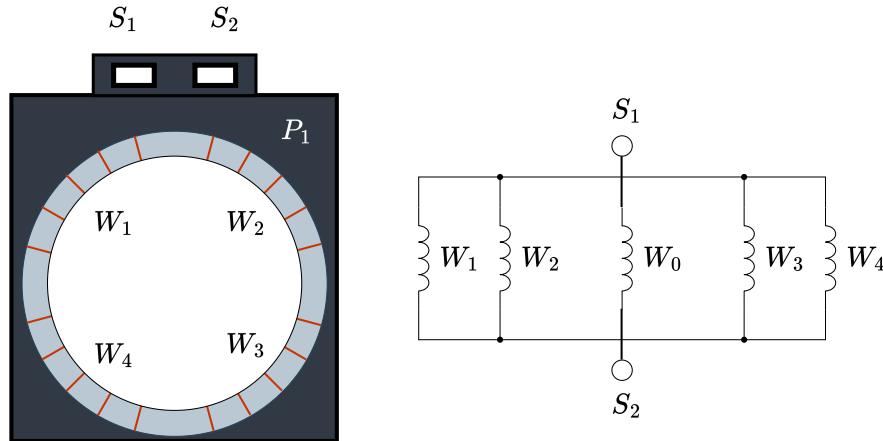


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau eines Wandlers mit zusätzlichen Kompensationswicklungen

Diese Parallelschaltung ermöglicht den Fluss von Ausgleichsströmen zwischen den Segmenten zur Kompensation lokaler Sättigungserscheinungen und Asymmetrien im Magnetfluss [5, S. 77].

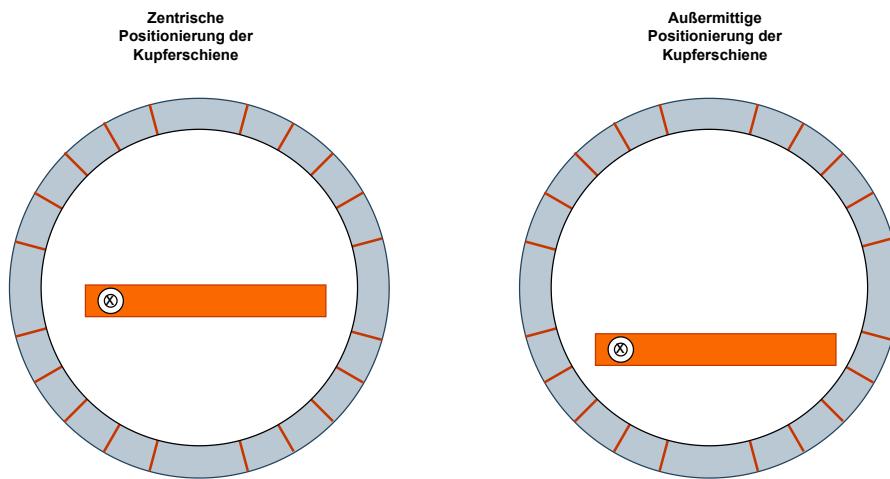


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der zentrischen und exzentrischen (außermittigen) Positionierung der Kupferschiene

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 [7, S. 22] festgelegt. Diese Klassen definieren die maximal zulässigen Messabweichungen und bilden die Entscheidungsgrundlage für die Auswahl eines Wandlers. Wie bereits erläutert unterscheiden sich die Anforderungen an Mess- und Schutzwandler grundlegend. Für Schutzwandler ist das Verhalten bei hohen Kurzschlussströmen entscheidend. Sie werden in die Klassen P (Protection) und PR (Protection, niedrige Remanenz) eingeteilt. Die Bezeichnung der Genauigkeitsklasse setzt sich aus der höchstzulässigen prozentualen Gesamtmessabweichung sowie dem Kennbuchstaben und dem Genauigkeitsgrenzfaktor (Accuracy Limit Factor (Genauigkeitsgrenzfaktor) (ALF)) zusammen [7, S. 23–24]. Die Klasse P beschreibt Standard-Schutzwandler ohne definierten Grenzwert für den Remanenzfluss. Im Gegensatz dazu kennzeichnet die Klasse PR Schutzwandler mit be-

grenztem 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 [5, S. 82]. Der Genauigkeitsgrenzfaktor gibt an, bis zum Wievielfachen des Nennstroms die Fehlertoleranzen eingehalten werden. Eine Bezeichnung wie „5P20“ bedeutet demnach eine Gesamtfehlerabweichung von 5 % bei 20-fachem Nennstrom. Tabelle 2.1 zeigt die Grenzwerte für die gängigen Schutzklassen.

Tabelle 2.1: Grenzwerte der Messabweichung für Stromwandler für Schutzzwecke der Klassen P und PR (gemäß DIN EN 61869-2 Tabelle 205 [7, S. 24])

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

Messwandler untergliedern sich in die Standardklassen 0,1 bis 1, die Sonderklassen 0,2S und 0,5S für präzise Messungen weit unter Nennstrom sowie die Klassen 3 und 5 für weniger genaue Betriebsmessungen. Die Einhaltung der Fehlertoleranzen ist an die angeschlossene Bürde gekoppelt. Für die Standard- sowie die Sonderklassen dürfen die Grenzwerte im Bürdenbereich von 25 % bis 100 % der Bemessungsleistung nicht überschritten werden. Für die Klassen 3 und 5 gilt hingegen ein Bereich von 50 % bis 100 % [7, S. 21]. Ein wesentliches Kriterium ist die Übersetzungsmessabweichung ε als prozentuale Abweichung des Sekundärstroms vom idealen Wert (siehe Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2: Grenzwerte für die Übersetzungsmessabweichung (gemäß DIN EN 61869-2 Tabelle 201 [7, 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 [7, S. 51]. Tabelle 2.3 fasst die zulässigen Fehlwinkel für die Klassen 0,1 bis 1 zusammen.

Tabelle 2.3: Grenzwerte für den Fehlwinkel (gemäß DIN EN 61869-2 Tabelle 201 [7, S. 22])

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

2.2.4 Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers

Ein Messstromwandler entspricht physikalisch einem Transformator. Sein Verhalten lässt sich daher mithilfe des Transformator-Ersatzschaltbildes beschreiben. In der Darstellung 2.4 sind die Größen der Primärseite auf die Sekundärseite bezogen. Dabei repräsentieren R'_p den Widerstand und L'_p die Streuinduktivität der Primärseite. Die Sekundärseite wird durch den Wicklungswiderstand R_s und die Streuinduktivität L_s gebildet. Der Querzweig aus Eisenverlustwiderstand R_{FE} und Hauptinduktivität L_H modelliert den Eisenkern, während R_B und L_B die externe Bürde abbilden.

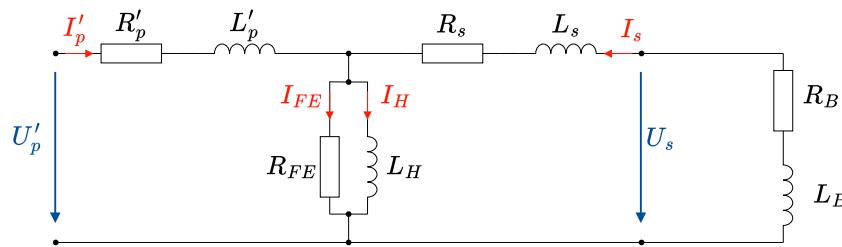


Abbildung 2.4: Vollständiges Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers

Bei einem Aufsteckstromwandler bildet der durch die Fensteröffnung geführte Leiter die Primärwicklung. Da dieser Leiterabschnitt sehr kurz ist und keine Wicklung im herkömmlichen Sinn darstellt, können der ohmsche Widerstand R'_p und die Streuinduktivität L'_p in der Regel vernachlässigt werden. Das daraus resultierende vereinfachte Ersatzschaltbild ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

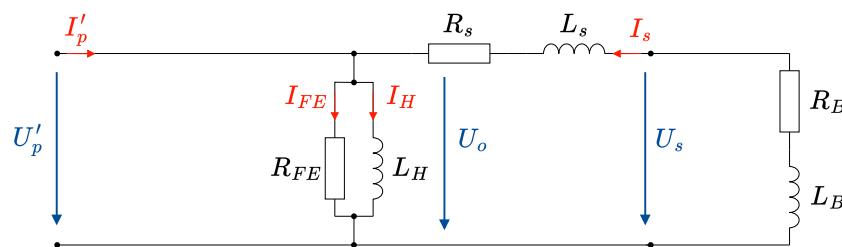


Abbildung 2.5: Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Messstromwandlers

Theoretisch ließe sich auch die sekundäre Streuinduktivität L_s bei zentrierter Lage des Primärleiters und gleichmäßiger Verteilung der Sekundärwicklung über den Umfang vernachlässigen [5,

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. Um das Betriebsverhalten und mögliche Fehlerquellen grundlegend zu verstehen werden im Folgenden die theoretischen Zusammenhänge der magnetischen Induktion hergeleitet. Die Betrachtung beginnt bei der Entstehung der magnetischen Feldstärke durch den Primärstrom und führt über die Materialeigenschaften des Kerns zur magnetischen Flussdichte. Unter Einbeziehung der geometrischen Abmessungen wird der magnetische Widerstand definiert welcher die Grundlage für das Hopkinson'sche Gesetz bildet [8]. Abschließend wird erläutert wie sich durch die induzierte Gegendurchflutung auf der Sekundärseite das für die Stromtransformation notwendige Durchflutungsgleichgewicht einstellt.

2.3.1 Magnetfelder und Induktion

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

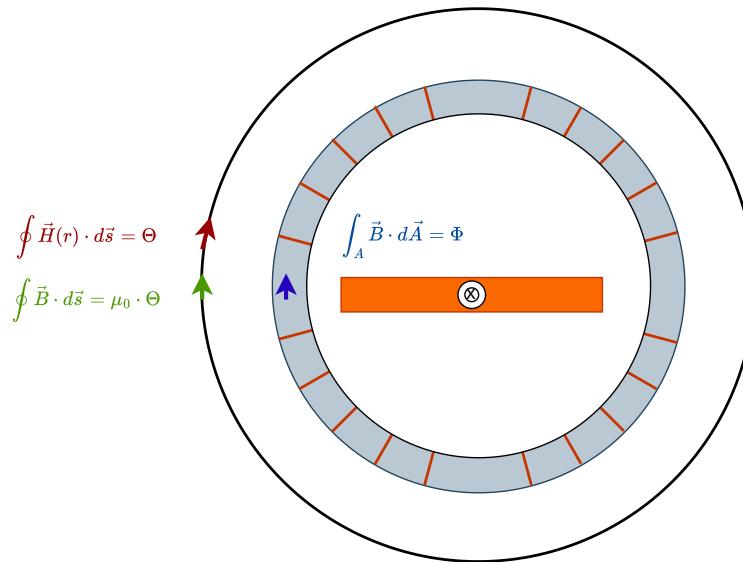


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung der magnetischen Kopplung im Wandler

Ein durch den Ringkern geführter Primärstrom I_{pri} erzeugt gemäß dem Ampèreschen Durchflutungsgesetz ein magnetisches Feld. Das Linienintegral der magnetischen Feldstärke H entlang eines geschlossenen Weges \mathcal{S} entspricht dabei der umschlossenen Durchflutung Θ , wie Gleichung (1) zeigt

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

Der Stromwandler nutzt einen Ringkern aus ferromagnetischem Material mit einer hohen relativen Permeabilität $\mu_r \gg 1$ (siehe Abschnitt 2.3.2). Unter der Annahme eines torusförmigen Kerns mit dem mittleren Radius r folgt der Integrationsweg der kreisförmigen mittleren Feldlinie. Infolge der Rotationssymmetrie bleibt der Betrag der Feldstärke H konstant. Bei einem Durchsteck-/Aufsteckstromwandler entspricht der Primärleiter einer einzelnen Durchsetzung des Kerns, sodass $N_p = 1$ gilt. Das Wegintegral ergibt sich folglich aus dem Produkt der Feldstärke H und dem Kreisumfang $2\pi r$ (siehe Gleichung (2)).

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

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

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 der Zusammenhang in Gleichung (3)

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

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 gemäß Gleichung (4)

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

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, was in Gleichung (5) dargestellt ist

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

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

Der in Gleichung (5) hergeleitete Zusammenhang zwischen Fluss und Strom lässt sich in Analogie zum elektrischen Stromkreis (Ohmsches Gesetz) betrachten. Der Term, der die Geometrie und die Materialeigenschaften des Kerns beschreibt, stellt den magnetischen Widerstand R_m dar (vgl. Gleichung (6))

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

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, analog zu Gleichung (7) [8, Kap. 11.9]

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

Im Betrieb des Stromwandlers wirkt nicht nur der Primärstrom auf den magnetischen Kreis. Auf der Sekundärseite befindet sich eine Wicklung mit der Windungszahl N_s . Der magnetische Fluss induziert in dieser Wicklung eine Spannung, die bei geschlossenem Sekundärkreis einen Strom I_s treibt. Nach der Lenzschen Regel ist dieser Sekundärstrom seiner Ursache entgegengerichtet. Er erzeugt eine magnetische Gegendurchflutung Θ_s , 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 (siehe Gleichung (8))

$$\Theta_{res} = \Theta_p - \Theta_s = N_p \cdot I_p - N_s \cdot I_s \quad (8)$$

Dabei ist N_p die Windungszahl der Primärseite (bei Durchsteckwandlern ist $N_p = 1$). Setzt man die resultierende Durchflutung in das Hopkinsonsche Gesetz ein, erhält man die Beziehung in Gleichung (9)

$$\Phi \cdot R_m = N_p \cdot I_p - N_s \cdot I_s \quad (9)$$

Für die ideale Betrachtung eines Stromwandlers wird ein Kernmaterial mit sehr hoher Permeabilität ($\mu_r \rightarrow \infty$) angenommen. Daraus folgt gemäß Gleichung (6), dass der magnetische Widerstand gegen Null geht ($R_m \rightarrow 0$). Damit der magnetische Fluss Φ einen endlichen Wert annimmt, muss die resultierende Durchflutung Θ_{res} ebenfalls gegen Null gehen. Es stellt sich ein fast ideales Durchflutungsgleichgewicht ein, wie in Gleichung (10) zu sehen ist

$$0 = N_p \cdot I_p - N_s \cdot I_s \\ N_s \cdot I_s = N_p \cdot I_p \quad (10)$$

Durch Umstellen dieser Gleichung ergibt sich der Sekundärstrom in Abhängigkeit vom Primärstrom und dem Übersetzungsverhältnis der Windungszahlen (siehe Gleichung (11))

$$I_s = I_p \cdot \frac{N_p}{N_s} \quad (11)$$

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

Magnetische Stoffeigenschaften werden über die Reaktion eines Materials auf ein äußeres Magnetfeld beschrieben. Als zentrale Kenngröße dient die relative Permeabilität μ_r , die die magnetische Flussdichte B im Material mit der Flussdichte im Vakuum verknüpft. Tabelle 2.4 gibt einen Überblick über die gebräuchliche Einteilung magnetischer Stoffklassen sowie typische Wertebereiche von μ_r nach [9, Tab. 48].

Tabelle 2.4: Magnetische Stoffklassen und typische Bereiche der relativen Permeabilität μ_r nach [9, 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

Diamagnetische Stoffe weisen eine relative Permeabilität kleiner als eins auf, beispielsweise Kupfer oder Wasser. Paramagnetische und diamagnetische Materialien werden in vielen elektrotechnischen Anwendungen näherungsweise wie Vakuum behandelt, da ihre Abweichung von $\mu_r \approx 1$ gering ist. Für Messstromwandler sind dagegen ferromagnetische Werkstoffe wesentlich, da ihre hohe Permeabilität den magnetischen Fluss bevorzugt im Kern führt und damit eine effiziente Kopplung ermöglicht. Da die Permeabilität ferromagnetischer Materialien von der Feldstärke abhängt, kann es bei großen Feldstärken zur magnetischen Sättigung kommen. In der Sättigung nimmt die wirksame Permeabilität ab, wodurch sich die Übertragungsgenauigkeit bei hohen Primärströmen oder bei Fremdfeldeinfluss verschlechtern kann.

2.3.3 Hysterese und reales Verhalten

Ferromagnetische Werkstoffe weisen im Allgemeinen eine nichtlineare Magnetisierungskennlinie auf, deren Ursache in der Domänenstruktur des Materials liegt. Im Kristallgefüge bilden sich zahlreiche mikroskopische Bereiche, die als magnetische Domänen oder Weißsche Bezirke bezeichnet werden. In jedem dieser Bereiche sind die atomaren magnetischen Momente überwiegend parallel orientiert, sodass innerhalb der Domäne eine ausgeprägte Magnetisierung vorliegt. Zwischen benachbarten Domänen können unterschiedliche Magnetisierungsrichtungen auftreten. Die räumlich begrenzten Übergangszonen, in denen sich die Magnetisierungsrichtung von einer Domäne zur nächsten ändert, werden als Bloch-Wände bezeichnet [10].

Abbildung 2.7 illustriert die Veränderung der Domänenstruktur beim Anlegen eines äußeren Magnetfeldes. Im Ausgangszustand ist die Domänenverteilung so beschaffen, dass die resultierende Magnetisierung nach außen näherungsweise verschwindet. Es liegt damit keine ausgeprägte Vorzugsrichtung der Magnetisierung vor.

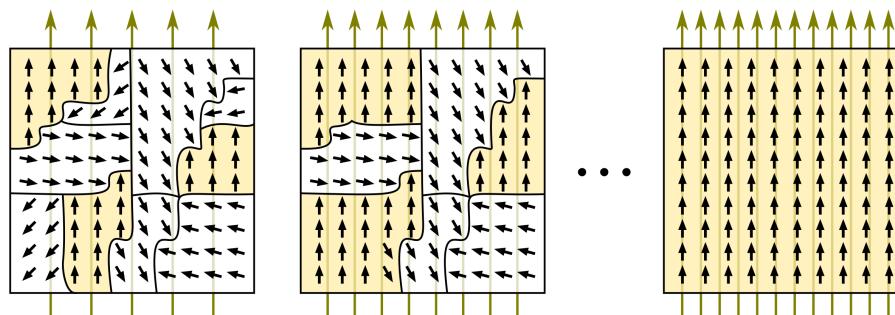


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung der Domänenentwicklung bei Anlegen eines äußeren Magnetfeldes, nach [10]

Mit zunehmender Feldstärke wirkt das äußere Feld auf die Domänen so ein, dass energetisch günstig orientierte Bereiche anwachsen. Dieser Prozess erfolgt zunächst überwiegend durch die Verschiebung der Bloch-Wände, wodurch Domänen mit ungünstiger Orientierung verkleinert werden. Bei weiterer Erhöhung der Feldstärke nimmt zusätzlich die Drehung der Magnetisierung innerhalb der Domänen zu, bis eine weitgehende Ausrichtung in Feldrichtung erreicht ist. Der Endzustand entspricht der magnetischen Sättigung. In diesem Bereich führt eine weitere Steigerung der Feldstärke nur noch zu einer geringen Erhöhung der Flussdichte B , da die maximale Magnetisierung nahezu erreicht ist.

Die nichtlineare Domänenumordnung bewirkt zugleich, dass die effektive Permeabilität μ_r im Sättigungsbereich deutlich abnimmt. Für Messstromwandler ergibt sich daraus eine reduzierte Übertragungsgenauigkeit bei hohen Primärströmen oder bei überlagerten Fremdfeldern.

Neben der Nichtlinearität tritt Hysterese auf. Darunter wird verstanden, dass B bei veränderlicher Feldstärke H nicht eindeutig von H bestimmt ist, sondern vom vorherigen Magnetisierungszustand abhängt. Abbildung 2.8 zeigt dieses Verhalten im B - H -Diagramm. Die Neukurve beschreibt den ersten Magnetisierungsvorgang eines zunächst unmagnetisierten Materials bis zur Sättigung. Bei anschließender Reduktion der Feldstärke folgt die Flussdichte einer Hystereseschleife und kehrt nicht zum Ursprung zurück. Ursächlich sind irreversible Anteile der Domänenwandbewegung, die unter anderem durch Defekte und Inhomogenitäten im Kristallgitter begünstigt werden. Bei $H = 0$ verbleibt die Remanenz B_r . Zur vollständigen Entmagnetisierung ist eine Gegenfeldstärke erforderlich, deren Betrag als Koerzitivfeldstärke H_c angegeben wird.

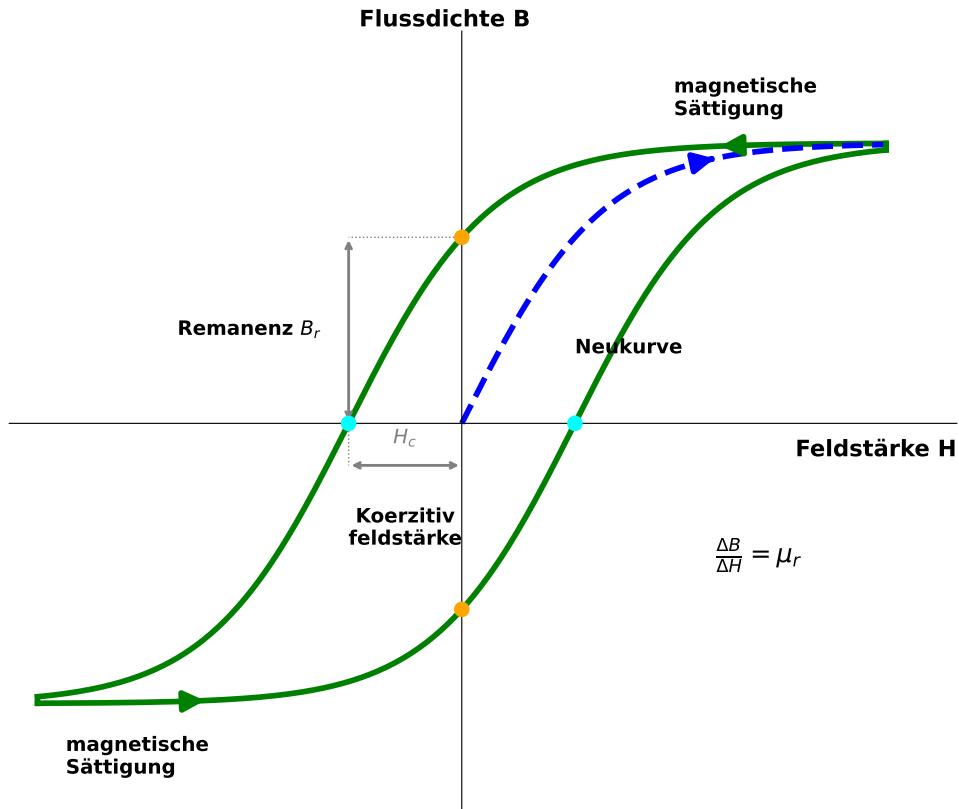


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung von Neukurve und Hystereseschleife im B - H -Diagramm

Die im B - H -Diagramm eingeschlossene Fläche der Hystereseschleife ist ein Maß für die magnetischen Verluste ... pro Zyklus [8, Kap. 11.12.1]. Für Messanwendungen werden daher weichmagnetische Werkstoffe mit kleiner Koerzitivfeldstärke und schmaler Hystereseschleife bevorzugt,

um Remanenz und Verlustleistung zu reduzieren [8], [11].

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 maßgeblich. Wie im vereinfachten Ersatzschaltbild (Abbildung 2.5) dargestellt, setzt sich der Sekundärkreis aus der Innenimpedanz der Wicklung und der externen Bürde zusammen. Ein erhöhter Widerstand im Sekundärkreis erfordert eine höhere induzierte Spannung U_o zur Aufrechterhaltung des eingeprägten Stroms I_s . Diese Spannung entspricht der Summe der Spannungsabfälle über dem Wicklungswiderstand R_s und dem Bürdenwiderstand R_B

$$U_o = I_s \cdot (R_s + R_B) \quad (12)$$

Dabei fasst der Parameter R_B alle externen ohmschen Widerstände wie Leitungen, Messgeräte oder zusätzliche Kompensationswiderstände zusammen. Gemäß dem Induktionsgesetz (Transformator-Hauptgleichung) besteht ein proportionaler Zusammenhang zwischen dieser induzierten Spannung und dem magnetischen Fluss Φ im Kern

$$U_o = 4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi \quad (13)$$

Durch Gleichsetzen der Beziehungen (12) und (13) sowie Auflösen nach dem Fluss ergibt sich

$$\Phi = \frac{I_s \cdot (R_s + R_B)}{4,44 \cdot f \cdot N_s} \quad (14)$$

Aus dieser Beziehung wird ersichtlich, dass eine Erhöhung des Bürdenwiderstandes R_B bei konstantem Sekundärstrom zu einem linearen Anstieg des magnetischen Flusses Φ führt. Übersteigt dieser Fluss die Sättigungsgrenze des Kernmaterials, verlässt der Wandler seinen linearen Arbeitsbereich und die Messabweichung nimmt stark zu.

