

NETZSCHUTZ

Das Magazin für Schutztechnik

03 2018

06 Theorie & Praxis

Anforderungen,
Dimensionierung mit
Berechnungsbeispiel

36 Gerätetechnik

Kleinsignal- & optische
Wandler, Merging Units
bei Distanzschutz

54 Prüftechnik

Inbetriebnahmeprüfung
für zuverlässigen Schutz

STROM- WANDLER

Wichtigster Signalüberträger
für den Schutz

Prüfen Sie leidenschaftlich wirtschaftlich



MVCT

Multifunktionales Strom- und Spannungswandler-Prüfgerät

Nur ein Anschluss – und Sie prüfen wirtschaftlich alle wichtigen Parameter an Ihren Wandlern. Gleich dazu das Schutzrelais und sogar die Isolation mit 1 kV. Schneller, leichter - und mit riesigem Farb-Touchscreen - bequemer und sicherer als je zuvor. Sie sparen Zeit und Transport weiterer Prüfgeräte dafür ein – und die Ausgaben!

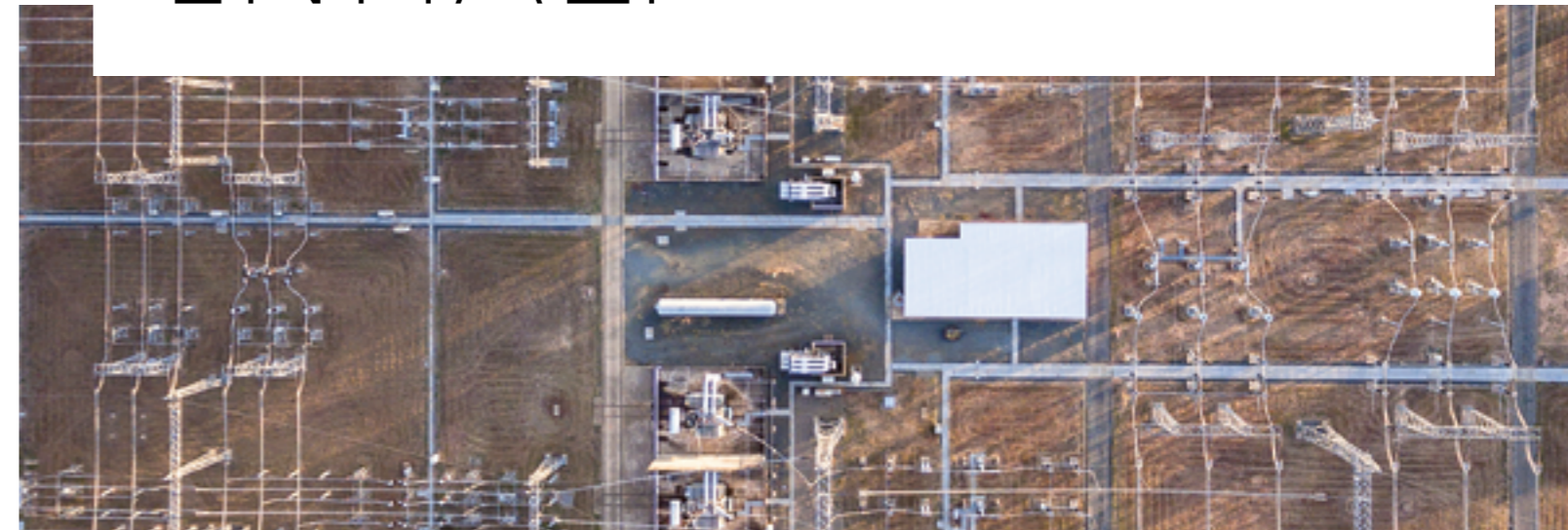
- Großer 10" Farb-Touchscreen
- Prüft Strom- und Spannungswandler
- Prüft die Isolation mit 1 kV
- Prüft Schutzrelais
- Prüft alle Anzapfungen automatisch

www.megger.de



Megger
Power on

INHALT



STROMWANDLER

Die Basis jeder Schutzanwendung ist die ausreichende Übertragung des Primärstromes auf den Sekundärkreis. Die Anforderungen sind hoch und werden von Messabweichungen, Nicht-Linearität und Sättigung maßgeblich beeinflusst. Um die wirtschaftlich-technischen Anforderungen der Standardisierung und Vereinfachung von Systemen zu erreichen, werden von Herstellerseite verstärkt Produkte wie Kleinsignalwandler oder optische Strommessungen

angeboten. Merging Units stellen Messsignale auf Stationsbus-Ebene zur Verfügung und öffnen neue Möglichkeiten der sekundären Anlagenkonfiguration.

Die Inbetriebnahmeprüfung von Stromwandlern, der Stromwandlerkreise und in Folge der korrekten Einstellung am Schutzgerät ist für ein zuverlässiges Schutzsystem unerlässlich.

