REDUR.DE



DAS KLEINE EINMALEINS DER STROMWANDLER

KNOWLEDGE THAT DRIVES CHANGE.

Von den Grundlagen über technische Zusammenhänge bis zur praktischen Anwendung – entdecken Sie die Welt der Stromwandler. Kompaktes Fachwissen, verständlich erklärt und praxisnah vermittelt.

KONTAKT

REDUR GmbH & Co. KG
Maria-Telkes-Straße 6
D-52428 Jülich
Germany

+49 (0) 2428 905 370

info@redur.de



Alle unsere Druckprodukte werden auf nachhaltigem Papier produziert und CO_2-neutral gedruckt.

FOLLOW THE CHANGE
@REDUR

3.9	Bemessungsleistung	50
3.10	Bürde, Bemessungsbürde	51
3.10.1	Einfluss der Bebürdung auf den Überstrom-Begrenzungsfaktor FS	53
4	**ANFORDERUNGEN AN DIE GENAUIGKEIT**	58
4.1	Genauigkeitsklassen von Stromwandlern für Messzwecke	58
4.2	Genauigkeitsklassen von Stromwandlern für Schutzzwecke	65
5	**ISOLATIONS- UND TEMPERATURANFORDERUNGEN**	70
5.1	Bemessungs-Isolationspegel, Bemessungs-Steh-Wechselspannung, Bemessungs-Steh-Blitzstoßspannung	70
5.2	Windungsprüfung	71
5.3	Temperaturklassen	72
5.4	Isolierstoffklassen	73
6	**BESONDERHEITEN BEIM UMGANG MIT STROMWANDLERN**	74
6.1	Offenbetrieb	74
6.2	Erdung von Stromwandlern	76
6.2.1	Entkoppeln der Erdung	78
6.3	Auswirkungen von Fremdfeldern	79
6.4	Der Wandlerfaktor	81
7	**PRAKTISCHE ANWENDUNG VON STROMWANDLERN**	83
7.1	Beispiel zur Bestellung eines Stromwandlers	83
7.1.1	Widerstände von Schaltdrähten, Leistungsaufnahme von Messgeräten und Relais	87

7.2 Durchschleifen mehrerer Messgeräte im Sekundärkreis 90
7.3 Lastaufteilung auf mehrere Wandler 91
7.4 Stromwandler bei großen sekundärseitigen Leitungslängen 94
7.5 Summen-Stromwandler 96
7.5.1 Kennzeichnung der Anschlüsse und Typenschild 98
7.5.2 Gesamtübersetzung, Gesamt-Wandlerfaktor 99
7.5.2.1 Zahlenbeispiele zur Ermittlung der Gesamtübersetzung 102
7.5.3 Leistungsanforderung an die Hauptwandler 103
7.5.3.1 Zahlenbeispiele zur Ermittlung der Bemessungsleistungen der Hauptwandler 106
7.5.4 Genauigkeitsbetrachtung bei der Kombination von Haupt- und Summen-Stromwandlern 114
7.5.5 Summen-Stromwandler als Anpasswandler 116
7.5.6 Summierung ohne Summen-Stromwandler 116

Stromwandler (engl. current transformer, abgekürzt CT), umgangssprachlich oft auch nur kurz Wandler genannt, sind auf die besonderen Erfordernisse der Messtechnik konzipierte Sonderformen von Transformatoren. Stromwandler werden hauptsächlich dort eingesetzt, wo Ströme aufgrund ihrer Größe nicht direkt gemessen werden können. Sie haben die Aufgabe, den Primärstrom in einen meistens kleineren Sekundärstrom zu übersetzen und Primär- und Sekundärkreis galvanisch voneinander zu trennen. Außer zur Messung können Stromwandler auch eingesetzt werden, um Schutzfunktionen zu steuern oder auszulösen. Abb. 1/ S. 6 zeigt das Beispiel eines Aufsteck-Stromwandlers. (Mehr dazu in Kapitel 2.1/ S. 18)



Abb. 1
Beispiel eines Aufsteck-Stromwandlers

1.1 AUFBAU VON STROMWANDLERN

Stromwandler bestehen aus einem Kern einer geeigneten Eisensorte, die bestimmte magnetische Eigenschaften aufweisen muss. Dieser trägt die Sekundärwicklung, wie in Abb. 2/S. 7 gezeigt. Je nach Ausführung und Anwendungsfall befindet sich über der Sekundärwicklung eine angemessene Isolation, gefolgt von der Primärwicklung, oder die Primärwicklung wird durch das externe Stromschienen- oder Kabelsystem gebildet, in dem der zu messende Primärstrom fließt.



Abb. 2
Offener Aufsteck-Stromwandler nach Abb. 1/S. 6 mit Kern und Sekundärwicklung

1.2 FUNKTIONSWEISE

Durch die Primärspule des Stromwandlers fließt der zu messende Wechselstrom I_p, der ein ständig wechselndes Magnetfeld Φ_p verursacht. Dieses Magnetfeld gelangt über den Eisenkern zur Sekundärspule und induziert dort die sekundäre Quellenspannung E_0 als treibende Größe für den Sekundärstrom I_s, der sich gemäß dem Windungsverhältnis von Primär- und Sekundärwicklung einstellt. Dieser wiederum erzeugt einen magnetischen Fluss Φ_s. Gemäß der lenzschen Regel verläuft die Richtung des Sekundärstroms derart, dass dessen magnetischer Fluss Φ_s dem durch die Primärwicklung erzeugten Feld Φ_p entgegenwirkt, daher oft auch Gegenfeld genannt. Beim verlustfreien, kurzgeschlossenen Stromwandler wären beide Flüsse gleich groß und der resultierende magnetische Fluss im Kern nicht mehr vorhanden. Tatsächlich hat aber der Sekundärstrom I_s verlustbedingt nicht die Größe, die er-

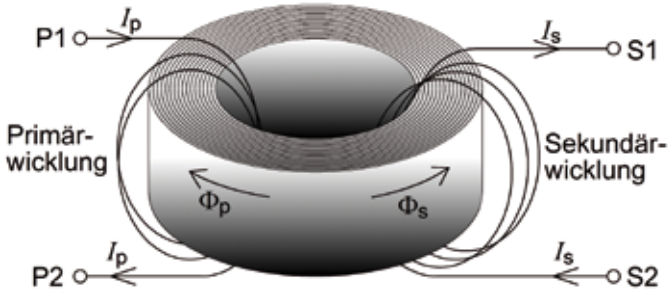


Abb. 3
Diagramm zur Funktionsweise von Stromwandlern

forderliche Gegeninduktion aufzubauen, um den primären magnetischen Fluss Φ_p völlig aufzuheben. Es bleibt ein Restfluss Φ_ε übrig, der für die Entstehung der Quellenspannung E_0 und des Magnetfelds im Kern sorgt. In der Norm für Stromwandler (DIN EN 61869-2) ist für den Restfluss der Begriff „verketteter Fluss ψ" eingeführt worden.

In der Terminologie von Transformatoren ist analog vom sogenannten Hauptfluss Φ_h die Rede. Abb. 3/S. 8 zeigt gemäß der lenzschen Regel die Verhältnisse am Transformator (hier Stromwandler) und wie das durch den Primärstrom erzeugte Magnetfeld Φ_p durch das des Sekundärstroms Φ_s vermindert wird.

Der Ausgang eines Stromwandlers ist als Konstantstromquelle (engl. constant current source) anzusehen. Die Größe des Sekundärstroms hängt dabei idealerweise nur vom Primärstrom ab und wird daher auch durch die angeschlossenen Widerstände

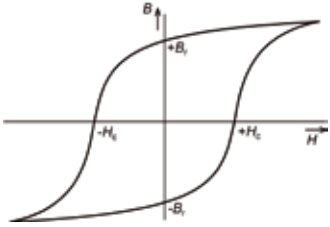


Abb. 4
Hysteresekurve
Flussdichte B vs. Feldstärke H
mit Koerzitivfeldstärke H_c
und Remanenzinduktion B_r

(Leitungswiderstände, Innenwiderstände angeschlossener Messgeräte usw.) nicht beeinflusst.

Selbst beim idealisierten, fehlerfreien Stromwandler gilt diese Aussage allerdings nur bis zur unvermeidlichen magnetischen Sättigung des Kernmaterials, wie anhand der allgemein bekannten BH-Kennlinie, auch Hystereskurve genannt, in Abb. 4/S. 9 deutlich zu erkennen ist. Ein Stromwandler muss also so bemessen sein, dass sein Arbeitsbereich (engl. operating range) innerhalb des durch die Sättigung begrenzten Bereichs des Kernmaterials liegt.

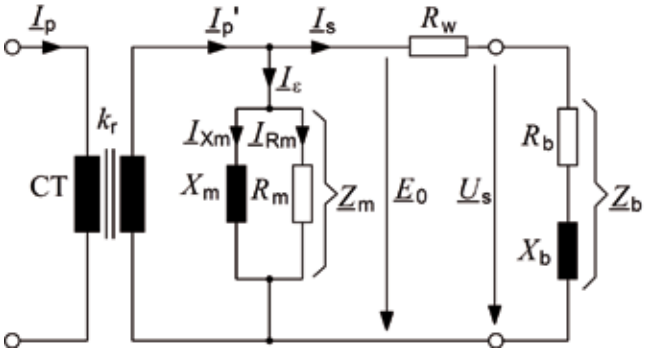
1.3 ERSATZSCHALTBILD, FEHLERSTROM I_ε, ERREGERSTROM I_e

Das Ersatzschaltbild (ESB, engl. equivalent circuit diagramm) eines Stromwandlers soll hier nicht im Einzelnen entwickelt, sondern als gegeben hingenommen werden. Dazu dient zur weiteren Betrachtung das vereinfachte ESB in Abb. 5/S. 11, welches dem allgemein bekannten Transformator-ESB entspricht mit dem Unterschied, dass der ideale, fehlerfreie Transformator (in Abb. 5/S. 11 als CT bezeichnet) auf die linke Seite gelegt wird. Die primärseitigen Elemente des Transformator-ESBs entfallen, bis auf den vorgenannten, als ideal anzusehenden Stromwandler CT mit der Bemessungsübersetzung k_r. An dessen Ausgang steht der fehlerfreie Sekundärstrom, auch „auf die Sekundärseite bezogenen Primärstrom $\underline{I}'_p$ " genannt, zur Verfügung.

Der auf die Sekundärseite bezogene Primärstrom $\underline{I}'_p$ teilt sich auf in den Fehlerstrom $\underline{I}_\varepsilon$, der zur Magnetisierung des Eisenkerns und für dessen Verluste aufgebracht werden muss, und den tatsächlichen, fehlerbehafteten Sekundärstrom $\underline{I}_s$.

Die bei Transformator-Ersatzschaltbildern anzutreffende sekundärseitige Streuinduktivität kann bei Stromwandlern wegen ihres sehr geringen Wertes vernachlässigt werden. Lediglich der Widerstand R_w der Sekundärwicklung ist zu berücksichtigen. Wird dieser auf eine festgelegte Temperatur bezogen (z. B. 75 °C), so ändert sich der Index normgerecht, und dieser Wicklungswiderstand wird mit R_{ct} bezeichnet.

Abb. 5
vereinfachtes ESB eines Stromwandlers



CT	idealer Stromwandler
E_0	Quellenspannung
I_p	Primärstrom
I'_p	auf die Sekundärseite bezogener Primärstrom, bzw. idealer Sekundärstrom
I_s	Sekundärstrom
I_{Rm}	Eisenverluststrom
I_{Xm}	Magnetisierungsstrom
I_ε	Fehlerstrom

k_r	Bemessungsübersetzung
R_b	Blindwiderstand der Bürde
R_m	Eisenverlustwiderstand
R_w	Wicklungswiderstand
U_s	Sekundärspannung, Bürdenspannung
X_b	Wirkwiderstand der Bürde
X_m	Hauptinduktivität
Z_b	Bürden-Scheinwiderstand
Z_m	Querimpedanz

Innerhalb des Arbeitsbereichs stellen sich die Quellenspannung E_0 und die Sekundärspannung U_s nach dem ohmschen Gesetz automatisch ein. Es gilt:

Gleichung 1

$$U_s = I_s Z_b$$

U_s	Sekundärspannung
I_s	Sekundärstrom
Z_b	Bürden-Scheinwiderstand

womit U_s als treibende Spannung für den Sekundärstrom I_s angesehen werden kann.

Das ESB zeigt, dass der Fehlerstrom I_ε, der durch die Querimpedanz Z_m fließt, ursächlich für den Fehler des Stromwandlers ist. Gleichung 2/S. 13 gilt für den idealen, fehlerfreien Stromwandler, den es in der Praxis in dieser Form nicht gibt. Diese oft anzutreffende Gleichung

Gleichung 2

$$k_r = \frac{I_p}{I_s}$$

k_r	Bemessungsübersetzung
I_p	Primärstrom
I_s	Sekundärstrom

ist folglich nicht korrekt, da der Sekundärstrom I_s bereits fehlerbehaftet ist. Nach Kenntnis des ESBs ist es nunmehr korrekter, Gleichung 2/S. 12 in die Form der Gleichung 3 zu überführen:

Gleichung 3

$$k_r = \frac{I_p}{I'_p}$$

k_r	Bemessungsübersetzung
I_p	Primärstrom
I'_p	auf die Sekundärseite bezogener Primärstrom bzw. idealer Sekundärstrom

In der DIN EN 61869-2 ist darüber hinaus der Erregerstrom I_e (engl. exciting current) erwähnt, der wie folgt definiert ist: „Der Erregerstrom ist der Effektivwert des in der Sekundärwicklung eines Stromwandlers fließenden Stroms, wenn an die Sekundäranschlüsse eine sinusförmige Spannung mit Bemessungsfrequenz angelegt wird und die Primärwicklung und alle sonstigen Wicklungen offen sind." Obwohl der Erregerstrom den gleichen Weg wie der Fehlerstrom I_f durch die Querimpedanz Z_m nimmt, sind beide aufgrund der unterschiedlichen Definitionen nicht zwingend identisch, können aber für bestimmte Parameter gleiche Werte annehmen. Wenn die an die Sekundärwicklung angelegte Spannung zur Bestimmung des Erregerstroms identisch ist mit der Sekundärspannung, die sich im bestimmungsgemäßen Betrieb nach Gleichung 1/S. 12 für einen bestimmten Arbeitspunkt einstellt, haben Erreger- und Fehlerstrom für diesen Arbeitspunkt die gleichen Werte. Daher werden beide in der Norm als identisch betrachtet, womit die Norm der direkten messtechnischen Ermittlung des Fehlerstroms durch den Erregerstrom Rechnung trägt.

1.4 ANSCHLUSSKENNZEICHNUNG UND POLARITÄT

Um Stromwandler hinsichtlich der Polarität richtig anschließen zu können und eine Verwechslung von Primär- und Sekundärwicklung (z. B. bei Wickel-Stromwandlern) zu vermeiden, ist eine normgerechte Bezeichnung der Anschlüsse unerlässlich.

1.4.1 ERKLÄRUNGEN ZUM BEGRIFF DER STROMRICHTUNG

Wechselstrom ändert periodisch seine Richtung und entzieht sich dadurch eigentlich einer Richtungsaussage. In der Wandlertechnik wird daher die Stromrichtung mit der Richtung der Wirkenergie verknüpft. Der physikalische Energiefluss hat immer eine eindeutige und konstante Richtung, abgesehen von Wechseln zwischen Verbrauch und Einspeisung. Erst durch die Verknüpfung mit der Richtung des Wirkenergieflusses oder der Wirkleistung wird es möglich, für die Montage von Stromwandlern eine eindeutige Aussage bezüglich der Stromrichtung zu treffen, Ströme korrekt zu addieren (z. B. mittels Summen-Stromwandlern, siehe unter 2.4/S. 24) und Ströme mit Spannungen vorzeichenrichtig zu verknüpfen (z. B. bei der Leistungsmessung). Wenn also bei Wechselstrom und vor allem bei Stromwandlern von der Stromrichtung die Rede ist, muss stets klar sein, dass es sich in Wirklichkeit um eine willkürlich gewählte Verknüpfung mit der Richtung der Energie oder der Leistung handelt.

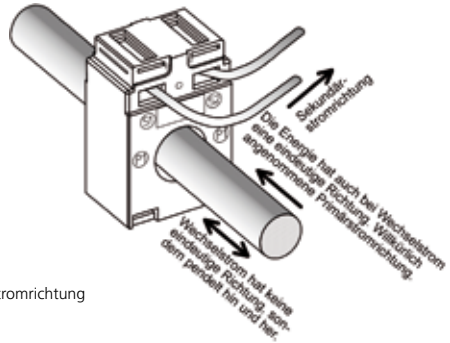


Abb. 6
Energie- und Stromrichtung

Es kann also gerechtfertigt sein, unter Beachtung dieser Besonderheit auch bei Wechselströmen umgangssprachlich von einer Richtung zu sprechen. Bei der reinen Strommessung spielt die Richtung keine Rolle, ggf. muss nur bei der Addition von Strömen bedacht werden, dass alle Wandler gleich gepolt sind, damit nicht versehentlich eine Subtraktion stattfindet. Findet jedoch eine Verknüpfung von Strom und Spannung statt (z. B. Leistungs-, Leistungsfaktor-, Energiemessung), ist die Beachtung der Stromrichtung unerlässlich. Abb. 6/S.15 verdeutlicht den Zusammenhang nochmals bildlich.

1.4.2 ANSCHLUSSKENNZEICHNUNG VON STROMWANDLERN UND STROMRICHTUNG

Nach der DIN EN 61869-2 (VDE 0414-9-2) sind die Primäranschlüsse (engl. primary terminal) mit den Großbuchstaben P1 und P2 gekennzeichnet; die Sekundäranschlüsse (engl. secondary terminal) erhalten die Bezeichnungen S1 und S2. Dabei hat die Polung so zu erfolgen, dass die Wirkenergie oder Wirkleistung (unter Berücksichtigung des vorherigen Abschnitts ist hier auch der Begriff Stromrichtung zulässig) von P1 nach P2 fließt, entsprechend der Abb. 7/S. 17. Dann fließt der Sekundärstrom aus S1 heraus.
Die Spannungspfeile in Abb. 7/S. 17 dürfen nicht mit der Systemspannung verwechselt werden. Es handelt sich entsprechend dem oberen Teil dieser Abbildung um die Spannung, die entlang eines Strommessers abfällt.
Die Festlegung der Anschlussfolge in der vorgegebenen Form findet ihre Rechtfertigung darin, dass ein direkt angeschlossenes Mess-

gerät (oberer Teil der Abb. 7/S. 17) dieselbe Polung erfahren muss, als wenn dieses indirekt über einen Stromwandler angeschlossen wäre. Die bei älteren Wandlern häufig noch anzutreffenden deutschen Bezeichnungen *K* und *L* für P1 und P2 sowie *k* und *l* für S1 und S2 sind in der neueren Norm DIN EN 61869-2 ab dem Jahr 2012 nicht mehr enthalten. So konnte früher für die Stromrichtung auch die Eselsbrücke „*k* wie kommend, *l* wie laufend" angewendet werden.

Es gilt:

- **Fließt der Primärstrom bei P1 in den Wandler, fließt der entsprechende Sekundärstrom aus S1 heraus.**
- **Positive Wirkleistung gelangt über P1 in den Wandler und über S1 heraus.**

Abb. 8/S. 17 zeigt das für Stromwandler genormte Schaltsymbol.

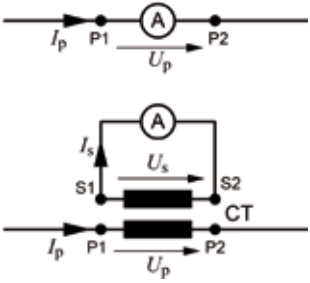


Abb. 7
Polarität und Kennzeichnung der Anschlüsse von Stromwandlern

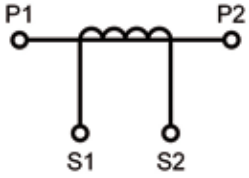


Abb. 8
Schaltsymbol für Stromwandler nach DIN EN 61869-2

2 STROMWANDLERTYPEN

Es gibt mehrere Kriterien, Stromwandler zu unterscheiden. So können diese eingeteilt werden nach der Bemessung der Isolation in Nieder-, Mittel- und Hochspannungswandlern, nach ihrem Aufbau oder nach dem Anwendungsfall.

2.1 UNTERSCHEIDUNG NACH AUFBAU

Nach ihrem Aufbau wird zwischen Einleiter-Stromwandlern (engl. bar-type CT) und Wickel-Stromwandlern (engl. winding-type CT) unterschieden. Der häufigste Vertreter der Einleiter-Stromwandler ist der Aufsteck-Stromwandler (engl. slip over CT), wie in Abb. 1/S. 6 gezeigt, der auf den stromführenden Leiter gesteckt wird und damit in Verbindung mit diesem Primärleiter einen Transformator mit einer Windung als Primärwicklung bildet.