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

$$B(r) = \frac{\mu_0 \cdot I_p}{2\pi \cdot r} \quad (15)$$

Hierbei beschreibt μ_0 die magnetische Feldkonstante und I_p 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 [12]. 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. Dieser Berechnungsansatz stützt sich auf die theoretischen Grundlagen von Pfuntner [12] und ermittelt explizit den zusätzlichen Anteil der Flussdichte B_{Fremd} , der durch das externe Feld induziert wird [13]

$$B_{\text{Fremd}} \approx 10^{-6} \cdot I_p \cdot \frac{R + 0,5 \cdot W}{A} \cdot \log_{10} \left(\frac{D + R}{D - R} \right) \quad (16)$$

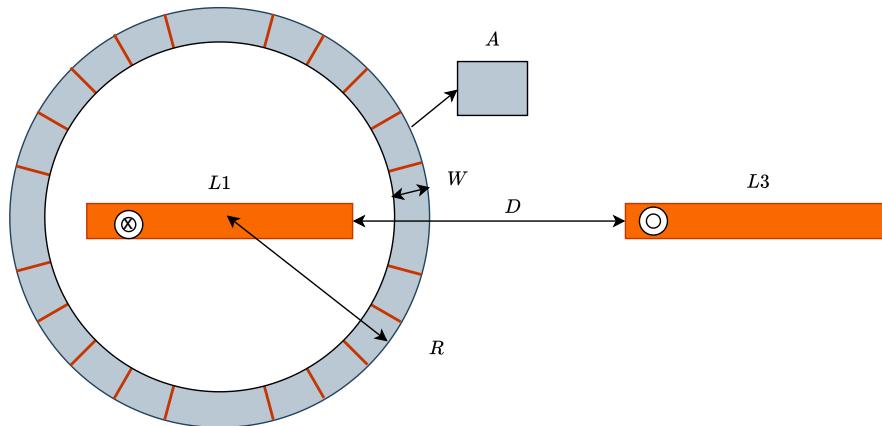


Abbildung 2.9: Geometrische Parameter zur Berechnung des Fremdfeldeinflusses

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

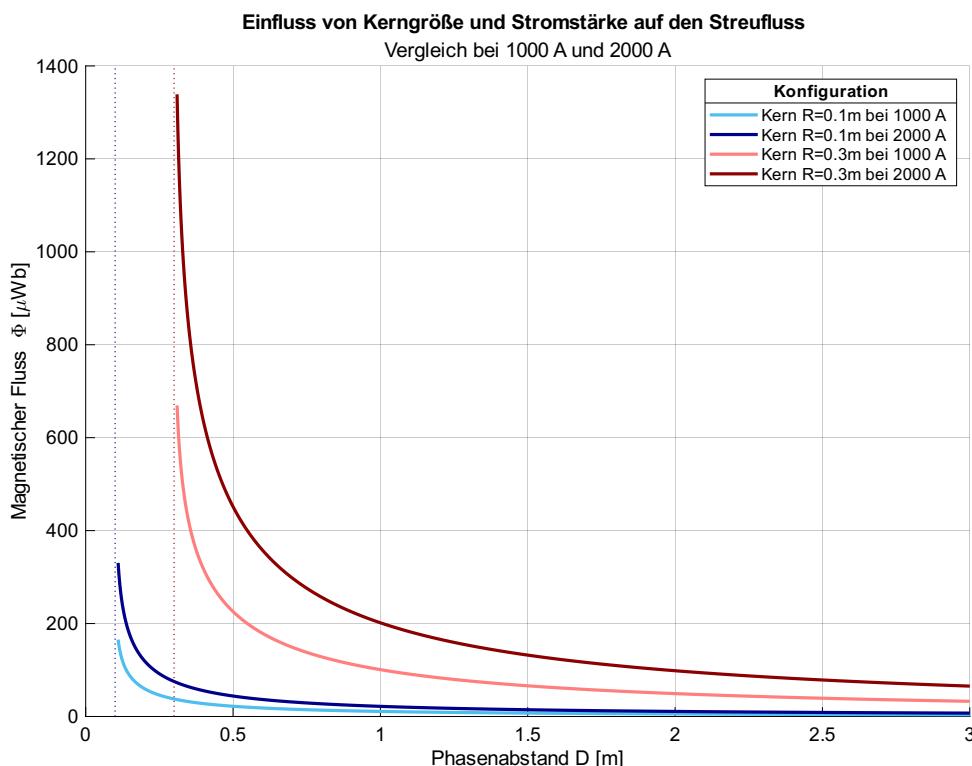


Abbildung 2.10: Einfluss von Kerngröße und Stromstärke auf den zusätzlichen Streufluss

Abbildung 2.10 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

$$B_{\text{res}} = B_{\text{Nutz}} + \underbrace{\frac{\Phi_{\text{Fremd}}}{A}}_{B_{\text{Fremd}}} \quad (17)$$

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 ΔB gering bleibt. Die Unabhängigkeit des im Diagramm gezeigten absoluten Störflusses vom Kernquerschnitt lässt sich durch Einsetzen von Gleichung (16) in die Flussdefinition herleiten. Dabei kürzt sich der Querschnitt A heraus

$$\Phi_{\text{Fremd}} \approx 10^{-6} \cdot I_p \cdot (R + 0,5 \cdot W) \cdot \log_{10} \left(\frac{D + R}{D - R} \right) \quad (18)$$

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 2.2.2 erläutert, lässt sich eine ideal zentrierte Installation der Primärleiter (Kupferschienen) in der Praxis häufig nicht vollständig realisieren. Bereits geringe Abweichungen von der zentrischen Lage führen zu einer inhomogenen magnetischen Feld- bzw. Flussverteilung im Eisenkern und erhöhen damit lokale Sättigungsbereiche.

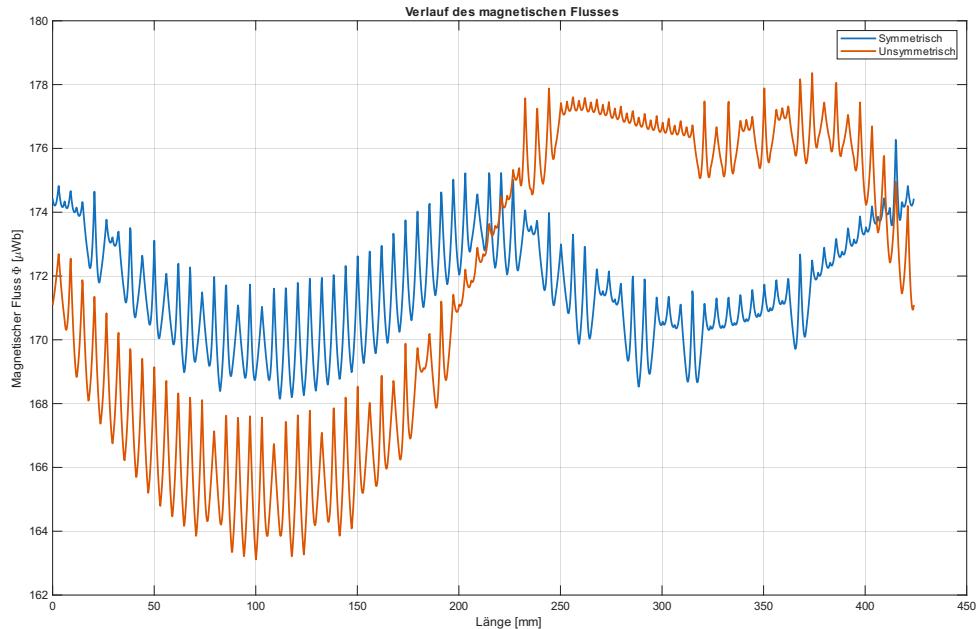


Abbildung 2.11: Simulierter Verlauf des magnetischen Flusses entlang des mittleren Kernumfangs bei zentriert (symmetrisch) und exzentrischer (unsymmetrisch) Primärleiterposition

Abbildung 2.11 visualisiert den simulierten Verlauf des magnetischen Flusses entlang des mittleren Kernumfangs. Dabei sind auf der Abszisse der Weg in mm und auf der Ordinate der magnetische Fluss in φ aufgetragen. Die blaue Kurve repräsentiert die Referenzkonfiguration mit einer zentrierten Leiteranordnung. Der Fluss ist hierbei über den gesamten Umfang homogen verteilt. Im Vergleich dazu verdeutlicht der orangefarbene Verlauf die Auswirkungen einer exzentrischen Positionierung. In den leiternahen Bereichen nimmt der magnetische Fluss zu während er auf der gegenüberliegenden Seite abfällt. Diese Asymmetrie führt zu einer ungleichmäßigen magnetischen Aussteuerung des Materials und begünstigt lokale Sättigungseffekte. Sofern die Sekundärwicklung nicht gleichmäßig über den Kernumfang verteilt ist resultieren aus dieser inhomogenen Flussverteilung Messabweichungen da die magnetische Kopplung in den einzelnen Wicklungsabschnitten variiert.

2.4 Messabweichung und Fehlerfortpflanzung

Zur Sicherstellung der normativ geforderten Genauigkeitsklassen wird in der Prüftechnik das Prinzip der Vergleichsmessung angewendet. Hierbei werden der zu prüfende Wandler und ein hochgenaues Referenznormal primärseitig vom identischen Strom durchflossen. Da die Fehlercharakteristik des Normals bekannt und dessen Eigenabweichung vernachlässigbar klein ist, lässt sich die Messabweichung des Prüflings direkt aus der Differenz der sekundärseitigen Ausgangssignale ableiten. Gemäß DIN EN 61869-2 müssen zwei zentrale Kenngrößen ermittelt werden. Die Übersetzungsmessabweichung ε beschreibt die prozentuale Differenz der Stromamplituden und wird nach folgender Gleichung berechnet

$$\varepsilon = \frac{k_n \cdot I_s - I_p}{I_p} \cdot 100 \% \quad (19)$$

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.

3 Versuchsaufbau und Methodik

Dieses Kapitel beschreibt die experimentelle Grundlage der Arbeit und dokumentiert den Weg von der Konzeption bis zur validen Datenerfassung. Im Fokus steht der Hochstromprüfstand welcher für die Generierung von Primärströmen bis zu 6000 A ausgelegt ist. Dabei wird nicht nur der technische Aufbau erläutert sondern auch die kritische Analyse der anfänglichen Messunsicherheiten und die daraus resultierende Optimierung der Messkette. Die Implementierung moderner Digitalmessgeräte und einer automatisierten Prozesssteuerung bildet die Basis für reproduzierbare Ergebnisse. Ergänzend werden die Auswahl der Prüflinge sowie die konstruktiven Variationen der Leitergeometrie vorgestellt.

3.1 Hochstromprüfstand

Der Hochstromprüfstand bildet die experimentelle Basis für die durchgeführten Untersuchungen. Dieser Abschnitt beschreibt zunächst die technische Realisierung der Stromerzeugung sowie das digitale Regelungskonzept. Darauf aufbauend erfolgt eine Analyse der ursprünglich eingesetzten Messtechnik. Die Betrachtung der dabei identifizierten Defizite dient als Grundlage für die im weiteren Verlauf beschriebene Optimierung des Messsystems. Die Anlage selbst 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 etwa 6 V.

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.

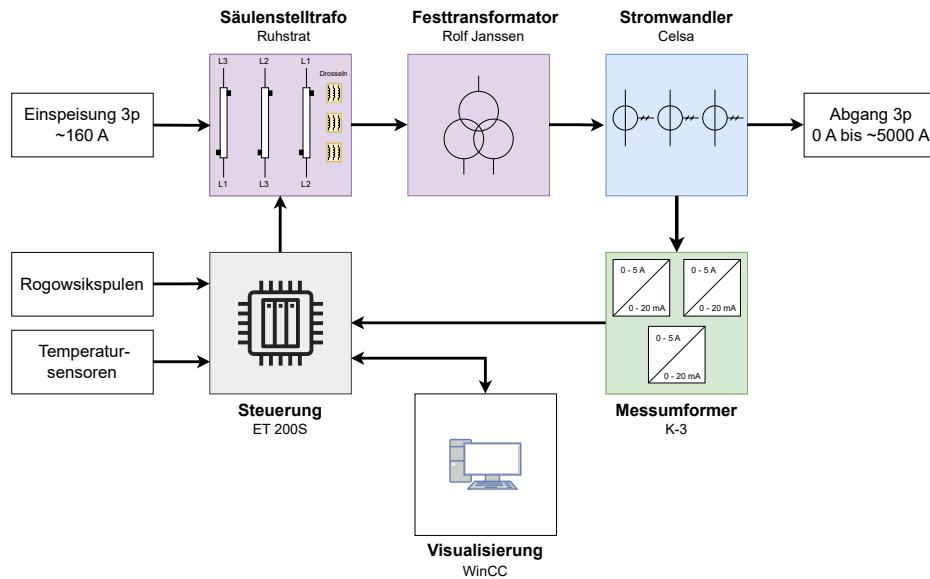


Abbildung 3.1: Blockschaltbild des Hochstromprüfstandes mit Leistungs und Signalpfaden

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 3.1 zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Detaillierte Spezifikation der Komponenten

Komponente	Typ	Leistung / Bürde	Primär / Input	Sekundär / Output
Säulenstelltransformator	Ruhstrat	90 kVA	380 V	0 V bis 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)	3K Elektrik	–	0 A bis 5 A AC	0 mA bis 20 mA DC
Leittechnik	Typ	Beschreibung		
Steuerung	Siemens ET 200S	PROFINET Anbindung, Stromregelung, Analogeingänge		
Visualisierung	Siemens WinCC	HMI System, Prozessüberwachung, Datenlogging		

3.1.3 Ursprünglicher Aufbau der Messstrecke

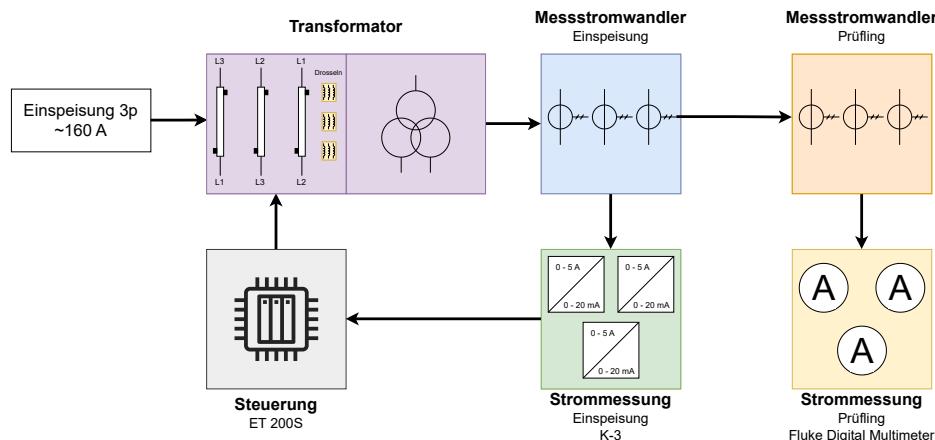


Abbildung 3.2: Schematischer Aufbau der Messstrecke zur Ermittlung der Messabweichung

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

3.1.4 Schwachstellen im Messkonzept

Die Auswertung der ersten Messreihen zeigt Abweichungen die über den gesamten Messbereich auftreten. In Abbildung 3.1 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 Referenzrahmen für die Bewertung der gesamten Messkette wird die Genauigkeitsklasse 0,2 herangezogen. Dies stellt eine konservative Betrachtung dar da die primärseitigen Stromwandler der Klasse 0,2S entsprechen. Gemäß Norm [7] definiert die Sonderklasse 0,2S insbesondere im Niederstrombereich strengere Anforderungen als die Standardklasse 0,2. Da die Abweichungen jedoch bereits die weiteren Grenzen der Klasse 0,2 überschreiten ist diese als Vergleichsmaßstab für die Fehleranalyse ausreichend.

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 minus 1 % und minus 2,5 % aufweisen. In Phase L2 zeigt der Messumformer K-3 bei 20 % Last einen Abfall der Genauigkeit auf circa minus 2 % wohingegen die Rogowskispulen eine positive Abweichung von über 1 % erreichen. Da beide Messsysteme die geforderte Genauigkeitsklasse von 0,2 signifikant verfehlten sind sie für eine valide Referenzmessung ungeeignet. Folglich kann auf Basis dieser Komponenten kein vertrauenswürdiger Referenzwert für den Primärstrom bestimmt werden was die Validierung der Stromwandler unmöglich macht.

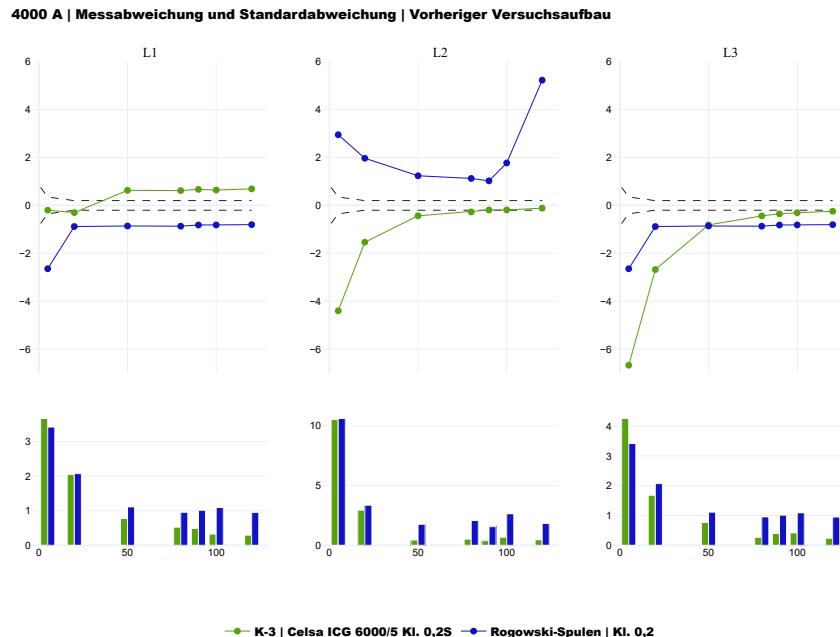


Diagramm 3.1: Analyse der Messabweichung und Standardabweichung der Phasen L1 L2 und L3 im ursprünglichen Versuchsaufbau

Die im unteren Teil der Abbildung 3.1 dargestellte Standardabweichung zeigt dass beide Messgeräte im niedrigen Strombereich eine erhöhte Varianz aufweisen. Dies ist darauf zurückzuführen dass der Säulenstelltransformator bei geringen Strömen einen begrenzten Stellbereich besitzt woraus eine geringere Stabilität des Stromwertes resultiert aus der Regelung. Mit zunehmender Stromstärke reduziert sich dieses Rauschen im Messsignal. Dabei weisen die K-3 Messumformer eine geringere Schwankungsbreite auf als die Rogowskispulen. Aufgrund dieser Ergebnisse sind beide Messverfahren für eine Referenzmessung im Rahmen der Genauigkeitsprüfung unzureichend. Im folgenden Abschnitt 3.2 wird die Systemoptimierung erläutert um eine präzisere Messwerterfassung zu realisieren.

3.2 Optimiertes Messsystem

Wie im vorangegangenen Abschnitt dargelegt erfüllte die ursprüngliche Messstrecke nicht die Anforderungen an eine präzise Genauigkeitsprüfung von Messstromwandlern. Aus diesem Grund wurde eine Optimierung des Hochstromprüfstandes 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 PAC 3220 welches für die Erfassung des Prüflingsstroms eingesetzt wird [14, S. 97] sowie das zur Überwachung der Einspeisung genutzte PAC 4220 [15, 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.

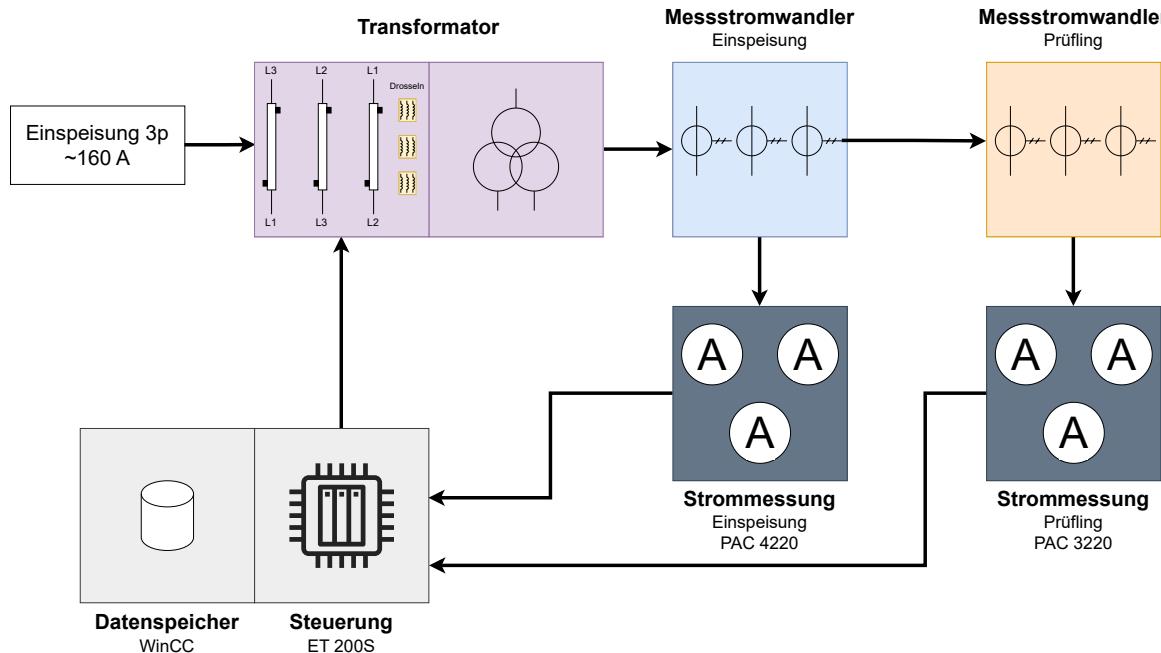


Abbildung 3.3: Schematischer Aufbau der optimierten Messstrecke mit Siemens SENTRON Messgeräten

Die in Abbildung 3.3 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 Addressierung 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 Programmabusteine ist hierfür in Abschnitt A 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 entsprechenden Speicheradressen innerhalb der DBs verknüpft. Über diese Verbindung werden die Werte der Ströme in regelmäßigen Abständen vom System ausgelesen auf dem HMI angezeigt und für den späteren Export als CSV Datei in der Datenbank gespeichert. Die Automatisierung des Prüfablaufs wird über die SPS realisiert wobei der vorhandene PID Regler zur präzisen Stromeinstellung genutzt wird. Für die Genauigkeitsmessung eines Wandlers sind gemäß Norm [7]

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 Schrittfolge entwickelt. Diese durchläuft die Prüfpegel sequenziell und hält jeden Messpunkt für eine Dauer von fünf Minuten konstant. Dieser Zeitraum gewährleistet das Erreichen eines thermisch stationären Zustands sowie die Erfassung einer hinreichenden Anzahl an Messwerten für die Mittelwertbildung. Da der Stelltransformator zur Vermeidung von Schwingungen mit einer Hysterese um den Sollwert arbeitet unterliegt der Strom geringfügigen Schwankungen. Ein längeres Messintervall kompensiert diesen Effekt durch die statistische Glättung. Zwar stellt sich ein stabiler Zustand oft bereits nach 60 bis 90 Sekunden ein jedoch wurde das Zeitfenster von fünf Minuten als konservative Sicherheitsmarge gewählt.