THEORIE & PRAXIS

- 06 Anforderungen
- 16 Dimensionierung
- 22 Auslegungsbeispiel
- 28 Etappen der Innovation

GERÄTETECHNIK

- 36 Sensortechnik
- 42 Distanzschutz mit Merging Units
- 48 Optische Stromwandler

PRÜFTECHNIK

- 54 Inbetriebnahmeprüfung

AKTUELLES/TERMINE

- 60 Konferenzen, Tagungen, Seminare
- 60 Impressum



EDITORIAL



Peter Schitz
Herausgeber und
Chefredakteur

Liebe Leserinnen und Leser,

wir widmen uns in dieser Ausgabe dem wohl wichtigsten Betriebsmittel für die Schutztechnik, dem Stromwandler. Schutztechnikerinnen und -techniker dürfen im Vorfeld darauf achten, diese für eine korrekte Übertragung der zu erwartenden Stromverläufe zu dimensionieren. Wir möchten Sie dazu mit detaillierten Grundlageninformationen und einem Berechnungsbeispiel informieren.

Ein persönlicher Hinweis sei mir v.a. zum Thema transientes Übertragungsverhalten gestattet. Es ist, wie auch in den FNN-Richtlinien hingewiesen wird, sehr wohl der jeweilige Anwendungsfall zu berücksichtigen. Eine Distanzschutz-Einrichtung im Hochspannungsbereich muss mehr Anforderungen gerecht werden als eine Mittelspannung-Differentialschutzeinrichtung mit aktivierter Sättigungserkennung. Auch das Thema Remanenz wird von einigen Herstellern in den letzten Jahren als große Bedrohung dargestellt. Gespräche mit erfahrenen Kollegen zeigen aber, dass es beim Großteil der Anlagen keine Probleme damit gibt.

Aus meiner Sicht haben unsere Schutztechnik-Vorfahren immer schon genügend Reserven eingeplant, um viele der „neu entdeckten“

Probleme abzufedern. Lediglich das Dimensionieren am technischen Limit kann auch bei Standardanwendungen eine genaue Berechnung erfordern.

Hintergrundwissen, wie Sie es in dieser Ausgabe erhalten, sowie das Wissen um die Netzsituation und die Abstimmung mit dem Wandlerhersteller sind wohl der sicherste Weg zu einer korrekten Dimensionierung.

Auf vielen Tagungen berichten Hersteller über die Möglichkeiten und Kolleginnen und Kollegen über ihre Erfahrungen mit Kleinsignalwandlern und optischen Wandlern. Diese sind v.a. im Zuge der weiteren Standardisierung und im Zusammenhang mit IEC 61850 ein spannendes Thema.

Wie inzwischen gewohnt, bitte ich Sie, uns Ihre Fragen, Erfahrungen oder Anregungen zu schicken. Wir antworten und schreiben gerne zurück. Wir möchten gerne das Expertenforum zum Leben erwecken.

Viel Freude beim Lesen wünscht Ihnen

Energietechnik und Innovationen für die Klimastrategie

Anwendungen – Industrie – Forschung – Erzeugung – Netze

56. Fachtagung der Österreichischen Gesellschaft für Energietechnik im OVE

18. und 19. Oktober 2018 | Wien

www.ove.at/OGE-FT2018



Unter dem Titel „#mission2030“ veröffentlichte die österreichische Bundesregierung im Frühjahr 2018 die Klima- und Energiestrategie. Die Österreichische Gesellschaft für Energietechnik (OGE) im OVE Österreichischer Verband für Elektrotechnik nimmt dies zum Anlass, sich in ihrer 56. Fachtagung mit den Innovationen in der elektrischen Energietechnik zu beschäftigen, die zur Umsetzung der Klimastrategie beitragen.

Diese Fachtagung richtet sich an alle Interessierten aus Energiewirtschaft und Industrie, der Öffentlichkeit sowie aus Lehre und Forschung, die sich mit der Klima- und Energiestrategie und deren Umsetzung auseinandersetzen.

IMMER BESSER INFORMIERT

NUR IM ABO
ERHÄLTlich!

Mit dem Jahres-Abo erhalten Sie
- 4 Papier-Ausgaben für bis zu
5 KollegInnen an einer Adresse
- Online-Zugang zu allen bisher
erschienenen Artikeln für 1 Jahr

Bestellungen unter
www.netzschutz-magazin.com
oder mit dem online abrufbaren
Bestellformular per Mail an
abo@netzschutz-magazin.com



Das Magazin für Schutztechnik

THEMEN 2018

Lichtbogenschutz
März 2018

Überstromzeitschutz
Juni 2018

Stromwandler
September 2018

Transformatordifferentialschutz
Dezember 2018

NETZSCHUTZ

Das Magazin für Schutztechnik

JA, ICH MÖCHTE ABONNIEREN!