Ohne hier näher auf die physikalische Ursache einzugehen, hängt das Leistungsvermögen eines Stromwandlers ab von der Übersetzung und dem Querschnitt des Eisenkerns. Ist der Primärstrom und damit die Übersetzung zu klein, um die erforderliche Leistung bereitstellen zu können, und verbietet sich aus räumlichen Gründen ein größerer Eisenkern, muss ein Einleiter-Stromwandler mit einer höheren Übersetzung zur Anwendung kommen, bei dem der Primärstrom durch Aufbringen mehrerer Primärwindungen „scheinbar" erhöht wird. So entsteht ein Wickel-Stromwandler (Abb. 9/S. 18), auch kurz Wickelwandler genannt.



Abb. 9
Beispiel eines
Wickel-Stromwandlers

Das heißt aber letztlich, dass im Grunde genommen nicht der Primärstrom, sondern eigentlich die Durchflutung Θ als Produkt aus Strom und Windungszahl ursächlich für den Sekundärstrom ist, gemäß:

Gleichung 4

$$\Theta_p = N_p I_p$$

Θ_p	primäre Durchflutung
N_p	Anzahl Primärwindungen
I_p	Primärstrom

Zu beachten bleibt, dass bei Einleiter-Stromwandlern $N_p=1$ ist.

Im Gegensatz zu Einleiter- oder Aufsteck-Stromwandlern, bei denen der Primärleiter nicht aufgetrennt werden muss, wird dieser bei Wickelwandlern geteilt und an die vorgesehenen Primärleiterklemmen des Wandlers angeschlossen. Abb. 10/S. 20 zeigt einen offenen Wickelwandler mit den im Bild oben liegenden Anschlüssen für den Primärleiter und den Sekundäranschlüssen darunter. Deutlich sind die Primärwicklung und die Isolationsschicht, die die Primär- von der Sekundärwicklung trennt, zu sehen. Die Isolationsschicht verdeckt hier die Sekundärwicklung.
Bei dieser Betrachtungsweise wird der Einleiter-Stromwandler als Grundtyp aller Stromwandler angesehen. Die magnetischen und elektrischen Verhältnisse eines solchen Einleiter-Stromwandlers für z. B.

100/5 A sind identisch mit den Verhältnissen eines Wickel-Stromwandlers für 10/5 A , dessen Primärwicklung 10 Windungen besitzt. Die Primärwicklung sorgt nur für die nötige Durchflutung, hat aber für die weitere Funktion keine Bedeutung mehr.
Eine Erklärung zur Schreibweise der Übersetzung folgt in Kapitel 3.1/S. 33. Eine Sonderform des Wickel-Stromwandlers ist der Durchfädel-Stromwandler, der in Kapitel 2.4/S. 24 ausführlicher behandelt wird.

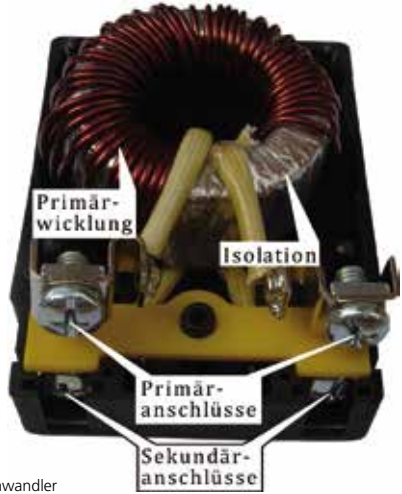


Abb. 10
Offenen Wickel-Stromwandler

2.2 UNTERSCHEIDUNG NACH ANWENDUNGSFALL

Nach ihrem Anwendungsfall wird zwischen Strom-Messwandlern (engl. measuring CT) und Schutz-Stromwandlern (engl. protective CT) unterschieden. Streng nach der DIN EN 61869-2 muss es Stromwandler für Messzwecke und Stromwandler für Schutzzwecke heißen. Die griffigere Bezeichnungen Strom-Messwandler und Schutz-Stromwandler oder auch kurz nur Schutzwandler sind jedoch nicht nur umgangssprachlich, sondern auch im Schriftverkehr anzutreffen.

Strom-Messwandler werden zur Messung von Strömen eingesetzt, die entweder gemessen bzw. angezeigt oder weiterverarbeitet werden (z. B. mittels Stromzähler zur Energiemessung). Durch die in Kapitel 1.2/S. 8 bereits erwähnte und unvermeidliche, physikalisch bedingte magnetische Sättigung des Kernmaterials kann der Sekundärstrom nicht beliebig ansteigen. Dieser, auf den ersten Blick als Nachteil erscheinende Effekt, wird jedoch als Schutz des Sekundärkreises vor zu hohen Strömen genutzt, wie sie z. B. im Falle eines Kurzschlusses im Primärkreis auftreten. Der Kurzschlussstrom wird dann nicht in vollem Maße entsprechend der Übersetzung in den Sekundärkreis übertragen, sondern durch die Sättigung begrenzt. (Mehr dazu folgt in Kapitel 3.8/S. 46.)

Schutz-Stromwandler müssen eine über den Arbeitsbereich von Messwandlern weit hinaus verschobene Sättigung haben. Sie werden zum Anlagenschutz in Verbindung mit den entsprechenden Schaltgeräten eingesetzt. Sie sollen also auch kurzschlussartige Ströme noch hinreichend genau übertragen können, die den Bemessungsstrom um ein Vielfaches überschreiten. Ihre prinzipielle Funktion ist jedoch mit der für Strom-Messwandler identisch.

2.3 SENSOREN

In der Wandlertechnik wird unter dem Begriff Sensor (engl. sensor) die Gesamtheit alle Geräte zusammengefasst, die die Funktion eines Strom- oder Spannungswandlers wahrnehmen, jedoch vom klassischen Transformatorprinzip abweichen, oder die messwertverarbeitende elektronische Bauteile enthalten. Zu den Stromsensoren gehören:

KLEINSIGNALWANDLER (engl. low power CT)
Diese Wandler sind in der DIN EN 61869-6 beschrieben als solche, deren Ausgangsleistung ≤ 1 VA ist. Sie sind wie konventionelle Wandler aufgebaut und/oder mit einer internen elektronischen Beschaltung versehen und dürfen auch Hilfsspannung erfordern. Als Ausgangsgrößen kommen primärstromproportionale Spannungen oder Ströme, jedoch kleiner als bei konventionellen Wandlern, oder auch digitale Signale infrage.

ROGOWSKI-SPULE (engl. ROGOWSKI coil)
Diese Wandler bestehen aus einem eisenlosen, bewickelten Ring und liefern eine Spannung proportional zur Ableitung di_p/dt des Primärstroms i_p.

DIREKTABBILDENDER STROMSENSOR (engl. direct-imaging CT)
Diese Stromsensoren messen den Strom indirekt über das durch den Strom verursachte Magnetfeld mittels einer oder mehrerer Hallsonden. Der oder die Hallsonden sind in Luftschlitzen weichmagnetischer Ringkerne eingebracht, die den stromführenden Leiter umschließen.

NULLFLUSSWANDLER (engl. zero flux sensor) oder KOMPENSATIONSSTROMWANDLER (engl. compensation CT)
Bei diesen Wandlern dient die Sekundärwicklung (Kompensationswicklung) dazu, mittels eines elektronisch generierten Kompensationsstroms das vom Primärstrom erzeugte Magnetfeld aufzuheben. Der magnetische Fluss im Kern wird dann zu Null, wobei der Kompensationsstrom ein nahezu exaktes Abbild des Primärstroms ist. Die Messgröße zur Erzeugung des Kompensationsstroms kann z. B. durch Hallsonden, magnetoresitive Sensoren oder eine zusätzliche Wicklung gewonnen werden und gelangt über einen elektronischen Verstärker als Kompensationsstrom zur Kompensationswicklung.

STROMWANDLER MIT DIGITALAUSGANG (engl. digital CT, abgekürzt DCT)
Diese Stromwandler haben einen Digitalausgang, geregelt in der DIN EN 61869-9.

OPTOELEKTRONISCHER WANDLER (engl. optoelectronic CT)
Diese Wandler arbeiten nach dem Prinzip des Faraday-Effekts. Dieser magnetooptische Effekt beschreibt die Drehung der Polarisationsebene von polarisierten elektromagnetischen Wellen (z. B. Licht) in einem Magnetfeld. Der Winkel der Drehung ist proportional zum feldverursachenden Strom.

Die meisten Sensoren benötigen eine zusätzliche Hilfsenergiequelle. Sensoren werden in dieser Schrift nicht betrachtet.

2.4 ÜBERSICHT WEITERER STROMWANDLERTYPEN

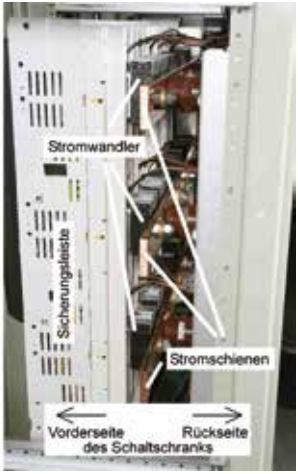
Neben den beiden genannten Typen, dem Einleiter-Stromwandler und dem Wickel-Stromwandler, werden noch einige auf bestimmte Anwendungsfälle zugeschnittene Abwandlungen unterschieden.

SCHIENEN-STROMWANDLER UND ROHRSTAB-STROMWANDLER (engl. bar-primary CT oder bar type CT und tube type CT) sind Aufsteck-Stromwandler, die mit einem Primärschienenstück geliefert werden, wie in Abb. 11/S. 24 zu sehen. Rohrstab-Stromwandler sind eine Sonderform der Aufsteck-Stromwandler, bei denen sich in der Primärschienendurchführung ein rohrförmiger Kupfereinsatz (Cu-Hülse) befindet. Diese Ausführung erlaubt es, den Wandler z. B. unmittelbar zwischen der Überlappung von Stromschienen oder zwischen Stromschienen und Trenn- oder Sicherungsleisten usw. einzusetzen, wie in Abb. 12/S. 25 zu sehen. Der umgangssprachliche Gebrauch dieser beiden Wandlerbegriffe ist leider nicht eindeutig. So wird die Bezeichnung Schienen-Stromwandler auch synonym für Aufsteck-Stromwandler verwendet, da diese i. d. R. auf Stromschienen geschoben werden. Als Rohrstab-Stromwandler werden auch Wandler bezeichnet mit einer runden Primärleiteröffnung.



Abb. 11
Beispiel eines Schienen-Stromwandlers

Abb. 12
eingebaute Rohrstab-Stromwandler
hinter Sicherungsleisten (Seitenansicht)



DURCHFÄDEL-STROMWANDLER (engl. site-winding CT), oder kurz Fädelwandler, sind Wickel-Stromwandler, die jedoch in der Form von Aufsteck-Stromwandlern geliefert werden, wobei der Anwender selbst die Primärwicklung aufbringt.

Bei der Übersetzung kleiner Ströme kann eine Kostenersparnis erzielt werden, wenn anstelle der hier erforderlichen Wickel-Stromwandler Aufsteck-Stromwandler für höhere Primärströme verwendet werden. Der erforderliche höhere Primärstrom wird erreicht, indem der Primärleiter mehrmals durch die Primärschienendurchführung gewickelt (gefädelt) wird. So entsteht z. B. aus einem Aufsteckwandler 150/5 A durch dreimaliges Fädeln des Primärleiters ein Stromwandler mit der Übersetzung 50/5 A .

Abb. 13/S. 26 zeigt das Beispiel eines Stromwandlers mit einem zweifach gefädelten Primärleiter. Nehmen wir an, eine Übersetzung von 25/5 A werde benötigt, was mit einem passenden Wickel-Stromwandler zu realisieren wäre. Nehmen wir aber weiter an, ein Wickelwandler könne nicht eingesetzt werden. Dafür kann es verschiedene Gründe geben; der Wickelwandler kann z. B. zu groß sein, er kann zu teuer sein oder der Primärleiter kann oder darf nicht aufgetrennt werden. In unserem Beispiel käme nun ein Durchsteckwandler mit der Übersetzung 50/5 A zum Einsatz. Der Primärleiter, der nur 25 A führt, müsste dabei zweimal durch die Primärleiteröffnung des Wandlers gefädelt werden.

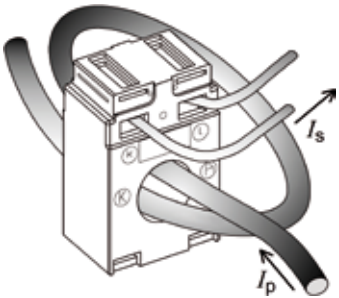


Abb. 13
Beispiel eines Fädelwandlers mit zwei Primärwindungen

SUMMEN-STROMWANDLER (engl. summation CT), auch kurz Summenwandler genannt, sind Sonderformen von Wickelwandlern, jedoch mit mehreren, untereinander getrennten Primärwicklungen. Sie dienen i. d. R. der Addition von Strömen eines gleichen Strangs. (Mehr dazu in Kapitel 7.5/S. 96). Diese Summenstrom-Messwandler sind nicht zu verwechseln mit den oft auch als Summen-Stromwandler bezeichneten Wandlern für die Fehlerstromerkennung.

Um Verwechslungen zu vermeiden, wird für Letztere daher immer öfter der Begriff Differenz-Stromwandler (engl. feedthrough residual current CT) verwendet oder kurz Differenzwandler. Hierbei werden mehrere gegeneinander isolierte Leiter durch die Primärleiteröffnung eines dafür ausgelegten Stromwandlers geführt. So wird je nach Durchsteckrichtung die Summe oder die Differenz der Ströme gebildet wie z. B. bei einer FI-Schutzeinrichtung.

SÄTTIGUNGSWANDLER (engl. saturable CT) werden hauptsächlich in der Mittelspannungstechnik im Sekundärkreis von Schutzwandlern eingesetzt, wenn diese gleichzeitig für Messaufgaben verwendet werden sollen, da Schutzwandler aufgrund ihrer Bestimmung die den Sekundärkreis schützende Sättigung erst bei höheren Strömen erreichen. Die im Messkreis zwischen Schutzwandler und Messgeräten eingebauten Sättigungswandler sorgen für den rechtzeitigen Sättigungseinsatz und damit den Schutz der Messgeräte vor zu hohen Strömen. So entsteht eine Kombination aus Hauptwandler (engl. main CT) und Sättigungswandler, wie in Abb. 14/S. 27 gezeigt.

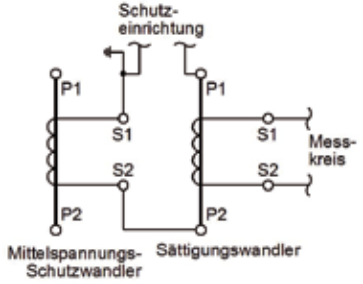


Abb. 14
Beschaltung eines Schutzwandlers mit einem Sättigungswandler

ZWISCHENSTROMWANDLER (engl. interposing CT) finden ihre Anwendung im Sekundärkreis eines Hauptwandlers. Mit ihnen kann der Sekundärstrom eines Hauptwandlers an die Messaufgabe angepasst werden, wenn z. B. der Sekundärstrom des Hauptwandlers 5 A beträgt, ein Strom von 1 A jedoch für die Messaufgabe benötigt wird. Daher rührt auch die manchmal anzutreffende Bezeichnung Anpasswandler (engl. matching CT). Früher wurden diese auch Anpassungs-Stromwandler genannt und dienten hauptsächlich dem Zweck, einen Hauptwandler an eine Schutztechnik anzupassen. Der vorher erwähnte Sättigungswandler ist ebenfalls eine Sonderform eines Zwischenwandlers und streng genommen ebenfalls der Summen-Stromwandler.

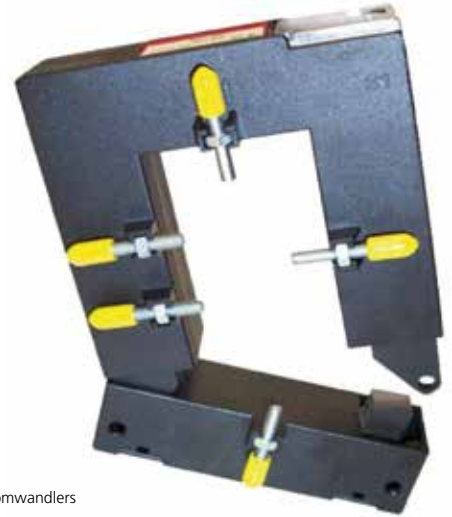


Abb. 15
Beispiel eines Umbau-Stromwandlers

SEKUNDÄR UMSCHALTBARE STROMWANDLER (engl. secondary tapped CT) haben sekundär eine oder mehrere Anzapfungen, um durch Beschalten dieser verschiedene Übersetzungen realisieren zu können. Der Begriff „umschaltbar" ist also nicht ganz korrekt und sollte besser durch den Begriff „umklemmbar" ersetzt werden. Die nicht benutzten Anschlüsse müssen hierbei offen bleiben.

EICHRECHTSKONFORME STROMWANDLER (engl. certifiable CT for revenue metering) haben eine Bauartzulassung und sind für den Einsatz zu Verrechnungszwecken zugelassen.

UMBAU-STROMWANDLER (engl. clamp-type CT oder split core CT) haben einen teilbaren Kern und werden hauptsächlich zum nachträglichen Einbau verwendet, um das Auftrennen des Primärleiters zu vermeiden. Einen typischen Umbau-Stromwandler zeigt Abb. 15/S. 28.

Beim **ZANGEN-STROMWANDLER (engl. current clamps)** ist wie beim Umbau-Stromwandler der Wandlerkern geteilt. Die beiden Kernhälften schließen wie die Backen einer Zange. Dadurch können Ströme gemessen werden, ohne dass die Leitung unterbrochen wird. Er ist zum schnellen und mehrfachen Öffnen konzipiert und dient der temporären Strommessung.

KABELUMBAU-STROMWANDLER (cable-type CT) für Erdschlusserfassung, gelegentlich auch Nullstromwandler genannt, sind häufig in Mittelspannungsnetzen zur Erfassung von Erdschlüssen anzutreffen. Da in diesen Netzen fast ausschließlich Kabel eingesetzt werden und dadurch die Isolationsanforderung bereits ins Kabel verlegt wurde, können hier aus Sicht der Isolation Niederspannungswandler (0,72 kV oder 1,2 kV) zum Einsatz kommen. Im ungestörten Betrieb ist die Summe der Ströme aller durch den Wandler geführten Leitungen null, was sich erst bei Erdschluss ändert. Der Wandler liefert dann sekundärseitig einen Strom, der zur Erdschlusserfassung verwendet wird.

Bei **STROMWANDLERN MIT GIESSHARZVERGUSS (engl. CT compound-filled with cast resign)** wird durch zusätzliches Vergießen Tropenfestigkeit (engl. tropic-proof) erzielt. Tropenfestigkeit ist kein genormter Begriff bei Stromwandlern, wird aber oft gerne benutzt, um auf extreme Feuchtigkeit und Temperaturschwankungen hinzuweisen. Es gibt jedoch keine definierten Werte für diese Einflussgrößen. Durch Vergießen wird auch eine höhere Schock- und Rüttelfestigkeit (engl. vibration resistance) bei extremer mechanischer Beanspruchung erreicht (siehe auch DIN EN 60068).

Bei einem **DREIPHASEN-STROMWANDLERSATZ (engl. 3-phase CT)** befinden sich drei Stromwandler in einem Gehäuse mit je drei getrennten Primärleiterdurchführungen und drei getrennten Sekundäranschlüssen. Diese können nur bei Kabeln als Primärleiter oder nur bei einem bestimmten Schienenabstand eines Dreiphasensystems eingesetzt werden. Da hier der Einsatz von drei einzelnen Stromwandlern

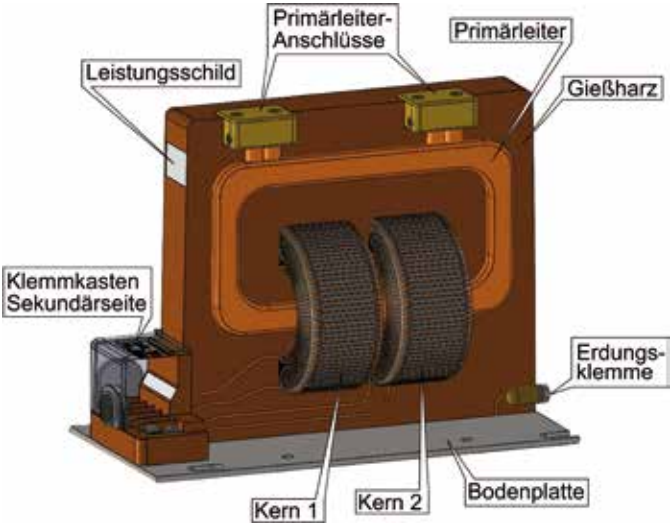
deutlich flexibler ist, sind Dreiphasen-Stromwandlersätze nahezu aus der Mode gekommen und nur für Spezialanwendungen bei definierten Schienenabständen vorgesehen, z. B. in der Stromzuführung von Sicherungs- und Trennleisten.

Darüber hinaus werden noch im Mittelspannungsbereich
· Stützer-Stromwandler und
· Durchführungs-Stromwandler
verwendet

STÜTZER-STROMWANDLER (engl. support-type CT) übernehmen neben der eigentlichen Aufgabe als Stromwandler zusätzlich die Stützfunktion für die Stromschienen und müssen dadurch auch in der Lage sein, die mechanischen Umbruchkräfte abzufangen, die bei einem Kurzschluss im Primärkreis entstehen.