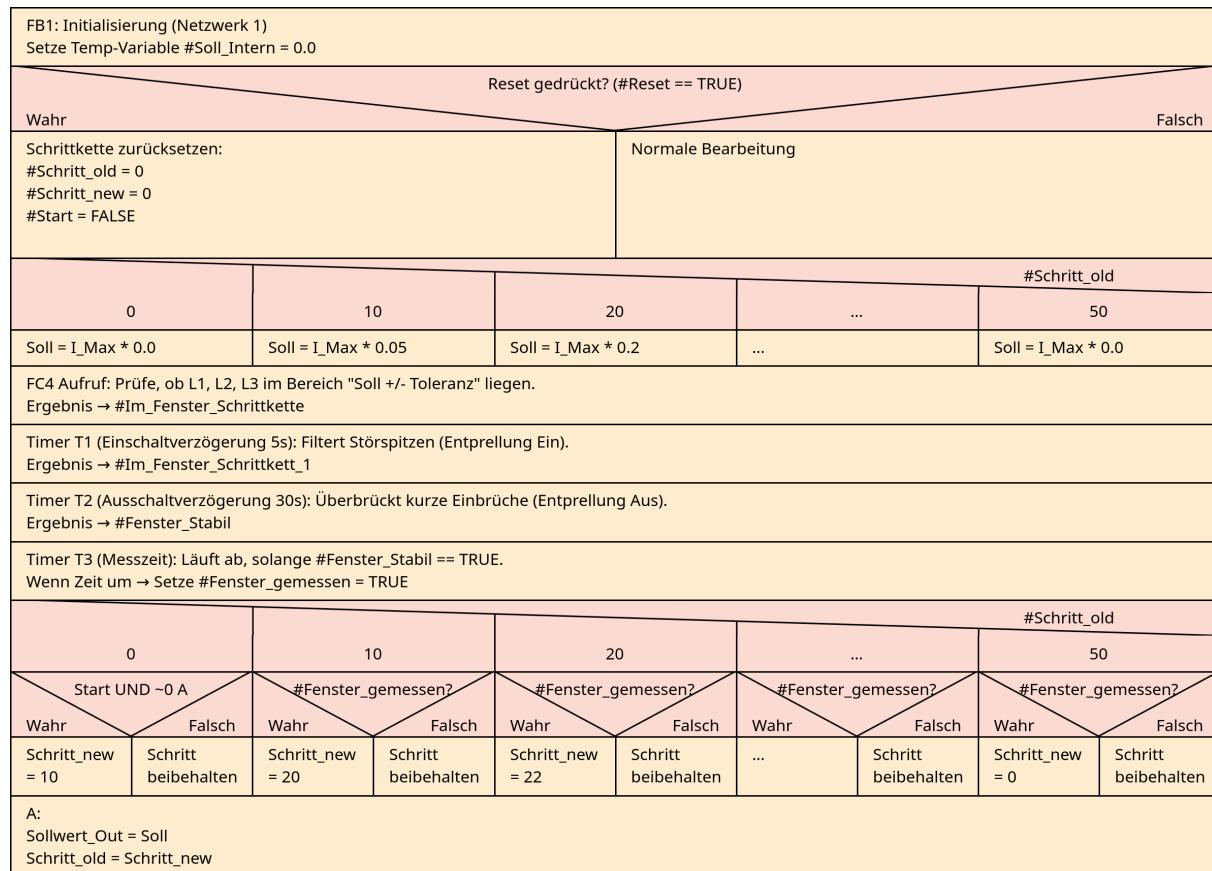


Abbildung 3.4: Struktogramm der Schrittfolge zur automatisierten Kennlinienaufnahme (FB1)

Der logische Ablauf dieser Automatisierung ist im Struktogramm des Funktionsbausteins FB1 dargestellt. Der Baustein übernimmt die zentrale Steuerung wobei zu Beginn eine Initialisierung erfolgt bei der die interne Sollwert Variable auf Null gesetzt wird. Im Falle eines aktiven Reset Signals wird die gesamte Schrittfolge 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 sta-

bile 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 3.5). 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.

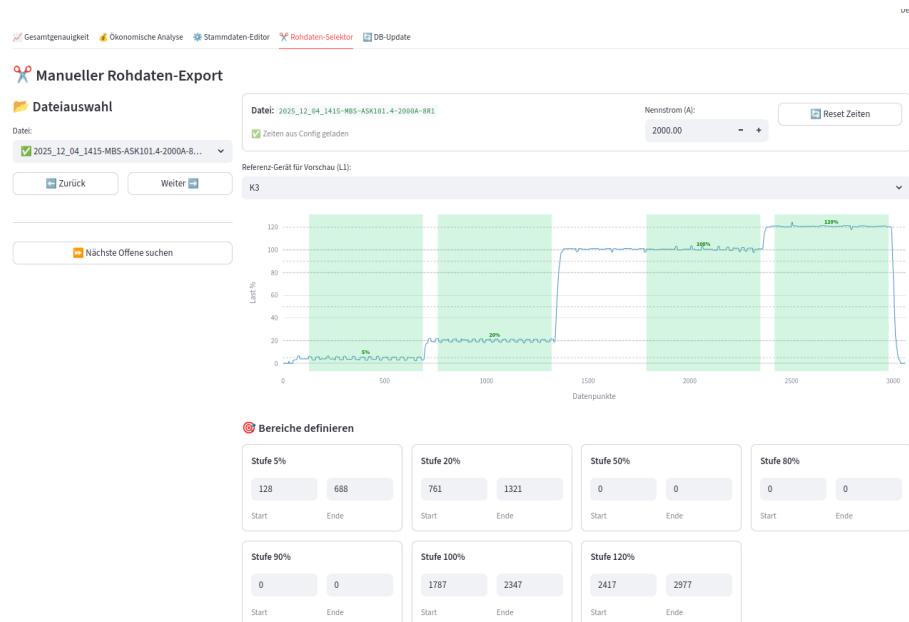


Abbildung 3.5: Benutzeroberfläche des manuellen Rohdaten Exports zur Selektion stabiler Messbereiche

Für die Berechnung werden pro Laststufe exakt 560 Messpunkte herangezogen was einem Zeitfenster von 4 Minuten und 40 Sekunden entspricht. Obwohl das Plateau technisch fünf Minuten gehalten wird werden die letzten 20 Sekunden des Datensatzes verworfen. Diese Maßnahme dient als Sicherheitsabstand um sicherzustellen dass bei der manuellen Selektion über die Software keine Flanken des Abschaltvorgangs in die Berechnung einfließen. Die verbleibenden 560 Werte

bilden eine statistisch valide Basis für die Auswertung. 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 2.4. Für die automatisierte Auswertung werden zunächst die arithmetischen Mittelwerte der Ströme über das stabile Zeitfenster (560 Messpunkte) gebildet und anschließend verrechnet

$$\varepsilon = \frac{\bar{I}_{ist} - \bar{I}_{ref}}{\bar{I}_{ref}} \cdot 100\% \quad (20)$$

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

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (21)$$

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 Fehlgrenzen (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 Gütefaktor 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

$$\bar{\varepsilon}_{Bereich} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k |\varepsilon_j| \quad (22)$$

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 3.2 ist der Fehlerverlauf des neu installierten Energiemessgerätes PAC 4220 (magenta) im direkten Vergleich zum Messumformer K-3 (grün) und den Rogowskispulen (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.

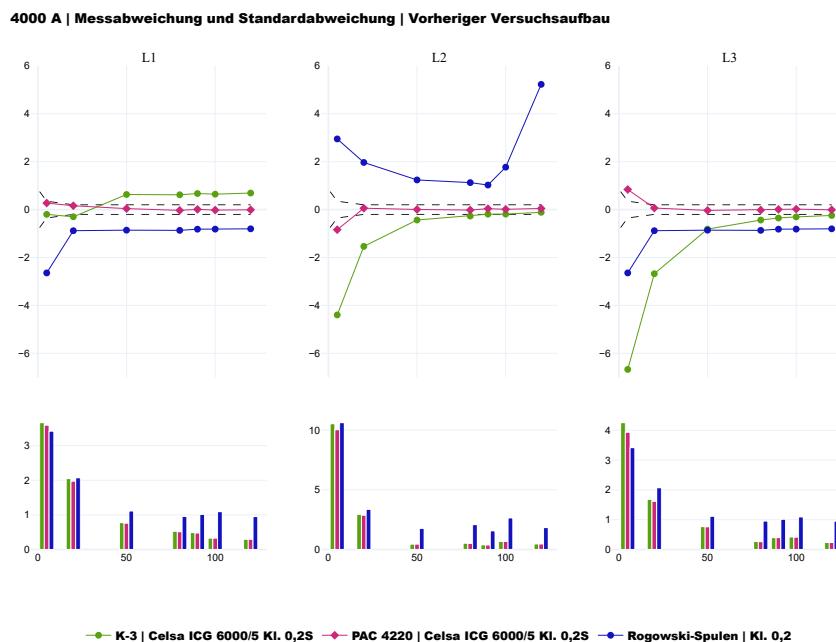


Diagramm 3.2: Vergleichende Analyse der Messabweichung (oben) und Standardabweichung (unten) unter Einsatz des PAC 4220

Eine Abweichung außerhalb der Normgrenzen ist lediglich im Bereich geringer Ströme (5%) erkennbar. Wie in Abschnitt 3.1.4 erläutert resultiert dieser Effekt aus dem begrenzten Stellbereich 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 3.2 visualisierte Standardabweichung dient als Maß für die Präzision und Reproduzierbarkeit der Messsysteme. Hierbei weisen das PAC 4220 und der Mes-

sumformer 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 Rogowskispulen 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 3.3 eine zusammenfassende Bewertung der Messsysteme.

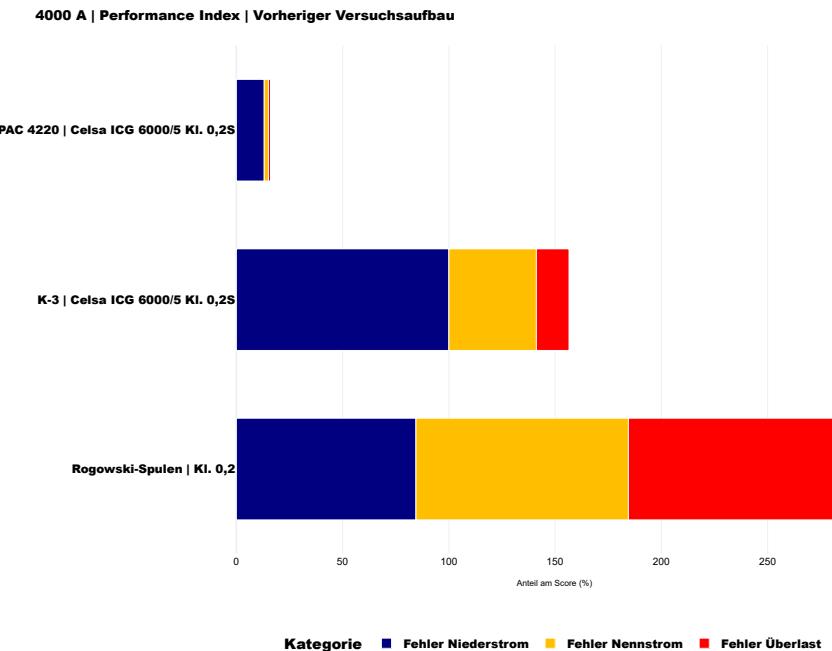


Diagramm 3.3: Kumulierter Vergleich der Fehleranteile (Ökonomie Ranking) der verschiedenen Messsysteme über drei Lastbereiche

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 3.2 ausgewiesene Fehler Score. Um die unterschiedlichen Messsysteme vergleichbar zu machen erfolgt eine Normierung der Fehlerwerte innerhalb jedes Lastbereichs. Das System mit der größten mittleren Abweichung im jeweiligen Bereich wird als Referenz für 100 % gesetzt während die anderen Systeme relativ dazu skaliert werden. Der Gesamtwert (Fehler Score) berechnet sich anschließend aus der Summe dieser normierten Einzelwerte gemäß der Formel

$$Score = \sum_{Bereich} \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{System}}{\bar{\varepsilon}_{max}} \cdot 100 \% \right) \quad (23)$$

Ein niedriger Gesamtscore indiziert dabei eine hohe Genauigkeit über alle Betriebsbereiche hinweg.

Tabelle 3.2: Vergleichende Übersicht der normierten Fehleranteile und des resultierenden Fehler Scores

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
Rogowskispulen	84,50	100,00	100,00	284,50

Im direkten Vergleich erreicht das PAC 4220 einen Fehler Score von nur 16,06 %. Dies bedeutet dass seine kumulierte Abweichung nur einen Bruchteil der Fehler der anderen Systeme beträgt. Der Messumformer K-3 weist einen kumulierten Anteil von 156,55 % auf da er insbesondere im Niederstrombereich die größte Ungenauigkeit zeigte und dort den 100 % Referenzwert bildete. Die Rogowskispulen markieren mit 284,50 % die größte Gesamtabweichung da sie im Nennstrom und Überlastbereich jeweils die schlechtesten Ergebnisse lieferten. Diese Resultate bestätigen dass erst durch den Einsatz der digitalen PAC Messgeräte eine valide Datenbasis geschaffen wurde.

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 3.3 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	43,67
MBS	ASK 129.10	Standard	5000	15,0	6175,0	289,80
Redur	13A1030.3ffp	FFP	2000	10,0	778,7	146,01
Redur	20A1456.5FFP	FFP	5000	15,0	1600,0	296,64

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 2.2). 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 2.2.2). Die dritte Gruppe bilden die spezialisierten Fremdfeld-Protektor (Schirmungstechnologie) (FFP) 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 [4]. 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 3.2.1 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.

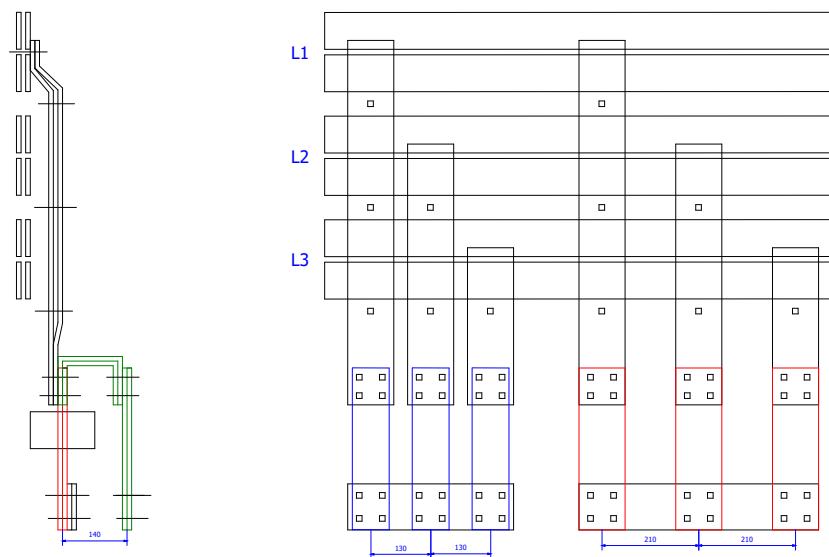


Abbildung 3.6: Technische Zeichnung des Kupferschienensystems in paralleler und dreiecksförmiger Anordnung

Abbildung 3.6 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 Schiene) beträgt der Abstand 130 mm und im rechten Teil der Anlage (rote Schiene) 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 3.4 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	130
	2500	2x 100x10	
	3000	3x 100x10	
3WA13	4000	4x 100x10	210
	5000	5x 120x10	

Parallelanordnung

Als Referenz fungiert die Parallelanordnung der drei Phasenleiter L1 L2 und L3 in einer Ebene. Dieser in Abbildung 3.7 gezeigte Aufbau bildet die realen Bedingungen in Siemens SIVACON S8 Schalfeldern nach. Die verwendeten Abstände entsprechen dabei den in Tabelle 3.4 aufgeführten Herstellervorgaben. In dieser Konfiguration ist der Prüfling hier beispielhaft der Messstromwandler Redur 20A1456.5FFP (5000 A) den maximalen magnetischen Fremdfeldern der benachbarten Leiter ausgesetzt.



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

Dreieckskonfiguration

Für die Realisierung der Dreiecksanordnung wurde der Aufbau gemäß Abbildung 3.8 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 3.2.5.

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 4.1 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 | Parallel und Dreieck

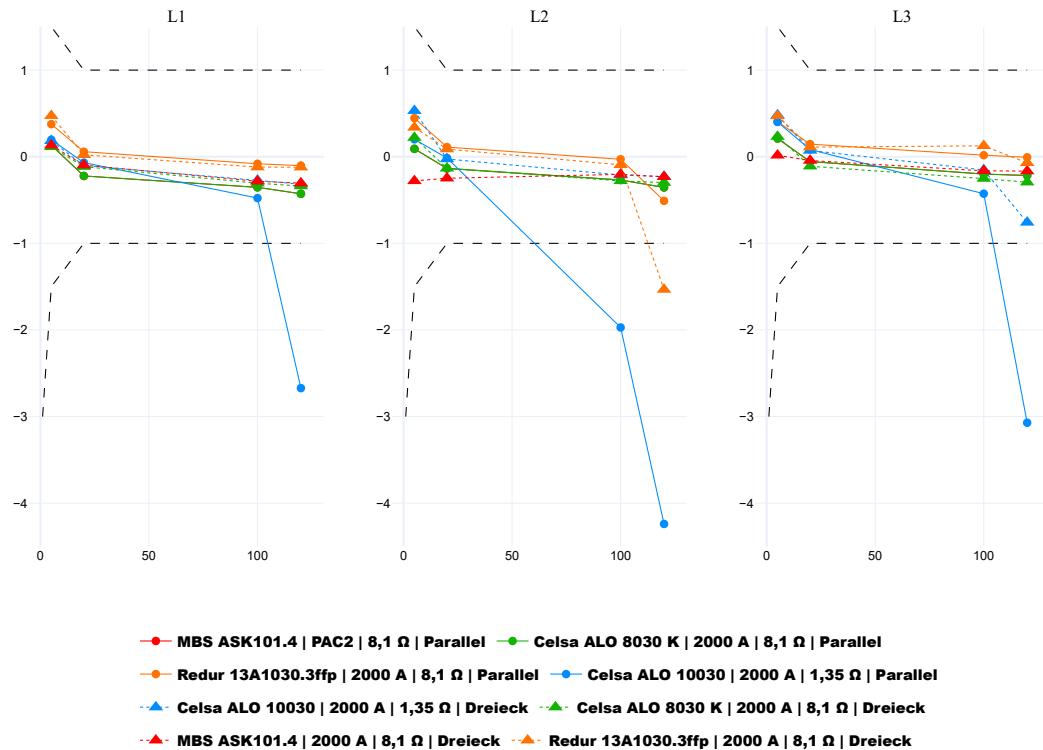


Diagramm 4.1: Zusammenfassender Vergleich der Leitergeometrien bei 2000 A

Eine bauliche Besonderheit weist der Redur 13A1030.ffp auf. Wie in Abbildung 4.1 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.

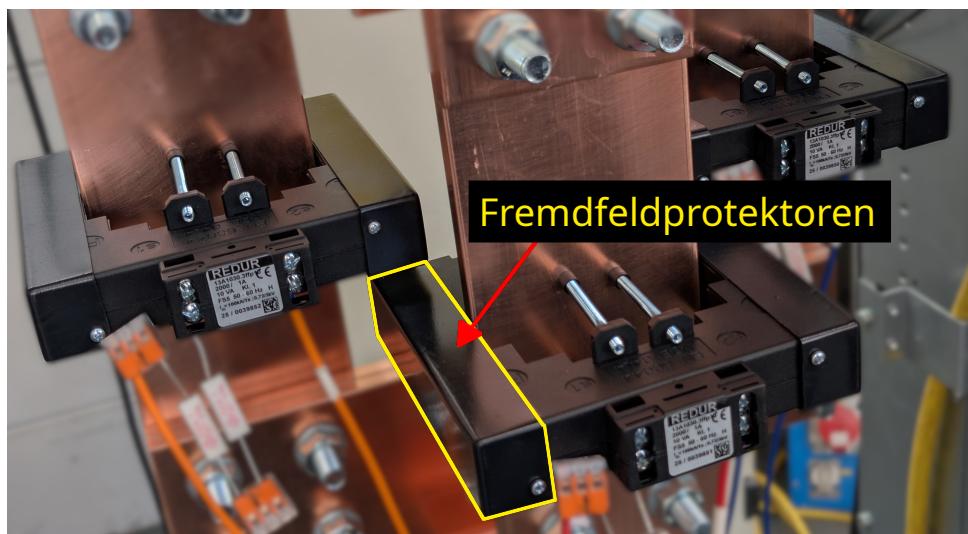


Abbildung 4.1: Seitliche Fremdfeldprotektoren am Redur Wandler

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

taillierten numerischen Ergebnisse für diesen Aufbau sind in Tabelle A.1 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 A.2 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 4.2 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.

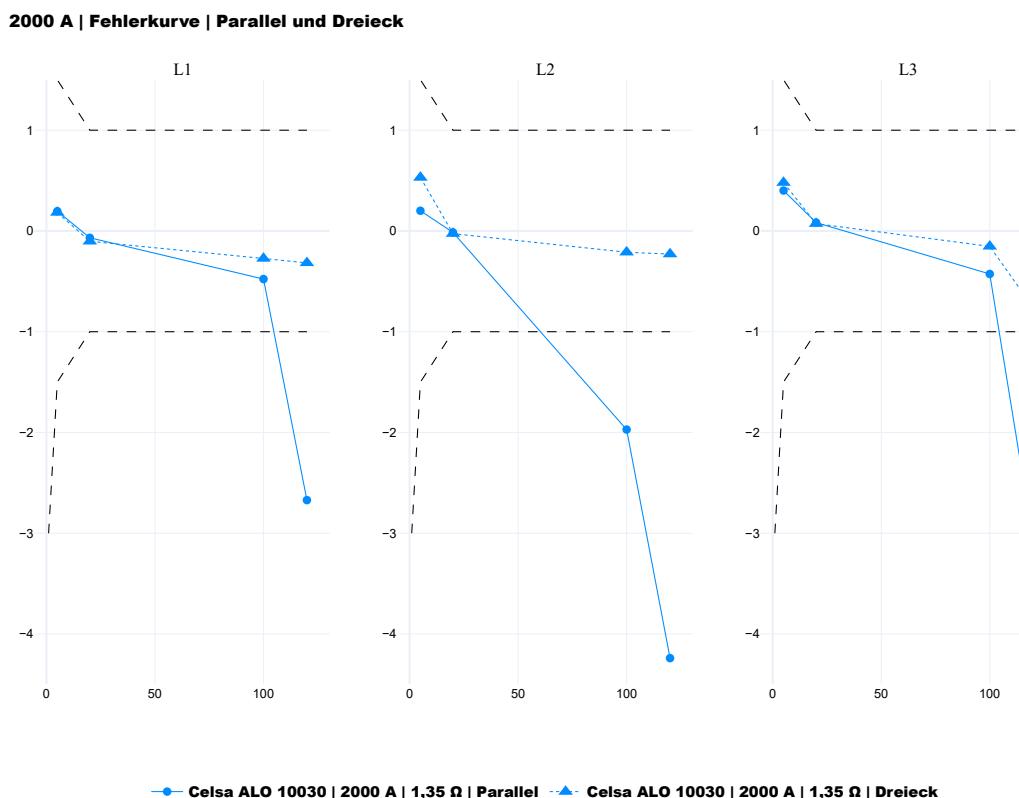


Diagramm 4.2: Messfehlerverlauf des Celsa ALO 10030 in Abhängigkeit vom Primärstrom

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 2.2.2 erläutert wird. Tabelle A.3 im Anhang fasst die Ergebnisse für dieses Mo-

dell zusammen. Selbst unter Vollast 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 A.4 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

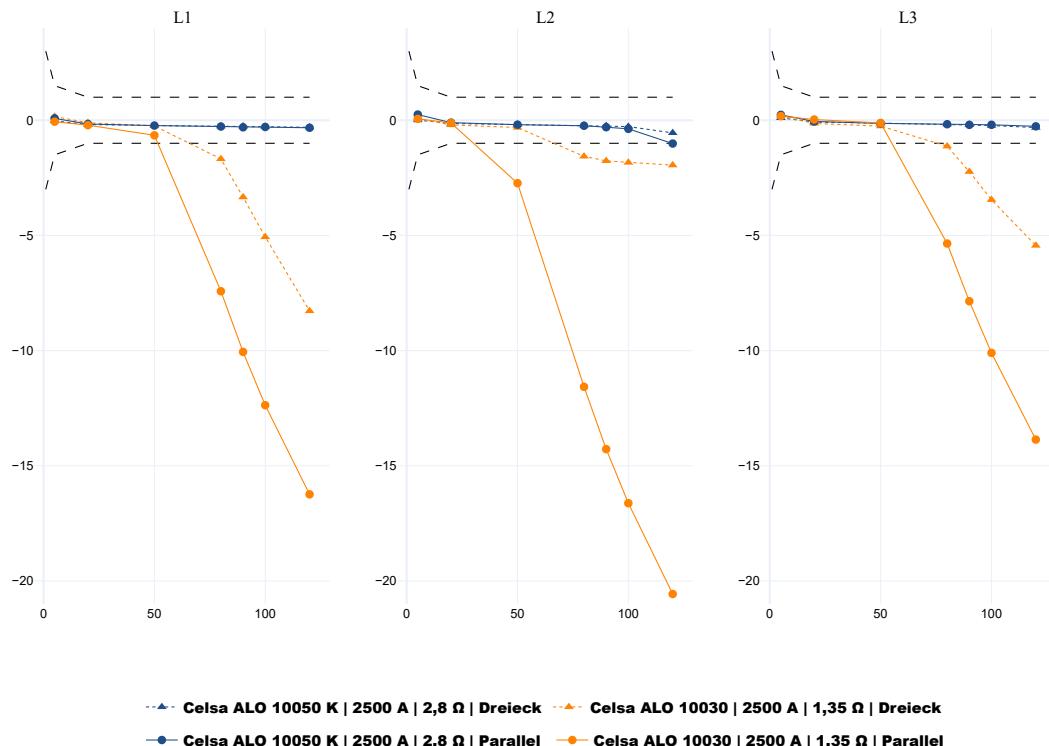


Diagramm 4.3: Zusammenfassender Vergleich der Leitergeometrien bei 2500 A

Die Messergebnisse des kompensierten Wandlers Celsa ALO 10050 K belegen dass dieser über den Großteil des Messbereichs eine hohe Genauigkeit aufweist (siehe Tabelle A.5 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 A.6 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 4.1 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 4.1.1 stützt diese Hypothese da bereits dort der Wandlertyp Sättigungstendenzen im Nennstrombereich zeigte. Bei dem hier untersuchten 2500 A-Modell wird anhand von Tabelle 4.1 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 17 in Abschnitt 2.3.4.2 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 4.2 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 4.4 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 A.7 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.