Mit einem Abonnement ist der Bezug von bis zu 5 Ausgaben pro Erscheinung und Lieferadresse möglich. Dazu einfach die weiteren EmpfängerInnen eintragen und Heft kommt auf den Tisch. **Online-Zugang inklusive.**

<p>Anrede / Akad. Titel _____</p> <p>Vor- / Nachname _____</p> <p>Position _____</p> <p>Firma _____</p> <p>Außenstelle / Filiale _____</p> <p>E-Mail _____</p> <p>UID Nummer _____</p>	<p>Rechnungsadresse</p> <p>Straße _____</p> <p>PLZ _____ Stadt _____</p> <p>Bundesland _____</p> <p>Land _____</p>
<p>2. EmpfängerIn</p> <p>Anrede / Akad. Titel _____</p> <p>Vor- / Nachname _____</p>	<p>Telefonnummer Festnetz _____</p> <p>Telefonnummer Mobil _____</p>
<p>3. EmpfängerIn</p> <p>Anrede / Akad. Titel _____</p> <p>Vor- / Nachname _____</p>	<p>4. EmpfängerIn</p> <p>Anrede / Akad. Titel _____</p> <p>Vor- / Nachname _____</p>
<p>Vermerk / Hinweise</p> <div style="border: 1px solid black; height: 40px; width: 100%;"></div>	<p>5. EmpfängerIn</p> <p>Anrede / Akad. Titel _____</p> <p>Vor- / Nachname _____</p>

Lieferadresse wie Rechnungsadresse

Andere Lieferadresse

Straße _____

PLZ _____ Stadt _____

Bundesland _____

Land _____

Ich willige in die Verarbeitung und Nutzung meiner personenbezogenen Daten ein und akzeptiere die Datenschutzbedingungen.

Ich habe die **Allgemeinen Geschäftsbedingungen** (s. Rückseite) gelesen und akzeptiere diese vollinhaltlich.

Abopreise:
Österreich EUR 158,00 netto (EUR 173,80 brutto inkl. Versand)
Deutschland EUR 158,00 netto (EUR 187,00 brutto inkl. Versand)
Schweiz EUR 158,00 netto (EUR 170,00 brutto inkl. Versand)

Ort, Datum _____

Unterschrift _____

Das ausgefüllte und unterschriebene Abonnementformular senden Sie bitte an:
NETZSCHUTZ Magazin - EET Verlag GmbH, Westbahnstraße 7/6a, 1070 Wien,
Österreich oder per Mail an abo@netzschutz-magazin.com

Mit diesem QR-Code werden Sie zu unserem Online-Formular geleitet.

NETZSCHUTZ



ANFORDERUNGEN

Jörg Meyer,

geb. 1979, nach dem Studium Elektrotechnik mit dem Schwerpunkt Elektrische Energietechnik an der Berufsakademie Sachsen Projektierungs- und Inbetriebnahmeingenieur für Sekundärtechnik in Umspannwerken.

Promotion an der TU Dresden auf dem Gebiet der Niederspannungsschutztechnik. Derzeit Mitarbeiter an der Professur für Elektroenergieversorgung der TU Dresden und am NARC® (National Arc Fault Research Center).

Der Arbeitsbereich der Stromwandler für Schutzzwecke erstreckt sich von wenigen Prozent seines Bemessungsstromes bis hin zu den zu übertragenden Kurzschlussströmen. Für die ordnungsgemäße Dimensionierung des Stromwandlers zur bestimmungsgemäßen Funktion des Selektivschutzkonzeptes ist das Verständnis zum Übertragungsverhalten des Stromwandlers wichtige Grundlage.

Dem Wandler kommen folgende grundsätzlichen Aufgaben zu:

1. Umwandlung standardisierter Primärwerte in ebenfalls standardisierte Sekundärwerte
2. Elektrische Isolation der Schutzeinrichtung gegenüber dem Hochspannungspotenzial des Schutzobjektes
3. Augenblickswertgetreue Übertragung der Primärwerte von Strom und Spannung im gesamten Arbeitsbereich
4. Hilfsenergieversorgung für wandlerstromversorgte Schutzgeräte

Der Arbeitsbereich der Stromwandler für Schutzzwecke erstreckt sich von wenigen Prozent seines Bemessungsstromes (Freigabebeiströme) bis hin zu den zu übertragenden Kurzschlussströmen. Diese können je nach Anlagenkonfiguration ein hohes Vielfaches (z. B. das 100-Fache) des Bemessungsstromes betragen. Aus der zuvor definierten Anforderung 3) einer augenblickswertgetreuen Übertragung im gesamten Arbeitsbereich ist ersichtlich, dass die ordnungsgemäße Dimensi-

onierung des Stromwandlers eine wesentliche Voraussetzung für die bestimmungsgemäße Funktion des Selektivschutzkonzeptes ist. In diesem Beitrag wird deshalb auf die Dimensionierung des Stromwandlers eingegangen, da die von Wandlern geforderte Messgenauigkeit im gesamten Arbeitsbereich eingehalten werden muss.