DURCHFÜHRUNGS-STROMWANDLER (engl. bushing-type CT) sind prinzipiell Aufsteck-Stromwandler mit einer für das höhere Spannungsniveau tauglichen Isolation, die gleichzeitig als Wanddurchführung dienen.
Auch können Stromwandler mehrere Sekundärwicklungen auf getrennten Kernen mit gleicher oder unterschiedlicher Funktion haben. So wird z. B. gern ein Mess- mit einem Schutzwandler kombiniert. Hier wird dann von einem Messkern (engl. measuring core) und einem Schutzkern (engl. protection core) gesprochen. Somit handelt es sich im vorliegenden Fall um einem Zweikernwandler (Abb. 16/S. 32). Selbstverständlich sind darüber hinaus weitere Kerne für unterschiedliche

Abb. 16
Beispiel eines Zweikern-Mittelspannungswandlers
(Schnittzeichnung)



Aufgaben möglich. Man spricht dann von Mehrkernwandlern (engl. multi-core CT).
Im Mittelspannungsbereich wird so die aufwendige Isolation für einen zweiten Wandler eingespart. In der Niederspannung sind solche Wandler unüblich. Es ist hier kostengünstiger, zwei separate Wandler für die Mess- und die Schutzaufgabe zu verwenden.

Bei den Bemessungsgrößen (früher Nenngrößen) findet man heute die Indizes „r" für „rated", engl. für bemessen. Nachfolgende Bemessungsgrößen charakterisieren einen Stromwandler.

3.1 PRIMÄRER UND SEKUNDÄRER BEMESSUNGSSTROM I_{pr} UND I_{sr}, BEMESSUNGSÜBERSETZUNG k_r

Primärer und sekundärer Bemessungsstrom (früher Nennstrom, engl. rated current) sind die auf dem Leistungsschild (Abb. 17/S. 33) angegebenen Stromwerte,

- die den Stromwandler kennzeichnen,
- für die der Stromwandler bemessen ist,
- auf die sich weitere Charakteristika des Stromwandlers beziehen.

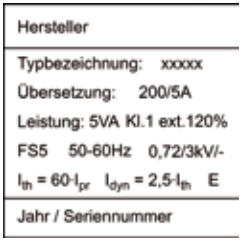


Abb. 17
Leistungsschild (Beispiel)

Nach der DIN EN 61869-2 sind genormte Bemessungs-Sekundärströme 1 A und 5 A . Seltener gibt es, bedingt durch die vorhergegangenen Normen, noch 2 A und die durch √3 geteilten Normwerte für Stromwandler mit im Dreieck geschalteten Sekundärwicklungen. Genormte Bemessungs-Primärströme sind 10; 12,5; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 75 A, sowie deren dezimale Vielfache und Teile davon.

Da Normen im Gegensatz zu Gesetzen nicht bindend sind, sind auch andere Bemessungsströme, z. B. 2,5 A durchaus möglich. Auch kann die Sekundärgröße eine Spannung sein, die an einem internen Widerstand aus dem Sekundärstrom gewonnen wird (Sensoren, Kapitel 2.3/S. 22).

Primärer und sekundärer Bemessungsstrom werden als ungekürzter Bruch angegeben und bilden so die Bemessungsübersetzung (früher Nennübersetzung, engl. rated transformation ratio)

Gleichung 5

$$k_r = \frac{I_{pr}}{I_{sr}}$$

k_r	Bemessungsübersetzung
I_{pr}	primärer Bemessungsstrom
I_{sr}	sekundärer Bemessungsstrom

Eine korrekte Angabe sollte eigentlich z. B. 200 A/5 A lauten. Es hat sich aber die Schreibweise 200/5 A eingebürgert.
Bei einem idealen, fehlerfreien Stromwandler drückt die Bemessungsübersetzung das Verhältnis eines jeden beliebigen Primärstroms I_p zum Sekundärstrom I_s innerhalb eines definierten Strombereichs (dem Arbeitsbereich) aus. Gleichung 2/S. 12 gilt daher nur für den idealen, fehlerfreien Stromwandler.

Ein idealer Stromwandler mit der Bemessungsübersetzung von z. B. $k_r = 200/5$ A liefert folgerichtig nach dieser Gleichung bei einem Primärstrom von $I_p = 100$ A einen Sekundärstrom von $I_s = 2{,}5$ A.

3.2 THERMISCHER BEMESSUNGS-KURZZEITSTROM I_{th}

Ein Stromwandler muss im Stromnetz auftretende, kurzzeitige Überströme, wie sie z. B. bei Kurzschlüssen entstehen, schadlos überbestehen können. Der Effektivwert des Primärstroms, den der Wandler bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung eine Sekunde lang aushalten muss, ohne Schaden zu nehmen, heißt thermischer Bemessungs-Kurzzeitstrom (engl. rated short-time thermal current). Als thermischer Bemessungs-Kurzzeitstrom wird häufig der 60-fache Bemessungsstrom gefordert. Bei Mittelspannungswandlern ist oft sogar der Faktor 100 oder ein höherer anzutreffen.

I_{th} muss nicht zwingend als Faktor des Bemessungsstroms angegeben werden. Die Angabe in kA ist ebenfalls zulässig und bei Mittelspannungswandlern üblich.

Beim thermischen Bemessungs-Kurzzeitstrom steht die Wärmeentwicklung im Vordergrund, während es bei dem nachfolgenden Bemessungs-Stoßstrom in erster Linie auf die Kraftentwicklung ankommt, die das durch die Ströme verursachte Magnetfeld ausübt.

3.3 BEMESSUNGS-STOSSSTROM I_{dyn}

Beim Bemessungs-Stoßstrom (engl. rated dynamic current) handelt es sich um den Scheitelwert der ersten Amplitude des Primärstroms, dessen magnetischer Kraftwirkung der Stromwandler bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung ohne Beschädigung standhält. Das gilt bei einem Aufsteck-Stromwandler nicht für die Umbruchkräfte, die das Schienensystem entwickelt. Es ist darauf zu achten, dass die auftretenden Kurzschlusskräfte der Schienen durch zusätzliche Stützer abgefangen werden müssen. Typisch für den Bemessungs-Stoßstrom ist der Wert des 2,5-fachen thermischen Bemessungs-Kurzzeitstroms. Nur bei Abweichung von diesem Wert muss der Bemessungs-Stoßstrom auf dem Leistungsschild angegeben werden. Trotzdem wird er häufig auch dann angegeben in der Form $I_{dyn} = 2{,}5 \cdot I_{th}$.

3.4 THERMISCHER BEMESSUNGS-DAUERSTROM I_{cth}

Der thermische Bemessungs-Dauerstrom (engl. rated continuous thermal current) ist der Primärstrom, mit dem der Wandler bei Bemessungsbürde (Kapitel 3.10/S.51) dauerhaft betrieben werden kann, ohne die Anforderungen der Genauigkeitsklasse (Kapitel 4/S. 21) zu verletzen und ohne die Spezifikation der Isolierstoffklasse (Kapitel 5.4/S. 73) zu überschreiten. Genormte thermische Bemessungs-Dauerstromstärken sind 100 %, 120 %, 150 % und 200 % des Bemessungsstroms.

Obwohl sich die Angabe des thermischen Bemessungs-Dauerstroms gemäß der Norm auf den Primärstrom bezieht, ist es im Grunde genommen aber belanglos, ob die Basis der primäre oder sekundäre Bemessungsstrom ist, da dieser i. Allg. in Prozent des Bemessungsstroms angegeben wird. So kann man z. B. bei einem Wandler mit der Übersetzung 100/5 A von einem primären thermischen Bemessungs-Dauerstrom von 120 A reden oder einem sekundären thermischen Bemessungs-Dauerstrom von 6 A .

Beträgt der thermische Bemessungs-Dauerstrom 100 % des Bemessungsstroms, kann diese Angabe auf dem Typenschild entfallen. Für alle anderen thermischen Bemessungs-Dauerströme wurden ergänzend zur Genauigkeitsklasse die Bezeichnungen „ext.120 %“; „ext.150 %“; „ext.200 %“ eingeführt. In den allermeisten Fällen ist 120 % üblich. Der thermische Bemessungs-Dauerstrom von 100 % ist erst vor wenigen Jahren zusätzlich in die Norm aufgenommen worden.

3.5 ÜBERSETZUNGSMESSABWEICHUNG ε

Die Übersetzungsmessabweichung (engl. current error, ratio error) eines Stromwandlers, auch Stromfehler genannt, ausgedrückt in Prozent, ist definiert durch die Gleichung 6/S. 38, wie sie auch in der DIN EN 61869-2 zu finden ist.

Gleichung 6

$$\varepsilon = \frac{k_r I_s - I_p}{I_p} \times 100\,\%$$

ε	Stromfehler
k_r	Bemessungsübersetzung
I_s	Sekundärstrom
I_p	Primärstrom

I'_p	auf die Sekundärseite bezogener Primärstrom, bzw. idealer Sekundärstrom

Hier ist zu beachten, dass im Zähler der Gleichung 6/S. 38 eine reine Betragsaddition der Effektivwerte stattfindet, im Gegensatz zur Gesamtmessabweichung (Kapitel 3.7/S. 41). Abb. 18/S. 39 verdeutlicht den Stromfehler anhand einer typischen Messschaltung, wobei in der praktischen Anwendung im Primärkreis natürlich kein Amperemeter vorhanden ist. Die beiden Amperemeter messen jeweils die Effektivwerte von Primär- und Sekundärstrom, ohne Berücksichtigung der durch den Wandlerfehler bedingten Phasenverschiebung zwischen diesen beiden Strömen.

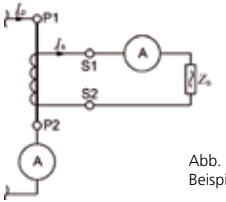


Abb. 18
Beispiel zur Messung des Stromfehlers

Die Messschaltung erfüllt in ihrer Funktion die Gleichung 6/S. 38. Im Umkehrschluss wird deutlich, dass bei der Messung des Effektivwerts des Sekundärstroms der dabei auftretende Messfehler der Stromfehler ist, abgesehen vom Fehler des Messgeräts.
Die Division von Zähler und Nenner des Bruchs in 6/S. 38 durch die Bemessungsübersetzung k_r liefert

aus Gleichung 6

$$\varepsilon = \frac{I_s - I_p / k_r}{I_p / k_r} \times 100\,\%$$

und mit Gleichung 3/S. 13 **Gleichung 7**

$$\varepsilon = \frac{I_s - I'_p}{I'_p} \times 100\,\%$$

Die Betrachtung der Übersetzungsmessabweichung ε lässt sich also auf die linke Seite des ESBs (Abb. 5/S. 11) reduzieren. Die arithmetische Differenz von tatsächlichem Sekundärstrom I_s und idealem Sekundärstrom I'_p, bezogen auf den idealen Sekundärstrom liefert ebenfalls die Übersetzungsmessabweichung.
Um hier Missverständnissen vorzubeugen, sei noch einmal darauf hingewiesen, dass es sich bei der arithmetischen Differenz von tatsächlichem Sekundärstrom und idealem Sekundärstrom nicht um den Fehlerstrom I_ε handelt! Letztere ergibt sich aus der geometrischen Differenz, also der Subtraktion der Stromzeiger von $\underline{I}'_p$ und $\underline{I}_s$.

3.6 FEHLWINKEL $\Delta\varphi$

Wie ein Transformator enthält auch ein Stromwandler interne parasitäre Elemente wie Eisenverlustwiderstand, Streuinduktivität und Wicklungswiderstand (siehe auch ESB Abb. 5/S. 11). Diese Komponenten verursachen neben dem Stromfehler auch eine Phasenverschiebung zwischen Primär- und Sekundärstrom, den Fehlwinkel (engl. phase displacement), auch Winkelfehler genannt. Spielt der Fehlwinkel bei der reinen Strommessung auch keine Rolle, so macht er sich bei der Leistungs- und Energiemessung als zusätzlicher Fehler bemerkbar. Auch beim Betrieb von phasenempfindlichen Schutzeinrichtungen wie z. B. bei Richtungsschutzgeräten, verdient der Fehlwinkel besondere Beachtung.
Der Fehlwinkel wird in Winkelminuten angegeben. Bekanntlich kann man die Zeitachse einer Periode des Wechselstroms auch mit 360° beschreiben. Ein Grad hat dabei 60 Minuten als kleinere Einheit. Alter-

nativ kann der Winkelfehler auch in Centiradiant beschrieben werden (1 crad = 34,4 min). **Der Winkelfehler ist positiv definiert, wenn die sekundäre Größe voreilt.**

3.7 GESAMTMESSABWEICHUNG ε_c

Bei der Gesamtmessabweichung (engl. composite error) handelt es sich im Gegensatz zur Übersetzungsmessabweichung ε um den Betrag der zeigerrichtigen Differenz von tatsächlichem und idealem Sekundärstrom, bezogen auf den Betrag des idealen Sekundärstroms. Damit geht Gleichung 7/S. 39 über in

Gleichung 8

$$\varepsilon_c = \frac{\left| \underline{I}_s - \underline{I}'_p \right|}{\left| \underline{I}'_p \right|} \times 100\,\%$$

ε_c	Gesamtmessabweichung
$\underline{I}_s$	(komplexer) Zeiger des Sekundärstroms
$\underline{I}'_p$	(komplexer) Zeiger des auf die Sekundärseite bezogenen Primärstroms, bzw. des idealen Sekundärstroms

Im Zähler dieser Gleichung handelt es sich um den Fehlerstrom $\underline{I}_\varepsilon$, denn wie aus dem ESB (Abb. 5/S. 11) leicht zu erkennen, gilt

Gleichung 9

$$\underline{I}_\varepsilon = \underline{I}_s - \underline{I}'_p$$

$\underline{I}_\varepsilon$	(komplexer) Zeiger des Fehlerstroms
$\underline{I}_s$	(komplexer) Zeiger des Sekundärstroms
$\underline{I}'_p$	(komplexer) Zeiger des auf die Sekundärseite bezogenen Primärstroms, bzw. des idealen Sekundärstroms

ε_c	Gesamtmessabweichung

und mit Gleichung 8/S. 41 folgt damit **Gleichung 10**

$$\varepsilon_c = \frac{\left| \underline{I}_\varepsilon \right|}{\left| \underline{I}'_p \right|} \times 100\,\%$$

Auch Gleichung 8/S. 41 oder Gleichung 10/S. 42 lassen sich auf den Primärstrom beziehen, analog zu Gleichung 6/S. 39. Dazu braucht nur der Bruch mit der Bemessungsübersetzung k_r erweitert zu werden. Somit folgt

aus Gleichung 8

$$\varepsilon_c = \frac{\left| k_r \underline{I}_s - k_r \underline{I}'_p \right|}{\left| k_r \underline{I}'_p \right|} \text{ x } 100\,\%$$

ε_c	Gesamtmessabweichung
k_r	Bemessungsübersetzung
$\underline{I}_s$	(komplexer) Zeiger des Sekundärstroms
$\underline{I}'_p$	(komplexer) Zeiger des auf die Sekundärseite bezogenen Primärstroms, bzw. des idealen Sekundärstroms
$\underline{I}_p$	(komplexer) Zeiger des Primärstroms

und mit Gleichung 3/S. 13 folgt damit **Gleichung 11**

$$\varepsilon_c = \frac{\left| k_r \underline{I}_s - k_r \underline{I}_p \right|}{\left| \underline{I}_p \right|} \text{ x } 100\,\%$$

Sofern in der Praxis die Gesamtmessabweichung ε_c betrachtet wird, befindet sich der Kern oft nahe der Sättigung und somit im nichtlinearen Bereich des Übertragungsverhaltens eines Wandlers. Fehlerstrom und Primärstrom sind dann häufig stark mit Oberwellen behaftet. Zeigerdarstellungen sind jedoch nur bei sinusförmigen Verläufen sinnvoll.

Daher ist in der DIN EN 61869-2 als Definition der Gesamtmessabweichung die Gleichung

Gleichung 12

$$\varepsilon_c = \frac{\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T (k_r i_s - i_p)^2 \, dt}}{I_p} \times 100\,\%$$

ε_c	Gesamtmessabweichung
T	Periodendauer
k_r	Bemessungsübersetzung
i_s	Sekundärstrom (Momentanwert)
i_p, I_p	Primärstrom (Momentanwert und Effektivwert)

$\underline{I}_\varepsilon$	(komplexer) Zeiger des Fehlerstroms
$\underline{I}_s$	(komplexer) Zeiger des Sekundärstroms
$\underline{I}_p$	(komplexer) Zeiger des Primärstroms

zu finden, die für rein sinusförmige Ströme mit Gleichung 11/S. 43 übereinstimmt. Auf Gleichung 12/S. 44 soll hier nicht näher eingegangen werden. Wer hierzu weitere Informationen möchte, sei an das Literaturverzeichnis (z. B. [3] oder [4]) verwiesen.
Die Gesamtmessabweichung ist für den Anwender insofern von Bedeutung, als sich Bemessungs-Begrenzungsstrom und Bemessungs-Genauigkeitsgrenzstrom (Kapitel 3.8/S. 46) auf sie beziehen. Obwohl der Stromfehler positiv oder negativ sein kann, ergibt sich für die Gesamtmessabweichung immer eine positive Größe, da Effektivwerte stets positiv sind.

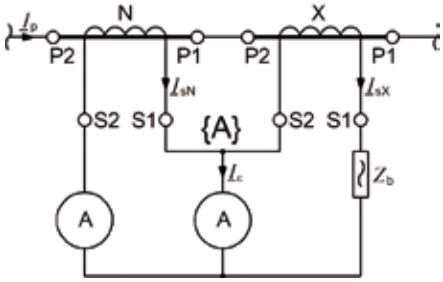


Abb. 19
Beispiel zur Messung der Gesamtmessabweichung

Zum besseren Verständnis der Gesamtmessabweichung soll noch eine einfache Messschaltung betrachtet werden am Beispiel eines Stromwandlers mit der Übersetzung 1:1, wie in Abb. 19/S. 45 gezeigt. Sowohl der Primär- als auch der (bis auf den Fehler) gleich große Sekundärstrom durchfließen das Amperemeter, jedoch in unterschiedlichen Richtungen, sodass eine Subtraktion beider Ströme stattfindet. Nach der ersten kirchhoffschen Regel (Knotenregel) gilt für Punkt {A}, dass bei phasenrichtiger Addition aller Ströme die Summe Null ergibt. Somit folgt hier als Differenz der tatsächliche Fehlerstrom und kann bei reinen Sinusgrößen geschrieben werden als

Gleichung 13

$$I_\varepsilon = I_s - I_p$$

Achtung! Gleichung 13/S. 45 gilt nur für das hier betrachtete Beispiel mit dem Sonderfall der Bemessungsübersetzung von 1:1. Abgeleitet aus dem ESB (Abb. 5/S. 11) gilt allgemeingültig Gleichung 9/S. 42.
Beim Vergleich der Gleichungen 6/S. 38 und 11/S. 43 wird der Unterschied zwischen Übersetzungsmessabweichung ε und Gesamtmessabweichung ε_c nochmals deutlich. Während bei der Übersetzungsmessabweichung im Zähler der Gleichung die arithmetische Differenz der Effektivwerte von mit der Bemessungsübersetzung multipliziertem Sekundärstrom und Primärstrom zu sehen ist, werden bei der Gesamtmessabweichung vor der Betragsbildung diese Größen erst zeigerrichtig, also vektoriell, subtrahiert.

3.8 BEMESSUNGS-BEGRENZUNGSSTROM I_{PL}, BEMESSUNGS-GENAUIGKEITSGRENZSTROM, ÜBERSTROM-BEGRENZUNGSFAKTOR FS, GENAUIGKEITSGRENZFAKTOR ALF

Weder der Bemessungs-Begrenzungsstrom I_{PL} (engl. excitation current) bei Strom-Messwandlern noch der Bemessungs-Genauigkeitsgrenzstrom (engl. rated accuracy limit primary current) bei Schutz-Stromwandlern müssen auf dem Typenschild angegeben werden. Der Bemessungs-Begrenzungsstrom ist der Primärstrom eines Messwandlers, bei dem die Gesamtmessabweichung des Sekundärstroms 10 % beträgt. Damit lässt sich der Überstrom- Begrenzungsfaktor (engl. instrument security factor) definieren als das Verhältnis des Bemessungs-Begrenzungsstroms zum primären Bemessungsstrom.
Der Überstrom-Begrenzungsfaktor (engl.: instrument security factor)

oder kurz Überstromfaktor gibt an, ab dem Wievielfachen des Bemessungsstroms ein Messwandler in Sättigung geht. Hierzu gilt die Bezeichnung FS 5 oder FS 10. Zur Abgrenzung gegen Schutzwandler hieß die Bezeichnung früher M 5 oder M 10 (M für Messwandler). FS 5 sagt, dass der Wandler spätestens beim fünffachen Bemessungsstrom in Sättigung gehen muss, bei FS 10 entsprechend beim zehnfachen, vorausgesetzt, der Wandler ist mit der Bemessungsbürde belastet. Exakt definiert ist dieser Punkt durch die Beschreibung, dass beim fünffachen Bemessungsstrom (bzw. zehnfachen) die Abweichung vom idealen, fehlerfreien Stromverlauf, bezogen auf die Gesamtmessabweichung ε_c, mindestens 10 % betragen muss (nach DIN EN 61869-2).