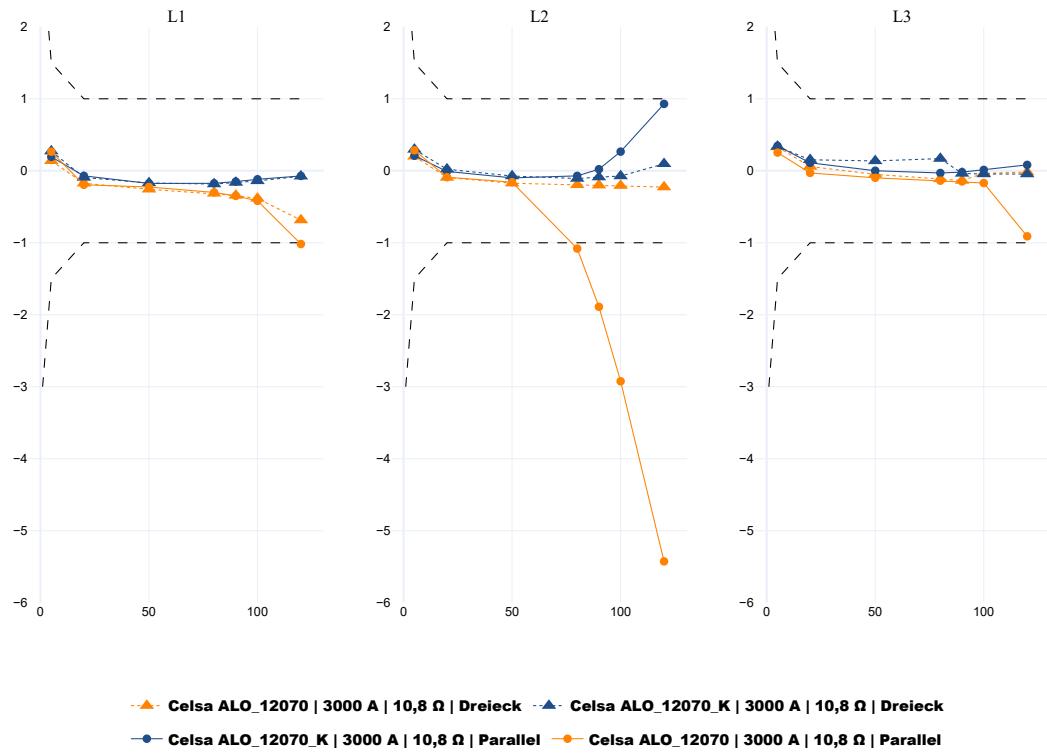
3000 A | Fehlerkurve | Parallel und Dreieck


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 4.3).

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 4.5 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.

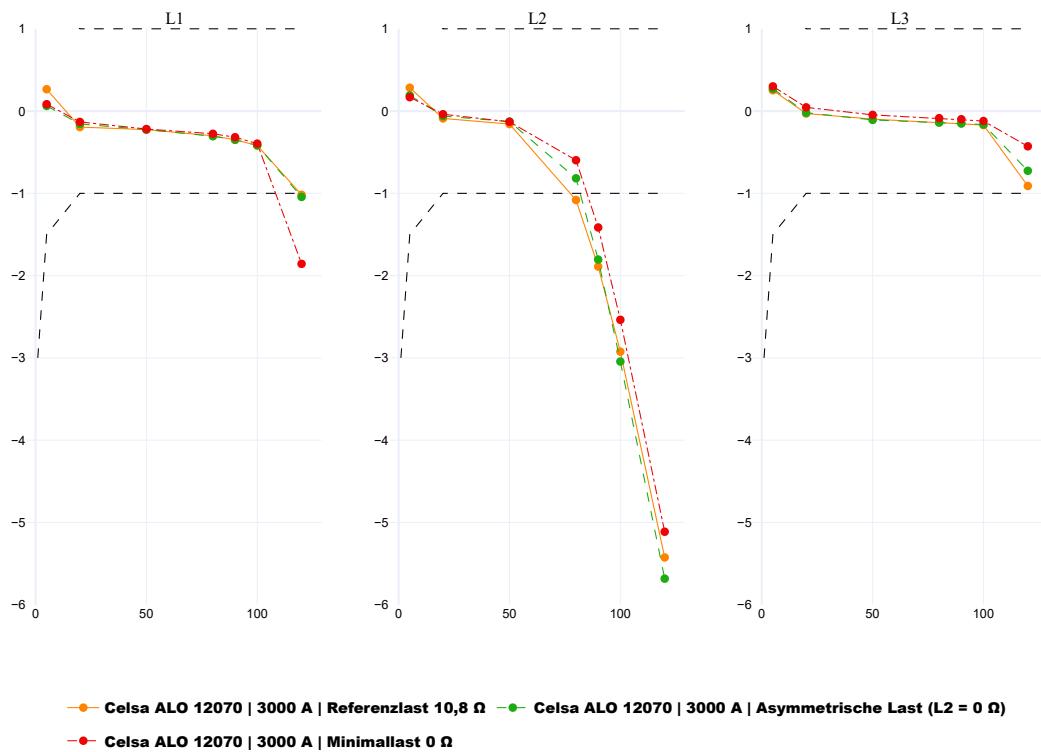
3000 A | Fehlerkurve | Parallelanordnung mit unterschiedlichen Bürdenwiderständen


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

Ein Vergleich zwischen der Referenzlast (Tabelle A.7 im Anhang) und der asymmetrischen Last (Tabelle A.9 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 A.10 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 4.6 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.

3000 A | Performance-Index | Ranking

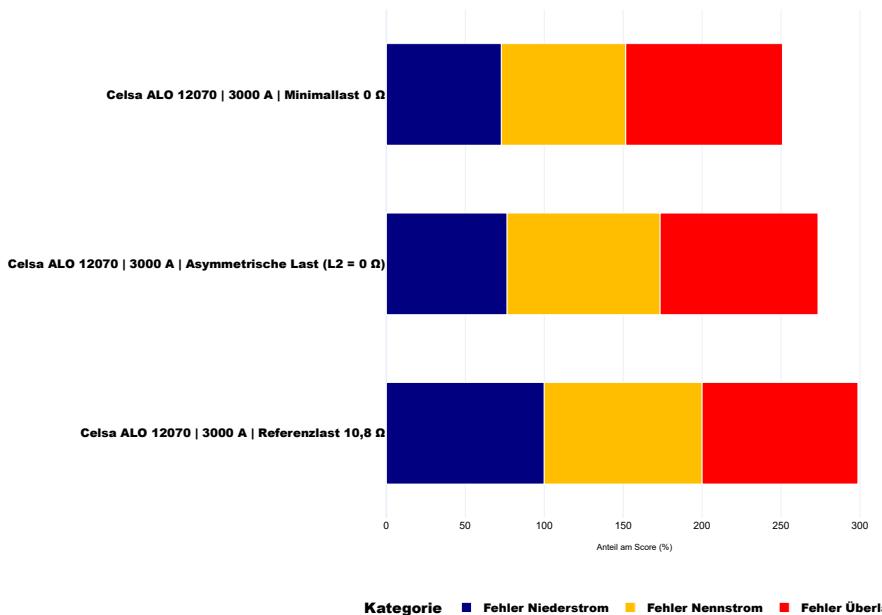


Diagramm 4.6: Ranking der Konfigurationen basierend auf dem Performance Index

4.1.4 Skalierung der Geometrieffekte bei 4000 A

Für diese Messreihe wurde der Phasenmittelabstand gemäß Tabelle 3.4 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 Bürdenwiderstände zu verifizieren.

Abbildung 4.7 skizziert einen Verlauf der qualitativ stark den Beobachtungen aus Abschnitt 4.1.3 ähnelt. Sowohl in der Parallelanordnung als auch in der Dreiecksanordnung stößt der Standardwandler Celsa ALO 12070 hier an seine Leistungsgrenzen wenngleich zu unterschiedlichen Zeitpunkten.

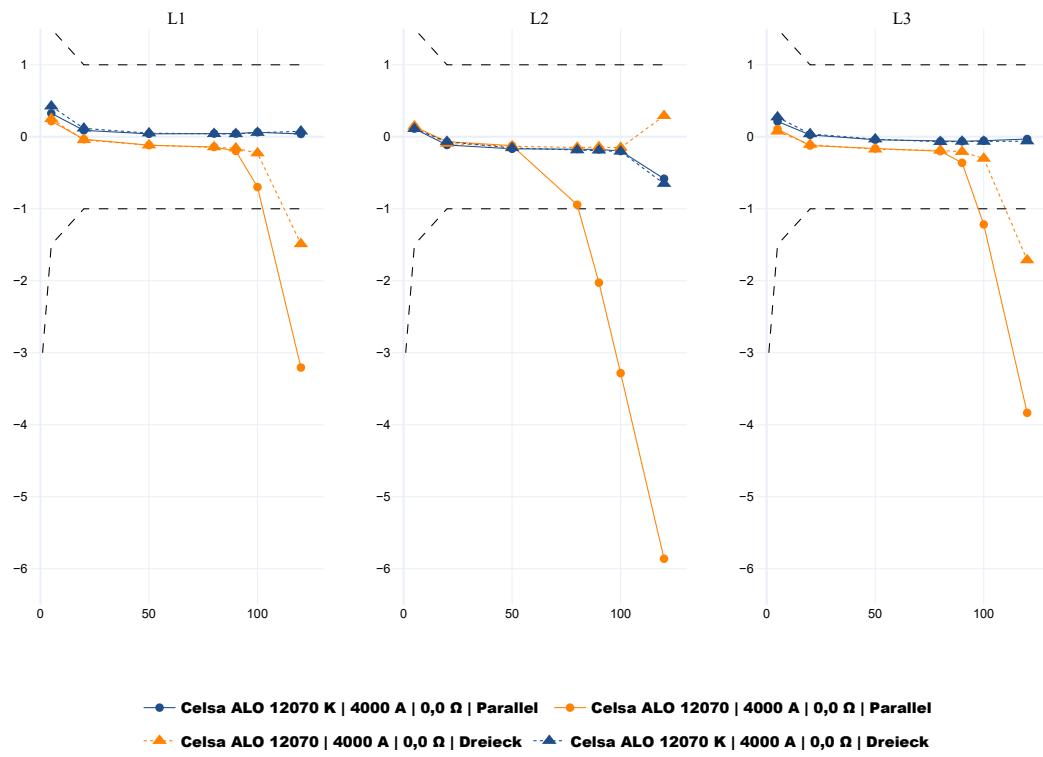
4000 A | Fehlerkurve | Parallel und Dreieck


Diagramm 4.7: Zusammenfassender Vergleich der Leitergeometrien bei 4000 A

Besonders augenfällig wird dies in der Parallelanordnung. Wie die Werte in Tabelle A.11 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 4.8 gibt einen Überblick über die Fehlerverläufe aller untersuchten Typen in beiden Geometrien.

Aufgabe

Ich verstehe nicht, warum die Messungen bei L1 so verschieden sind im Vergleich zu anderen Leitern.

5000 A | Fehlerkurve | Parallel und Dreieck

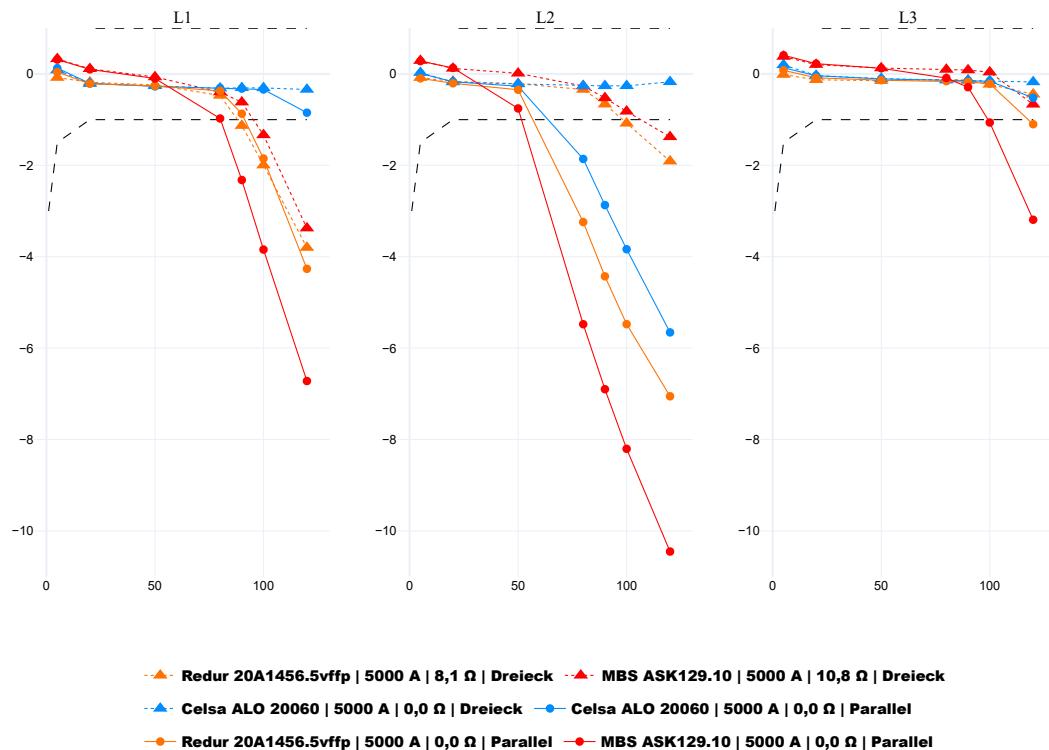


Diagramm 4.8: Zusammenfassender Vergleich der Leitergeometrien bei 5000 A

Bei der Analyse des MBS ASK129.10 (Details in Tabelle A.16 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 20A1456.5FFP dessen Messwerte in Tabelle A.15 (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 A.13 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 4.4 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.

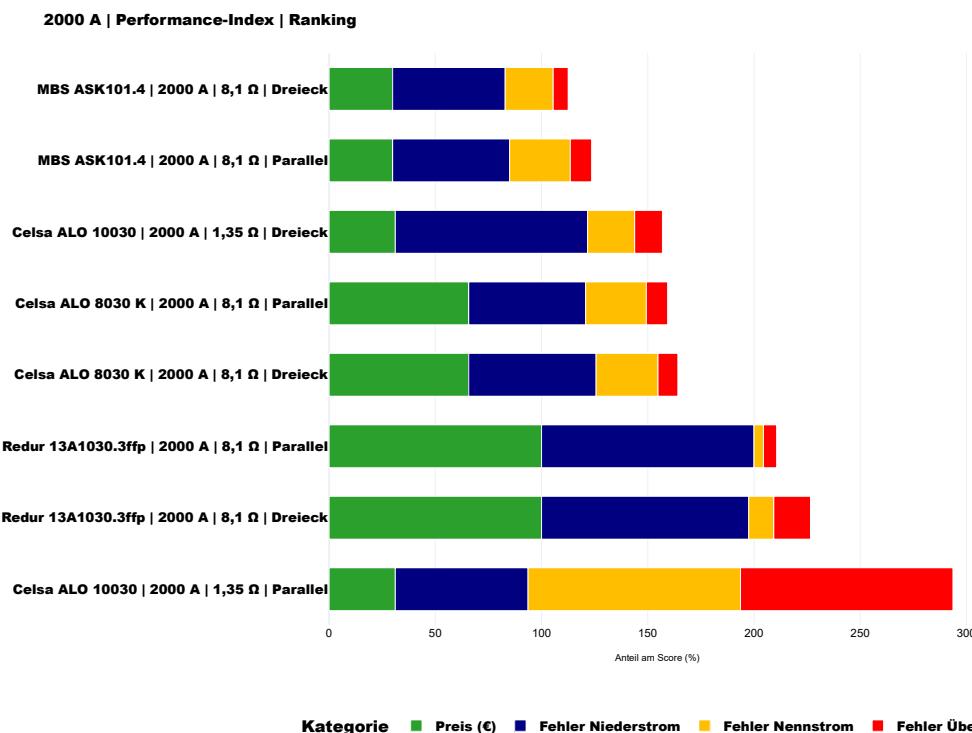


Diagramm 4.9: Wirtschaftliches Ranking der Wandlertechnologien bei 2000 A

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 4.9).

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 4.10). In diesem Strombereich rechtfertigt der technische Mehraufwand somit erstmals ökonomisch den höheren Preis.

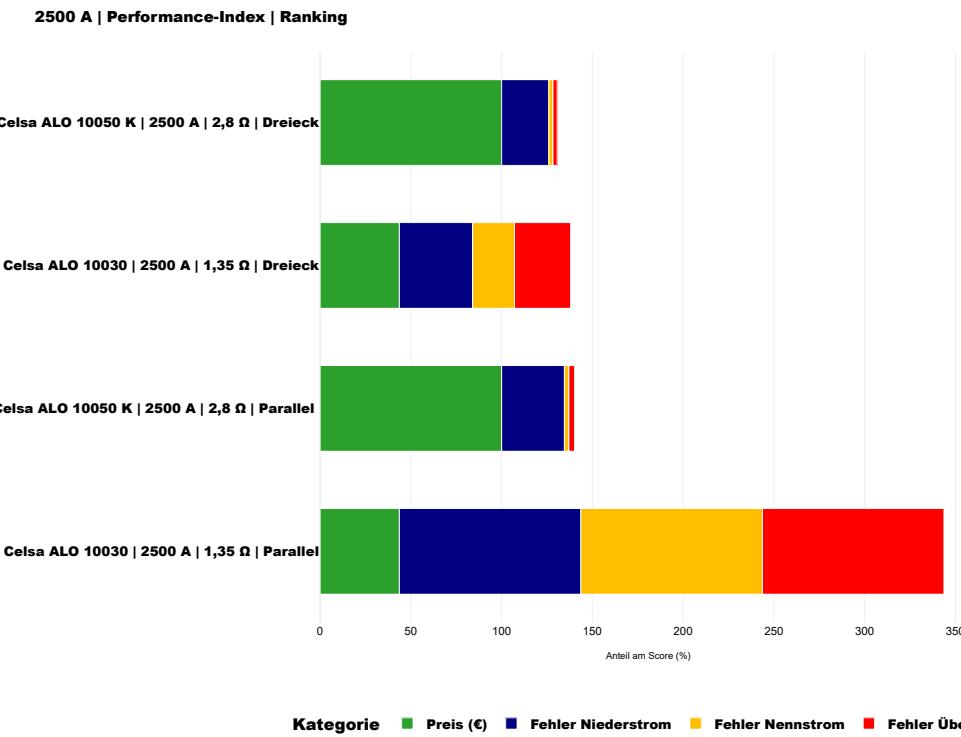


Diagramm 4.10: Wirtschaftliches Ranking der Wandlertechnologien bei 2500 A

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. 4.9). 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. [16]).

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. 4.9).

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. 4.10).

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.

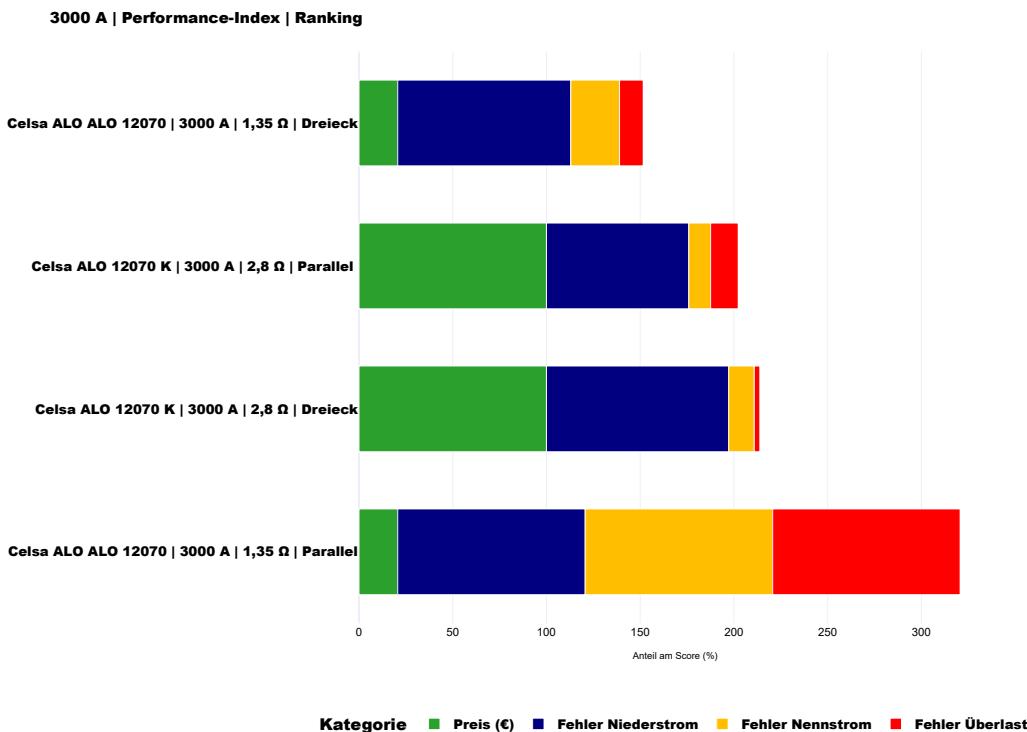


Diagramm 4.11: Wirtschaftliches Ranking der Wandlertechnologien bei 3000 A

Bei 3000 A (Abb. 4.11) 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. 4.12) 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.