Um diese hohen Anforderungen erfüllen zu können, wurden in der relevanten Norm [1] unterschiedliche Stromwandlerklassen (P, PX, TPX, TPZ) definiert. Auf diese Stromwandlerklassen und deren Definition hinsichtlich der Genauigkeit ihres Übertragungsverhaltens wird im letzten Abschnitt eingegangen.

ERSATZSCHALTBILD

Die klassische Wandlung von Primär- in Sekundärgrößen beruht auf dem Prinzip der induktiven Kopplung. Stromwandler sind Transformatoren, die sekundärseitig im Kurzschluss (bzw. sehr niederohmig) betrieben werden. Das elektrische Ersatzschaltbild des Stromwandlers entspricht daher grundlegend dem eines Transformators, entsprechend **Abb. 1**.

Im Ersatzschaltbild wird der Stromwandler in einen „idealen Stromwandler“ und in einen „realen Stromwandler“ unterteilt. Im „idealen Stromwandler“ wird der eingeprengte Primär-

strom, entsprechend dem Nennübersetzungsverhältnis k_r , fehlerfrei auf die sekundäre Seite umgewandelt. Im „realen Stromwandler“ werden die physikalischen Prozesse innerhalb des Wandlers auf die Sekundärseite bezogen modelliert. Dies wird durch den hochgestellten Strich gekennzeichnet.

Das Kernmaterial wird durch die nichtlineare Induktivität L_h und den Widerstand R_{Fe} nachgebildet. Der Widerstand repräsentiert die Verluste (Hysterese, Wirbelströme) im Eisenkern. Sekundärseitig ist an den Klemmen des Stromwandlers eine Bürdenimpedanz angeschlossen, die das Schutzgerät mit entsprechender Zuleitung repräsentiert. Aus dem vollständigen Transformatorersatzschaltbild können für Stromwandler einige Größen vernachlässigt werden. Die Elemente der Primärseite (L'_{op} , L'_p) sind nicht relevant, da i. d. R. von einem eingeprengten Primärstrom ausgegangen wird, der Spannungsfall über den Primärelementen hat keinen Einfluss auf die Genauigkeit des Stromwandlers. Außerdem wird der Widerstand R_{Fe} vernachlässigt, da dieser keinen nennenswerten Einfluss auf das Übertragungsverhalten des Stromwandlers bei großen Strömen hat. Die sekundäre Streuinduktivität L_{os} ist meistens sehr klein und wird häufig vernachlässigt. Das vereinfachte, auf die Sekundärseite bezogene Ersatzschaltbild ist in **Abb. 2** dargestellt.

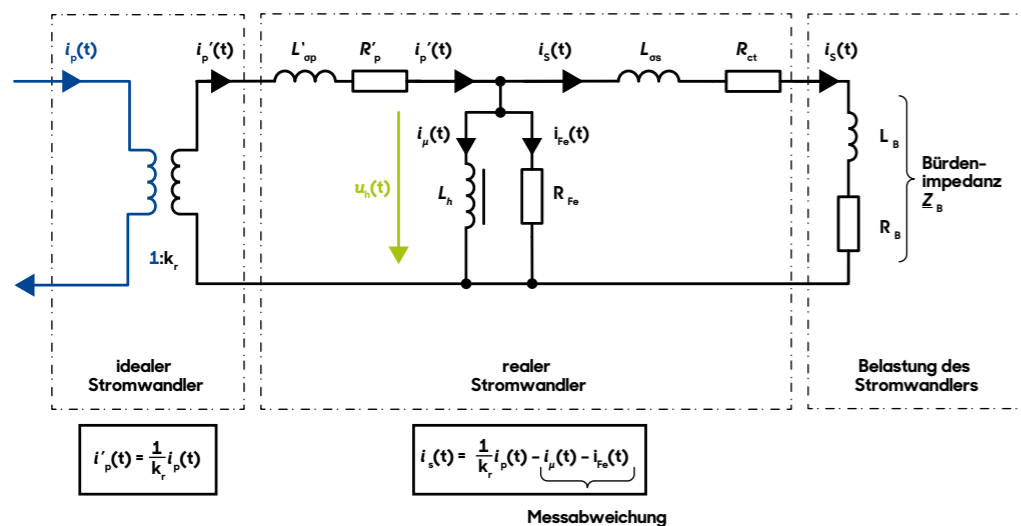


Abb. 1 Vollständiges elektrisches Ersatzschaltbild des Stromwandlers

In dem vereinfachten Ersatzschaltbild ist erkennbar, dass der Magnetisierungsstrom $i_\mu(t)$ der Hauptfeldinduktivität L_h die Messabweichung des Stromwandlers bestimmt. Der Zusammenhang zwischen der Spannung über der Hauptfeldinduktivität $u_h(t)$ und dem fließenden Magnetisierungsstrom $i_\mu(t)$ besteht über die nichtlineare Magnetisierungskennlinie des Kernmaterials.