Der Bemessungs-Genauigkeitsgrenzstrom bei Schutzwandlern ist das Pendant zum Bemessungs-Begrenzungsstrom eines Messwandlers, also der Wert des Primärstroms eines Schutz-Stromwandlers, bis zu dem dieser die Genauigkeitsanforderung erfüllt. Demzufolge entspricht dem Genauigkeitsgrenzfaktor eines Schutzwandlers der Überstrom-Begrenzungsfaktor eines Messwandlers. Während also Messwandler oberhalb des Bemessungsstroms möglichst rasch in Sättigung gehen sollen, um ein Anwachsen des Sekundärstroms im Fehlerfall zu vermeiden, wird bei Schutzwandlern eine möglichst weit außerhalb des Bemessungsstroms liegende Sättigung verlangt. Wann die Sättigung erreicht ist, ist bei Schutzwandlern durch den Genauigkeitsgrenzfaktor ALF (engl. accuracy limiting factor) ausgedrückt in Verbindung mit dem vorausgehenden Buchstaben „P" (engl.: protection) und der Genauigkeits-Klassenangabe. So bedeutet z. B. 5P10, dass beim zehnfachen Bemessungsstrom der Fehler, bezogen auf die Gesamtmessabweichung ε_c, höchstens 5 % betragen darf, auch wieder vorausgesetzt, der Wandler ist mit der Bemessungsbürde belastet. Nach der DIN EN 61869-2 genormte Genauigkeit-Grenzfaktoren sind 5; 10; 15; 20 und 30.

3.8.1 NUMERISCHES BEISPIEL

Hier soll ein Zahlenbeispiel für zusätzliche Klarheit sorgen anhand eines hypothetischen Stromwandlers mit nachfolgenden Werten, auf deren physikalische Zusammenhänge nicht weiter eingegangen wird, um nicht den Blick für das Wesentliche zu verlieren.

Bemessungswerte:	
Bemessungsübersetzung k_r:	100/5 A
Genauigkeitsklasse:	1
Bemessungsleistung S_r:	10 VA
Überstrom-Begrenzungsfaktor:	FS 5

Werte bei I_p=350 A:	
Sekundärstrom I_s:	15,925 A
fehlerfreier Sekundärstrom I'_p:	17,5 A
Stromfehler ε:	-9 %
Gesamtmessabweichung ε_c:	10 %
Fehlerstrom I_ε:	1,75 A

Wie schon erwähnt, ergibt sich der Fehlerstrom I_ε nicht als arithmetische Differenz von auf die Sekundärseite bezogenem Primärstrom I'_p und Sekundärstrom I_s. Der Fehlerstrom I_ε ist die vektorielle Differenz beider.
Bei diesem hypothetischen Strom-Messwandler mit der Übersetzung 100/5 A wird der Primärstrom über den Bemessungsstrom hinaus erhöht. Wir nehmen an, dass beim Primärstrom von 350 A auf der Sekundärseite statt der zu erwartenden 17,5 A nur noch ein Effektivwert von 15,925 A zu messen ist, was folgerichtig als beginnende Sättigung gedeutet wird.

Der Stromfehler in diesem Arbeitspunkt beträgt nach Gleichung 6/S. 38

$$\varepsilon = \frac{k_r I_s - I_p}{I_p} \times 100\,\% = \frac{20 \cdot 15{,}925\ \text{A} - 350\ \text{A}}{350\ \text{A}} \times 100\,\% = -9\,\%$$

ε	Stromfehler
k_r	Bemessungsübersetzung
I_s	Sekundärstrom
I_p	Primärstrom

Dieser Stromfehler interessiert im Zusammenhang mit dem Fehler, der bei der Strommessung entsteht. Die die Begrenzung beschreibenden Größen beziehen sich jedoch auf die Gesamtmessabweichung.
Die Gesamtmessabweichung ε_c ergibt sich nach Gleichung 10/S. 42 oder 11/S. 43 zu

$$\varepsilon_c = \frac{\left| k_r I_s - k_r I_p \right|}{\left| I_p \right|} \times 100\,\% = \frac{\left| I_z \right|}{\left| I'_p \right|} \times 100\,\% = \frac{1{,}75\ \text{A}}{17{,}5\ \text{A}} \times 100\,\% = 10\,\%$$

Damit ist der Primärstrom von 350 A also der Bemessungs-Begrenzungsstrom I_{PL} und der Faktor 3,5 der Überstrom-Begrenzungsfaktor FS. Es wird jedoch nicht FS 3,5 angegeben, sondern normgerecht FS 5. Man sieht, dass die Gesamtmessabweichung ε_c größer ist als der Betrag des Stromfehlers ε. Den Betrag von 10 % erreicht die Gesamtmessabweichung also vor dem Stromfehler.

3.9 BEMESSUNGSLEISTUNG S_r

Der Widerstand im Sekundärkreis setzt sich zusammen aus dem Leitungswiderstand und den Innenwiderständen der angeschlossenen Messgeräte. Wie schon in Kapitel 1.2/S. 8 erklärt, ist der Stromwandler als Konstantstromquelle anzusehen, wobei der Sekundärstrom idealerweise nur vom Primärstrom entsprechend der Übersetzung abhängt. Damit nun durch den Widerstand im Sekundärkreis der geforderte Strom fließen kann, muss der Stromwandler gemäß seiner Funktion als Konstantstromquelle die Sekundärspannung entsprechend erhöhen, um dem ohmschen Gesetz 1/S. 3 gerecht zu werden.
Damit gibt der Stromwandler nach der Gleichung 14/S. 50 die Leistung ab.

Gleichung 14

$$S = U\,I$$

Die Bemessungsleistung (früher Nennleistung, engl. rated output) ist nun entsprechend Gleichung 14/S. 50 diejenige Scheinleistung, für die der Stromwandler ausgelegt, also bemessen ist, und auf die sich Genauigkeit und Überstromfaktor FS beziehen. Sie wird in VA angegeben, wobei genormte Werte 1; 1,5; 2; 2,5; 5; 10; 15; 30 VA sind. Normgerecht dürfen aber auch Werte über 30 VA entsprechend dem Anwendungsfall gewählt werden. Die Bemessungsleistung beschreibt also das Leistungsvermögen eines Stromwandlers, den Sekundärstrom innerhalb der erlaubten Fehlergrenzen durch den Sekundärwiderstand „treiben" zu können.

3.10 BÜRDE Z_b, BEMESSUNGSBÜRDE Z_{br}

Im Sprachgebrauch der Wandlertechnik wird die Summe aller externen Scheinwiderstände im Sekundärkreis als Bürde bezeichnet. Die Bürde ist also ein Widerstand und sollte folglich mit der Einheit Ω versehen werden. Im allgemeinen Umgang wird aber häufig, historisch und umgangssprachlich bedingt, die Bürde in VA angegeben, und selbst die DIN EN 61869-2 weist unter 2.1.13 im Nebensatz darauf hin, dass die Bürde üblicherweise in VA angegeben wird. Diese stillschweigende Zustimmung zur weiteren Fortführung der fehlerhaften Terminologie ist nicht gerade hilfreich, trägt aber dem Umstand Rechnung, dass diese alte Gewohnheit nur sehr schwer aufzugeben ist.
Die Bemessungsbürde Z_{br} (früher Nennbürde, engl. rated burden) ist der an die Sekundärklemmen anzuschließende Scheinwiderstand, für den der Stromwandler bemessen ist und der als Basis für die Genauigkeitsforderungen dient.

Bei Abschluss des Stromwandlers mit der Bemessungsbürde Z_{br} liefert dieser bei Bemessungsstrom I_{sr} die Bemessungsleistung S_r.

Die Bemessungsbürde ist bis < 5 VA rein ohmsch und ab ≥5 VA ist sie nach Norm mit einem induktiven Blindanteil behaftet, der einem Bürdenleistungsfaktor von $cos\beta = 0{,}8$ entspricht.
Mit Hilfe der Bemessungsbürde kann die Bemessungsleistung auch wie folgt definiert werden, wie in der Norm DIN EN 61869-2 nachgesehen werden kann:
Die Bemessungsleistung ist das Produkt aus Bemessungsbürde und dem Quadrat des sekundären Bemessungsstroms in VA, entsprechend Gleichung 15/S. 52.

Gleichung 15

$$S_r = Z_{br}\, I^2_{sr}$$

S_r	Bemessungsleistung
Z_{br}	Bemessungsbürde
I_{sr}	sekundärer Bemessungsstrom

Gleichung 15/S. 52 ist hilfreich, um einen Überblick zu gewinnen, in welcher Größenordnung sich die Werte der Bürden bei den genormten Bemessungsleistungen bewegen. Betrachtet man einen Stromwandler mit dem sekundären Bemessungsstrom von 5 A und einer Bemessungsleistung von 5 VA, so stellt man mit

$$Z_{br} = \frac{S_r}{I^2_{sr}} = \frac{5\ \text{VA}}{25\ \text{A}^2} = 200\ \text{m}\Omega$$

fest, dass sich sogar im Milliohmbereich bewegt wird. Bei einem sekundären Bemessungsstrom von 1 A folgt analog dazu 5 Ω.

Hier zeichnet sich schon ab, dass wegen des Leitungswiderstands bei großen Entfernungen Stromwandler mit 1 A-Ausgang vorzuziehen sind.

3.10.1 EINFLUSS DER BEBÜRDUNG AUF DEN ÜBERSTROM-BEGRENZUNGSFAKTOR FS

Der Überstrom-Begrenzungsfaktor, der den Schutz des Messkreises durch die natürliche magnetische Sättigung des Kerns vor zu hohen Strömen ausdrückt, hängt von der Bebürdung ab. Normgerecht definiert mit FS 5 oder FS 10 ist dieser bei Bemessungsbürde, obwohl die Sättigung tatsächlich früher einsetzen kann. Im Beispiel Kapitel 3.8.1/S. 48 geschah das bereits beim 3,5-fachen Bemessungsstrom. Hier soll daher mit n_r der tatsächliche Überstrom-Begrenzungsfaktor bei Bemessungsbürde und mit n der tatsächliche Überstrom-Begrenzungsfaktor bei beliebiger Bürde bezeichnet werden. Gemäß dem ESB (Abb. 5/S. 11) gilt der folgende formelle Zusammenhang:

Gleichung 16

$$E_0 = I_s \sqrt{(R_w + R_b)^2 + X_b^2}$$

Unter der Annahme, dass der Stromwandler unter Bemessungsbedingungen beim n_r-fachen Sekundärstrom in Sättigung geht und E_{0sat} die bei Sättigung erreichte Quellenspannung ist, so geht 16/S. 54 über in die Form

i

$$E_{0sat} = n_r I_{sr} \sqrt{(R_w + R_{br})^2 + X_{br}^2}$$

Andererseits wird die Sättigung auch bei jeder anderen Bürde, bestehend aus dem Wirkanteil R_b und dem Blindanteil X_b mit einem dazugehörenden Faktor n, für ein Vielfaches des Sekundärstroms erreicht, gemäß

ii

$$E_{0sat} = n I_{sr} \sqrt{(R_w + R_b)^2 + X_b^2}$$

E_0	Quellenspannung
E_{0sat}	Quellenspannung bei Sättigung
I_{sr}	sekundärer Bemessungsstrom
R_w	Wicklungswiderstand

n_r	tatsächlicher Überstrom-Begrenzungsfaktor bei Bemessungsbürde
n	tatsächlicher Überstrom-Begrenzungsfaktor bei beliebiger Bürde

Gleichsetzen von (i) und (ii) liefert nach weiterer Umformung letztlich

Gleichung 17

$$n = n_r \sqrt{\frac{(R_w + R_{br})^2 + X_{br}^2}{(R_w + R_b)^2 + X_b^2}}$$

Wird der Winkel zwischen dem Wicklungswiderstand und dem Scheinwiderstand der Bürde vernachlässigt, geht die geometrische Addition in eine arithmetische über und Gleichung 17/S. 55 vereinfacht sich zu 18/S. 55

Gleichung 18

$$n \approx n_r \frac{R_w + Z_{br}}{R_w + Z_b}$$

R_b	Wirkwiderstand einer beliebigen Bürde	X_{br}	Blindwiderstand der Bemessungsbürde
R_{br}	Wirkwiderstand der Bemessungsbürde	Z_b	Scheinwiderstand einer beliebigen Bürde
X_b	Blindwiderstand einer beliebigen Bürde	Z_{br}	Scheinwiderstand der Bemessungsbürde

Zur Fortführung des vorherigen Beispiels aus Kapitel 3.8.1/S. 48 sind folgende Ergänzungen nötig, wobei derselbe Stromwandler jetzt mit 5 VA abgeschlossen werden soll:

Bemessungswerte bei 10 VA:
Wicklungswiderstand R_w: 30 mΩ
Bürden-Wirkwiderstand R_{br}: 320 mΩ
Bürden-Blindwiderstand X_{br}: 240 mΩ
tatsächlicher Überstrom-Begrenzungsfaktor n_r: 3,5

neue Bürdenwerte bei 5 VA:
Bürden-Wirkwiderstand R_b: 160 mΩ
Bürden-Blindwiderstand X_b: 120 mΩ

Mit Gleichung 17/S. 55 folgt jetzt für den tatsächlichen Überstromfaktor

$$n = n_r \sqrt{\frac{(R_w + R_{br})^2 + X_{br}^2}{(R_w + R_b)^2 + X_b^2}} = 3{,}5 \cdot \sqrt{\frac{(30\,\Omega + 320\,\Omega)^2 + 240^2\,\Omega^2}{(30\,\Omega + 160\,\Omega)^2 + 120^2\,\Omega^2}} = 6{,}6$$

Es ist deutlich zu erkennen, dass der bisherige Überstrom-Begrenzungsfaktor von 3,5 bei 10 VA (normgerecht mit FS5 angegeben) wesentlich überschritten wird. **Es ist also aus Sicht des Schutzes des Sekundärkreises nicht sinnvoll, einen Wandler mit einer höheren Bemessungsleistung zu wählen als unbedingt nötig.** Ist die tatsächliche Bebürdung deutlich kleiner, führt diese Unterbürdung zu einem größeren Überstrom-Begrenzungsfaktor mit möglichen unerwünschten Folgen für den Messkreis. Überschreitet die tatsächliche Bebürdung die Bemessungsbürde, spricht man von Überbürdung.

Hierbei kann der Wandler bereits vor Erreichen des Bemessungsstroms in Sättigung gehen.
Unterbürdung kann bei Schutzwandlern dagegen wünschenswert sein. Hier wird der Genauigkeits-Grenzfaktor als Pendant zum Überstrom-Begrenzungsfaktor von Messwandlern weiter in den Überstrombereich verschoben.
Zum Abschuss dieses Beispiels sei noch die Berechnung des Überstromfaktors mit der Näherungsformel 18/S.19 durchgeführt.

$$n \approx n_r \cdot \frac{R_w + Z_{br}}{R_w + Z_b} = 3{,}5 \cdot \frac{30\,\Omega + 240\,\Omega}{30\,\Omega + 120\,\Omega} = 6{,}3$$

Der Unterschied zur Berechnung nach der exakten Gleichung 17/S. 55 ist also nicht so dramatisch. Man kann daher gerne mit der Näherungsgleichung 18/S. 55 arbeiten.

Die Genauigkeitsklassen (engl. accuracy class) von Stromwandlern werden bezeichnet nach dem Betrag des maximal erlaubten Stromfehlers, den ein Wandler bei Bemessungsstrom aufweisen darf. Diese Klassenangabe steht stellvertretend für eine ganze Fehlerkurve, bei der Fehlergrenzen (engl. limits of error) für unterschiedliche Ströme festgelegt sind. Die Fehlerkurve beinhaltet nicht nur die Stromfehlergrenzen (engl. limits of current error), sondern auch die Fehlwinkelgrenzen (engl. limits of phase displacement).

4.1 GENAUIGKEITSKLASSEN VON STROMWANDLERN FÜR MESSZWECKE

Nach der DIN EN 61869-2 sind für Messwandler die Genauigkeitsklassen 5; 3; 1; 0,5; 0,5S; 0,2; 0,2S und 0,1 definiert. Eine Auflistung der einzelnen Genauigkeitsklassen mit den zugehörigen Fehlergrenzwerten ist in Tabelle 1/S. 59 zu sehen.

In der linken Hälfte der Tabelle sind die Stromfehler den jeweiligen Primärströmen zugeordnet. Erklärt anhand der Genauigkeitsklasse 1 (Zeile 15) ist zu erkennen, dass bei 1 % des Primärstroms der Stromfehler der Klasse 1 nicht definiert ist. Bei 5 % des Primärstroms darf der Stromfehler ± 3 % bezogen auf den Messwert nicht überschreiten usw. Der rechte Tabellenteil zeigt die maximal erlaubten Fehlwinkel. Dieser beträgt z. B. für Klasse 1 bei 100 % des Primärstroms ± 60 min.

Ein Zahlenbeispiel soll hier noch einmal Klarheit schaffen. Dazu fließt bei einem beispielhaft angenommenen Stromwandler mit der Be-

messungsübersetzung $k_r = 300/5$ A in der Klasse 1 bei 5 % des Bemessungsstroms ein Primärstrom von 15 A. Idealerweise sollte dann sekundär ein Strom von 0,25 A fließen. Da hier der Stromfehler ± 3 % betragen darf, entsprechend ± 0,0075 A, liegt der tatsächliche Sekundärstrom zwischen 0,2425 A und 0,2575 A.

1	Fehlergrenzwerte für Strom-Messwandler der Klasse 0,1 bis 0,5							
2	Genauig-keitsklasse	Stromfehler ε in % bei % des Bemessungsstroms						
3		1	5	20	50	100	120	150
4	0,1		± 0,4	± 0,2	-	± 0,1	± 0,1	
5	0,1 ext 150		± 0,4	± 0,2	-	± 0,1		± 0,1
6	0,1 ext 200		± 0,4	± 0,2	-	± 0,1		
7	0,2		± 0,4	± 0,35	-	± 0,2	± 0,2	
8	0,2 ext 150		± 0,75	± 0,35	-	± 0,2		± 0,2
9	0,2 ext 200		± 0,75	± 0,35	-	± 0,2		
10	0,25	± 0,75	± 0,35	± 0,2	-	± 0,2	± 0,2	
11	0,5		± 1,5	± 1,5	-	± 0,5	± 0,5	
12	0,5 ext 150		± 1,5	± 1,5	-	± 0,5		± 0,5
13	0,5 ext 200		± 1,5	± 1,5	-	± 0,5		
14	0,55	± 1,5	± 0,75	± 0,75	-	± 0,5	± 0,5	
15	1		± 3	± 1,5	-	± 1	± 1	
16	1 ext 150		± 3	± 1,5	-	± 1		± 1
17	1 ext 200		± 3	± 1,5	-	± 1		
18	3				± 3		± 3	
19	5				± 5		± 0,5	

Tabelle 1
Fehlergrenzwerte für Strom-Messwandler
der Klassen 0,1 bis 5 nach DIN EN 61869-2

	Fehlwinkel $\Delta\varphi$ in min bei % des Bemessungsstroms						
200	**1**	**5**	**20**	**100**	**120**	**150**	**200**
		± 15	± 8	± 5	± 5		
		± 15	± 8	± 5		± 5	
± 0,1		± 15	± 8	± 5			± 5
		± 30	± 15	± 10	± 10		
		± 30	± 15	± 10		± 10	
± 0,2		± 30	± 15	± 10			± 10
	± 30	± 15	± 10	± 10	± 10		
		± 90	± 45	± 30	± 30		
		± 90	± 45	± 30		± 30	
± 0,5		± 90	± 45	± 30			± 30
	± 90	± 45	± 30	± 30	± 30		
		± 180	± 90	± 60	± 60		
		± 180	± 90	± 60		± 60	
± 1		± 180	± 90				± 60

Die Genauigkeitsforderung bei Stromwandlern ist schärfer als z. B. bei Messgeräten, bei denen der Fehler auf den Endwert bezogen wird. Würde der Fehler von ± 3 % auf den Endwert bezogen, so dürfte der Fehler bei Stromwandlern im vorherigen Beispiel ± 0,15 A betragen und wäre damit um den Faktor 20 größer.
Die Genauigkeitsgrenzen der Klassen 0,1 bis 1 müssen bei 25 % und 100 % und die der Klassen 3 und 5 bei 50 % und 100 % der Bemessungsbürde eingehalten werden, wobei die kleinste Bürde 1 VA beträgt. Darüber hinaus muss die Bürde bei einer Leistung von ≥ 5 VA einen Bürdenleistungsfaktor (engl. burden power-factor) von $cos\beta = 0{,}8$ induktiv und bei Werten < 5 VA von $cos\beta = 1{,}0$ haben.
Überdies darf für alle Genauigkeitsklassen ein erweiterter Bürdenbereich (engl. extended burden range) festgelegt werden. Die Grenzwerte der Fehler nach Tabelle 1 dürfen dann von 1 VA bis zur Bemessungsbürde nicht überschritten werden. Dann muss der Bürdenleistungsfaktor über den gesamten Bürdenbereich 1,0 sein. Die höchste Bemessungsleistung ist hier auf 15 VA begrenzt.
Auch darf für Messwandler der Genauigkeitsklassen 0,1 bis 1 ein erweiterter Strommessbereich (engl. extended current range) vereinbart werden unter den Voraussetzungen, dass

- der thermische Bemessungs-Dauerstrom dem erweiterten Bemessungsstrom entspricht,
- die gemäß Tabelle 1/S. 60 bei 120 % des Bemessungsstroms vorgeschriebenen Fehlergrenzen bis zum erweiterten Bemessungsstrom eingehalten werden.