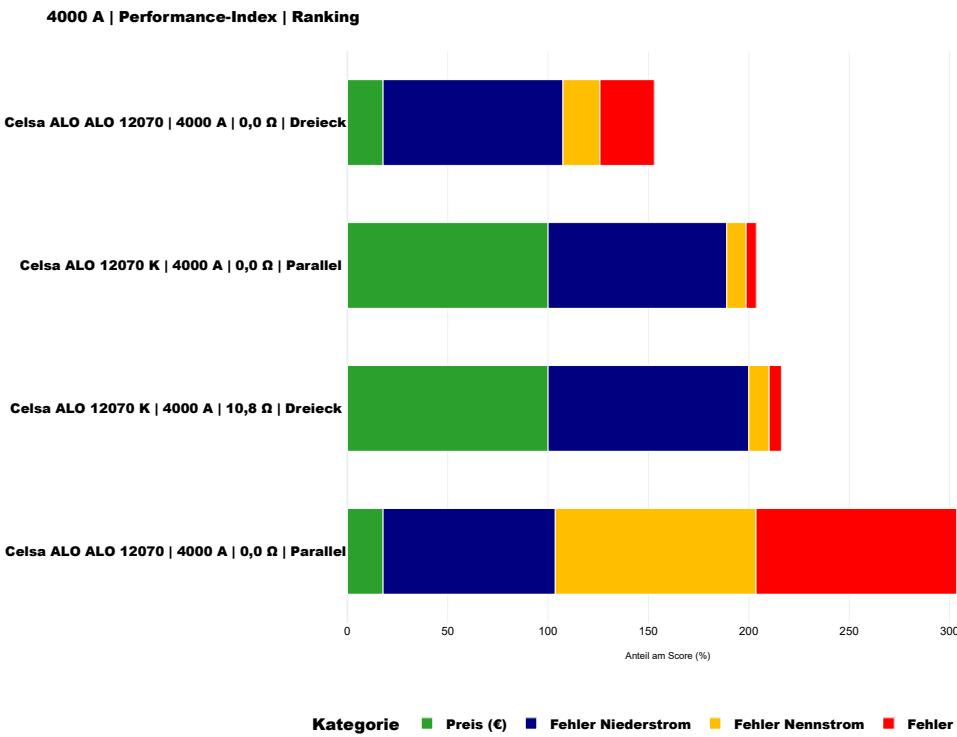


Diagramm 4.12: Wirtschaftliches Ranking der Wandlertechnologien bei 4000 A

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 (5000 A)

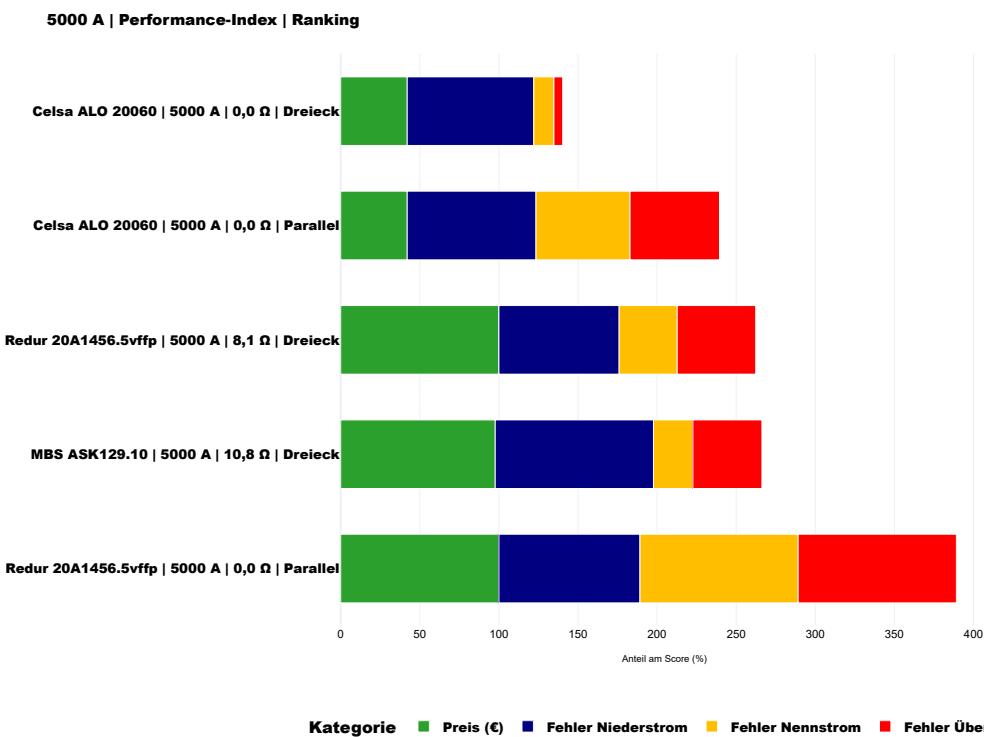


Diagramm 4.13: Wirtschaftliches Ranking der Wandlertechnologien bei 5000 A

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 4.14) und 5000 A (Abbildung 4.15), 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

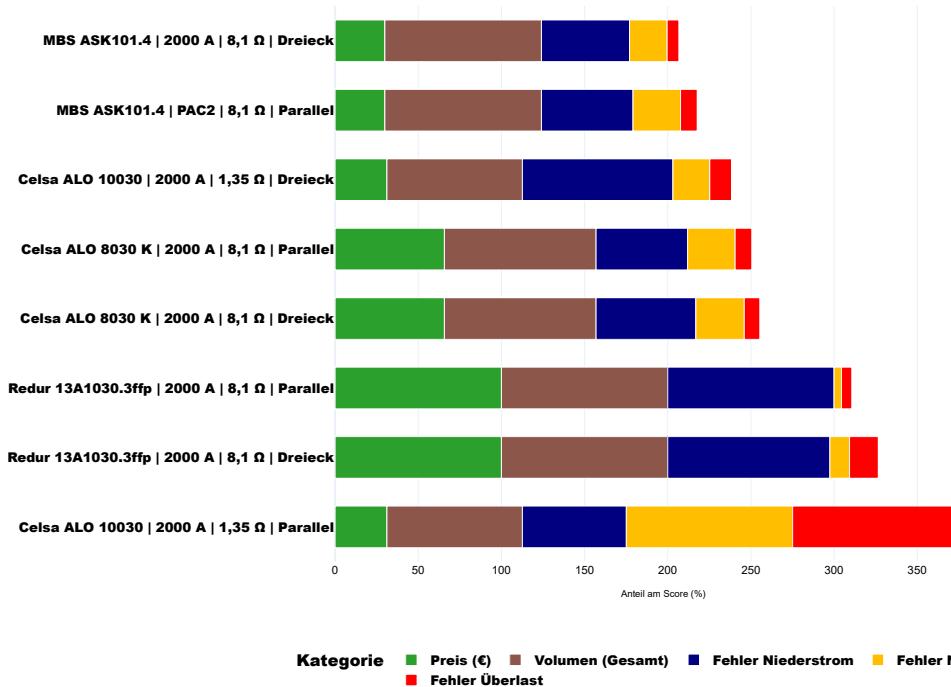


Diagramm 4.14: Wirtschaftliches Ranking unter Berücksichtigung des Volumens bei 2000 A

5000 A | Performance-Index | Ranking

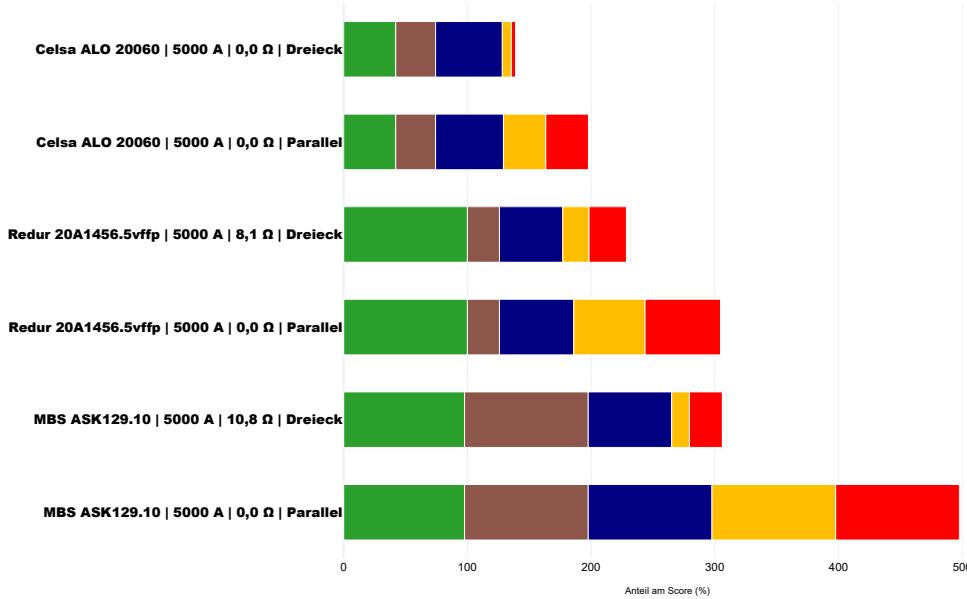


Diagramm 4.15: Wirtschaftliches Ranking unter Berücksichtigung des Volumens bei 5000 A

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 20A1456.5FFP, 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	12,67	5,56	80,02	42,06	140,31
Celsa ALO 20060 5000 A 0,0 Ω Parallel	59,44	56,56	81,37	42,06	239,43
Redur 20A1456.5FFP 5000 A 8,1 Ω Dreieck	36,74	49,56	75,99	100,00	262,29
MBS ASK129.10 5000 A 10,8 Ω Dreieck	24,90	43,63	100,00	97,69	266,23
Redur 20A1456.5FFP 5000 A 0,0 Ω Parallel	100,00	100,00	89,16	100,00	389,16

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

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

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

Messsystem	Preis (€)	Volumen (Gesamt)	Fehler Niederstrom	Fehler Nennstrom	Fehler Überlast	Fehler
Celsa ALO 20060 5000 A 0,0 Ω Dreieck	42,06	32,21	53,96	7,30	3,39	100,00
Celsa ALO 20060 5000 A 0,0 Ω Parallel	42,06	32,21	54,88	34,21	34,50	100,00
Redur 20A1456.5FFP 5000 A 8,1 Ω Dreieck	100,00	25,91	51,25	21,15	30,23	100,00
Redur 20A1456.5FFP 5000 A 0,0 Ω Parallel	100,00	25,91	60,12	57,56	60,99	100,00
MBS ASK129.10 5000 A 10,8 Ω Dreieck	97,69	100,00	67,44	14,33	26,61	100,00
MBS ASK129.10 5000 A 0,0 Ω Parallel	97,69	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

A SPS-Programmierung (Step7)

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

A.1 Datenbausteine

A.1.1 DB1

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:22:45
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \DB1 - <offline>

DB1 - <offline> - Deklarationssicht

"PAC1_Daten" Daten PAC3220 Einspeisung
Globaler Datenbaustein DB 1
Name: PAC1_DAT **Familie:** WANDLER
Autor: OliverS **Version:** 1.0
Bausteinversion: 2
Zeitstempel Code: 03.12.2025 08:53:01
Interface: 29.11.2025 17:23:20
Längen (Baustein / Code / Daten): 00202 00076 00000

Baustein: DB1 Rohdaten Messgerät PAC1 - Eingangsmessung

Adresse	Name	Typ	Anfangswert	Kommentar
0.0		STRUCT		
+0.0	I_L1	REAL	0.000000e+00	Strom Phase L1 [A]
+4.0	I_L2	REAL	0.000000e+00	Strom Phase L2 [A]
+8.0	I_L3	REAL	0.000000e+00	Strom Phase L3 [A]
+12.0	U_12	REAL	0.000000e+00	Spannung Phase L1 gegen L2 [V]
+16.0	U_23	REAL	0.000000e+00	Spannung Phase L2 gegen L3 [V]
+20.0	U_31	REAL	0.000000e+00	Spannung Phase L3 gegen L1 [V]
+24.0	CosPhi_L1	REAL	0.000000e+00	Leistungsfaktor CosPhi L1
+28.0	CosPhi_L2	REAL	0.000000e+00	Leistungsfaktor CosPhi L2
+32.0	CosPhi_L3	REAL	0.000000e+00	Leistungsfaktor CosPhi L3
+36.0	P_Wirk_L1	REAL	0.000000e+00	Wirkleistung L1 [kW]
+40.0	P_Wirk_L2	REAL	0.000000e+00	Wirkleistung L2 [kW]
+44.0	P_Wirk_L3	REAL	0.000000e+00	Wirkleistung L3 [kW]
+48.0	S_Schein_L1	REAL	0.000000e+00	Scheinleistung L1 [kVA]
+52.0	S_Schein_L2	REAL	0.000000e+00	Scheinleistung L2 [kVA]
+56.0	S_Schein_L3	REAL	0.000000e+00	Scheinleistung L3 [kVA]
+60.0	Q_Blind_L1	REAL	0.000000e+00	Blindleistung L1 [kvar]
+64.0	Q_Blind_L2	REAL	0.000000e+00	Blindleistung L2 [kvar]
+68.0	Q_Blind_L3	REAL	0.000000e+00	Blindleistung L3 [kvar]
+72.0	Frequenz	REAL	0.000000e+00	Netzfrequenz [Hz]
=76.0		END_STRUCT		

A.1.2 DB2

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:22:19
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \DB2 - <offline>

DB2 - <offline> - Deklarationssicht

"PAC2_Daten" Daten PAC4220 Prüfling
Globaler Datenbaustein DB 2
Name: PAC2_DAT **Familie:** WANDLER
Autor: OliverS **Version:** 1.0
Bausteinversion: 2
Zeitstempel Code: 03.12.2025 08:53:51
Interface: 29.11.2025 17:23:20
Längen (Baustein / Code / Daten): 00202 00076 00000

Baustein: DB2 Rohdaten Messgerät PAC2 - Ausgangsmessung
--

Adresse	Name	Typ	Anfangswert	Kommentar
0.0		STRUCT		
+0.0	I_L1	REAL	0.000000e+00	Strom Phase L1 [A]
+4.0	I_L2	REAL	0.000000e+00	Strom Phase L2 [A]
+8.0	I_L3	REAL	0.000000e+00	Strom Phase L3 [A]
+12.0	U_12	REAL	0.000000e+00	Spannung Phase L1 gegen L2 [V]
+16.0	U_23	REAL	0.000000e+00	Spannung Phase L2 gegen L3 [V]
+20.0	U_31	REAL	0.000000e+00	Spannung Phase L3 gegen L1 [V]
+24.0	CosPhi_L1	REAL	0.000000e+00	Leistungsfaktor CosPhi L1
+28.0	CosPhi_L2	REAL	0.000000e+00	Leistungsfaktor CosPhi L2
+32.0	CosPhi_L3	REAL	0.000000e+00	Leistungsfaktor CosPhi L3
+36.0	P_Wirk_L1	REAL	0.000000e+00	Wirkleistung L1 [kW]
+40.0	P_Wirk_L2	REAL	0.000000e+00	Wirkleistung L2 [kW]
+44.0	P_Wirk_L3	REAL	0.000000e+00	Wirkleistung L3 [kW]
+48.0	S_Schein_L1	REAL	0.000000e+00	Scheinleistung L1 [kVA]
+52.0	S_Schein_L2	REAL	0.000000e+00	Scheinleistung L2 [kVA]
+56.0	S_Schein_L3	REAL	0.000000e+00	Scheinleistung L3 [kVA]
+60.0	Q_Blind_L1	REAL	0.000000e+00	Blindleistung L1 [kvar]
+64.0	Q_Blind_L2	REAL	0.000000e+00	Blindleistung L2 [kvar]
+68.0	Q_Blind_L3	REAL	0.000000e+00	Blindleistung L3 [kvar]
+72.0	Frequenz	REAL	0.000000e+00	Netzfrequenz [Hz]
=76.0		END_STRUCT		

A.1.3 DB51

SIMATIC TempPruef\
SIMATIC 300(1)\IM151-8 PN/DP CPU\...\DB51 16.12.2025 10:21:08

DB51 - <offline>

"iDB_Wandler_Kennlinie"
Instanzdatenbaustein für Kennlinien-Auswertung FB1

Typ des Datenbausteins:

Instanzdatenbaustein zu FB1

Name:

SEQ_CURR

Familie:

WANDLER

Autor:

OliverS

Version:

1.0

Bausteinversion:

2

Längen (Baustein / Daten):

00184 / 00038

Zeitstempel

04.12.2025 10:24:41

Code:

04.12.2025 10:23:12

Schnittstelle:

Kommentar:

Instanzdatenbaustein für Kennlinien-Auswertung FB1

Adresse	Deklaration	Name	Typ	Anfangswert	Aktualwert	Kommentar
0.0	in	I_Max_Vorgabe	REAL	0.000000e+00	0.000000e+00	Referenzwert 100% (Wandler-Nennstrom) [A]
4.0	in	I_Istwert_L1	REAL	0.000000e+00	0.000000e+00	Gemessener Iststrom Phase L1 [A]
8.0	in	I_Istwert_L2	REAL	0.000000e+00	0.000000e+00	Gemessener Iststrom Phase L2 [A]
12.0	in	I_Istwert_L3	REAL	0.000000e+00	0.000000e+00	Gemessener Iststrom Phase L3 [A]
16.0	in	Toleranz	REAL	1.000000e+01	1.000000e+01	Zulässiges Fenster +/- für "Strom stabil" [A]
20.0	in	Messzeit	S5TIME	S5T#5M	S5T#5M	Verweilzeit pro Prüfstufe (z.B. 5min)
22.0	out	Sollwert_Out	REAL	0.000000e+00	0.000000e+00	Berechneter Sollwert für den PID-Regler [A]
26.0	out	Schritt_Anzeige	INT	0	0	Aktueller Schritt für Visu (10=5%, 20=20...)
28.0	out	Fertig	BOOL	FALSE	FALSE	Status: Kennlinie erfolgreich beendet
30.0	in_out	Start	BOOL	FALSE	FALSE	Startbefehl (Flanke positiv)
30.1	in_out	Reset	BOOL	FALSE	FALSE	Bricht Ablauf ab und setzt Schrittfolge zurück
32.0	stat	Schritt_old	INT	0	0	Flankenauswertung: Schritt im letzten Zyklus
34.0	stat	Schritt_new	INT	0	0	Aktueller Schritt (State Machine Variable)
36.0	stat	Reset_Fenster_gemessen	BOOL	FALSE	FALSE	Hilfsmerker zum Neustart des Mess-Timers
36.1	stat	FP_Start_Reset	BOOL	FALSE	FALSE	

A.1.4 DB52

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 08:50:43
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \DB52 - <offline>

DB52 - <offline> - Deklarationssicht

"DB_WandlerMess"
Globaler Datenbaustein DB 52
Name: SEQ_DATA **Familie:** WANDLER
Autor: OliverS **Version:** 1.0
Bausteinversion: 2
Zeitstempel Code: 16.12.2025 08:14:35
Interface: 04.12.2025 10:26:58
Längen (Baustein / Code / Daten): 00130 00022 00000

Baustein: DB52

Adresse	Name	Typ	Anfangswert	Kommentar
0.0		STRUCT		
+0.0	Start	BOOL	FALSE	Startet den Messablauf
+0.1	Reset	BOOL	FALSE	Setzt die Schrittkette zurück
+0.2	Fertig	BOOL	FALSE	Status: Messvorgang erfolgreich beendet
+2.0	Spare	DWORD	DW#16#0	Reserve für zukünftige Erweiterungen
+6.0	I_Primaer	REAL	0.000000e+00	Nennwert oder Messwert des Primärstroms [A]
+10.0	I_Tolleranz	REAL	0.000000e+00	Zulässige Abweichung für den Stromwert (+/-)
+14.0	Sollwert_Regler	REAL	0.000000e+00	Vorgabewert für den Stromregler
+18.0	Messzeit	S5TIME	S5T#5M	Dauer des Messvorgangs (Aktuell: 5 Min)
+20.0	Aktueller Schritt	INT	0	Nummer des aktuellen Schritts in der Schrittkette
=22.0		END_STRUCT		

A.2 Funktionsbausteine und Funktionen

A.2.1 FB1

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:19:02
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FB1 - <offline>

FB1 - <offline>

"Wandler_Kennlinie" Ablauf Schritt kette
Name: SEQ_CURR **Familie:** PRUEF
Autor: OS **Version:** 0.1
Bausteinversion: 2
Zeitstempel Code: 16.12.2025 10:18:12
Interface: 04.12.2025 10:23:12
Längen (Baustein / Code / Daten): 01344 01092 00040

Name	Datentyp	Adresse	Anfangswert	Kommentar
IN		0.0		
I_Max_Vorgabe	Real	0.0	0.000000e+00	Referenzwert 100% (Wandler-Nennstrom) [A]
I_Istwert_L1	Real	4.0	0.000000e+00	Gemessener Iststrom Phase L1 [A]
I_Istwert_L2	Real	8.0	0.000000e+00	Gemessener Iststrom Phase L2 [A]
I_Istwert_L3	Real	12.0	0.000000e+00	Gemessener Iststrom Phase L3 [A]
Toleranz	Real	16.0	1.000000e+01	Zulässiges Fenster +/- für "Strom stabil" [A]
Messzeit	SSTime	20.0	SST#5M	Verweilzeit pro Prüfstufe (z.B. 5min)
OUT		0.0		
Sollwert_Out	Real	22.0	0.000000e+00	Berechneter Sollwert für den PID-Regler [A]
Schritt_Anzeige	Int	26.0	0	Aktueller Schritt für Visu (10=5%, 20=20%...)
Fertig	Bool	28.0	FALSE	Status: Kennlinie erfolgreich beendet
IN_OUT		0.0		
Start	Bool	30.0	FALSE	Startbefehl (Flanke positiv)
Reset	Bool	30.1	FALSE	Bricht Ablauf ab und setzt Schritt kette zurück
STAT		0.0		
Schritt_old	Int	32.0	0	Flankenauswertung: Schritt im letzten Zyklus
Schritt_new	Int	34.0	0	Aktueller Schritt (State Machine Variable)
Reset_Fenster_gemessen	Bool	36.0	FALSE	Hilfsmerker zum Neustart des Mess-Timers
FP_Start_Reset	Bool	36.1	FALSE	
TEMP		0.0		
Soll_Internal	Real	0.0		Zwischenspeicher für den aktuell berechneten Sollwert [A]
Limit_Min	Real	4.0		Berechnete Untergrenze des Toleranzfensters
Fenster_Stabil	Bool	8.0		Status: Strom ist stabil innerhalb der Toleranz
Limit_Max	Real	10.0		Berechnete Obergrenze des Toleranzfensters
Im_Fenster_Start	Bool	14.0		Startbedingung: Stromwert liegt nahe 0 A
Im_Fenster_Schritt_kette	Bool	14.1		Sammelanzeige: Strom ist stabil in der Schritt kette
L1_im_Bereich	Bool	14.2		Hilfsbit: Phase L1 liegt stabil im Toleranzbereich
L2_im_Bereich	Bool	14.3		Hilfsbit: Phase L2 liegt stabil im Toleranzbereich
L3_im_Bereich	Bool	14.4		Hilfsbit: Phase L3 liegt stabil im Toleranzbereich
Fenster_gemessen	Bool	14.5		Timer abgelaufen: Messzeit für aktuellen Schritt erfüllt
Im_Fenster_Schritt_kett_1	Bool	14.6		Hilfsvariable zur Verzögerung (Strom stabil)
Fenster_gemessen_1	Bool	14.7		Hilfsvariable zur Verzögerung (Messzeit abgelaufen)

A.2.2 FB1

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:19:03
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FB1 - <offline>

Baustein: FB1 Ablaufsteuerung: Stromkennlinie (5%, 20%, 100%, 120%)

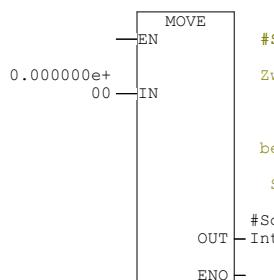
Funktion: Dieser Baustein steuert die automatische Kennlinienaufnahme für einen Stromwandler. Er fährt sequenziell verschiedene Prozentstufen des Nennstroms an (5%, 20%, 50%, 80%, 90%, 100%, 120%), prüft, ob der Strom im Toleranzfenster liegt, hält diesen für eine definierte Messzeit und schaltet dann weiter.

Ablauf:

1. Idle: Warten auf Start.
2. Rampe: Anfahren der Stufen.
3. Messung: Halten der Stufe für Messzeit (sobald Strom stabil).
4. Ende: Abschalten auf 0% und Fertigmeldung.

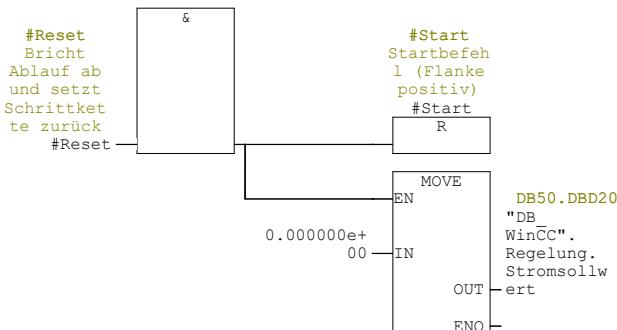
Netzwerk: 1 Temp-Variablen initialisieren

Sicherstellen, dass temporäre Variablen zu Zyklusbeginn definiert sind.



Netzwerk: 2 Reset / Not-Abbruch

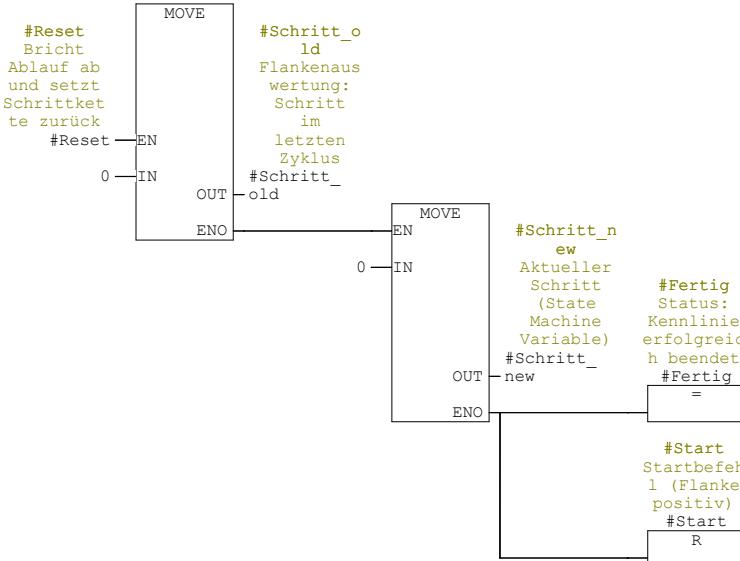
Wenn der Eingang #Reset True ist, wird der Schrittzähler hart auf 0 gesetzt und der Startbefehl zurückgenommen.