MESSABWEICHUNG DES STROMWANDLERS

Für sinusförmige Ströme bei Aussteuerung des Wandlers in seinem (linearen) Arbeitsbereich wird die sog. Übersetzungsmessabweichung ε aus der Differenz der Effektivwerte der Primär- und Sekundärströme berechnet [1] – **Gl. 1**:

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

An der Grenze des linearen Arbeitsbereiches beginnt der Stromwandler zu sättigen. Insbesondere die Ströme auf der Sekundärseite sind daher nicht mehr exakt sinusförmig. Für nichtsinusförmige Stromverläufe wird der Zeitverlauf des Fehlerstromes $i_\varepsilon(t)$ bewertet – **Gl. 2**:

$$i_\varepsilon(t) = k_r \cdot i_s(t) - i_p(t)$$

Für diesen erweiterten Arbeitsbereich gibt es abhängig von der Stromwandlerklasse verschiedene Genauigkeitsangaben:

1. Die **Gesamtmessabweichung** wird nach [1] über den bezogenen Effektivwert der Stromdifferenz nach folgender Gleichung berechnet. Sie wird für Wandler der Klasse P, PR verwendet – **Gl. 3**:

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

2. Betrachtung der Momentanwerte des Fehlerstromes. Für Wandler der Klasse TPX, TPY und TPZ werden der Wechsel- und Gleichstromanteil des Fehlerstromes getrennt bewertet – **Gl. 4**:

$$i_\varepsilon(t) = i_{\varepsilon ac}(t) + i_{\varepsilon dc}(t) = k_r \cdot i_s(t) - i_p(t)$$

Dabei kann entweder der Scheitelwert des gesamten Fehlerstromes bezogen auf den Scheitelwert des Bemessungskurzschlussstromes I_{psc} angegeben werden – **Gl. 5**:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{\hat{i}_\varepsilon(t)}{\sqrt{2} I_{psc}} \cdot 100 \%$$

Für Kerne mit geringen sekundären Zeitkonstanten (TPZ), die kaum Gleichanteile übertragen, wird die Messabweichung nur für den Wechselstromanteil des Fehlerstromes definiert – **Gl. 6**:

$$\hat{\varepsilon}_{ac} = \frac{\hat{i}_{\varepsilon ac}(t)}{\sqrt{2} I_{psc}} \cdot 100 \%$$

NICHTLINEARE MAGNETISIERUNGSKENNLINIE

Es ist zu beachten, dass die Hauptfeldinduktivität L_h das nichtlineare Verhalten des magnetischen Kerns aufweist. Das Kernmaterial ist ferromagnetisch. Die sogenannten Weiß'schen Bezirke innerhalb des Kernmaterials richten sich entsprechend des Magnetfeldes H aus. Änderungen des magnetischen Kernflusses Ψ führen zur Induktion einer Spannung in der Sekundärwicklung. Sind die Weiß'schen Bezirke im Kernmaterial vollständig ausgerichtet und somit gesättigt, können sich magnetische Feldlinien nur noch über die Luft schließen. Das bedeutet, dass die steigende magnetische Feldstärke durch eine primärseitige Stromerhöhung nur noch eine kleine Änderung des magnetischen Flusses zur Folge hat. Die induzierte Spannung in der Sekundärspule verschwindet somit und der Strom im Sekundärkreis wird null. Der bekannte Zusam-