Normwerte für den erweiterten Bemessungsstrom sind 150 % und 200 % des Bemessungsstroms. Selbst wenn der thermische

Bemessungs-Dauerstrom nur 100 % beträgt, so entbindet das nicht davon, die Fehlergrenzen (kurzzeitig) auch bei 120 % des Bemessungsstroms einzuhalten.
Einen typischen Verlauf des Stromfehlers zeigt Abb. 20/S. 63 am Beispiel eines Wandlers der Klasse 1. Die Normfehlergrenzen sind in Rot eingezeichnet. Innerhalb der durch die beiden roten Linien gebildeten „Trompete" (wegen der trompetenähnlichen Form auch gelegentlich so genannt) muss die tatsächliche Fehlerkurve liegen.

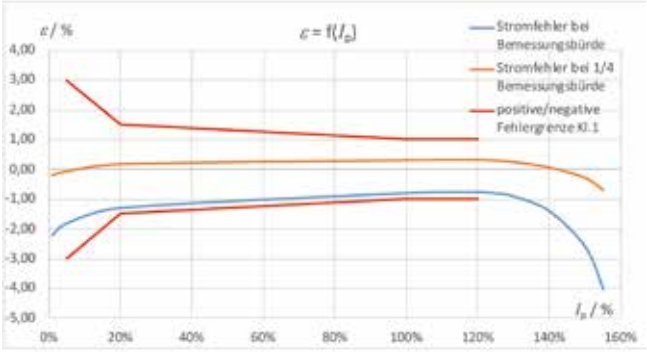


Abb. 20
Stromfehlerkurven

Die blaue Kurve zeigt den Stromverlauf bei Bemessungsbürde und die braune bei Belastung des Wandlers mit einem Viertel der Bemessungsbürde. Im unteren Aussteuerungsbereich fällt die Kurve nach unten ab, weil hier das Kernmaterial des Wandlers im ungünstigen Bereich arbeitet.

Im hohen Aussteuerbereich fällt die Kurve ebenfalls wieder ab, da der Stromwandler hier in den Bereich der Sättigung des Kernmaterials kommt.
Mit zunehmender Last bis zur Belastung mit Bemessungsbürde verschiebt sich die Kurve mehr oder weniger weit in den negativen Bereich und der Sättigungseinsatz findet früher statt, wie ein Vergleich der braunen mit der blauen Fehlerkurve zeigt.
Abb. 21/S. 64 zeigt die mit der Stromfehlerkurve korrespondierende Fehlwinkelkurve. Auch hier ist zu erkennen, dass der Fehlwinkel im unteren Aussteuerungsbereich größer wird wegen des ungünstigen Bereichs des Kernmaterials. Im oberen Aussteuerungsbereich wird der Fehlwinkel ebenfalls wieder größer, da sich der Sättigung genähert wird.

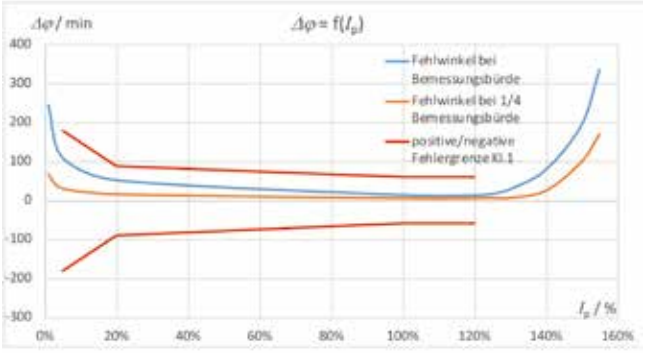


Abb. 21
Fehlwinkelkurven

4.2 GENAUIGKEITSKLASSEN VON STROMWANDLERN FÜR SCHUTZZWECKE

Ursprünglich gab es für Schutzzwecke nur die heute mit der Klasse P bezeichneten Stromwandler, die sich praktisch von Messwandlern kaum unterscheiden bis auf den weit in den Überstrombereich verlagerten Sättigungseinsatz. Um jedoch der Menge unterschiedlicher Fehlermöglichkeiten in einem Versorgungsnetz zu genügen, wurden die Schutzwandler sehr bald um zusätzliche Spezifikationen erweitert, die sich hauptsächlich auf das Einschwingverhalten und das Verhalten bei Vorhandensein einer abklingenden Gleichstromkomponente bei Schaltvorgängen im Primärkreis beziehen.

Bei einem plötzlich einsetzenden Kurzschluss tritt im Stromverlauf ein abklingendes Gleichstromglied auf, dessen Zeitkonstante besonders am Einspeisepunkt leistungsstarker Generatoren bis zu 0,4 s betragen kann. Da die Zeitkonstante der abklingenden Gleichstromkomponente sekundärseitig i. Allg. deutlich größer als primärseitig ist, fehlt das durch den Primärstrom erzeugte magnetische Gegenfeld. So reichen schon relativ kleine Gleichstromkomponenten, den Wandlerkern in die Sättigung zu treiben. Die Gleichstromkomponente des Sekundärstroms kann bei Stromwandlern mit geschlossenem Eisenkern mit Wandlerzeitkonstanten (nach der DIN EN 61869-2 sekundäre Zeitkonstante T_s genannt, engl. time constant of instrument transformer) von einigen Sekunden behaftet sein.

Der Sättigungseinsatz durch das Gleichstromglied kann vermieden werden, indem der Kernquerschnitt überdimensioniert wird. In der DIN EN 61869-2 sind hierzu Dimensionierungsfaktor K_x und transienter Dimensionierungsfaktor K_{td} definiert.

Beachtet man noch die unvermeidliche Remanenz, so überschreitet die Überdimensionierung sehr schnell technische und wirtschaftliche Grenzen. Solche überdimensionierten Wandler mit geschlossenem Eisenkern gehören zur Klasse TPX, deren Nachteile hauptsächlich die großen Eisenquerschnitte sind, verbunden mit höheren Kosten und Einbauproblemen. Als Maß für die Größe der Remanenz ist in der DIN EN 61869-2 der Remanenzfaktor K_r definiert als das Verhältnis von Remanenzfluss ψ_r zu Sättigungsfluss ψ_{sat}.

Bei Wandlern der Klassen TPY und TPZ werden durch Luftspalte im Eisenkern die sekundäre Zeitkonstante und der Remanenzfaktor verringert, wobei sich beide Klassen in Anzahl und Länge der Luftspalte unterscheiden. Bei Wandlern der Klasse TPY, auch Wandler mit Antiremanenz-Luftspalten genannt, weisen die Kerne wenige (meist zwei) Luftspalte geringer Länge auf zur Unterdrückung der Remanenz nach Kurzschlussabschaltungen.

Wandler der Klasse TPZ, auch als Linearwandler bezeichnet, haben die besseren transienten Übertragungseigenschaften, was durch mehrere große Luftspalte im Kern erreicht wird. Der Remanenzfaktor wird dabei fast Null und die sekundäre Zeitkonstante erreicht Werte von unter 60 ms. Eine weitere Verringerung verbiete sich jedoch, da der Winkelfehler, der ohnehin schon 180 min beträgt (Tabelle 2/S.68), dann noch größer werden würde. Nachteile der Linearwandler sind die ungenaue Übertragung des Gleichstromgliedes im Kurzschlussstrom und das langsamere Abklingen des Sekundärstromes bei Abschaltvorgängen.

Normwerte für die Bemessungsbürde der TP-Wandler sind 0,5; 1; 2; 5 Ω, bezogen auf einen sekundären Bemessungsstrom von 1 A. Für Stromwandler mit einem anderen sekundären Bemessungsstrom müssen die vorgenannten

Werte im umgekehrten Verhältnis zum Quadrat des sekundären Bemessungsstroms umgerechnet werden.

Zur weiteren Klassifizierung der TP-Wandler werden noch die beiden transienten Fehlergrenzwerte Scheitelwert des Momentanwerts des Fehlers $\hat{\varepsilon}$ und Scheitelwert des Fehlers der Wechselstromkomponente $\hat{\varepsilon}_{ac}$ herangezogen. Bei Ersterm betrachtet man den transienten Verlauf des Sekundärstroms und beim Zweiten nur den auf dem abklingenden Gleichanteil überlagerten Wechselstrom.

Weitere Informationen enthält Tabelle 2/S. 68, wobei noch das Windungszahlverhältnis für die Klassen PX und PXR zu definieren ist. Häufig besteht ein Unterschied zwischen dem Bemessungs- und dem tatsächlichen Windungszahlverhältnis (Primär- zu Sekundärwindungen), da die Übersetzungsmessabweichung bei Stromwandlern häufig durch einen Windungsabgleich kompensiert wird. Die Messabweichung des Windungszahlverhältnisses ist definiert als Unterschied zwischen Bemessungs- und tatsächlichem Windungszahlverhältnis in Prozent.

1	Grenzwerte für Schutz-Stromwandler				
2	Klasse	Messabweichung			
3 4 5		Stromfehler ε in % des Bemessungsstroms	Fehlwinkel $\Delta\varphi$ in min des Bemessungsstroms	Gesamtmessabweichung in % des Bemessungs-Genauigkeitsgrenzstroms	Messabweichung in % der Windungszahlverhältnisse
6	5P	± 1	± 60	5	
7	10P	± 3	-	10	
8	5PR	± 1	± 60	5	
9	10PR	± 3	-	10	
10	PX				≤ | ± 0,25 |
11	PXR				≤ | ± 1 |
12	TPX	± 0,5	± 30		
13	TPY	± 1	± 60		
14	TPZ	± 1	180 ± 18		

Tabelle 2
Grenzwerte für Schutz-Stromwandler

Transistente Fehlergrenzwerte in %	Anforderungen an Remanenzfluss	Erläuterungen
	keine	Beschreibt einen Stromwandler für die Einhaltung der Anforderungen an die Gesamtmessabweichung unter Bedingungen eines symmetrischen
	Grenzwert $K_r \leq 10$ %	
	keine	Beschreibt einen Stromwandler durch Festlegung seiner Magnetisierungskennwerte
	Grenzwert $K_r \leq 10$ %	
$\hat{\varepsilon} = 10$	keine	Beschreibt einen Stromwandler für die Einhaltung der Anforderungen an den transienten Fehlerstrom unter Bedingungen eines asymmetrischen Kurzschlussstroms
$\hat{\varepsilon} = 10$	Grenzwert $K_r \leq 10$ %	
$\hat{\varepsilon}_{ac} = 10$		

5.1 BEMESSUNGS-ISOLATIONSPEGEL, BEMESSUNGS-STEH-WECHSELSPANNUNG, BEMESSUNGS-STEH-BLITZSTOSSSPANNUNG

Die Isolationsanforderungen beziehen sich auf die höchste Spannung für Betriebsmittel U_m (engl. highest voltage for equipment). Hierbei handelt es sich um den Effektivwert der höchsten Außenleiterspannung (im Mehrphasensystem die Spannung eines Außenleiters gegen einen anderen Außenleiter), für die die Isolation eines Betriebsmittels, hier eines Stromwandlers, bemessen ist. Für U_m wird i. d. R. die Systemspannung U_{sys}, früher Reihenspannung genannt, gewählt.

Der Bemessungs-Isolationspegel (engl. rated isolation level) beschreibt eine Kombination von Spannungswerten, die die Isolationsfestigkeit kennzeichnen, bestehend aus der höchsten Spannung für Betriebsmittel U_m, der Bemessungs-Steh-Wechselspannung U_p (engl. rated power-frequency withstand voltage) und der Bemessungs-Steh-Blitzstoßspannung U_b (engl. rated lightning impulse withstand voltage), wobei letztere erst ab $U_m = 3{,}6$ kV angegeben wird. Ab $U_m = 300$ kV kommt noch der Scheitelwert der Bemessungs-Steh-Schaltspannung (engl. rated switching impulse withstand voltage) hinzu.

Die Bemessung-Steh-Wechselspannung U_p ist der Effektivwert einer an die Isolation angelegten Spannung über eine Zeitdauer von 60 s. Die Bemessungs-Steh-Blitzstoßspannung U_b ist dagegen der Scheitelwert einer transienten Spannung mit einer Anstiegsflanke von 1,2 µs und einer Abstiegsflanke von 50 µs. So gilt z. B. für eine höchste Spannung für Betriebsmittel von $U_m = 12$ kV, dass sich der Bemessungs-Isolationspegel zusammensetzt aus der Bemessungs-Steh-Wechselspannung von $U_p = 28$ kV und der

Bemessungs-Steh-Blitzstoßspannung von U_b = 60 kV . Der Bemessungs-Isolationspegel wird dann i. Allg. angegeben in der Form 12 / 28 / 60 kV .
Bei Stromwandlern mit $U_m \leq 1{,}2$ kV gilt nur die Bemessungs-Steh-Wechselspannung und zwar 3 kV bei 0,72 kV und 6 kV bei 1,2 kV. Eine Bemessungs-Blitzstoßspannung ist hier nicht definiert. Der Bemessungs-Isolationspegel hat dann die Kurzform 0,72/3 kV, bzw. 1,2/6 kV . Aber auch die Bezeichnung in der Form 0,72/3/-kV, bzw. 1,2/6/-kV ist anzutreffen.
Die Bemessungs-Isolationspegel für die höchsten Spannungen für Betriebsmittel von 0,72 kV bis 765 kV sind in der DIN EN 61869-1 aufgelistet.

5.2 WINDUNGSPRÜFUNG

Während der Bemessungs-Isolationspegel die Werte der Isolation zwischen den galvanisch getrennten Einheiten widerspiegelt, beschreibt die Windungsisolation die Isolation innerhalb einer Wicklung. Die Windungsprüfung (engl. inter-turn overvoltage test) stellt sicher, dass die Isolation innerhalb einer Wicklung fehlerfrei ist und kein Windungsschluss vorliegt oder durch eine Schwachstelle während des späteren Betriebs auftreten kann.
Dazu wird der Primärstrom bei offener Sekundärwicklung so lange erhöht, bis an den Sekundäranschlüssen entweder vor Erreichen des Bemessungsstroms eine Scheitelspannung von 4,5 kV gemessen wird, oder der Primärstrom die Größe des Bemessungsstroms erreicht. Für bestimmte Schutzwandler sind sogar 10 kV vorgeschrieben.

5.3 TEMPERATURKLASSEN

Messwandler werden unter „normalen“ Betriebsbedingungen hinsichtlich der zulässigen Umgebungstemperatur in 3 Temperaturklassen (engl. temperature category) eingeteilt, wie in Tabelle 3/S. 72 zu sehen. Die Angaben gelten für Höhenlagen bis 1000 m. Da darüber hinaus aufgrund der abnehmenden Luftdichte die Kühlung schlechter wird, sind Höhenkorrekturfaktoren (engl. altitude correction factor) aus der DIN EN 61869-1 zu entnehmen.

An Standorten, an denen die Umgebungstemperaturen beträchtlich außerhalb der in der Tabelle „Normale Umgebungsbedingungen“ angegebenen Bereiche liegen, empfiehlt die DIN EN 61869-1, Bereiche festzulegen entsprechend der Werte der Tabelle „Besondere Umgebungsbedingungen“ Tabelle 3/S. 72.

Temperaturklassen		
Normale Umgebungsbedingungen		
Klasse	**Niedrigste Temperatur °C**	**Höchste Temperatur °C**
-5/40	-5	40
-25/40	-25	40
-40/40	-40	40

Temperaturklassen		
Besondere Umgebungsbedingungen		
Anwendungsfall	**Niedrigste Temperatur °C**	**Höchste Temperatur °C**
für sehr kaltes Klima	-50	40
für sehr heißes Klima	-5	50

Tabelle 3
Temperaturklassen

5.4 ISOLIERSTOFFKLASSEN

Isolierstoffklassen (engl. class of insulation) charakterisieren Isolierstoffe hinsichtlich ihrer maximal zulässigen Temperatur. Die Isolierstoffklasse ist in der DIN EN 61869-2 nicht mehr als Pflichtangabe auf dem Typenschild erwähnt. Trotzdem ist sie dort immer noch anzutreffen. Die Isolierstoffklasse nach der IEC 60085 gibt die Grenzen der Übertemperaturen an, die abhängig von den Isolierstoffen erreicht werden dürfen. Eine Auflistung ist auch in der DIN EN 61869-1 zu finden.
Die höchste Umgebungstemperatur ist hierbei 40 °C, entsprechend der Tabelle 3/S. 72. Ist diese überschritten, so muss die Grenze der Übertemperatur um den Betrag der Überschreitung der Umgebungstemperatur verringert werden.
Für die Isolierstoffklasse E gilt eine Übertemperaturgrenze von 75 K (Kelvin), für F 110 K und für H ist eine Übertemperatur bis 135 K zulässig.

6.1 OFFENBETRIEB

Wie schon im Abschnitt 1.2/S. 8 erwähnt, ist der Stromwandler eine Konstantstromquelle, dessen sekundäre Stromstärke idealerweise entsprechend der Übersetzung nur vom Primärstrom abhängt. Aufgrund seiner Physik vermag es der Stromwandler, gemäß dem ohmschen Gesetz (1)/S. 12, die Quellenspannung E_0 jeweils der Belastung anzupassen, sodass der geforderte, konstante Strom fließt. Nimmt die Bürde zu hohe Werte an, erreicht der Stromwandler die Sättigung und der Betrag des Fehlers wird deutlich größer. Ist das Kernmaterial vollkommen gesättigt, so ist es wirkungslos, aber der Stromwandler arbeitet dann immer noch wie ein Lufttransformator. Auch hier steigt der Strom, wenn auch deutlich geringer, weiter an.

Es ist also leicht verständlich, dass die Quellenspannung und damit ebenfalls die Spannung an den Sekundärklemmen mit zunehmender Bürde auch steigen. Der Extremfall ist ein unendlich hoher Widerstand, der bei offenen Sekundärklemmen erreicht wird, wobei die Sekundärspannung sehr hohe Werte annehmen kann, die für den Menschen lebensgefährlich sind und den Wandler durch Spannungsüberschläge innerhalb der Sekundärwicklung zerstören können. Darüber hinaus erhöhen sich bei Sättigung die Kernverluste, sodass auch eine Überhitzung des Kerns droht.

Offenbetrieb (engl. open-circuit operation) ist also unbedingt zu vermeiden. Dazu zählt auch, dass im Sekundärkreis keine Absicherung erfolgen darf, die diesen unterbrechen könnte.

Bei Stromwandlern mit großer Streuung oder mit Eisenkernen aus magnetisch leicht sättigbaren Werkstoffen kann der Leerlauf zulässig sein, z. B. bei sehr leistungsschwachen Stromwandlern und kleinen Übersetzungen. Hier tritt

die Sättigung schnell ein und die Spannung erreicht nicht so hohe Werte. Da der Anwender aber oft nicht über diese Information verfügt, die mögliche Offenspannung (engl. open-circuit voltage) abzuschätzen, sollte kein Offenbetrieb riskiert werden.

Gelegentlich taucht der Begriff offensichere Wandler auf, obwohl dieser in keiner Norm definiert ist. Man kann die Windungsisolation oder den Sättigungseinsatz so bemessen, dass der Wandler die hohe Spannung beim Offenbetrieb mit dem Bemessungs-Dauergrenzstrom I_{cth} (Kapitel 3.4/S. 37) schadlos übersteht. Das bedeutet aber nicht, dass die Offenspannung für den Menschen unschädliche Werte annimmt.

Ein Wandler muss aber ohnehin die Windungsprüfung mit 4,5 kV bestehen (Kapitel 5.2/S. 71). Aber selbst bei ausreichender Isolation ist zu beachten, dass bei Einschaltvorgängen wie z. B. Motoranlauf der Primärstrom kurzzeitig ein Vielfaches des Nennstroms erreicht, weshalb auch die Offenspannung über 4,5 kV anwachsen kann.

Die Zerstörung des Wandlers durch innere Spannungsüberschläge kann durch Isolationsmaßnahmen teilweise verhindert werden, nicht jedoch die Zerstörung durch die drohende Überhitzung des Kerns. Beim Offenbetrieb nehmen die Kernverluste und damit die Kernerwärmung zu.

Letztlich kann der Offenbetrieb auch durch Schaltungsmaßnahmen wie z. B. antiparallel geschaltet Z-Dioden am Wandlerausgang, Thyristoren oder der Einsatz von Kurzschlussklemmen verhindert werden. Diese Maßnahmen sind aber – bis auf die Kurzschlussklemmen – kaum anzutreffen.

Im bestimmungsgemäßen Betrieb erfolgt der für den Stromwandler geforderte Kurzschluss durch den niederohmigen Strompfad des angeschlossenen Messgerätes.