A.2.3 FB1

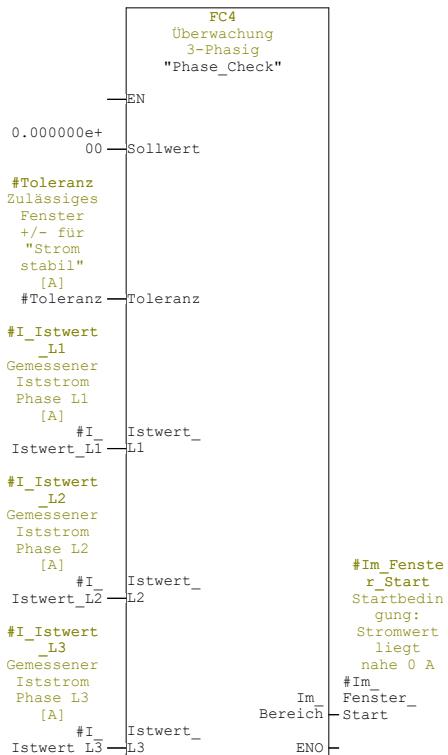
SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:19:03
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FB1 - <offline>

Netzwerk: 3 Reset / Not-Abbruch
Wenn der Eingang #Reset True ist, wird der Schrittzähler hart auf 0 gesetzt und der Startbefehl zurückgenommen



Netzwerk: 4 Überwachung Nullstrom (Startbedingung)

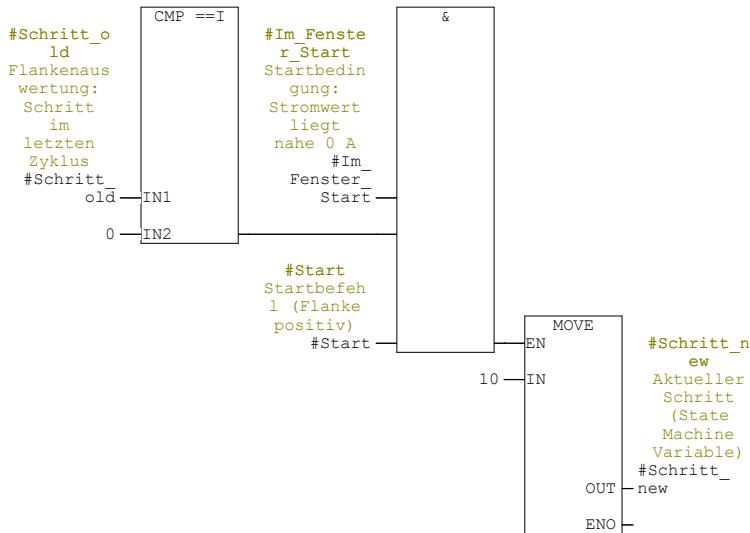
Prüft mittels FC4, ob vor dem Start alle Ströme nahe 0A sind (Sicherheit, dass keine Last anliegt). Setzt #Im_Fenster_Start.



A.2.4 FB1

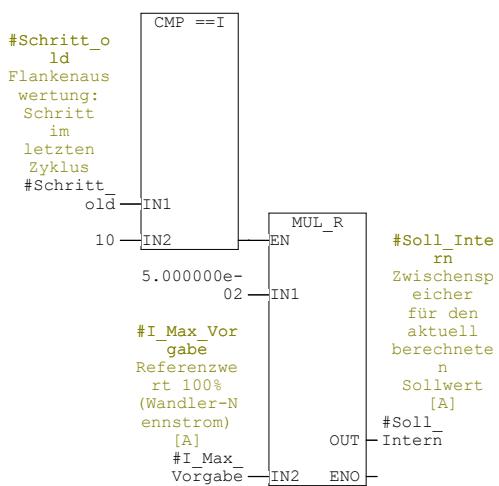
SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:19:03
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FB1 - <offline>

Netzwerk: 5 Transition IDLE -> START (Schritt 0 -> 10)
Wenn Schritt 0 aktiv ist, die Startbedingungen erfüllt sind und #Start gedrückt wird -> Setze Schritt 10.



Netzwerk: 6 Schritt 10: Berechnung Sollwert 5%

Wenn sich die Schrittfolge in Schritt 10 befindet, wird der Sollwert für die erste Prüfstufe berechnet. Hierfür wird der maximale Vorgabewert (Nennstrom) mit dem Faktor 0,05 multipliziert, um 5% der Nennlast als Führungsgröße für den Regler vorzugeben.

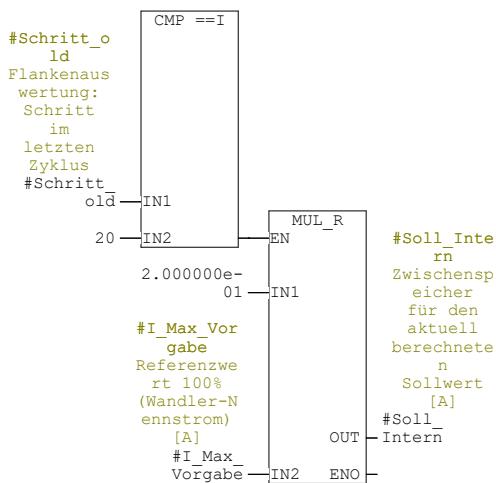


A.2.5 FB1

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:19:03
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FB1 - <offline>

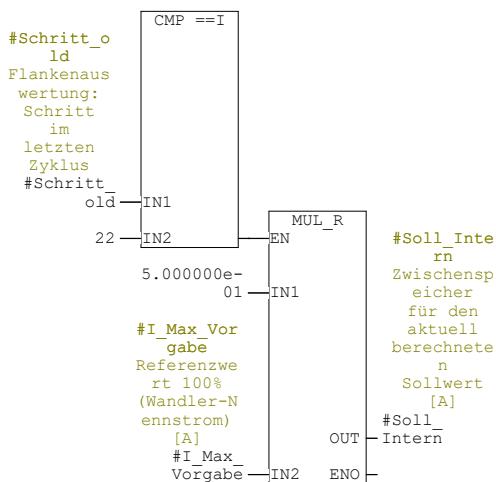
Netzwerk: 7 Schritt 20: Berechnung Sollwert 20%

Sobald die Schrittfolge in den Schritt 20 wechselt, wird der Sollwert für die zweite Stufe ermittelt. Dabei wird der eingestellte Nennstrom mit dem Faktor 0,20 multipliziert, sodass der Regler nun 20% der Last anfährt.



Netzwerk: 8 Schritt 22: Berechnung Sollwert 50%

In diesem Schritt (Schritt 22) erfolgt die Vorgabe für die halbe Nennlast. Der interne Sollwert wird berechnet, indem der maximale Vorgabewert mit 0,50 multipliziert wird, was einer Stromstärke von 50% entspricht.

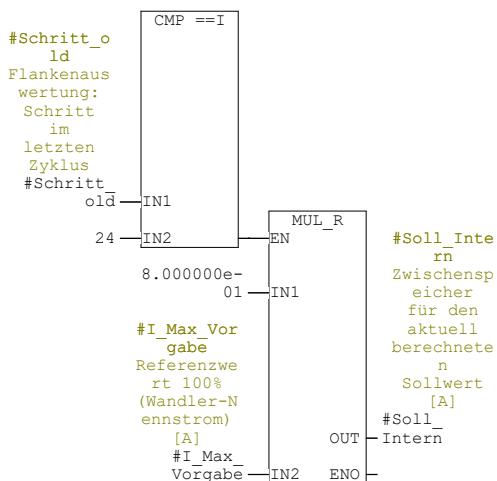


A.2.6 FB1

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:19:03
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FB1 - <offline>

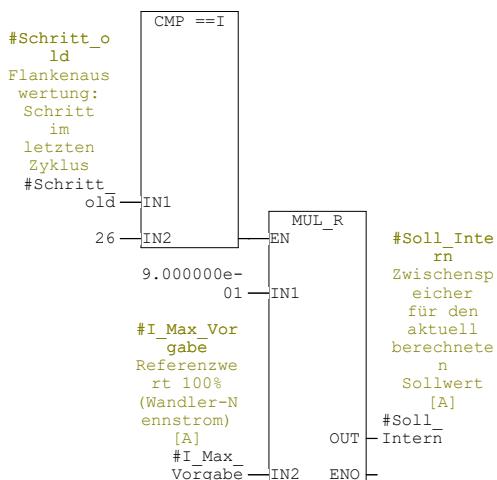
Netzwerk: 9 Schritt 24: Berechnung Sollwert 80%

Wenn Schritt 24 aktiv ist, wird der Sollwert auf 80% der Nennleistung angehoben.
Dazu wird der Nennstrom-Parameter mit dem Faktor 0,80 verrechnet und als neue Führungsgröße an den Regler übergeben.



Netzwerk: 10 Schritt 26: Berechnung Sollwert 90%

Im Schritt 26 wird der Prüfstrom auf 90% erhöht, um sich der Nennlast anzunähern. Die Berechnung erfolgt durch Multiplikation des maximalen Vorgabewerts mit dem Faktor 0,90.

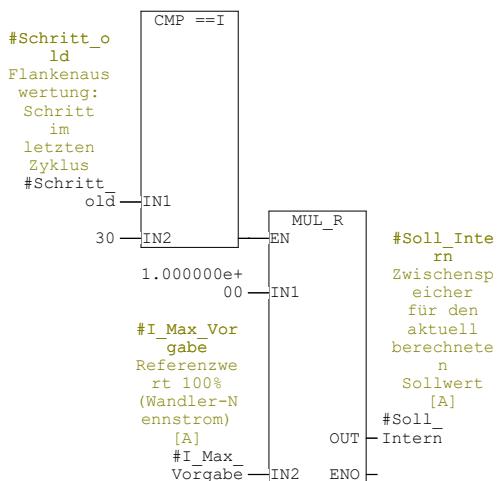


A.2.7 FB1

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:19:04
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FB1 - <offline>

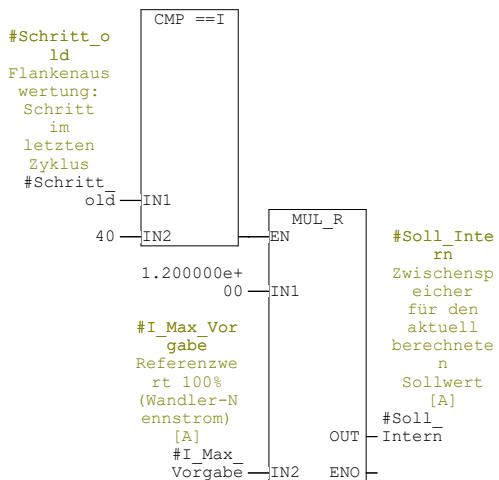
Netzwerk: 11 Schritt 30: Berechnung Sollwert 100% (Nennstrom)

Wenn die Schrittfolge Schritt 30 erreicht hat, wird die volle Nennlast geprüft.
Der Sollwert entspricht hierbei exakt dem konfigurierten Nennstrom (Faktor 1,0),
wodurch der Regler auf 100% Leistung eingestellt wird.



Netzwerk: 12 Schritt 40: Berechnung Sollwert 120% (Überlast)

Für die Überlastprüfung in Schritt 40 wird der Sollwert über das Nennmaß hinaus erhöht. Der Nennstrom wird mit dem Faktor 1,20 multipliziert, um 120% des Stroms als Sollwert vorzugeben.

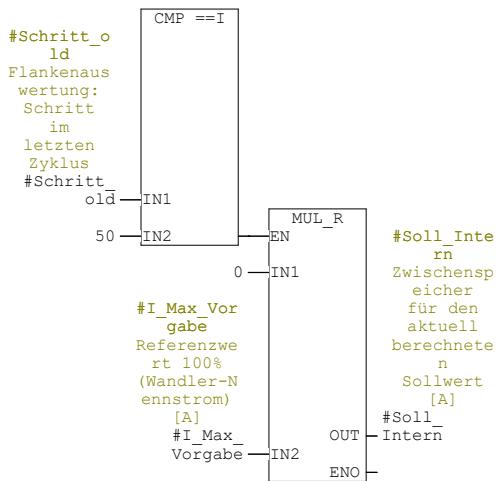


A.2.8 FB1

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:19:04
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FB1 - <offline>

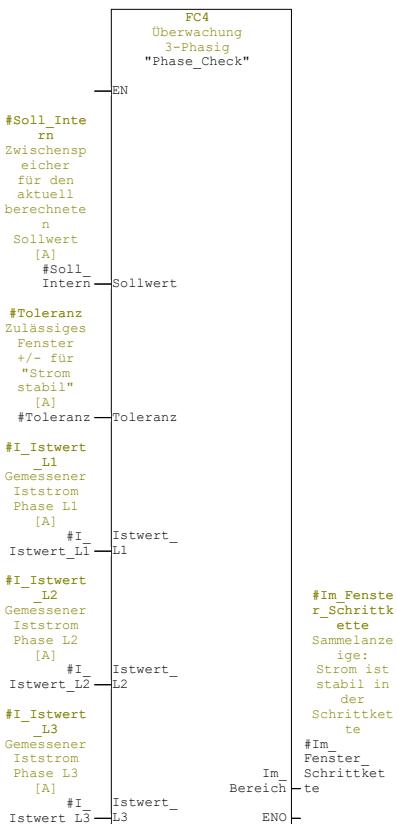
Netzwerk: 13 Schritt 50: Berechnung Sollwert 0% (Rampe Ab)

Zum Abschluss des Zyklus in Schritt 50 wird der Sollwert wieder auf 0 A gesetzt (Multiplikation mit 0,0). Dies dient dazu, den Strom kontrolliert abzufahren (Rampe ab), bevor die Prüfung als beendet gemeldet wird.



Netzwerk: 14 Toleranzprüfung (FC4)

Vergleicht die Istwerte (L1, L2, L3) mit dem aktuellen #Soll_Internal +/- #Toleranz. Das Ergebnis #Im_Fenster_Schritt_kette wird TRUE, wenn alle Phasen stabil sind.



A.2.9 FB1

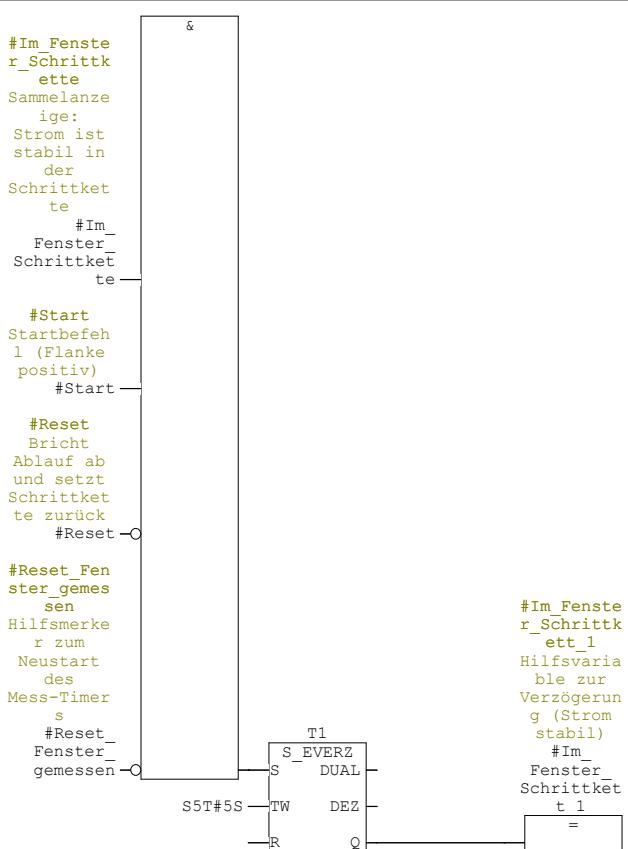
SIMATIC

300(1)\IM151-8 PN/DP CPU\...\FB1 - <offline>

16.12.2025 10:19:04

Netzwerk: 15 Entprellung / Einschaltverzögerung

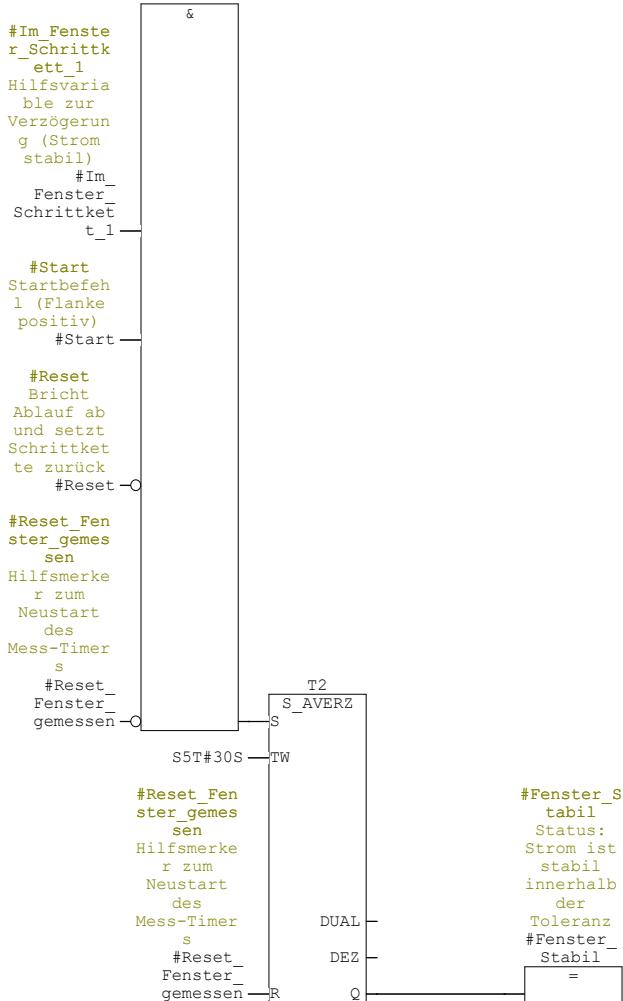
Timer T1 und T2 filtern das "Im Fenster"-Signal, um bei kurzem Rauschen nicht sofort die Messzeit zu starten.



A.2.10 FB1

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:19:04
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FB1 - <offline>

Netzwerk: 16	Entprellung / Einschaltverzögerung
Timer T1 und T2 filtern das "Im Fenster"-Signal, um bei kurzem Rauschen nicht sofort die Messzeit zu starten.	

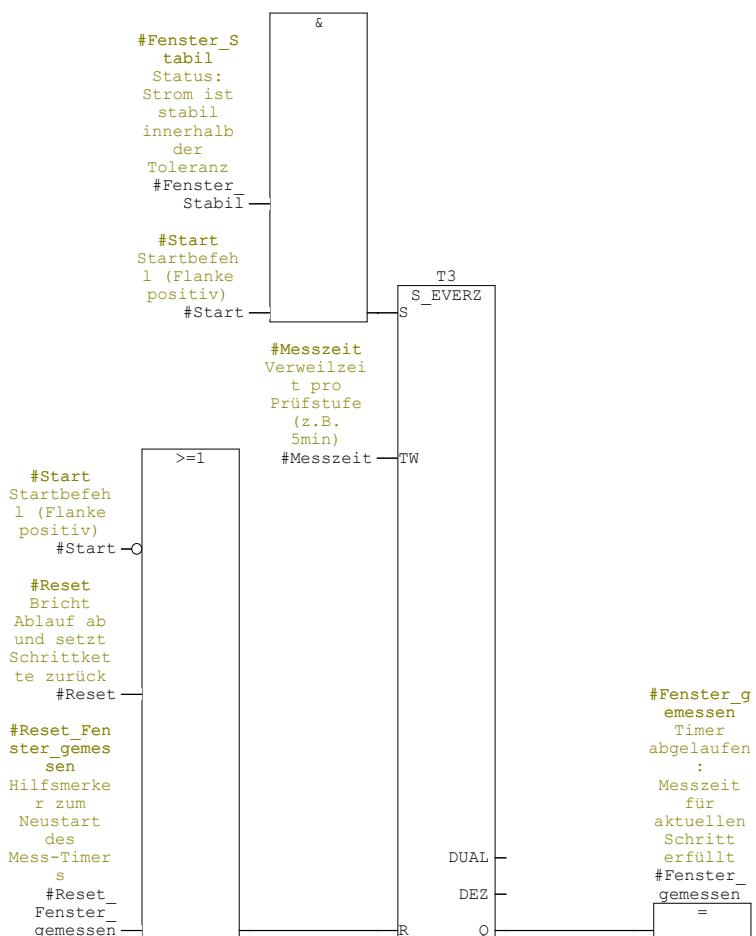


A.2.11 FB1

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:19:04
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FB1 - <offline>

Netzwerk: 17 Timer T3: Haltezeit

Dies ist der Haupt-Timer. Er läuft, sobald der Strom stabil im Fenster ist (#Fenster_Stabil). Wenn er abläuft (#Messzeit erreicht), wird #Fenster_gemessen TRUE. Das ist das Signal zum Weiterschalten.

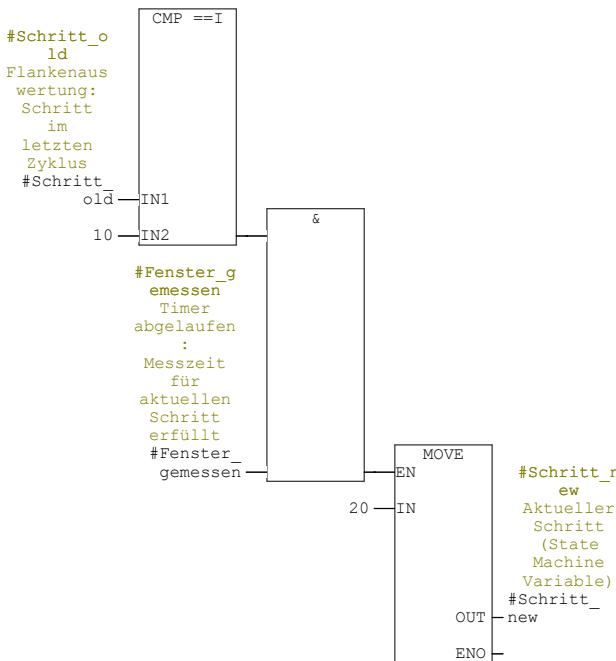


A.2.12 FB1

SIMATIC | TempPruef\SIMATIC | 16.12.2025 10:19:05
 300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FB1 - <offline>

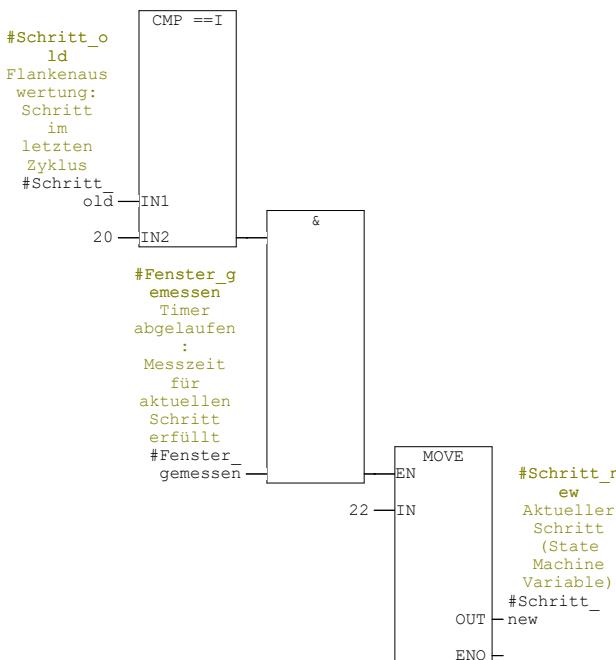
Netzwerk: 18 Transition 10 -> 20 (5% fertig)

Wenn Schritt 10 aktiv ist UND die Messzeit abgelaufen ist (#Fenster_gemessen), weiterschalten zu Schritt 20.