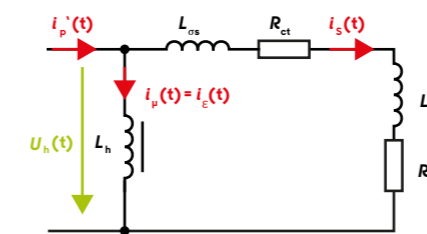


Abb. 2 Vereinfachtes elektrisches Ersatzschaltbild des Stromwandlers



Abb. 3 Magnetisierungskennlinie des Wandlerkerns (ohne Hysterese) – H-B-Diagramm

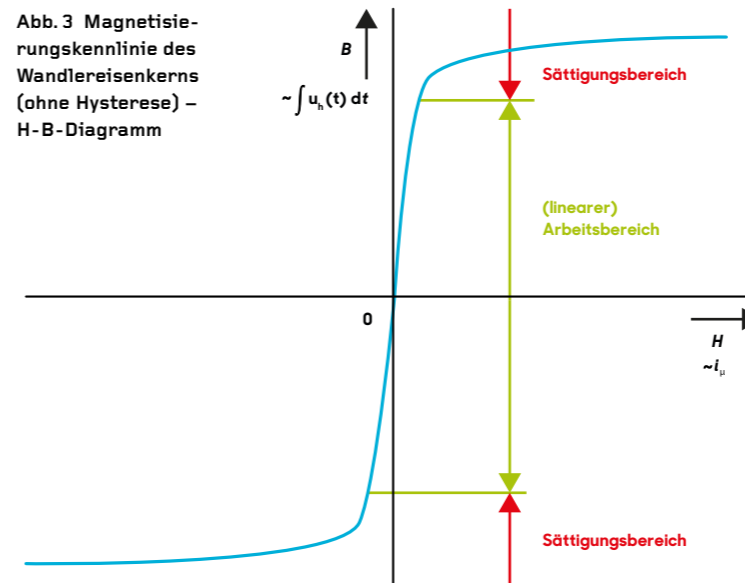
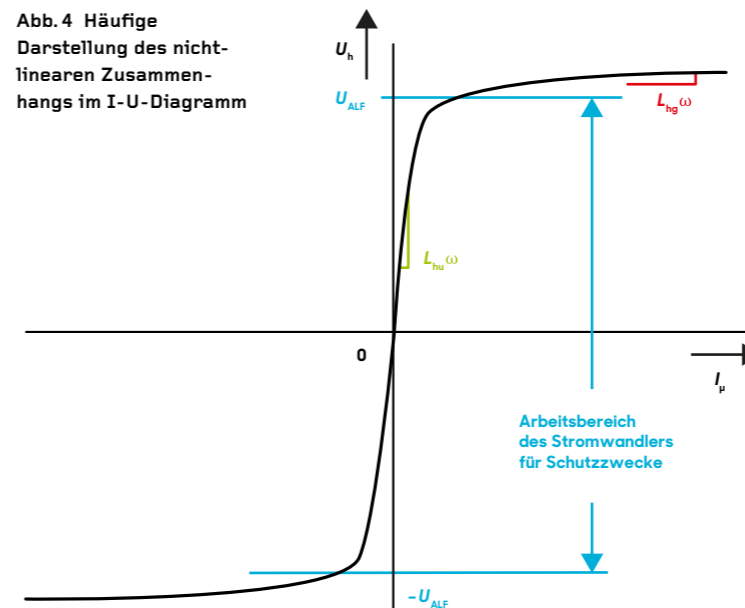


Abb. 4 Häufige Darstellung des nicht-linearen Zusammenhangs im I-U-Diagramm



menhang zwischen magn. Feldstärke (Durchflutung) H und magn. Flussdichte (Induktion) B ist in **Abb. 3** abgebildet. Dargestellt ist die sog. Neukurve. Die wirksame Hysterese der Magnetisierungskennlinie wurde vernachlässigt. Diese ist für die Beurteilung der Remanenzflussdichte (B_r) relevant (geringerer Anstieg der Magnetisierungskennlinie). Bei der Dimensionierung von Stromwandlern wird davon ausgegangen, dass keine Remanenz im Eisenkern vorhanden ist. Daher kann die dargestellte Neukurve für die Auslegung von Stromwandlern verwendet werden. Der Einfluss der Remanenz wird getrennt bewertet.

Häufig wird für den nichtlinearen Zusammenhang auch die Darstellung im I-U-Diagramm (**Abb. 4**) verwendet. Der physikalische Zusammenhang zwischen Flussdichte B und Hauptfeldspannung U_h (Integration der Spannung - Induktionsgesetz) wird nicht richtig abgebildet. Für die alleinige Betrachtung von Effektivwerten bei einrequenten, sinusförmigen Zeitverläufen (siehe stationäre Wandlerdimensionierung) ist dies meist ausreichend und wird als Näherung verwendet.

Der Zusammenhang zu den elektrischen und magnetischen Größen ist über das *Durchflutungsgesetz* (Vernachlässigung der Verschiebungsstromdichte) – **Gl. 7**

$$\oint_{dA} H \, ds = \iint_A J \, dA = Ni_{\mu}$$

bzw. das *Induktionsgesetz* herstellbar – **Gl. 8.**

$$\begin{aligned} - \iint_A \frac{dB}{dt} \, dA &= \oint_{dA} E \, ds = u_h(t) \\ - \iint_A B \, dA &= \Psi = \int u_h(t) \, dt \end{aligned}$$

Im Arbeitsbereich ist der Messfehler sehr klein, da der Magnetisierungsstrom i_{μ} sehr klein ist. Im Sättigungsbereich ist der Messfehler sehr groß, da der Magnetisierungsstrom i_{μ} sehr groß ist.

Es wird davon ausgegangen, dass die Messabweichung des Stromwandlers im linearen Arbeitsbereich eingehalten wird. Bei Betrieb des Wandlers über den linearen Arbeitsbereich hinaus wird die Anforderung der Messabweichung verletzt, da Sättigung eintritt.

HAUPTFELDINDUKTIVITÄT

Die Hauptfeldreaktanz des Stromwandlers X_h beschreibt den Anstieg der Kennlinie im I-U-Diagramm. Die Hauptfeldinduktivität ergibt sich durch Berücksichtigung der Kreisfrequenz der Spannung und des Stroms – **Gl. 9**:

$$L_h = \frac{X_h}{\omega}$$

Im (ungesättigten) Arbeitsbereich des Wandlers wirkt eine sehr hohe Hauptfeldinduktivität L_{hu} , da die Kennlinie einen hohen Anstieg besitzt.

Im Sättigungsbereich hat die Kennlinie einen relativ geringen Anstieg, die wirksame Hauptfeldinduktivität L_{hg} ist entsprechend klein.