6.2 ERDUNG VON STROMWANDLERN

Vorschriften zur Erdung (engl. earthing, grounding) von Stromwandlern haben sich in den letzten Jahrzehnten verändert. Stromwandler, die ab einer höchsten Spannung für Betriebsmittel von U_m>1,2 kV eingesetzt werden, müssen nach wie vor grundsätzlich sekundärseitig geerdet werden. In früheren Jahren mussten alle Stromwandler sekundär auf der *k*-Seite (jetzt als s1 bezeichnet) geerdet werden. Das rührt noch aus Zeiten, als das Vertrauen in die Dauerhaftigkeit der Isolation – manchmal berechtigt – noch nicht so groß war. In späteren Normen wurde diese Forderung ersatzlos und ohne zusätzlichen Hinweis gestrichen. Erst die derzeit aktuelle Norm DIN EN 61869-1 hat unter Abschnitt 6.5 wieder eine Aussage über die Erdung aufgenommen, leider aber unvollständig. So ist hier nur zu lesen, dass Montagerahmen und Messwandler für gasisolierte Schaltanlagen geerdet werden müssen.
Die DIN VDE 0100-557 zur Errichtung von Niederspannungsanlagen bis 1 kV ist bezüglich der Erdung deutlicher. So ist unter Abschnitt 557.5.3.1 zu lesen, dass Stromwandler sekundär nicht geerdet werden dürfen, es sei denn, die Messaufgabe kann nur durch Erdung erfüllt werden.
Das wird zum einen damit gerechtfertigt, dass die Isolationsmaterialien deutlich besser und zuverlässiger geworden sind, und zum anderen wird damit auch berücksichtigt, dass immer mehr elektronische Messgeräte auf den Markt kommen, bei denen eine Eingangsklemme bereits intern geerdet ist. Durch Mehrfacherdungen würden hier Messgeräte kurzgeschlossen, was aber u. U. nicht leicht zu erkennen ist, da die Strompfade der Messgeräte niederohmig sind und damit widerstandsmäßig in der Größenordnung des kurzschließenden Anlagenteils oder Drahtes liegen. Da sich der Strom dabei im umgekehrten Verhältnis der Widerstände aufteilt, kann trotzdem ein Strom angezeigt werden.

Auch sind seit einigen Jahren Stromzähler auf dem Markt, bei denen die Spannungspfade in die Sekundärkreise der Stromwandler gelegt werden. Bei dreiphasigem Wechselstrom werden so drei Anschlussklemmen eingespart und das Gehäuse kann schmäler werden. Hier würde die sekundärseitige Erdung der Stromwandler zu einem Kurzschluss im Spannungspfad führen, wie Abb. 22/S. 77 beispielhaft an einem Einphasen-Stromzähler zeigt.

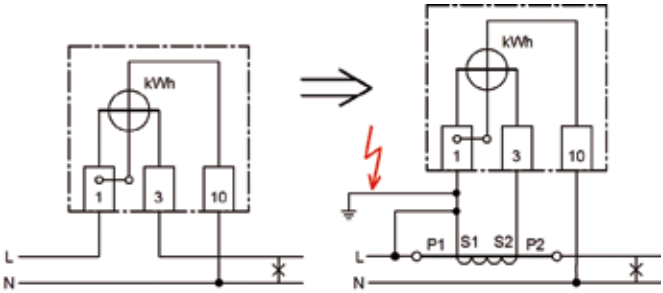


Abb. 22
Netzspannung im Sekundärkreis eines Stromwandlers bei Energiemessung

6.2.1 ENTKOPPELN DER ERDUNG

Wie bereits erwähnt, müssen Stromwandler ab U_m>1,2 kV sekundär geerdet werden. Was aber, wenn Erdfreiheit erforderlich ist, da sich z. B. im Messkreis bereits Messgeräte befinden, die schon intern geerdet sind und damit die beschriebenen Probleme verursachen?

Hier kann man eine Lösung herbeiführen mit den in Kapitel 2.4/S. 24 erwähnten Zwischenwandlern. Muss keine Anpassung des Stroms erfolgen, so haben diese die Bemessungs-Übersetzung 1/1 A oder 5/5 A . Dadurch ist die Forderung erfüllt, den Mittel- oder Hochspannungs-Stromwandler erden zu können. Gleichzeitig wird aber dem Messkreis eine erdfreie Messgröße zur Verfügung gestellt (Abb. 23/S. 78).

Bedingt durch die Eigenverluste des Zwischenwandlers, ist die erforderliche Bemessungsleistung des Hauptwandlers entsprechend zu erhöhen.

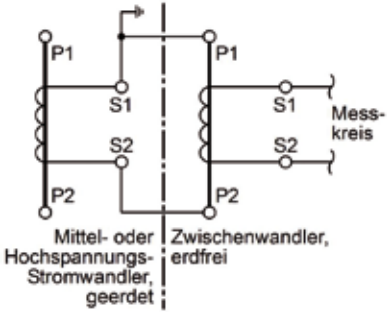


Abb. 23
Kaskade aus Haupt- und Zwischenwandler

6.3 AUSWIRKUNGEN VON FREMDFELDERN

Auch Magnetfelder (Fremdfeld, engl. external magnetic field) benachbarter Stromleiter können auf Genauigkeit und Funktion von Stromwandlern Einfluss haben. Abb. 24/S. 79 zeigt dazu einen benachbarten Rückleiter mit ursprünglich konzentrischen Feldlinien, und wie diese in den Kern eines Stromwandlers eindringen. Nach dem Eintritt teilt sich der magnetische Fluss Φ_a des Störfeldes im umgekehrten Verhältnis der magnetischen Widerstände auf. Der größere Teil des Flusses Φ_{a1} nimmt daher den kürzeren Weg (rot). Ein kleinerer Teil des Flusses Φ_{a2} legt die größere Wegstrecke zurück (grün). In Abb. 24/S. 79 ist der besseren Übersicht wegen nur das durch den Rückleiter gebildete Störfeld gezeichnet und nicht das Feld des durch den Stromwandler geführten Leiters, da die Überlagerung beider Felder die Zeichnung unübersichtlich werden ließe.

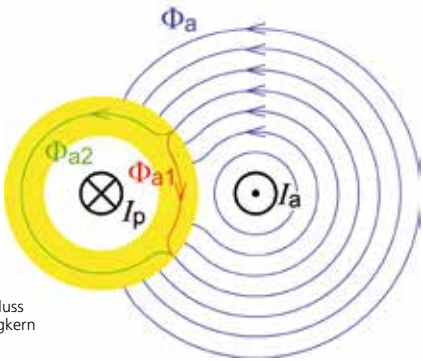


Abb. 24
Rückleitereinfluss
auf einen Ringkern

Der zu messende Primärstrom I_p verursacht also ein magnetisches Feld. Dem eigentlichen Feld des Primärstroms wirkt das durch den Sekundärstrom erzeugte Feld entgegen (lenzsche Regel, Kapitel 1.2/S. 8), sodass als feldverursachende Durchflutung nur die Differenz $I_p - N_s I_s$ wirksam ist, die beim idealen Stromwandler Null wäre. Diese Differenz bewirkt ein Magnetfeld Φ_ε, welches die Quellenspannung E_0 erzeugt, die erforderlich ist zur Überwindung der sekundärseitigen Widerstände. Dem Magnetfeld des Primärstroms wirkt also ein von der Sekundärseite erzeugtes Magnetfeld entgegen. Das so entstehende Hauptfeld Φ_ε addiert sich unter Beachtung der Richtung zu den Magnetfeldern Φ_{a1} und Φ_{a2}. Das soeben besprochene Gegenfeld fehlt allerdings bei grober Betrachtung nahezu beim Störfeld, sodass dessen Komponenten u. U. in der gleichen Größenordnung liegen wie das Hauptfeld und sogar größer sein können.

Gemäß der in Abb. 24/S. 79 gezeigten Stromrichtung addieren sich das Feld Φ_p des Primärstroms und das Störfeld Φ_{a1} auf der rechten Kernseite (rot), während auf der linken Seite (grün) eine Subtraktion stattfindet. Im ungünstigsten Fall kann dabei das rechte Kernstück in die Sättigung getrieben werden, verbunden mit großen Messfehlern. Da hierbei nur ein Teil des Kerns in Sättigung gerät, spricht man auch von partieller Sättigung (engl. partial saturation). Zusätzlich kann sich durch das fehlende Gegenfeld des Störstroms in den beiden Kernhälften eine hohe Induktion aufbauen, sodass die Quellenspannung sehr hohe Werte annehmen kann.

Zwar kann der Einfluss von Störfeldern durch konstruktive Maßnahmen im Stromwandler verringert, nicht jedoch gänzlich vermieden werden. So ist bei der Montage von Stromwandlern auch immer darauf zu achten, ob und wo sich Störfelder ausbreiten können. Konstruktive Maßnahmen sto-

ßen bei Niederspannungs-Stromwandlern wegen der hier oft geforderten geringen Abmessungen schnell an ihre Grenzen.
Sofern es die Platzverhältnisse in einer Schalt- oder Energieverteilungsanlage zulassen, sollten Rück- oder Fremdleiter also nie zu nahe am Stromwandler vorbeigeführt werden. Hiermit sind die Möglichkeiten des Anwenders aber bereits erschöpft. Wie groß ein angemessener Abstand sein sollte, kann nicht pauschal beantwortet werden, da verschiedene konstruktive Maßnahmen Einfluss haben. Im Zweifelsfall sollte der Anwender den Hersteller fragen.

6.4 DER WANDLERFAKTOR

Stromzähler (engl. electricity meter, energy counter) sind bis zu Bemessungsströmen von 100 A als direktmessende Geräte erhältlich. Für höhere Ströme gibt es sogenannte Wandlerzähler (engl. CT connected electricity meter) mit 1 A- oder 5 A-Eingängen, denen entsprechende Stromwandler vorgeschaltet werden müssen. Bei den meisten elektronischen Zählern kann man einen Korrekturfaktor in Form der Wandlerübersetzung oder des Wandlerfaktors (engl. meter factor) einprogrammieren, sodass der Verbrauch ohne Umrechnung direkt abgelesen werden kann. Bei älteren mechanischen oder einigen elektronischen Zählern muss der angezeigte Wert jedoch mit der Wandlerübersetzung multiplizieren werden, um so den tatsächlichen Energieverbrauch zu erhalten.
Dieser Wandlerfaktor (manchmal auch Zählerfaktor genannt) muss auf den Zählern angegeben werden und ist nichts anderes als die Wandlerübersetzung k_r. Bei Stromwandlern steht die Übersetzung als un-

gekürzter Bruch auf dem Typenschild. Der Wandlerfaktor ist die ausgerechnete Übersetzung. Diese wird auf den Energiezählern gelegentlich mit dem Formelzeichen c benannt oder im Klartext angegeben.
Folglich gilt

Gleichung 19

$$c = k_r$$

Gelegentlich stößt man auf die Frage des Anwenders, ob bei Drehstromzählern der Faktor mit 3 zu multiplizieren ist, da ja auch 3 Wandler vorhanden sind. Folgende Betrachtung soll weiterhelfen, bei der angenommen wird, dass die Strompfade eines Wandlerzählers von 3 Stromwandlern mit der Übersetzung $k_r = 200/5$ A gespeist werden. Hierbei „sieht" der Zähler insgesamt 15 A , die aber tatsächlich 600 A repräsentieren. Die Anzeige muss also mit dem Faktor 600/15 korrigiert werden, was aber nach Kürzen nichts anderes ist als die Übersetzung $k_r = 200/5$ eines einzelnen Wandlers. Also erfolgt auch bei Drehstromzählern die Multiplikation des angezeigten Energieverbrauchs mit der Übersetzung nur eines Wandlers, hier im Beispiel mit $c = 40$.

7.1 BEISPIEL ZUR BESTELLUNG EINES STROMWANDLERS

An einem konkreten Beispiel, bei dem der Anwender die Ströme in den drei Strängen des Drehstromsystems 230/400 V, 50 Hz eines 80 kW-Generators messen muss, sollen die Bestellparameter gezeigt werden. Die Berechnung liefert einen Strom nach Gleichung 20/S. 83

Gleichung 20

$$P = 3\, U_{Stern}\, I_{Leiter}$$

von 115,94 A, der indirekt mittels Stromwandler gemessen werden soll. Wenn ein Stromwandler mit der Bemessungsübersetzung 115,94/5 A auch technisch möglich ist, so würde es bestimmt schwierig sein, ein Messgerät derart zu skalieren, dass es bei einem Strom von 5 A den Primärstrom 115,94 A anzeigt. Bei Analoginstrumenten halten die Lieferanten Wechselskalen vor, die den genormten Bemessungsübersetzungen von Stromwandlern entsprechen. Digitalinstrumente sind da zwar etwas flexibler, da bei skalierbaren Instrumenten beliebige Wandlerfaktoren einprogrammieren werden können. Man würde sich aber hier für Stromwandler mit der Übersetzung 125/5 A , entscheiden, wobei es sich dabei um den nächstgrößten genormten Wert nach 115,94/5 A handelt.

Der nächste Schritt besteht darin, die geometrisch passenden Stromwandler nach dem Querschnitt des Primärleiters festzulegen. Hat man es mit einem starren Schienensystem zu tun, so ist auch noch die Wandlerbreite anhand des Schienenabstands zu beachten. In diesem Beispiel

ist ein Kabel mit 95 mm² Kupferquerschnitt eingesetzt. Man soll einem Lieferanten für Stromwandler aber nicht den Kupferquerschnitt vorgeben, da er nicht wissen kann, wie stark im vorliegenden Fall die Isolation ist. Da sich in diesem Beispiel für den Kabeltyp H07RN-F entschieden wurde, beträgt der Durchmesser 23,3 mm. Um nun den Stromwandler leicht und reibungsfrei über das Kabel schieben zu können, sollte dieser eine Primärleiteröffnung von mindestens 26 mm haben.
Nun kann man sich Gedanken machen über die angeschlossene Bürde, einschließlich der Zuleitungen zum Messgerät. Es wurde ein Abstand zum Messgerät von 5 m ermittelt, also mit Hin- und Rückleiter $\ell = 10$ m. Das Messgerät selbst soll eine Bürde von 1,5 VA haben. Mit dem vorgegebenen Drahtquerschnitt (hier von 2,5 mm²) bestimmt man nach

Gleichung 21

$$R = \frac{\rho \ell}{A}$$

und mithilfe von

Gleichung 22

$$P = R\, I^2$$

oder mit

Gleichung 23

$$P_{Lt} = \frac{\rho \ell I_{sr}^2}{A}$$

ρ	spezifischer Widerstand bei 20 °C Cu:= 0,0171 Ωmm²/m [1] Al: = 0,0279 Ωmm²/m [1]
P_{Lr}	Leistungsbedarf der Messleitung bei sekundärem Bemessungsstrom
ℓ	Leitungslänge (Hin- und Rückleiter)
I_{sr}^2	sekundärer Bemessungsstrom
A	Leiterquerschnitt

[1] Datenblatt Elektrisola (http://www.elektrisola.com/de/leitermaterial/kupfer.html)

die Leistung, die die Sekundärleitung „verbraucht". Da diese Leistung zur Berechnung der einzusetzenden Bemessungsleistung des Stromwandlers herangezogen wird, versteht es sich von selbst, dass der hier zur Anwendung kommende Strom der sekundäre Bemessungsstrom sein muss.

Die so ermittelte Leistung beträgt P_{Lr}=1,78 W. Dazu muss die Leistungsaufnahme des Messgeräts von 1,5 VA plus einem Sicherheitszuschlag von viermal 0,1 W für eventuelle Übergangswiderstände an den vier Anschlussklemmen (zwei Klemmen am Wandler, zwei Klemmen am

Messgerät) addiert werden. So folgt die vom Wandler zu fordernde Leistung $S_b = 3{,}68$ VA . Man wählt die nächste genormte Bemessungsleistung von $S_r = 5$ VA . Da aber ohnehin die errechnete Leistung auf die nächstgelegene genormte Bemessungsleistung aufgerundet wird, ist übertriebene Genauigkeit hier fehl am Platze.
Als Genauigkeitsklasse reicht in diesem Beispiel für eine normale Betriebsmessung die Klasse 1. Mit Rücksicht auf die Belastung des Messkreises im Fehlerfall wird der Überstrom-Begrenzungsfaktor FS 5 gewählt.
Da man auch nicht über den gewählten Bemessungsstrom von 125 A hinaus messen will, fällt die Entscheidung für den üblichen Bemessungs-Dauergrenzstrom von 120 %.
Nun liegen die Bestelldaten für drei Stromwandler wie folgt fest:

a) Art des Wandlers:	Aufsteck-Stromwandler
b) Wandlertyp:	Bezeichnung herstellerabhängig anhand der Geometrie und der Primärschienenöffnung von ≥ 26 mm Ø
c) Bemessungsübersetzung:	125/5 A
d) Bemessungsleistung:	5 VA
e) Genauigkeitsklasse:	Kl.1 FS 5 ext.120 %

Damit sind nun alle relevanten Daten für den Wandlerlieferanten bestimmt.

7.1.1 WIDERSTÄNDE VON SCHALTDRÄHTEN, LEISTUNGSAUFNAHME VON MESSGERÄTEN UND RELAIS

Für eine schnellere Handhabung in der Praxis sind in Tabelle 4/S. 87 die Widerstände der im Schaltanlagen- und Verteilerbau eingesetzten Drähte angegeben, entsprechend der DIN VDE 0295. Da die Nennquerschnitte Schwankungen unterworfen sind, handelt es sich hier jeweils um die höchstmöglichen Widerstandswerte. Diese weichen daher gering von den berechneten Werten nach Gleichung 21/S. 84 ab. Tatsächlich sind diese Differenzen bei den hierbei geforderten Genauigkeiten aber unbedeutend.

Nennquerschnitt in mm²	Widerstände bei 20 °C in Ω/m		Leistungsverluste bei 5A in W/m	
	Klasse 1+2	Klasse 5	Klasse 1+2	Klasse 5
1	0,0181	0,0195	0,4525	0,4875
1,5	0,121	0,0133	0,3025	0,3325
2,5	0,0074	0,00798	0,185	0,1995
4	0,00461	0,00495	0,11525	0,12375
6	0,00308	0,0033	0,077	0,0825

Was die Leistungsaufnahme von Messgeräten betrifft, so reicht es auch schon, diese abzuschätzen. Eine Unterstützung dabei liefert Tabelle 5/S. 89.

Tabelle 5
Leistungsaufnahmen der gebräuchlichsten Messgeräte und Relais

Messgeräte	S/VA
Dreheisen-Strommesser	1
Drehspul-Strommesser	1
Bimetall-Strommesser	2 – 2,5
kombinierter Bimetall-Strommesser (Dreheisen mit Bimetall)	3 – 4
schreibende Strommesser	0,5 – 9
Leistungsmesser (je Strompfad)	0,5 – 3
schreibende Leistungsmesser (je Strompfad)	0,5 – 5
Leistungsfaktormesser (je Strompfad)	2 – 5
Stromzähler (je Strompfad) Wirk-, Blind- oder Scheinleistung	0,5 – 4

Leistungsverluste bei 1 A in W/m	
Klasse 1+2	**Klasse 5**
0,0181	0,0195
0,0121	0,0133
0,0074	0,00798
0,00461	0,00495
0,00308	0,0033

Tabelle 4
Widerstände verschiedener Leitungen nach DIN VDE 0295 mit Leistungsverlusten bei 1 A und 5 A

In die Klasse 1 fallen eindrähtige, also massive Leitungen. Die Klasse 2 enthält sogenannte mehrdrähtige Litzen. So hat z. B. eine Leitung mit dem Nennquerschnitt von 2,5 mm^2 7 Einzeldrähte mit je 0,52 mm Durchmesser. Zur Klasse 5 gehören feindrähtige Litzen. Hier findet man z. B. bei dem Nennquerschnitt von 2,5 mm^2 30 Einzeldrähte mit je 0,25 mm Durchmesser.

Messumformer	**S/VA**
Messumformer für Strom, passiv	1 – 3
Messumformer für Strom, aktiv	0,5
Messumformer für Leistung (je Strompfad)	0,5

Relais	**S/VA**
elektronische Relais	0,5
meschanische Relais	2 – 25
thermische Relais	6 – 11
Distanzschutzrelais	2 – 30
Differentialschutzrelais	1 – 15
Erdschlussrelais	0,5 – 4
Wandlerstrom-Auslöser	5 – 10

7.2 DURCHSCHLEIFEN MEHRERER MESSGERÄTE IM SEKUNDÄRKREIS

Seine Funktion als Konstantstromquelle erlaubt es, mehrere Messgeräte im Sekundärkreis eines Stromwandlers bis zum Erreichen der Bemessungsleistung in Serie anzuschließen, wie Abb. 25/S. 90 zeigt. In diesem Beispiel gelangt der Sekundärstrom über ein digitales Amperemeter (DAM) zu einem Wattmeter (W), weiter zu einem Leistungsfaktormesser (*cosφ*) und schießlich über einen Stromzähler (kWh) zurück zum Wandler. Die erforderlichen Spannungsanschlüsse der letzten drei Messgeräte sind nur angedeutet. Hier soll davon ausgegangen werden, dass das digitale Amperemeter intern an der S2-Klemme geerdet ist.