Netzwerk: 19 Transition 20 -> 22 (20% fertig)

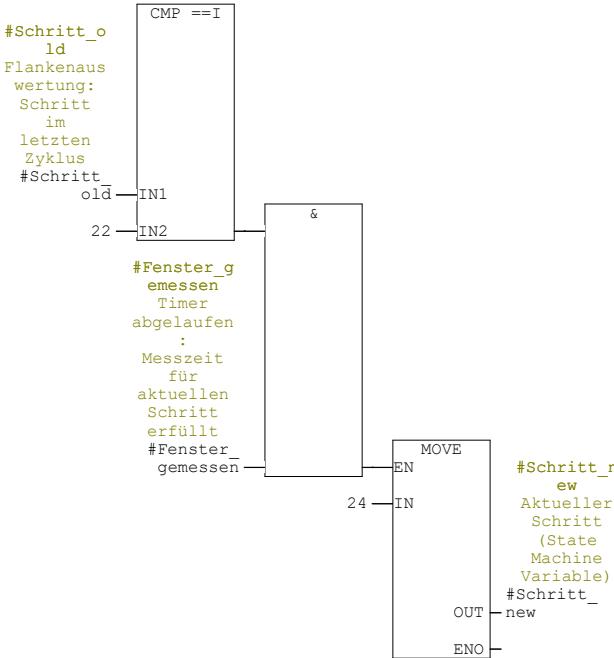
Wenn Schritt 20 aktiv ist UND die Messzeit abgelaufen ist (#Fenster_gemessen), weiterschalten zu Schritt 22.



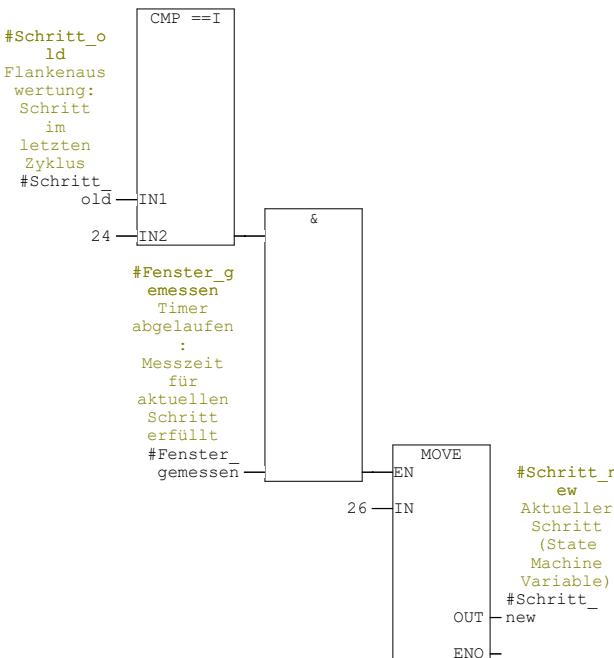
A.2.13 FB1

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:19:05
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FB1 - <offline>

Netzwerk: 20 Transition 22 -> 24 (50% fertig)
Wenn Schritt 22 aktiv ist UND die Messzeit abgelaufen ist (#Fenster_gemessen), weiterschalten zu Schritt 24.



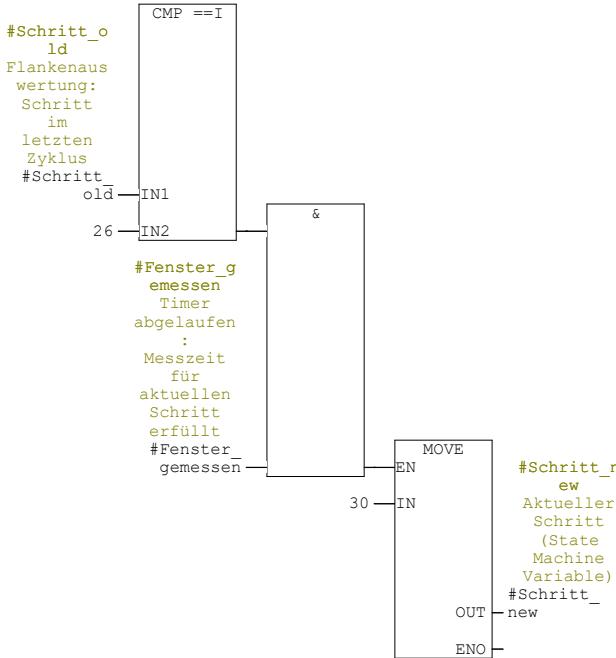
Netzwerk: 21 Transition 24 -> 26 (80% fertig)
Wenn Schritt 24 aktiv ist UND die Messzeit abgelaufen ist (#Fenster_gemessen), weiterschalten zu Schritt 26.



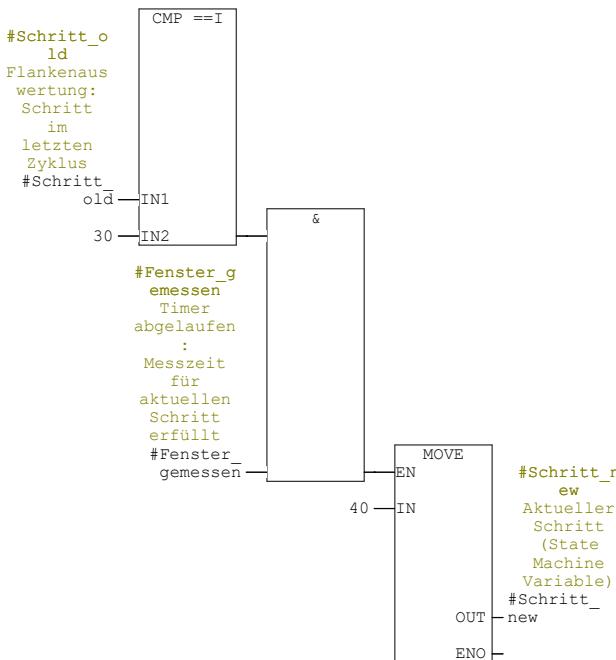
A.2.14 FB1

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:19:05
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FB1 - <offline>

Netzwerk: 22 Transition 26 -> 30 (90% fertig)
Wenn Schritt 26 aktiv ist UND die Messzeit abgelaufen ist (#Fenster_gemessen),
weiterschalten zu Schritt 30.



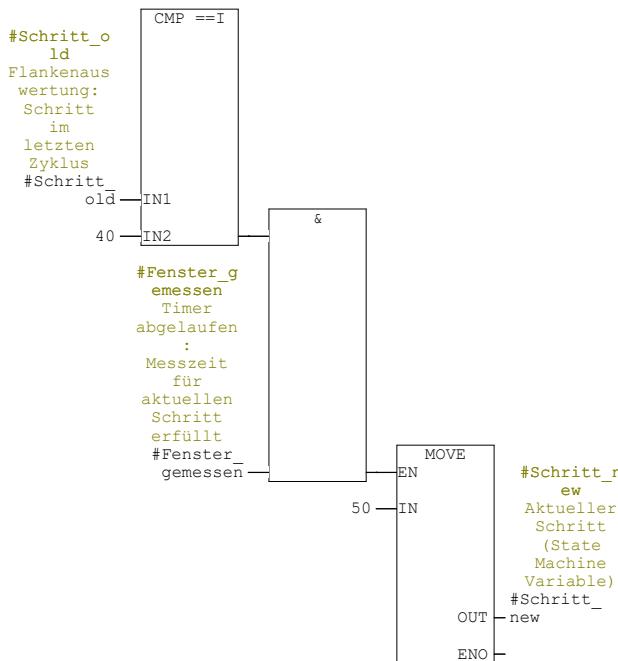
Netzwerk: 23 Transition 30 -> 40 (100% fertig)
Wenn Schritt 30 aktiv ist UND die Messzeit abgelaufen ist (#Fenster_gemessen),
weiterschalten zu Schritt 40.



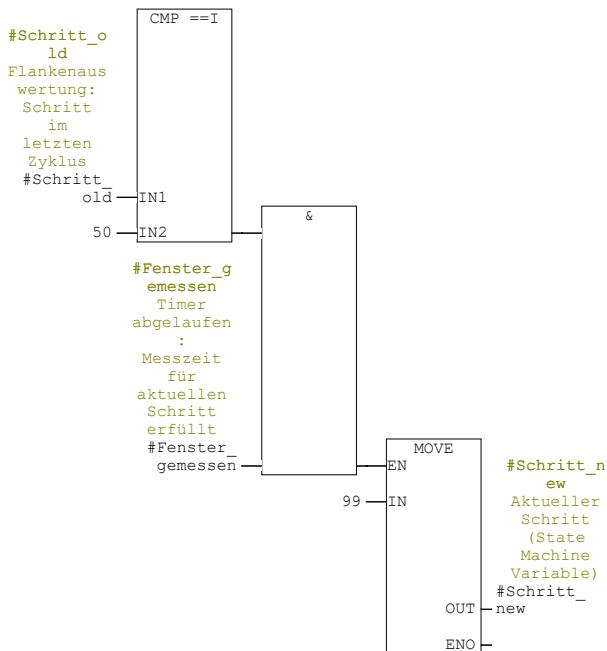
A.2.15 FB1

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:19:05
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FB1 - <offline>

Netzwerk: 24 Transition 40 -> 50 (120% fertig)
Wenn Schritt 40 aktiv ist UND die Messzeit abgelaufen ist (#Fenster_gemessen),
weiterschalten zu Schritt 50 (Rampe abfahren).



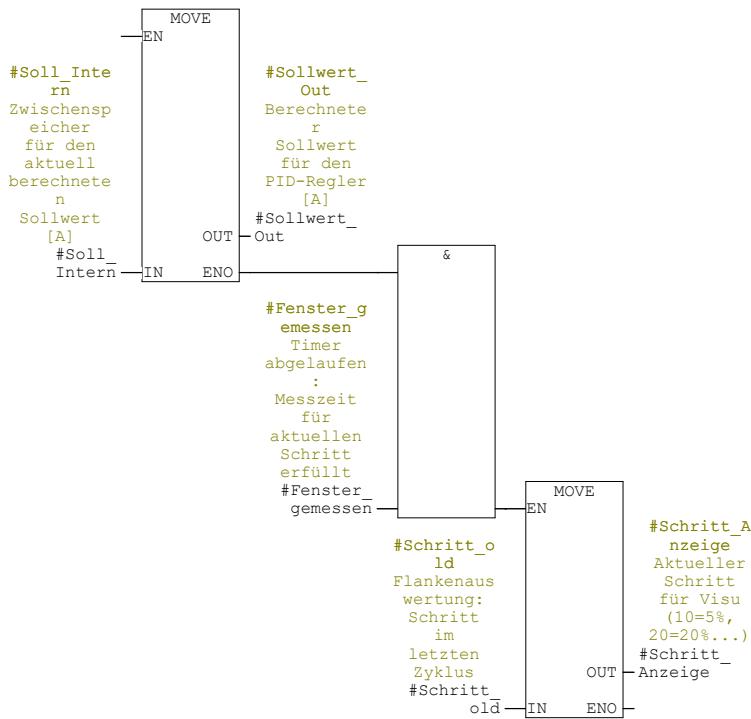
Netzwerk: 25 Transition 50 -> 99 (0% / Ende erreicht)
Wenn Schritt 50 aktiv ist, der Strom auf 0 ist und die Zeit abgelaufen ist,
wird der Ablauf beendet (Schritt 99).



A.2.16 FB1

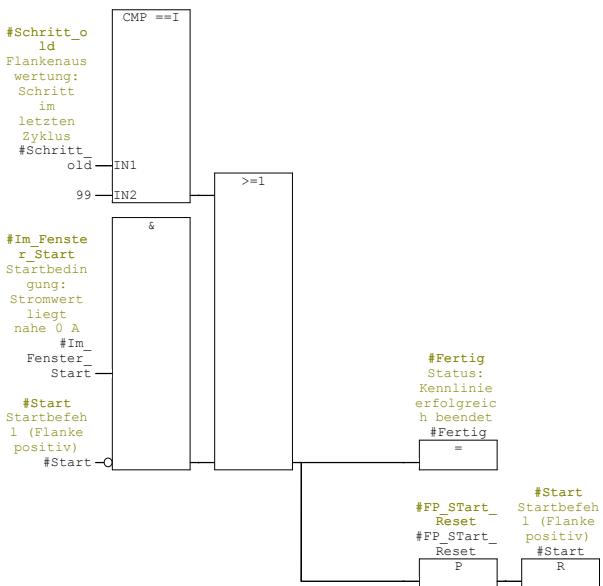
SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:19:05
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FB1 - <offline>

Netzwerk: 26 Ausgangstreiber
Übergabe der internen Rechenwerte auf die Baustein-Ausgänge (Sollwert für Regler, Status für HMI).



Netzwerk: 27 Status "Fertig" und Start-Reset

Im Schritt 99 wird der Ausgang #Fertig gesetzt. Gleichzeitig wird der #Start-Eingang zurückgesetzt (R), damit der Ablauf nicht von vorne beginnt, solange der Taster noch gedrückt ist.



A.2.17 FB1

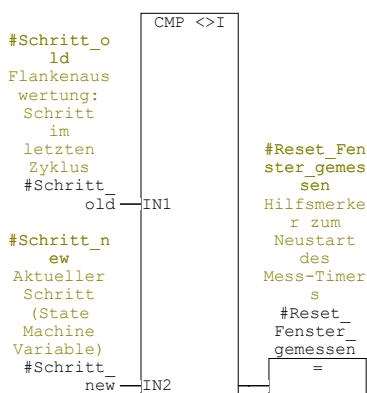
SIMATIC

300(1)\IM151-8 PN/DP CPU\...\FB1 - <offline>

16.12.2025 10:19:06

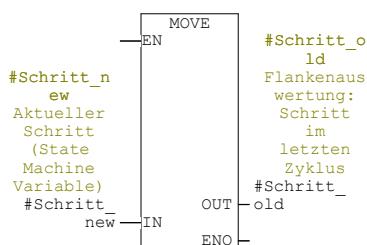
Netzwerk: 28 Housekeeping Schrittmerker

Aktualisiert `#Schritt_old` mit dem Wert von `#Schritt_new` für den nächsten Zyklus (wichtig für Flankenerkennung bei Schrittwechseln). Löscht Hilfsmerker wie `#Reset` Fenster gemessen.



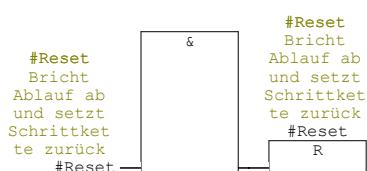
Netzwerk: 29 Housekeeping Schrittmerker

Aktualisiert #Schritt_old mit dem Wert von #Schritt_new für den nächsten Zyklus (wichtig für Flankenerkennung bei Schrittwechseln). Löscht Hilfsmerker wie #Reset Fenster gemessen.



Netzwerk: 30 Baustein Reset

Führt Reset-Befehle aus, falls angefordert



A.2.18 FC1

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:46:15
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FC1 - <offline>

FC1 - <offline>

"PAC1_Auslesen" Treiber PAC3220
Name: PAC1_RD **Familie:** WANDLER
Autor: OliverS **Version:** 1.0
Bausteinversion: 2
Zeitstempel Code: 16.12.2025 10:45:58
Interface: 27.11.2025 15:27:10
Längen (Baustein / Code / Daten): 00320 00192 00000

Name	Datentyp	Adresse	Kommentar
IN		0.0	
OUT		0.0	
IN_OUT		0.0	
TEMP		0.0	
RETURN		0.0	
RET_VAL		0.0	

Baustein: FC1 PAC1 auslesen

Funktion: Liest die Prozessdaten vom Messgerät PAC4220
 Hardware-Startadresse: 1500
 Ziel: Datenbaustein DB1 ("PAC1_Daten")
 Datenformat: Alle Werte sind REAL (Gleitkomma, 32-Bit)

Netzwerk: 1 Erfassung Ströme (L1, L2, L3) [A]

```

L      "PAC1_I_L1"      // Lade Strom L1 von Hardware          PED1500
T      "PAC1_Daten".I_L1 // Transferiere in DB1           DB1.DB0
                                                [A]                      -- Strom Phase L1

L      "PAC1_I_L2"      // Lade Strom L2          PED1504
T      "PAC1_Daten".I_L2 // Transferiere in DB1           DB1.DB4
                                                [A]                      -- Strom Phase L2

L      "PAC1_I_L3"      // Lade Strom L3          PED1508
T      "PAC1_Daten".I_L3 // Transferiere in DB1           DB1.DB8
                                                [A]                      -- Strom Phase L3
  
```

Netzwerk: 2 Erfassung Spannungen (L1-L2, L2-L3, L3-L1) [V]

```

L      "PAC1_U_L12"      // Lade Spannung L1-L2          PED1512
T      "PAC1_Daten".U_12 // Transferiere in DB1           DB1.DB12
                                                [V]                      -- Spannung Phase
                                                L1 gegen L2 [V]

L      "PAC1_U_L23"      // Lade Spannung L2-L3          PED1516
T      "PAC1_Daten".U_23 // Transferiere in DB1           DB1.DB16
                                                [V]                      -- Spannung Phase
                                                L2 gegen L3 [V]

L      "PAC1_U_L31"      // Lade Spannung L3-L1          PED1520
T      "PAC1_Daten".U_31 // Transferiere in DB1           DB1.DB20
                                                [V]                      -- Spannung Phase
                                                L3 gegen L1 [V]
  
```

Netzwerk: 3 Erfassung Leistungsfaktor (CosPhi)

```

L      "PAC1_cos_phi_L1"    PED1524
T      "PAC1_Daten".CosPhi_L1 DB1.DB24
                                                -- Leistungsfaktor CosPhi L1

L      "PAC1_cos_phi_L2"    PED1528
T      "PAC1_Daten".CosPhi_L2 DB1.DB28
                                                -- Leistungsfaktor CosPhi L2

L      "PAC1_cos_phi_L3"    PED1532
T      "PAC1_Daten".CosPhi_L3 DB1.DB32
                                                -- Leistungsfaktor CosPhi L3
  
```

A.2.19 FC1

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:46:16
 300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FC1 - <offline>

Netzwerk: 4 Erfassung Wirkleistung (P) [kW]

```
L "PAC1_P_L1" PED1536
T "PAC1_Daten".P_Wirk_L1 DB1.DBDB36      -- Wirkleistung L1 [kW]

L "PAC1_P_L2" PED1540
T "PAC1_Daten".P_Wirk_L2 DB1.DBDB40      -- Wirkleistung L2 [kW]

L "PAC1_P_L3" PED1544
T "PAC1_Daten".P_Wirk_L3 DB1.DBDB44      -- Wirkleistung L3 [kW]
```

Netzwerk: 5 Erfassung Scheinleistung (S) [kVA]

```
L "PAC1_S_L1" PED1548
T "PAC1_Daten".S_Schein_L1 DB1.DBDB48      -- Scheinleistung L1 [kVA]

L "PAC1_S_L2" PED1552
T "PAC1_Daten".S_Schein_L2 DB1.DBDB52      -- Scheinleistung L2 [kVA]

L "PAC1_S_L3" PED1556
T "PAC1_Daten".S_Schein_L3 DB1.DBDB56      -- Scheinleistung L3 [kVA]
```

Netzwerk: 6 Erfassung Blindleistung (Q) [kvar]

```
L "PAC1_Q_L1" PED1560
T "PAC1_Daten".Q_Blind_L1 DB1.DBDB60      -- Blindleistung L1 [kvar]

L "PAC1_Q_L2" PED1564
T "PAC1_Daten".Q_Blind_L2 DB1.DBDB64      -- Blindleistung L2 [kvar]

L "PAC1_Q_L3" PED1568
T "PAC1_Daten".Q_Blind_L3 DB1.DBDB68      -- Blindleistung L3 [kvar]
```

Netzwerk: 7 Erfassung Netzfrequenz [Hz]

```
L "PAC1_f" PED1572
T "PAC1_Daten".Frequenz DB1.DBDB72      -- Netzfrequenz [Hz]
```

A.2.20 FC2

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:49:02
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FC2 - <offline>

FC2 - <offline>

"PAC2_Auslesen" Treiber PAC4220
Name: PAC2_RD **Familie:** WANDLER
Autor: OliverS **Version:** 1.0
Bausteinversion: 2
Zeitstempel Code: 16.12.2025 10:48:20
Interface: 27.11.2025 15:27:10
Längen (Baustein / Code / Daten): 00320 00192 00000

Name	Datentyp	Adresse	Kommentar
IN		0.0	
OUT		0.0	
IN_OUT		0.0	
TEMP		0.0	
RETURN		0.0	
RET_VAL		0.0	

Baustein: FC2 PAC2 auslesen

Funktion: Liest die Prozessdaten vom Messgerät PAC3220
 Hardware-Startadresse: 1000
 Ziel: Datenbaustein DB2 ("PAC2_Daten")

Netzwerk: 1 Erfassung Ströme (L1, L2, L3) [A]

L	"PAC2_I_L1"	// Lade Strom L1 von Hardware	PED1000	
T	"PAC2_Daten".I_L1	// Transferiere in DB1	DB2,DBD0	-- Strom Phase L1 [A]
L	"PAC2_I_L2"	// Lade Strom L2	PED1004	
T	"PAC2_Daten".I_L2		DB2,DBD4	-- Strom Phase L2 [A]
L	"PAC2_I_L3"	// Lade Strom L3	PED1008	
T	"PAC2_Daten".I_L3		DB2,DBD8	-- Strom Phase L3 [A]

Netzwerk: 2 Erfassung Spannungen (L1-L2, L2-L3, L3-L1) [V]

L	"PAC2_UL_12"	// Lade Spannung L1-L2	PED1012	
T	"PAC2_Daten".U_12		DB2,DBD12	-- Spannung Phase L1 gegen L2 [V]
L	"PAC2_UL_23"	// Lade Spannung L2-L3	PED1016	
T	"PAC2_Daten".U_23		DB2,DBD16	-- Spannung Phase L2 gegen L3 [V]
L	"PAC2_UL_31"	// Lade Spannung L3-L1	PED1020	
T	"PAC2_Daten".U_31		DB2,DBD20	-- Spannung Phase L3 gegen L1 [V]

Netzwerk: 3 Erfassung Leistungsfaktor (CosPhi)

L	"PAC2_cos_phi_L1"	PED1024	
T	"PAC2_Daten".CosPhi_L1	DB2,DBD24	-- Leistungsfaktor CosPhi L1
L	"PAC2_cos_phi_L2"	PED1028	
T	"PAC2_Daten".CosPhi_L2	DB2,DBD28	-- Leistungsfaktor CosPhi L2
L	"PAC2_cos_phi_L3"	PED1032	
T	"PAC2_Daten".CosPhi_L3	DB2,DBD32	-- Leistungsfaktor CosPhi L3

A.2.21 FC2

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:49:02
 300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FC2 - <offline>

Netzwerk: 4 Erfassung Wirkleistung (P) [kW]

```
L "PAC2_P_L1" PED1036
T "PAC2_Daten".P_Wirk_L1 DB2.DB36      -- Wirkleistung L1 [kW]
L "PAC2_P_L2" PED1040
T "PAC2_Daten".P_Wirk_L2 DB2.DB40      -- Wirkleistung L2 [kW]
L "PAC2_P_L3" PED1044
T "PAC2_Daten".P_Wirk_L3 DB2.DB44      -- Wirkleistung L3 [kW]
```

Netzwerk: 5 Erfassung Scheinleistung (S) [kVA]

```
L "PAC2_S_L1" PED1048
T "PAC2_Daten".S_Schein_L1 DB2.DB48      -- Scheinleistung L1 [kVA]
L "PAC2_S_L2" PED1052
T "PAC2_Daten".S_Schein_L2 DB2.DB52      -- Scheinleistung L2 [kVA]
L "PAC2_S_L3" PED1056
T "PAC2_Daten".S_Schein_L3 DB2.DB56      -- Scheinleistung L3 [kVA]
```

Netzwerk: 6 Erfassung Blindleistung (Q) [kvar]

```
L "PAC2_Q_L1" PED1060
T "PAC2_Daten".Q_Bind_L1 DB2.DB60      -- Blindleistung L1 [kvar]
L "PAC2_Q_L2" PED1064
T "PAC2_Daten".Q_Bind_L2 DB2.DB64      -- Blindleistung L2 [kvar]
L "PAC2_Q_L3" PED1068
T "PAC2_Daten".Q_Bind_L3 DB2.DB68      -- Blindleistung L3 [kvar]
```

Netzwerk: 7 Erfassung Netzfrequenz [Hz]

```
L "PAC2_f" PED1072
T "PAC2_Daten".Frequenz DB2.DB72      -- Netzfrequenz [Hz]
```

A.2.22 FC3

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:41:55
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FC3 - <offline>

FC3 - <offline>

"Grenzwert_Check" Hilfsfunktion Toleranz
Name: LIM_CHK **Familie:** WANDLER
Autor: OliverS **Version:** 1.0
Bausteinversion: 2
Zeitstempel Code: 16.12.2025 10:41:04
Interface: 30.11.2025 21:53:31
Längen (Baustein / Code / Daten): 00174 00066 00008

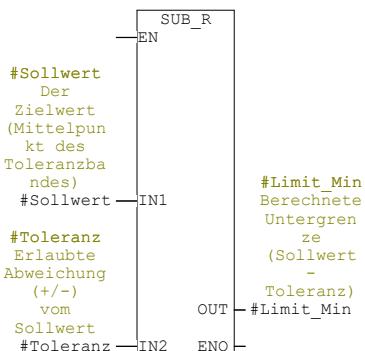
Name	Datentyp	Adresse	Kommentar
IN		0.0	
Sollwert	Real	0.0	Der Zielwert (Mittelpunkt des Toleranzbandes)
Istwert	Real	4.0	Der gemessene Wert, der geprüft werden soll
Toleranz	Real	8.0	Erlaubte Abweichung (+/-) vom Sollwert
OUT		0.0	
Im_Bereich	Bool	12.0	Status: TRUE, wenn Istwert innerhalb der Toleranz
IN_OUT		0.0	
TEMP		0.0	
Limit_Min	Real	0.0	Berechnete Untergrenze (Sollwert - Toleranz)
Limit_Max	Real	4.0	Berechnete Obergrenze (Sollwert + Toleranz)
RETURN		0.0	
RET_VAL		0.0	

Baustein: FC3 Hilfsfunktion: Grenzwert-Check (Toleranz)

Diese Funktion berechnet dynamisch ein Toleranzfenster basierend auf einem Sollwert und einer Toleranzvorgabe. Anschließend wird geprüft, ob der übergebene Istwert innerhalb dieser berechneten Grenzen (Min/Max) liegt.