SEKUNDÄRSEITIGER STROMZEITVERLAUF

Allgemein kann der verlagerte Kurzschlussstrom (bezogener Primärstrom) gemäß folgender Gleichung beschrieben werden – **Gl. 10**:

$$i'_p(t) = i'_p [e^{-t/T_p} \cos(\theta) - \cos(\omega t + \theta)]$$

Mit der primären Netzzeitkonstanten T_p , Der Winkel θ beschreibt die Differenz zwischen Impedanzwinkel des Netzes φ und Fehlereintrittswinkel γ – **Gl. 11**:

$$\theta = \gamma - \varphi$$

Eine Vollverlagerung ergibt sich bei $\theta = 0^\circ$.

Ansatz für die Berechnung des sekundären Stromverlaufs bildet wieder das Ersatzschaltbild des Stromwandlers nach **Abb. 2**. Da davon ausgegangen wird, dass der Wandler nicht sättigt und damit im (linearen) ungesättigten Arbeitsbereich betrieben wird, wirkt die ungesättigte Magnetisierungsinduktivität L_{hu} (vgl. **Abb. 5**).

Es lässt sich folgende Differentialgleichung der sekundärseitigen Masche I aufstellen – **Gl. 12**:

$$0 = \frac{(R_{ct} + R_{Bb})}{R_s} i_s(t) + \frac{(L_{\sigma s} + L_{Bb})}{L_s} \frac{d i_s(t)}{d t} - L_{hu} \frac{d (i'_p(t) - i_s(t))}{d t}$$

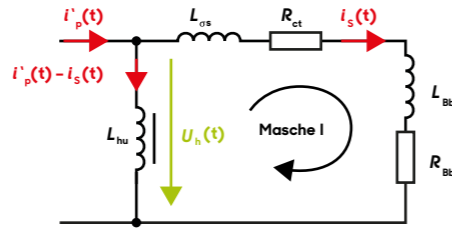


Abb. 5 Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Stromwandlers mit Betriebsbürde (Index b)

Die Widerstände und Induktivitäten der Sekundärseite werden zunächst zusammengefasst – **Gl. 13**:

$$0 = R_s i_s(t) + L_s \frac{d i_s(t)}{d t} - L_{hu} \frac{d (i'_p(t) - i_s(t))}{d t}$$

Zur Berechnung des gesuchten Sekundärstromes $i_s(t)$ wird **Gl. 13** wie folgt umgestellt – **Gl. 14**:

$$L_{hu} \frac{d i'_p(t)}{d t} = R_s i_s(t) + (L_s + L_{hu}) \frac{d i_s(t)}{d t}$$

Die Lösung der Differentialgleichung (**Gl. 14**) liefert schließlich für den Sekundärstrom folgende Lösung (bezogener Primärstrom gemäß **Gl. 10**) – **Gl. 15**:

$$i_s(t) = \frac{L_{hu}}{L_{hu} + L_s} i'_p \left[\frac{T_s}{T_p - T_s} \cos(\theta) \left(e^{-t/T_s} - e^{-t/T_p} \right) + \frac{\omega T_s}{1 + \omega^2 T_s^2} \left(\sin(\omega t + \theta) - \omega T_s \cos(\omega t + \theta) - (\sin(\theta) - \omega T_s \cos(\theta)) e^{-t/T_s} \right) \right]$$

Für den vollverlagerten Kurzschlussstrom ($\theta = 0^\circ$) ergibt sich – **Gl. 16**:

$$i_s(t) = \frac{L_{hu}}{L_{hu} + L_s} i'_p \left[\frac{T_s}{T_p - T_s} \left(e^{-t/T_s} - e^{-t/T_p} \right) + \frac{\omega T_s}{1 + \omega^2 T_s^2} \left(\sin(\omega t) - \omega T_s \cos(\omega t) + \omega T_s e^{-t/T_s} \right) \right]$$

Dabei ist T_s die sekundäre Wandlerzeitkonstante.

Abb. 6 Übertragungsverhalten von Stromwandlern mit unterschiedlichen sekundären Zeitkonstanten