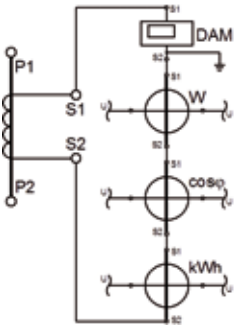


Abb. 25
Durchschleifen mehrerer Messgeräte

Unter der Voraussetzung, dass der Leitungsverlust derselbe ist wie beim vorherigen Beispiel (P_{Lr}=1,78 W), müssen noch die Bürden der Messgeräte beachtet werden, die z. B. den Datenblättern der Messgerätelieferanten entnommen werden können. Nachfolgender Leistungsbedarf wurde für die Strompfade ermittelt:

digitales Amperemeter:	0,1 VA
Wattmeter:	3 VA
Leistungsfaktormesser:	3 VA
Stromzähler:	5 VA

Obwohl die Leitungslänge unverändert ist, sollten jetzt aber die Übergangswiderstände von 10 Anschlussklemmen mit je 0,1 W berücksichtigt werden. So ergibt sich für die gesamte erforderliche Leistung der Wert 13,88 VA , wobei man sich wieder für die nächsthöhere genormte Bemessungsleistung von 15 VA entscheidet.
Wie Abb. 25/S. 90 auch zeigt, würde bei sekundärseitiger Erdung des Wandlers an der S1-Klemme das digitale Amperemeter über die Erdverbindung kurzgeschlossen.
An einen Stromwandler können also mehrere Messgeräte in Serie angeschlossen werden, solange die Bemessungsleistung des Wandlers nicht überschritten wird. Es ist zu beachten, dass Mehrfacherdung vermieden werden muss.

7.3 LASTAUFTEILUNG AUF MEHRERE WANDLER

Gehen wir in einem weiteren Beispiel davon aus, dass der aus dem vorherigen Abschnitt geforderte Wandler mit 15 VA aus geometrischen oder physikalischen Gründen nicht herstellbar bzw. lieferbar ist, so bieten sich drei Möglichkeiten an, die Last auf zwei Wandler zu verteilen, um die Leistung zu erhöhen.

A) Messgeräte auf zwei Wandler verteilen
B) sekundäre Serienschaltung zweier Wandler
C) sekundäre Parallelschaltung zweier Wandler

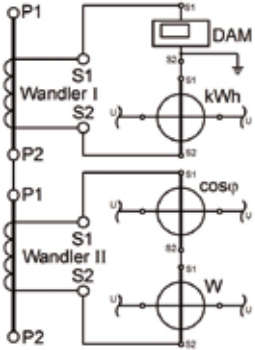


Abb. 26
Durchschleifen mehrerer Messgeräte, verteilt auf zwei Wandler

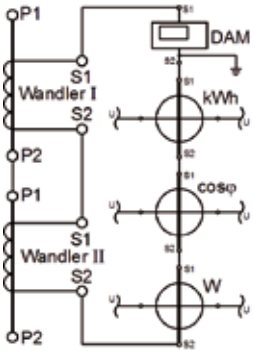


Abb. 27
Leistungserhöhung durch sekundäre Serienschaltung

zu A) Man kann die Messgeräte sinnvoll bezüglich guter Leistungsaufteilung auf zwei gleiche, jedoch voneinander unabhängige Wandler verteilen, z. B. Wattmeter (W) und Leistungsfaktormesser (*cosφ*) auf Wandler I, digitales Amperemeter (DAM) und Stromzähler (kWh) auf Wandler II. Nachteilig hierbei ist, dass die doppelte Anzahl Zuleitungen zu den Messgeräten benötigt wird (wie in Abb. 26/S. 92 zu sehen). Vorteilhaft ist, dass einige Messgeräte (hier Leistungsfaktormesser und Wattmeter) von der Zwangserdung des Digitalinstruments entkoppeln werden. So ist zumindest Wandler II sekundär wieder erdfrei. Diese Lösung ist vorzuziehen, wenn im Sekundärkreis zwei Messgeräte Verwendung finden, die bereits intern geerdet sind, um diese gegeneinander zu entkoppeln.

zu B) Eine Möglichkeit, die doppelten Zuleitungen zu vermeiden, ist die Serienschaltung der beiden

Wandler (wie in Abb. 27/S. 93). Dadurch addieren sich die Spannungen und auch folglich die Leistungen beider. Bei dieser Lösung ist zu beachten, dass sich zu der bereits vorhandenen Bebürdung eines Wandlers der Innenwiderstand des jeweils anderen Wandlers addiert. Diese Lösung sollte daher nur angewendet werden, wenn die Innenwiderstände beider Wandler hinreichend niedrig sind, also bei Aufsteckwandlern niedriger Übersetzung. Gegenüber der nächsten Lösung ist von Vorteil, dass keine Addition der Sekundärströme stattfindet, da Wandlerinstrumente nur für Ströme von 1 A oder 5 A erhältlich sind.

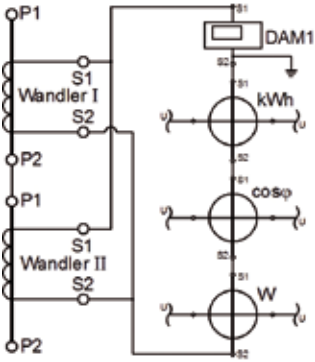


Abb. 28
Leistungserhöhung durch sekundäre Parallelschaltung

zu C) Letztlich besteht die Möglichkeit, beide Wandler sekundärseitig parallel zu schalten (Abb. 28/S34). Dadurch addieren sich allerdings die Ströme, sodass bei den 5 A-Ausgängen der Wandler letztlich in Summe 10 A fließen, was wiederum die Messgeräte überfordern würde. Um diese Problematik zu umgehen, kann man, statt der vorgesehenen Wandler mit der Übersetzung 125/5 A, Sonderwandler mit der Übersetzung 125/2,5 A einsetzen, auch wenn dieser Sekundärstrom nicht genormt ist. Diese Lösung ist trotz der möglichen Mehrkosten für Sonderwandler bei größeren Innenwiderständen der Wandler gegenüber Lösung B) vorzuziehen.
Welcher dieser drei Lösungen letztlich der Vorrang zu geben ist, hängt also vom Einzelfall ab.

7.4 STROMWANDLER BEI GROSSEN SEKUNDÄRSEITIGEN LEITUNGSLÄNGEN

Es gibt Anwendungsfälle, bei denen die Entfernung zwischen Hauptwandler und Messgerät sehr groß ist. Dabei kann im ungünstigsten Fall der Widerstand der Messleitung (siehe auch Gleichung 21/S. 84) so hoch werden, dass die Bemessungsleistung des Stromwandlers überschritten wird.

Vergrößern des Leitungsquerschnitts oder Verlegen mehrerer paralleler Leitungen zur Verringerung des Leitungswiderstands verbietet sich oft aus wirtschaftlichen oder geometrischen Gründen. Wie in Kapitel 3.10/S. 51 aber schon angedeutet, ist es bei größeren Leitungslängen im Messkreis vorteilhafter, Stromwandler mit einem sekundären Bemessungsstrom von 1 A einzusetzen. Gleichung 15/18 zeigt, dass die Leistung bei konstantem Widerstand quadratisch mit dem Strom zunimmt. Umgekehrt nimmt die Leistung natürlich quadratisch ab, wenn der Strom verringert wird.

Hierzu soll wieder ein konkretes Beispiel betrachtet werden. Zwischen Wandler und Messgerät muss eine Leitung von 400 m (Hin- und Rückleiter) verlegt werden. Bei einem Querschnitt von 2,5 mm² beträgt der Widerstand der Sekundärleitung 2,736 Ω. Der „Leistungsverbrauch" auf dieser Leitung bei einem Sekundärstrom von 5 A beträgt dann nach Gleichung 15/18 immerhin 68,4 W. Einen Stromwandler mit einer Bemessungsleistung in dieser Größenordnung wird kaum zu finden sein.

Wählt man nun hier einen Wandler mit dem sekundären Bemessungsstrom 1 A , so reduziert sich dieser „Leistungsverbrauch" auf moderate 2,736 W .

Ist der Leitungswiderstand größer, können selbstverständlich noch kleinere Sekundärströme gewählt

werden, auch wenn es sich dabei dann nicht mehr um genormte Bemessungsströme handelt, so z. B. 0,5 A oder 0,1 A. Je nach Anzeige- oder Auswertegerät muss am Ende der Sekundärleitung der kleinere Strom mittels Zwischenwandler wieder auf eine genormte Bemessungsgröße transformieren werden, wie in Abb. 29/S. 95 zu sehen.

Die Verwendung von Strömen kleiner als 1 A hat zusätzlich den finanziellen Reiz, dass bei langen Leitungen deutlich dünnere Leitungsquerschnitte verwendet werden können.

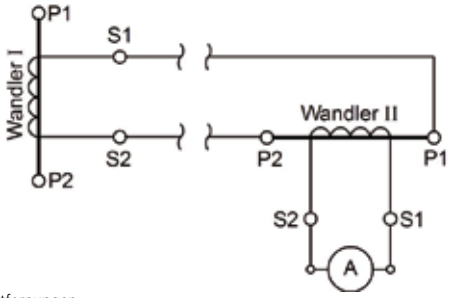


Abb. 29
Messung über große Entfernungen

7.5 SUMMEN-STROMWANDLER

Die Problematik und die Besonderheiten beim Einsatz von Summen-Stromwandlern werden hier nur kurz behandelt. Das Buch „Strom-Messwandler, Informationen für Anwender" widmet Summenwandlern ein ganzes Kapitel. Wie schon in Abschnitt 2.4/S. 24 erwähnt, sind sie Sonderformen von Wickelwandlern mit mehreren getrennten Primärwicklungen. Summen-Stromwandler werden i. Allg. nicht direkt an die Primärleiter angeschlossen. Ihr Betrieb erfolgt indirekt über Hauptwandler, die den zu messenden Strom in 1 A oder 5 A zur Speisung der Summenwandler umformen. Die genormten Bemessungsströme für die Ein- und Ausgänge von Summenwandlern sind 1 A und 5 A. Ein typisches Beispiel einer Beschaltung mit Summen-Stromwandlern zeigt Abb. 30/S. 97. In diesem Beispiel werden die Ströme je Strang von zwei Abgängen der Sammelschiene addiert und der weiteren Messung zugeführt. Energie- und Stromrichtung sind durch rote Pfeile angezeigt.

Ein Summenwandler addiert unter Berücksichtigung der Phasenlage die Primärströme von Verzweigungen desselben Strangs und ermöglicht dadurch die Messung der Summe der Ströme mit nur einem Instrument. Sekundärseitig wird durch die Konstruktion des Wandlers sichergestellt, dass die Ausgangsgröße i. d. R. wieder eine genormte Bemessungsgröße ist. Es lässt sich also von außen betrachtet sagen: **Ein Summen-Stromwandler addiert die Eingangsströme und dividiert die Summe gleichzeitig durch die Anzahl der Eingänge.**

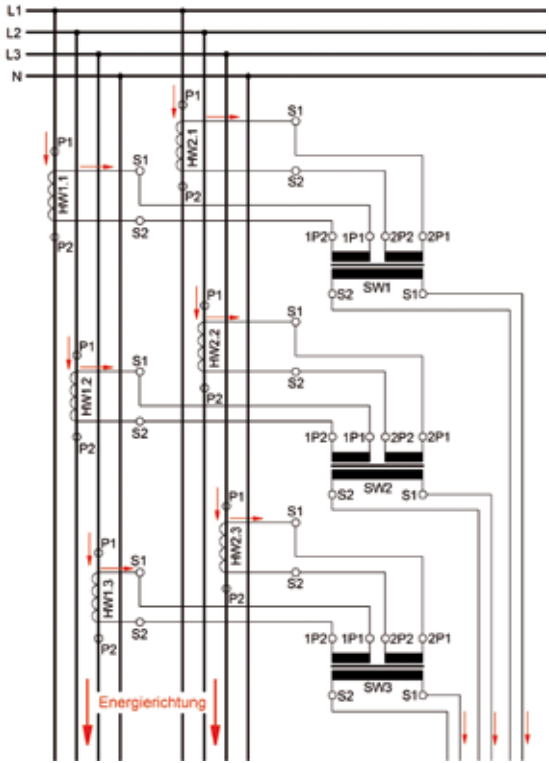


Abb. 30
Beispiel einer typischen Summenwandlerschaltung
hier: Addition der Ströme zweier Abgänge

Um seiner eigentlichen Aufgabe gerecht zu werden, ergibt es nur Sinn, Ströme in den Verzweigungen desselben Strangs zu addieren. Bei der Addition der drei Strangströme eines Dreiphasensystems würde die Summe der Ströme im fehlerfreien Betrieb null werden. In diesem Fall würde eine Fehlerstrommessung realisiert. Um diese Aufgabe zu erfüllen, gibt es jedoch besser geeignete Wandler (Abschnitt 2.4/S. 24).

Auch der Ausgang eines Summenwandlers muss immer kurzgeschlossen sein. Der Kurzschluss im bestimmungsgemäßen Betrieb erfolgt durch den niederohmigen Strompfad eines oder mehrerer Messgeräte. Gelegentlich kann es vorkommen, dass ein Eingang eines Summenwandlers nicht belegt ist. **Unbenutzte Eingänge von Summen-Stromwandlern müssen dagegen immer offen bleiben.** Ein kurzgeschlossener Eingang würde als zusätzliche Sekundärwicklung wirken mit der Folge, dass sich der Sekundärstrom auf beide Wicklungen aufteilt, was zu deutlichen Fehlmessungen führt. Hier ist besondere Achtsamkeit gefordert. Wird ein Eingang versehentlich kurzgeschlossen, kann das u. U. lange Zeit unbemerkt bleiben, da immer noch ein Sekundärstrom angezeigt wird.

7.5.1 KENNZEICHNUNG DER ANSCHLÜSSE UND TYPENSCHILD

Bei älteren Summenwandlern sind an den Sekundäranschlüssen noch die früheren Bezeichnungen k und l, manchmal schon in Kombination mit den Bezeichnungen S1 und S2 anzutreffen. Die Primäranschlüsse wurden mit Großbuchstaben in alphabetischer Reihenfolge benannt, in Verbindung mit K und L. So sieht

man die Bezeichnungen AK und AL für den ersten Eingang eines Summenwandlers, BK und BL für den zweiten Eingang usw.
Neuere Summen-Stromwandler haben sekundär nur noch die Bezeichnungen S1 und S2. Die Primärwicklungen werden dann mit 1P1 und 1P2 für den ersten Eingang, 2P1 und 2P2 für den zweiten Eingang usw. bezeichnet. Parallel dazu findet man primär auch die Benennung AP1 und AP2, BP1 und BP2 usw. Eine konkrete Vorschrift zur Klemmenbezeichnung von Summenwandlern ist zurzeit in keiner der Normen der Gruppe DIN EN 61869 zu finden.
Das Typenschild eines Summen-Stromwandlers sieht grundsätzlich nicht anders aus als das eines üblichen Stromwandlers. Der einzige Unterschied liegt in der Benennung der Übersetzung. Diese wird auch hier wieder als ungekürzter Bruch genannt, wobei der Zähler die Eingangs-Bemessungsströme als Summanden enthält. Bei einem Stromwandler mit z. B. 3 Eingängen zu je 5 A und einem Ausgang von 5 A wird die Übersetzung also angegeben als 5+5+5/5 A. Aus Gründen der Übersicht wird manchmal bei einer größeren Anzahl von gleichen Eingängen statt der Summanden die Anzahl der Eingänge als Faktor angegeben, z. B. bei 9 Eingängen in der Form 9×5/5 A .

7.5.2 GESAMTÜBERSETZUNG k_{rg}, GESAMT-WANDLERFAKTOR c_g

Um bei den nachfolgenden Betrachtungen Verwechslungen zwischen den Wandlern zu vermeiden, erhalten hier die Formelzeichen für Summenwandler den zusätzlichen Index S und die Formelzeichen für Hauptwandler den zusätzlichen Index H . Diese Indizierung ist nicht allgemein üblich und gilt nur für diese Abhandlung. Man unterscheidet Sum-

menwandler hinsichtlich der Eingänge in Summen-Stromwandler für gleiche, sowie für ungleiche Hauptwandler. Haben alle Hauptwandler dieselbe Übersetzung, liegt der einfachste Anwendungsfall für Summenwandler vor.
Um die Sekundärströme von Hauptwandlern mit unterschiedlichen Übersetzungen korrekt addieren zu können, müssen die Eingangswicklungen des Summenwandlers so gestaltet sein, dass die Eingangsströme entsprechend gewichtet werden. Nehmen wir dazu ein einfaches Beispiel an, bei dem der Hauptwandler I die Übersetzung 1000/5 A und der Hauptwandler II die Übersetzung 100/5 A hat. Die Eingänge des Summen-Stromwandlers müssen nun so gestaltet sein, dass der Strom am Eingang I zehnmal stärker gewichtet in die Summe eingeht als der Strom am Eingang II.
Deshalb müssen bei der Bestellung von Summenwandlern für ungleiche Hauptwandler immer die Übersetzungen der einzelnen Hauptwandler angegeben werden. Die Primäranschlüsse dieser Summenwandler sind dann immer nur einem bestimmten Hauptwandler zugeordnet und dürfen keinesfalls vertauscht werden.
Doch gleichgültig, um welche Art von Summenwandlers es sich handelt, lässt sich die Gesamtübersetzung k_{rg} aus der Kombination von Haupt- und Summenwandler stets aus der folgenden, einfachen Betrachtung herleiten:

Der sekundäre Bemessungsstrom I_{srS} des Summenwandlers repräsentiert stets die Summe aller Primärströme der Hauptwandler, den Gesamtprimärstrom I_{prHg}. Somit folgt allgemein für die Gesamtübersetzung

Gleichung 24

$$k_{rg} = \frac{I_{prHg}}{I_{srS}}$$

Mathematisch ausgedrückt gilt für die Summe aller *n* Hauptwandler

Gleichung 25

$$I_{prHg} = \sum_{1}^{n=n} = I_{prHn}$$

Somit folgt

Gleichung 26

$$k_{rg} = \frac{\sum_{1}^{n=n} I_{prHn}}{I_{srS}}$$

I_{prHn}	Bemessungs-Primärstrom des n-ten Hauptwandlers
I_{prHg}	Gesamtprimärstrom aller n Hauptwandler

I_{srS}	sekundärer Bemessungsstrom des Summenwandlers
k_{rg}	Gesamtübersetzung
n	Anzahl Hauptwandler

Natürlich entspricht die Gesamtübersetzung k_{rg} nach Gleichung 19/S. 82 auch dem Gesamt-Wandlerfaktor bzw. dem Gesamt-Zählerfaktor c_g. Bei der Bestimmung der Übersetzung und des Wandlerfaktors ist davon auszugehen, dass eventuell vorhandene offene Eingänge auch beschaltet, jedoch momentan stromlos sind.

7.5.2.1 ZAHLENBEISPIELE ZUR ERMITTLUNG DER GESAMTÜBERSETZUNG

a) Beispiel für gleiche Hauptwandler

Ausgehend von vier Hauptwandlern mit der Bemessungsübersetzung $k_{rHn} = 100/5\ \text{A}$ und einem Summenwandler mit der Bemessungsübersetzung $k_{rS} = 4 \times 5/5\ \text{A}$ gilt nach Gleichung 26/S. 101

Aus Gleichung 26 folgt

$$k_{rg} = \frac{\sum_{1}^{n=n} I_{prHn}}{I_{srS}} = \frac{100\ \text{A} + 100\ \text{A} + 100\ \text{A} + 100\ \text{A}}{5\ \text{A}} = 400/5\ \text{A}$$

b) Beispiel für ungleiche Hauptwandler

Vier ungleiche Hauptwandler mit den Bemessungsübersetzungen $k_{rH1} = 50/5\ \text{A}$, $k_{rH2} = 100/5\ \text{A}$, $k_{rH3} = 200/5\ \text{A}$ und $k_{rH4} = 400/5\ \text{A}$. Der Ausgangsstrom des Summenwandlers betrage ebenfalls $I_{srS} = 5\ \text{A}$. Nach Gleichung 26/S. 101 folgt

Aus Gleichung 26 folgt

$$k_{rg} = \frac{\sum_{1}^{n=n} I_{prHn}}{I_{srS}} = \frac{50\ A + 100\ A + 200\ A + 400\ A}{5\ A} = 750/5\ A$$

7.5.3 LEISTUNGSANFORDERUNG AN DIE HAUPTWANDLER

Ein Summen-Stromwandler soll die Bemessungsleistung S_{rS} abgeben können. Dazu muss er zum einen konstruktiv in der Lage sein, diese Leistung abgeben zu können. Zum anderen kann ein Summenwandler aber nur die Leistung weitergeben, die ihm geliefert wird. Es ist also sicherzustellen, dass die Bemessungsleistungen S_{rHn} der einzelnen n Hauptwandler ausreichend hoch sind.