Netzwerk: 1 Berechnung der Untergrenze

Hier wird die minimale zulässige Grenze ermittelt. Dazu wird die Toleranz vom Sollwert subtrahiert. Formel: Limit_Min = Sollwert - Toleranz

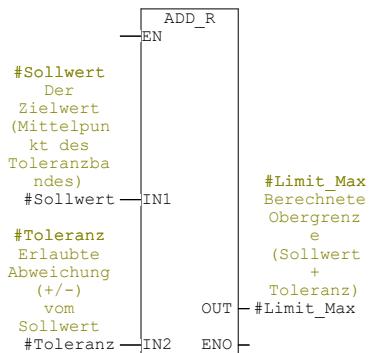


A.2.23 FC3

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:41:55
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FC3 - <offline>

Netzwerk: 2 Berechnung der Obergrenze

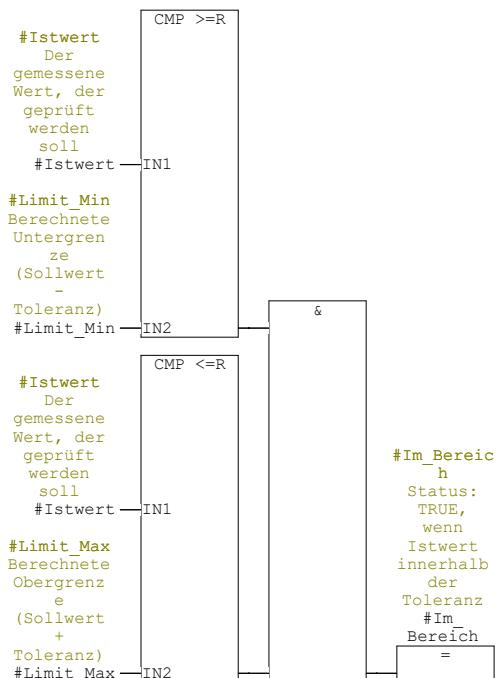
Hier wird die maximale zulässige Grenze ermittelt. Dazu wird die Toleranz auf den Sollwert addiert. Formel: Limit_Max = Sollwert + Toleranz



Netzwerk: 3 Fenster-Vergleich (Min <= Ist <= Max)

Es wird geprüft, ob der aktuelle Istwert im berechneten Fenster liegt. Der Ausgang #Im_Bereich wird TRUE, wenn gilt:

Istwert >= Limit_Min UND Istwert <= Limit_Max



A.2.24 FC4

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:34:09
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FC4 - <offline>

FC4 - <offline>

"Phase_Check" Überwachung 3-Phasig
Name: PHASE_CH **Familie:** WANDLER
Autor: OliverS **Version:** 1.0
Bausteinversion: 2
Zeitstempel Code: 16.12.2025 10:33:52
Interface: 01.12.2025 17:03:57
Längen (Baustein / Code / Daten): 00304 00186 00014

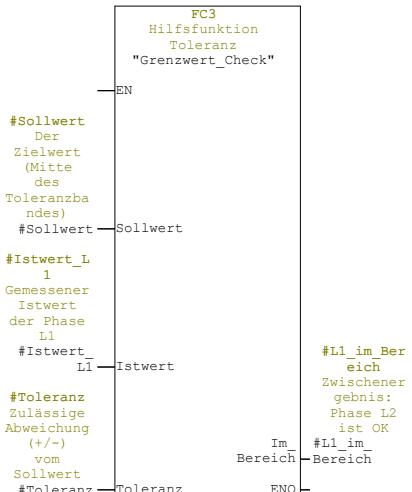
Name	Datentyp	Adresse	Kommentar
IN		0.0	
Sollwert	Real	0.0	Der Zielwert (Mitte des Toleranzbandes)
Toleranz	Real	4.0	Zulässige Abweichung (+/-) vom Sollwert
Istwert_L1	Real	8.0	Gemessener Istwert der Phase L1
Istwert_L2	Real	12.0	Gemessener Istwert der Phase L2
Istwert_L3	Real	16.0	Gemessener Istwert der Phase L3
OUT		0.0	
Im_Bereich	Bool	20.0	Sammelanzeige: TRUE wenn alle 3 Phasen i.O. sind
IN_OUT		0.0	
TEMP		0.0	
L1_im_Bereich_1	Bool	0.0	Zwischenergebnis: Phase L1 ist OK
L1_im_Bereich	Bool	0.1	Zwischenergebnis: Phase L2 ist OK
L2_im_Bereich	Bool	0.2	Zwischenergebnis: Phase L3 ist OK
L3_im_Bereich	Bool	0.3	
RETURN		0.0	
RET_VAL		0.0	

Baustein: FC4 Titel: Überwachung 3-Phasig (Phase Check)

Dieser Baustein überwacht drei Prozesswerte (L1, L2, L3) auf Einhaltung eines Toleranzfensters. Er prüft für jeden Istwert separat, ob dieser innerhalb der Toleranz (+/-) um den vorgegebenen Sollwert liegt. Der Ausgang "Im_Bereich" wird nur dann TRUE, wenn sich alle drei Phasen gleichzeitig im zulässigen Bereich befinden.

Netzwerk: 1 Überwachung Phase L1

Aufruf des Grenzwert-Checks (FC3) für Phase L1. Prüft, ob Istwert_L1 im Bereich Sollwert +/- Toleranz liegt. Das Ergebnis wird temporär gespeichert.

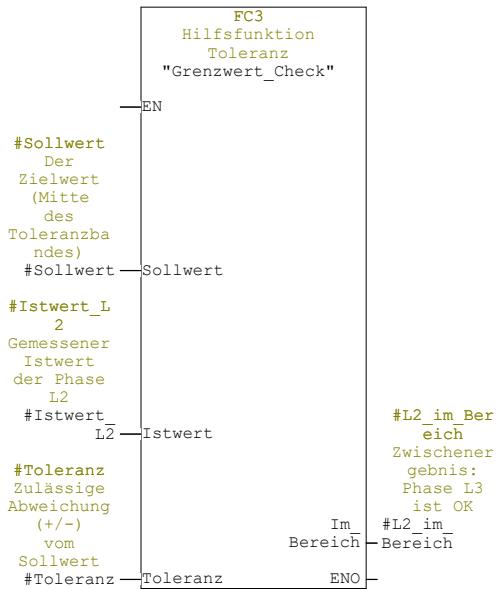


A.2.25 FC4

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:34:09
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FC4 - <offline>

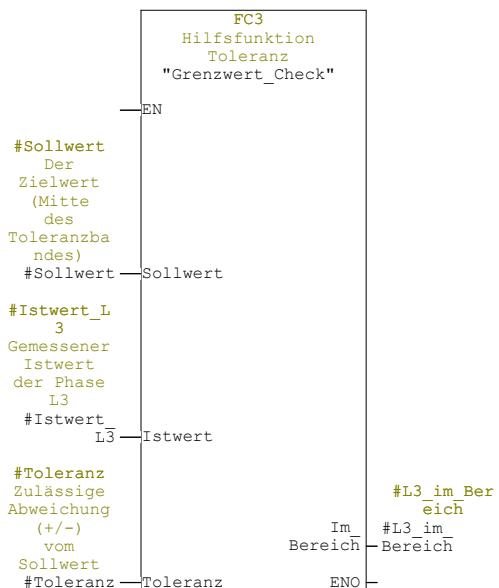
Netzwerk: 2 Überwachung Phase L2

Aufruf des Grenzwert-Checks (FC3) für Phase L2. Prüft, ob Istwert_L2 im Toleranzband liegt.



Netzwerk: 3 Überwachung Phase L3

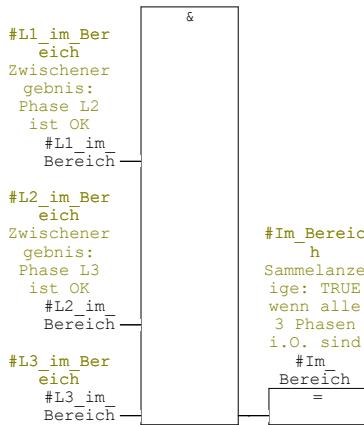
Aufruf des Grenzwert-Checks (FC3) für Phase L3. Prüft, ob Istwert_L3 im Toleranzband liegt.



A.2.26 FC4

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 10:34:09
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \FC4 - <offline>

Netzwerk: 4	Zusammenfassung: Alle Phasen OK?
UND-Verknüpfung der Einzelergebnisse. Der Ausgang #Im_Bereich wird nur TRUE, wenn alle drei Phasen (L1, L2 und L3) stabil innerhalb der Toleranz liegen.	



A.3 Organisationsbausteine

A.3.1 OB1

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 11:58:23
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \OB1 - <offline>

OB1 - <offline>

"Main_Cycle" Zyklisches Programm
Name: MAIN **Familie:** SYSTEM
Autor: **Version:** 1.0
Bausteinversion: 2
Zeitstempel Code: 16.12.2025 11:57:55
Interface: 15.02.1996 16:51:12
Längen (Baustein / Code / Daten): 00512 00384 00026

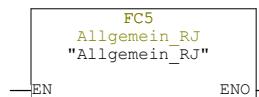
Name	Datentyp	Adresse	Kommentar
TEMP		0.0	
OB1_EV_CLASS	Byte	0.0	Bits 0-3 = 1 (Coming event), Bits 4-7 = 1 (Event class 1)
OB1_SCAN_1	Byte	1.0	1 (Cold restart scan 1 of OB 1), 3 (Scan 2-n of OB 1)
OB1_PRIORITY	Byte	2.0	Priority of OB Execution
OB1_OB_NUMBER	Byte	3.0	1 (Organization block 1, OB1)
OB1_RESERVED_1	Byte	4.0	Reserved for system
OB1_RESERVED_2	Byte	5.0	Reserved for system
OB1_PREV_CYCLE	Int	6.0	Cycle time of previous OB1 scan (milliseconds)
OB1_MIN_CYCLE	Int	8.0	Minimum cycle time of OB1 (milliseconds)
OB1_MAX_CYCLE	Int	10.0	Maximum cycle time of OB1 (milliseconds)
OB1_DATE_TIME	Date_And_Time	12.0	Date and time OB1 started

Baustein: OB1 Hauptprogramm (Main Cycle)

Zyklischer Organisationsbaustein. Hier erfolgt der zentrale Aufruf aller Unterprogramme: Allgemeine Funktionen, Auslesen der PAC-Messgeräte, Trend-Aufzeichnung und die Sequenzsteuerung für die Wandler-Prüfung.

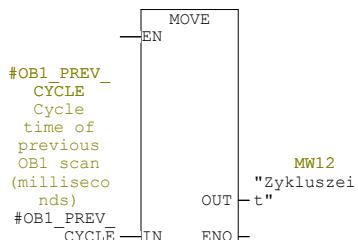
Netzwerk: 1 Allgemeine Funktionen (Housekeeping)

Aufruf der Funktion FC5 "Allgemein RJ". Hier werden zentrale Systemaufgaben erledigt (z.B. Lampentest, Sammelstörungen oder Initialisierungen), die unabhängig vom Prüfablauf sind.



Netzwerk: 2 Zykluszeit-Überwachung

Diagnose: Die Zeit, die der letzte Zyklus benötigt hat (#OB1_PREV_CYCLE), wird in das Merkerwort MW12 kopiert. Dies dient der Anzeige auf dem HMI, um die CPU-Auslastung zu überwachen.

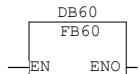


A.3.2 OB1

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 11:58:23
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\...\OB1 - <offline>

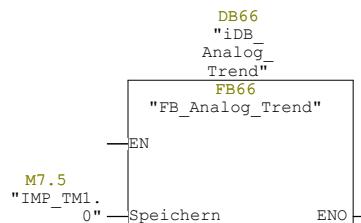
Netzwerk: 3 Archivierung 1 (FB60)

Aufruf des Bausteins FB60 (mit Instanz-DB60). Dient der ersten Stufe der Analogwert-Archivierung.



Netzwerk: 4 Trend-Aufzeichnung

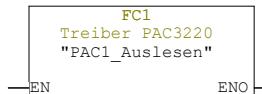
Aufruf des FB66 "FB_Analog_Trend". Dieser Baustein wird über den Taktmerker M7.5 getriggert (z.B. sekündlich) und speichert die aktuellen Prozesswerte in einen Puffer, um sie später als Kurve auf dem Panel darzustellen.



Netzwerk: 5 Messwerte Einspeisung lesen (PAC1)

Datum: 2025-11-30
Ersteller: Oliver Schmidt

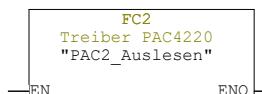
Kommunikation mit dem PAC3220 (Einspeisung, Adresse 1000). Der Treiber FC1 liest die Daten aus der Hardware und schreibt sie in den globalen Datenbaustein DB1. Diese Werte dienen als Istwerte für die Regelung.



Netzwerk: 6 Messwerte Prüfling lesen (PAC2)

Datum: 2025-11-30
Ersteller: Oliver Schmidt

Kommunikation mit dem PAC4220 (Prüfling, Adresse 1500). Der Treiber FC2 liest die Messwerte des zu prüfenden Wandlers aus und speichert sie in DB2. Diese Daten werden zur Protokollierung und Validierung benötigt.



Netzwerk: 7 Steuerung: Wandler-Prüfsequenz & Regler

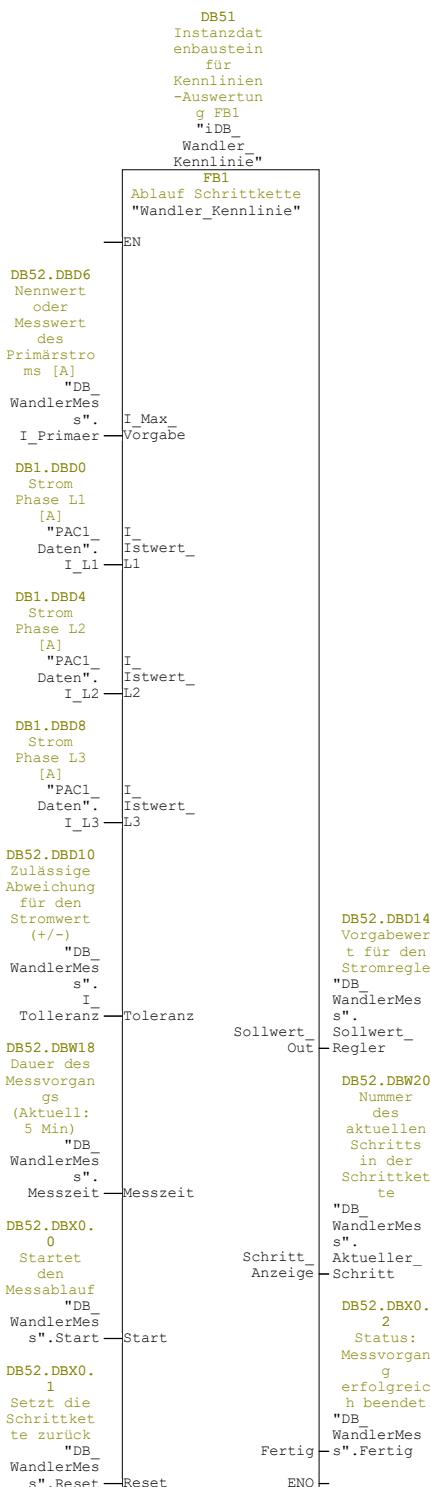
Datum: 2025-11-30
Ersteller: Oliver Schmidt

1. Zentraler Aufruf der Schrittfolge (FB1 mit Instanz DB51). Hier werden alle Komponenten verknüpft:
2. Eingänge: Startbefehle und Parameter (Nennstrom, Toleranz, Zeit) kommen aus dem HMI-DB (DB52).
3. Messwerte: Die Ist-Ströme (L1, L2, L3) werden direkt aus dem DB1 (PAC1 Daten) übergeben.

A.3.3 OB1

SIMATIC TempPruef\SIMATIC 16.12.2025 11:58:23
300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\... \OB1 - <offline>

4. Ausgänge: Der vom FB1 berechnete Sollwert (Sollwert_Out) wird in den DB52 geschrieben, von wo aus er an den PID-Regler oder Analogausgang weitergeht.
Auch der Status (Fertig, Schritt-Nr.) wird für die Visu ausgegeben.

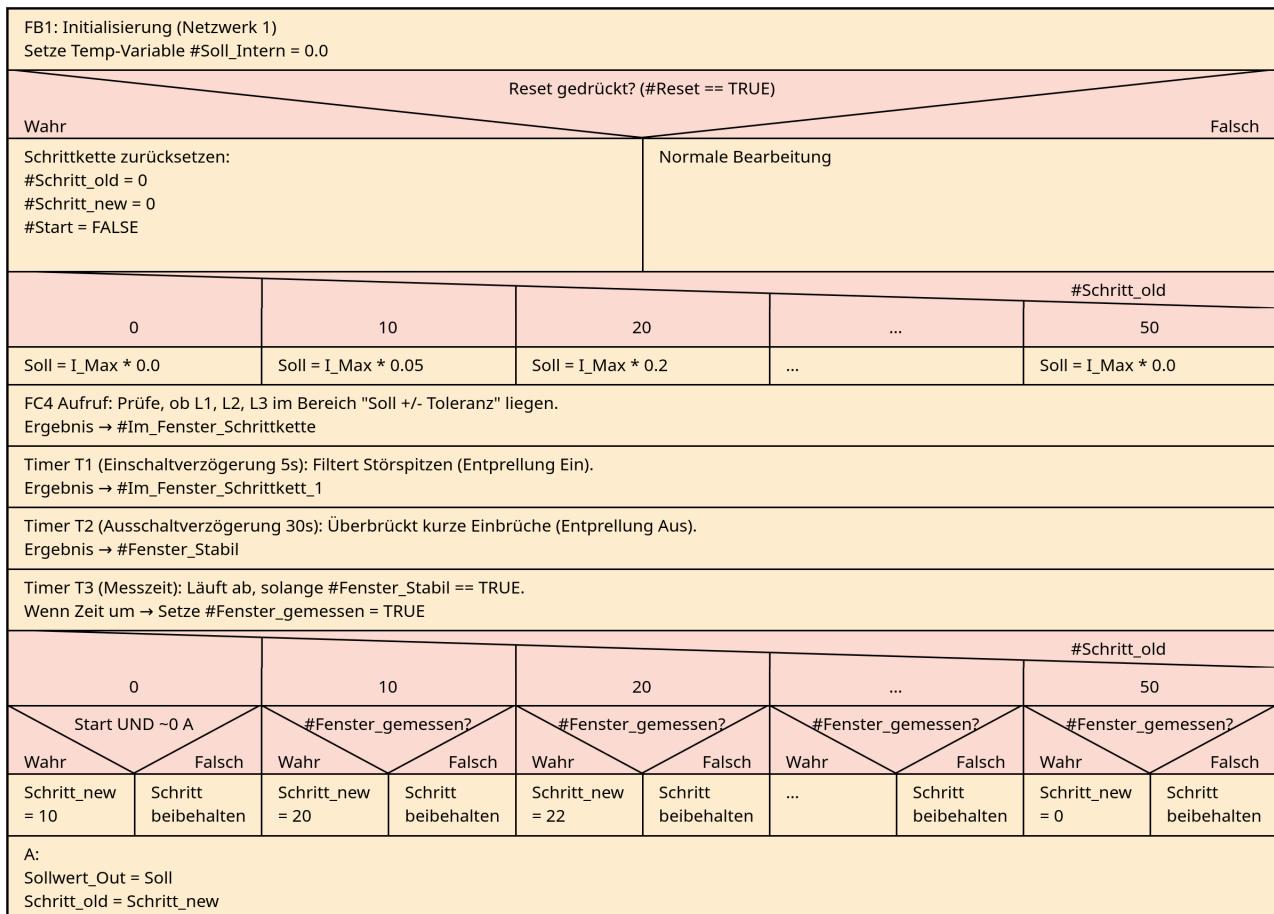


A.3.4 OB1

SIMATIC	TempPruef\SIMATIC 300 (1) \IM151-8 PN/DP CPU\...\OB1 - <offline>	16.12.2025 11:58:24
---------	---	---------------------

A.4 Strukturgramme

A.4.1 Struktogramm FB1



Literaturverzeichnis

- [1] VDE – Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., „Der zellulare Ansatz – Grundlage für eine erfolgreiche Energiewende,“ Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG), Frankfurt am Main, ETG-Studie, 2015, Grundlagenstudie zur Dezentralisierung der Energieversorgung.
- [2] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN ISO 50001:2018-12, Energiemanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung*, Norm, Deutsche Fassung EN ISO 50001:2018, Berlin, 2018.
- [3] Siemens AG, *Planung der elektrischen Energieverteilung: Technische Grundlagen*, Technische Publikation für Totally Integrated Power (TIP), Erlangen, 2015. besucht am 4. Feb. 2026. Adresse: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:d683c81df25afb360b79c5d48441eeda8b23477b/planung-der-elektrischen-energieverteilung-technische-grundlagen.pdf>.
- [4] Redur GmbH & Co. KG, „Fremdfeldstörungen bei Stromwendlern – Oft verkanntes Problem gebannt,“ *SCHALTSCHRANKBAU*, Nr. 6, 2021, Fachbeitrag zu Lösungen für hohe Ströme bei begrenzten 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.
- [5] 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>.
- [6] REDUR GmbH & Co. KG, *Das kleine Einmaleins der Stromwandler*. Merzenich: REDUR GmbH & Co. KG, 2021, Unternehmenspublikation, ISBN: 978-3-00-068179-0.
- [7] *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>.
- [8] T. Harriehausen und D. Schwarzenau, „Magnetisches Feld,“ in *Moeller Grundlagen der Elektrotechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2025, S. 570–683, ISBN: 978-3-658-49993-8. DOI: 10.1007/978-3-658-49993-8_11. Adresse: https://doi.org/10.1007/978-3-658-49993-8_11.
- [9] H. Kuchling, *Taschenbuch der Physik*, 21. Leipzig: Hanser Fachbuchverlag, 2014.
- [10] MikeRun, *Growing magnetic domains*, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Growing-magnetic-domains.svg>, Bild, Wikimedia Commons, abgerufen am 06.02.2026, 2020.
- [11] D. Mietke. „Magnetisierungskurve und Hysterese,“ besucht am 5. Feb. 2026. Adresse: <https://www.elektroniktutor.de/elektrophysik/magkurve.html>.
- [12] R. A. Pfuntner, „The Accuracy of Current Transformers Adjacent to High-Current Busses,“ *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, Jg. 70, Nr. 2, S. 1656–1661, 1951.
- [13] MBS AG, *Fremdfeldkompensierte Stromwandler für hohe Primärströme*, Technische Information und Produktbroschüre, MBS AG. Adresse: <https://www.schutztechnik.com/posts/fremdfeldkompensierte-stromwandler-für-hohe-primerströme>.
- [14] Siemens AG, *Gerätehandbuch SENTRON Messgerät 7KM PAC3120 und PAC 3220*, 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.

- [15] Siemens AG, *Gerätehandbuch SENTRON Multifunktionsmessgerät 7KM PAC 4220*, 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.
- [16] 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