Dabei dürfen die Verluste des Summenwandlers S_{vS} (bei Bemessungsstrom) und die der Zuleitung zwischen Haupt- und Summenwandler nicht vernachlässigt werden. Der Leistungsverlust P_{Lr} der Zuleitungen kann anhand der Gleichung 23/S. 85 berechnet werden mit anschließender Addition von 0,1 W pro Anschlussklemme für mögliche Übergangswiderstände an diesen. Je Hauptwandler ergeben sich vier Anschlussklemmen, zwei am Hauptwandler-Ausgang selbst und zwei am Summenwandler-Eingang. Auch müssen die Hauptwandler die Eigenverluste des Summenwandlers liefern. Sind diese nicht bekannt, so hat sich in der Praxis als Abschätzung bis zu einer Bemessungsleistung von $S_{rS} = 15$ VA bewährt, je Eingang pauschal rund 2 VA anzunehmen. Die Eigenverluste eines Summenwandlers mit beispielsweise vier Eingängen betragen dann also insgesamt 8 VA.

Die Bemessungs-Ausgangsleistung S_{rS} des Summenwandlers verteilt sich auf die Hauptwandler im Verhältnis der Teil-Sekundärströme I_{srSn}, die am Summenwandler-Ausgang wirksam werden zum sekundären Bemessungsstrom I_{srS}, nach Gleichung 27/S. 104 also

Gleichung 27

$$S_{Sn} = \frac{I_{srSn}}{I_{srS}} S_{rS}$$

Der sekundäre Teilstrom I_{srSn} ist der von einem Hauptwandler verursachte Anteil des am Summenwandler-Ausgang fließenden gesamten Sekundärstroms I_{srS}. Hierbei gilt für diesen Teilstrom

Gleichung 28

$$I_{srSn} = \frac{I_{prHn}}{k_{rg}}$$

I_{prHg}	Gesamtprimärstrom aller *n* Hauptwandler
I_{srSn}	sekundärer Teilstrom des Summenwandlers, verursach durch den n-ten Hauptwandler

I_{srS}	sekundärer Bemessungsstrom des Summen-Stromwandlers
k_{rg}	Gesamtübersetzung
S_{Sn}	Anteil des *n*-ten Hauptwandlers an der Bemessungsleistung des Summen-Stromwandlers

In vereinfachter Form verteilt sich die Verlustleistung S_{vS} des Summenwandlers nach derselben Proportionalität.

Gleichung 29

$$S_{vSn} = \frac{I_{srSn}}{I_{srS}} S_{vS}$$

Damit folgt als Leistungsanforderung S_{Hn} für den *n*-ten Hauptwandler

Gleichung 30

$$S_{Hn} \approx 4 \cdot 0{,}1\ \mathrm{W} + P_{Lr} + S_{vSn} + S_{Sn}$$

Anmerkung: Wirk- und Scheinleistungen sowie unterschiedliche Scheinleistungen dürfen nicht arithmetisch addiert werden. Hier sind i. Allg. nur Zeigeradditionen zulässig. Obwohl dieser Umstand bei der Näherungsgleichung 30/S. 105 vernachlässigbar ist, darf hier kein Gleichheitszeichen verwendet werden.

S_{rS}	Bemessungsleistung des Summen-Stromwandlers
S_{vS}	Gesamtverlustleistung des Summen-Stromwandlers
S_{vSn}	Anteil des *n*-ten Hauptwandlers an der Verlustleistung des Summenwandlers

S_{Hn}	Leistungsanforderung an den *n*-ten Hauptwandler
P_{Lr}	Leitungsverlust zwischen Haupt- und Summenwandler

7.5.3.1 ZAHLENBEISPIELE ZUR ERMITTLUNG DER BEMESSUNGSLEISTUNGEN DER HAUPTWANDLER

Auch hier sollen zwei Beispiele für mehr Klarheit sorgen.

a) Beispiel für gleiche Hauptwandler

Wir übernehmen die Daten des Summenwandlers aus dem Kapitel 7.5.2.1/S. 102, die wir um eine geforderte Leistung von z. B. $S_{rS} = 5\,\text{VA}$ ergänzen und fragen nach den von den Hauptwandlern zu fordernden Leistungen S_{Hn}. Wir nehmen für die Eigenverluste des Summenwandlers $S_{vS} = 8\ \text{VA}$ und für die Leitungsverluste $P_{Lr} = 1\ \text{W}$ pro Pfad an. Für die Gesamtübersetzung hatten wir bereits mit Gleichung 26/S. 101 $k_{rg} = 400/(5\ \text{A} = 80)$ ermittelt.

Nunmehr folgt nach 28/S. 104 für den sekundären Teilstrom, verursacht durch den ersten Hauptwandler

Aus Gleichung 28 folgt

$$I_{srS1} = \frac{I_{prH1}}{k_{rg}} = \frac{100\ \text{A}}{80} = 1{,}25\ \text{A}$$

Da alle Hauptwandler identisch sind, gilt der gleiche Teilstrom auch für die übrigen Wandler. Mit 29/S. 105 erhalten wir für die Verluste des Summenwandlers, die der erste Hauptwandler anteilig tragen muss.

Aus Gleichung 29 folgt

$$S_{vS1} = \frac{I_{srS1}}{I_{srS}} S_{vS} = \frac{1{,}25\ \text{A}}{5\ \text{A}} 8\ \text{VA} = 2\ \text{VA}$$

Auch hier gilt der gleiche Verlustanteil für alle anderen Hauptwandler. Nach 27/S. 104 beträgt der Leistungsteil, den der erste Hauptwandler an der Bemessungsleistung des Summenwandler beitragen muss

Aus Gleichung 27 folgt

$$S_{S1} = \frac{I_{srS1}}{I_{srS}} S_{rS} = \frac{1{,}25\ \text{A}}{5\ \text{A}} 5\ \text{VA} = 1{,}25\ \text{VA}$$

Mit 30/S. 105 folgt dann für die vom ersten Hauptwandler zu fordernde Leistung

Aus Gleichung 30 folgt

$$S_{H1} \approx 4 \cdot 0{,}1\ \text{W} + P_{Lr} + S_{vS1} + S_{S1}$$
$$= 0{,}4\ \text{W} + 1\ \text{W} + 2\ \text{VA} + 1{,}25\ \text{VA}$$
$$= 4{,}65\ \text{VA}$$

Es muss daher von jedem Hauptwandler eine Leistung von 4,65 VA gefordert werden, aufgerundet auf die nächstgelegene Bemessungsleistung also 5 VA.

b) Beispiel für ungleiche Hauptwandler

Wir übernehmen diesmal die Daten des Summenwandlers für ungleiche Hauptwandler aus dem Kapitel 7.5.2.1/S. 102, die wir um eine geforderte Leistung von z. B. wiederum $S_{rS} = 5$ VA ergänzen, und fragen nach den von den einzelnen Hauptwandlern zu fordernden Leistungen S_{Hn}. Auch soll für Eigen- und Leitungsverluste wieder gelten $S_{vS} = 8$ VA und $P_{Lr} = 1$ W pro Pfad. Die Gesamtübersetzung beträgt $k_{rg} = 750/(5\ \text{A} = 150)$.

Nach 28/S. 106 folgt für die einzelnen sekundären Teilströme, die die Hauptwandler am Summenwandler-Ausgang verursachen

Aus Gleichung 28 folgt

$$I_{srS1} = \frac{I_{prH1}}{k_{rg}} = \frac{50\ \text{A}}{150} = 0{,}333\ \text{A}$$

Aus Gleichung 28 folgt

$$I_{srS2} = \frac{I_{prH2}}{k_{rg}} = \frac{100\ \text{A}}{150} = 0{,}667\ \text{A}$$

Aus Gleichung 28 folgt

$$I_{srS3} = \frac{I_{prH3}}{k_{rg}} = \frac{200\ \text{A}}{150} = 1{,}333\ \text{A}$$

Aus Gleichung 28 folgt

$$I_{srS4} = \frac{I_{prH4}}{k_{rg}} = \frac{400\ \text{A}}{150} = 2{,}667\ \text{A}$$

Es sollte nicht wundern, dass die Summe aller Teilströme (bis auf eventuelle Rundungsfehler) wieder 5 A beträgt. Die Verluste des Summenwandlers verteilen sich auf die Hauptwandler gemäß 29/S. 107.

Aus Gleichung 29 folgt

$$S_{vS1} = \frac{I_{srS1}}{I_{srS}} S_{vS} = \frac{0{,}333\ \text{A}}{5\ \text{A}} 8\ \text{VA} = 0{,}5328\ \text{VA}$$

Aus Gleichung 29 folgt

$$S_{vS2} = \frac{I_{srS2}}{I_{srS}} S_{vS} = \frac{0{,}667\ \text{A}}{5\ \text{A}} 8\ \text{VA} = 1{,}0672\ \text{VA}$$

Aus Gleichung 29 folgt

$$S_{vS3} = \frac{I_{srS3}}{I_{srS}} S_{vS} = \frac{1{,}333\ \text{A}}{5\ \text{A}} 8\ \text{VA} = 2{,}1328\ \text{VA}$$

Aus Gleichung 29 folgt

$$S_{vS4} = \frac{I_{srS4}}{I_{srS}} \; S_{vS} = \frac{2{,}667\ \text{A}}{5\ \text{A}}\ 8\ \text{VA} = 4{,}2672\ \text{VA}$$

Zur Kontrolle muss die Summe aller Teilleistungen (bis auf eventuelle Rundungsfehler) wieder 8 VA ergeben. Nach 27/S. 104 beträgt der Leistungsteil, den die Hauptwandler an der Bemessungsleistung des Summenwandler beitragen müssen

Aus Gleichung 27 folgt

$$S_{s1} = \frac{I_{srS1}}{I_{srS}} \; S_{rS} = \frac{0{,}333\ \text{A}}{5\ \text{A}}\ 5\ \text{VA} = 0{,}333\ \text{VA}$$

Aus Gleichung 27 folgt

$$S_{s2} = \frac{I_{srS2}}{I_{srS}} \; S_{rS} = \frac{0{,}667\ \text{A}}{5\ \text{A}}\ 5\ \text{VA} = 0{,}667\ \text{VA}$$

Aus Gleichung 27 folgt

$$S_{S3} = \frac{I_{srS3}}{I_{srS}} \; S_{rS} = \frac{1{,}333\ \text{A}}{5\ \text{A}} \; 5\ \text{VA} = 1{,}333\ \text{VA}$$

Aus Gleichung 27 folgt

$$S_{S4} = \frac{I_{srS4}}{I_{srS}} \; S_{rS} = \frac{2{,}667\ \text{A}}{5\ \text{A}} \; 5\ \text{VA} = 2{,}667\ \text{VA}$$

Mit 30/S. 105 folgt dann letztendlich für die von den Hauptwandlern zu fordernden Leistungen

Aus Gleichung 30 folgt

$$\begin{aligned} S_{H1} \approx 4 \cdot 0{,}1\ \text{W} + P_{Lr} + S_{vS1} + S_{S1} \\ = 0{,}4\ \text{W} + 1\ \text{W} + 0{,}5328\ \text{VA} + 0{,}333\ \text{VA} \\ = 2{,}2658\ \text{VA} \end{aligned}$$

Aus Gleichung 30 folgt

$$S_{H2} \approx 4 \cdot 0{,}1\ \text{W} + L_{Lr} + S_{vS2} + S_{S2}$$
$$= 0{,}4\ \text{W} + 1\ \text{W} + 1{,}0672\ \text{VA} + 0{,}667\ \text{VA}$$
$$= 3{,}1342\ \text{VA}$$

Aus Gleichung 30 folgt

$$S_{H3} \approx 4 \cdot 0{,}1\ \text{W} + P_{Lr} + S_{vS3} + S_{S3}$$
$$= 0{,}4\ \text{W} + 1\ \text{W} + 2{,}1328\ \text{VA} + 1{,}333\ \text{VA}$$
$$= 4{,}8658\ \text{VA}$$

Aus Gleichung 30 folgt

$$S_{H4} \approx 4 \cdot 0{,}1\ \text{W} + P_{Lr} + S_{vS4} + S_{S4}$$
$$= 0{,}4\ \text{W} + 1\ \text{W} + 4{,}2672\ \text{VA} + 2{,}667\ \text{VA}$$
$$= 8{,}3342\ \text{VA}$$

Wir erhalten in der Summe aller Leistungen der Hauptwandler wieder dasselbe Ergebnis wie bei gleichen Hauptwandlern (bis auf eventuelle Rundungsfehler). Hier verteilt sich die Leistung jedoch unterschiedlich auf die einzelnen Hauptwandler.

Es müssen also Hauptwandler mit den nächstgelegenen genormten Bemessungsübersetzungen bestellt werden, im Einzelnen:

- Wandler 1: 50/5 A, 2,5 VA
- Wandler 2: 100/5 A, 5 VA
- Wandler 3: 200/5 A, 5 VA
- Wandler 4: 400/5 A, 10 VA

7.5.4 GENAUIGKEITSBETRACHTUNG BEI DER KOMBINATION VON HAUPT- UND SUMMEN-STROMWANDLERN

Für die Hintereinanderschaltung von Haupt- und Summenwandlern gelten nachfolgende Aussagen, ohne hier auf die Herleitung einzugehen. Wer sich für die konkrete Herleitung interessiert, sei an das Literaturverzeichnis (z. B. [4]) verwiesen. Die Fehlwinkel werden addiert und näherungsweise auch die Stromfehler. Nicht beschaltete Eingänge müssen offen bleiben, wie bereits erwähnt. Bei der Bestimmung des Wandlerfaktors ist davon auszugehen, dass auch offene Eingänge beschaltet, jedoch momentan stromlos sind.

Für den resultierenden Winkelfehler $\Delta\varphi_{res}$ der Kombination gilt

Gleichung 31

$$\Delta\varphi_{res} = \Delta\varphi_H + \Delta\varphi_S$$

$\Delta\varphi_{res}$	resultierender Fehlwinkel
$\Delta\varphi_H$	Fehlwinkel des Hauptwandlers
$\Delta\varphi_S$	Fehlwinkel des Summenwandlers

und für den Gesamtfehler in guter Näherung

Gleichung 32

$$\varepsilon_{res} \approx \varepsilon_H + \varepsilon_S$$

ε_{res}	resultierender Stromfehler
ε_H	Stromfehler des Hauptwandlers
ε_S	Stromfehler des Summenwandlers

Die Fehlwinkel werden addiert und näherungsweise auch die Stromfehler.

7.5.5 SUMMEN-STROMWANDLER ALS ANPASSWANDLER

Als Beispiel soll die Addition von 3 Hauptwandlern mit den Übersetzungen von jeweils k_{rH} = 300/5 A angenommen werden. Als Gesamtübersetzung gilt dann gemäß 26/S. 101 k_{rg} = 900/5 A. Diese Gesamtübersetzung kann Probleme verursachen, z. B. beim Anschluss eines Analoginstruments, wenn diese Skalierung nicht geliefert werden kann. Auch gibt es elektronische Stromzähler, bei denen die Eingabe dieses Zählerfaktors nicht möglich ist. Ebenfalls bei klassischen mechanischen Zählern, bei denen man noch manuell die Anzeige mit dem Zählerfaktor multiplizieren muss, ist die Multiplikation mit dem Zählerfaktor von c_g = 180, der sich in diesem Beispiel ergibt, unpraktisch.
Ein Wandlerhersteller ist aber in der Lage, einen Summenwandler derart zu modifizieren, dass hier die Übersetzung k_{rg} = 900/4,5 A lautet. Als ungekürzter Bruch entspricht dies der Übersetzung k_{rg} = 1000/5 A und einem Zählerfaktor von c_g = 200.
Man kann also einen Summen-Stromwandler auch gleichzeitig zum Anpassen einer wenig geeigneten Gesamtübersetzung an eine besser geeignete verwenden.

7.5.6 SUMMIERUNG OHNE SUMMEN-STROMWANDLER

Das Kapitel über Summen-Stromwandler sei noch um die Erkenntnis ergänzt, dass man die Sekundärströme von Hauptwandlern gleicher Stränge auch ohne Summenwandler addieren kann. Voraussetzung hierbei ist jedoch, dass alle Hauptwandler gleich sind.
In diesem Fall werden die Ausgänge aller Wandler parallelgeschaltet.

Hier findet jedoch keine Transformation der Ausgangsgröße statt, sodass zu prüfen ist, ob die nachfolgenden Gerätschaften für den höheren Strom verwendet werden können. Letztlich kann man hier mit einem Wickel-Stromwandler in Form eines Zwischenwandlers den Sekundärstrom anpassen.

Es besteht auch die Möglichkeit, Hauptwandler mit kleineren Ausgangsströmen zu verwenden. So können z. B. zwei Stromwandler mit einem Sekundärstrom von jeweils 2,5 A zu einem Gesamt-Sekundärstrom von 5 A addiert werden.

Anmerkung: Die hier vorgestellte Summierung ohne Summen-Stromwandler darf nicht mit der Holmgreen-Schaltung verwechselt werden. Hierbei befinden sich die Stromwandler auf den drei Strängen L1, L2 und L3 eines Systems und liefern durch Addition der Sekundärströme im fehlerfreien Zustand die Summe Null. Wer mehr über diese Schaltung erfahren möchte, sei an das Literaturverzeichnis (z. B. [4]) verwiesen.

[1] DIN EN 61869-1 (VDE 0414-9-1), Messwandler, Beuth Verlag GmbH, Berlin
[2] DIN EN 61869-2 (VDE 0414-9-2), Messwandler, Beuth Verlag GmbH, Berlin
[3] Alois Bröder, Strom-Messwandler, Grundlagen und Berechnungsverfahren, 2017, Shaker-Verlag, ISBN 978-3-8440-5649-5
[4] Alois Bröder, Strom-Messwandler, Informationen für Anwender, 2018, Shaker-Verlag, ISBN 978-3-8440-6233-5
[5] Rolf Fischer, Elektrische Maschinen, 2011, Carl Hanser Verlag, ISBN 978-3-446-42554-5
[6] Rudolf Bauer, Die Messwandler, 1953, Springer-Verlag, ISBN 978-3-662-11515-2
[7] Isaac Goldstein, Die Meßwandler, 1928, Springer-Verlag, ISBN-13: 978-3-642-89761-0
[8] Martin Kahmann, Elektrische Energie elektronisch gemessen, 1994, VDE-Verlag, ISBN 978-3800718597
[9] Ingmar Grambow (Hrsg.), Messwandler für Mittel- und Hochspannungsnetze, 2000, expert-Verlag (Kontakt & Studium, Band 554), ISBN 3-8169-1587-6
[10] Ungrad, Winkler, Wiszniewski, Schutztechnik in Elektroenergiesystemen, 1994, Springer-Verlag, ISBN 978-3-642-63409-3
[11] Fachwörterbuch Messwandler, Autorenkollektiv der Ritz Instrument Transformer GmbH, 2010, Union Druckerei Dresden GmbH

Herausgeber: REDUR GmbH & Co. KG
Autor: Alois Bröder

© Copyright REDUR GmbH & Co. KG
1. Auflage, Dezember 2020
Für Irrtümer und Druckfehler wird keine Haftung übernommen. Verwendete Bilder und Markennamen sind Eigentum der Rechtsinhaber oder des Autors. Änderungen in Technik und Ausführung behalten wir uns vor. Nachdruck, auch nur auszugsweise, ist genehmigungspflichtig. Es gelten die allgemeinen Geschäftsbedingungen unter www.redur.de/agb/

ISBN: 978-3-00-068179-0

Gestaltungskonzeption
KÖHLER & PARTNER
www.koehler-partner.de

Widmung

Wir danken dem Autor Alois Bröder für die sehr gelungene Zusammenstellung des Einmaleins der Stromwandler. Herr Bröder gilt nicht nur als Schöpfer der kompaktesten und vielseitigsten Stromwandler, sondern auch als begnadeter Lektor und Mentor. In seinem kompletten Berufsleben und darüber hinaus als Pensionär widmete und widmet er sich der Technik der Stromwandler. Er ist für seinen unermüdlichen Einsatz, die teilweise komplexe technische Materie der Stromwandler einem breiten Publikum näher zu bringen, über die Landesgrenzen hinaus bekannt. Ich persönlich bedanke mich für alles, was Herr Bröder für die REDUR, Kunden, Mitarbeiter und Stromwandlerfans aus aller Welt im Laufe der letzten Jahrzehnte geleistet hat.

Dr. Lothar Schunk
Geschäftsführer REDUR GmbH. Co. KG

MAKE A CHANGE WHEREVER ELECTRICAL ENERGY FLOWS.

Angetrieben von Präzision vereint unsere **Measurement Technology Division** vier spezialisierte Marken unter einer gemeinsamen Mission: leistungsstarke Mess- und Transformatortechnologien für ein breites Spektrum an Anwendungen zu entwickeln und bereitzustellen.

Jede Marke bringt ihre eigene Expertise, ihre individuellen Stärken und ihren spezifischen Marktfokus ein – verbunden durch den gemeinsamen Anspruch an Präzision, Innovation und Qualität.

Gemeinsam bieten wir mehr als nur Produkte – wir stellen ein globales Netzwerk aus Know-how und Erfahrung bereit und entwickeln gemeinsam mit unseren Kunden maßgeschneiderte Lösungen für ihre individuellen Anforderungen.



LET'S CREATE CHANGE. TOGETHER.

Wir liefern keine Produkte – wir liefern Lösungen. Ob maßgeschneiderter Produkte nach Ihren Anforderungen oder fachkundige Beratung – wir unterstützen Sie und Ihr Projekt. Lassen Sie uns gemeinsam Lösungen für Ihre Produkte entwickeln, die wirklich einen Unterschied machen.