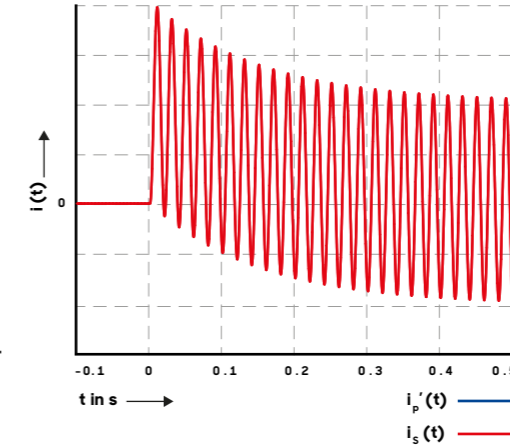


Abb. 6a Ts >> Tp

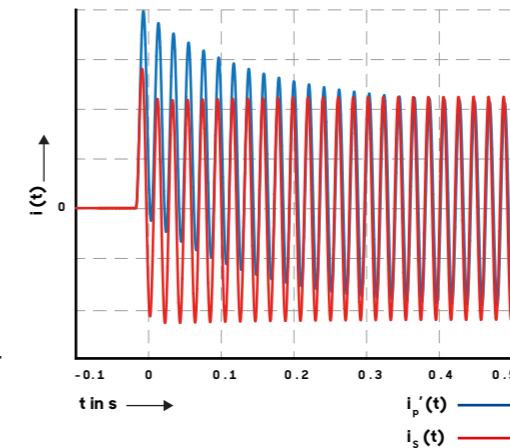


Abb. 6b Ts << Tp

SEKUNDÄRE WANDLERZEITKONSTANTE

Die sekundäre Wandlerzeitkonstante T_s ist eine wichtige Dimensionierungsgröße. Sie berechnet sich wie folgt – **Gl. 17**:

$$T_s = \frac{L_s + L_{hu}}{R_s}$$

Die Größe der sekundären Wandlerzeitkonstante hängt damit maßgeblich von der Hauptfeldinduktivität L_{hu} und damit vom Design des Eisenkerns ab. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Größen der sekundären Wandlerzeitkonstanten sollen im Folgenden kurz anhand von zwei Extremfällen gezeigt werden:

I. Fall

$T_s \gg T_p$ – sehr große sekundäre Wandlerzeitkonstante (eisengeschlossene Wandler (P, PX, TPX mit großer Magnetisierungsinduktivität L_{hu}) mit geringem Sekundärwiderstand und geringer Bürde). Für sehr große sekundäre Zeitkonstanten wird aus **Gl. 15** folgender Ausdruck und

entspricht damit dem bezogenen Primärstrom. Der Wandler überträgt den Primärstrom also detailgetreu mit Verlagerung – **Gl. 18**:

$$i_s(t) = \frac{L_{hu}}{L_{hu} + L_s} i'_p [e^{-t/T_p} \cos(\theta) - \cos(\omega t + \theta)] \approx i'_p(t)$$

II. Fall

$T_s \ll T_p$ – sehr kleine sekundäre Wandlerzeitkonstante (Stromwandler mit geschlitztem Eisenkern (TPZ) mit kleinerer Magnetisierungsinduktivität L_{hu} und relativ hohem Sekundärwiderstand sowie erhöhter ohmscher Bürde). Für sehr kleine sekundäre Zeitkonstanten verschwinden die exponentiellen Anteile in **Gl. 15**. Der Wandler überträgt also weitestgehend nur noch die Wechselstromanteile – **Gl. 19**:

$$i_s(t) = \frac{L_{hu}}{L_{hu} + L_s} i'_p \left[e^{-t/T_s} \left(\cos(\theta) - \frac{1}{\omega T_s} \sin(\theta) \right) + \frac{1}{\omega T_s} \sin(\omega t + \theta) - \cos(\omega t + \theta) \right]$$

Diese Gleichung kann mit Additionstheoremen wie folgt umgeschrieben werden – **Gl. 20**:

$$i_s(t) = \frac{L_{hu}}{L_{hu} + L_s} i'_p \left[\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega T_s} \right)^2} \cdot \cos \left(\omega t + \theta + \arctan \left(\frac{1}{\omega T_s} \right) \right) \right]$$

Es ist erkennbar, dass ein Amplituden- und Winkelfehler bei der Übertragung entsteht.

Abb. 6a und **6b** zeigen die prinzipiellen Zeitverläufe dieser beiden Extremfälle..

GENORMTE GENAUIGKEITSKLASSEN FÜR STROMWANDLER FÜR SCHUTZZWECKE

In [1] werden für Stromwandler verschiedene Klassen definiert. Innerhalb der Klassen werden verschiedene Werte zur Beschreibung der Genauigkeit, des Übertragungsverhaltens oder der Magnetisierungscharakteristik des Wandlers angegeben. Im Folgenden werden die einzelnen Wandlerklassen vorgestellt und am Ende miteinander verglichen.

KLASSE P, P(R)

Die Definition von Wandlern dieser Klasse erfolgt über die Definition der Genauigkeit bei einem Vielfachen des Bemessungsstromes. Die Angaben beziehen sich auf symmetrische (unverlagerte) Stromverläufe sowie dem Betrieb des Wandlers mit seiner Bemessungsbürde. Außerdem wird der sog. Überstromfaktor (ALF – accuracy limit factor) angegeben. Dieser gibt das Vielfache des Nennstromes I_{pr} an, der bei sekundärseitig angeschlossener Bemessungsbürde primär fließen darf, ohne die Gesamtmessabweichung ϵ_c zu überschreiten – **Tab. 1.**

Remanenzfaktor, gibt das Verhältnis der Remanenzflussdichte B_R zur Sättigungsflussdichte B_{satt} an – **Gl. 21:**

$$K_R = \frac{B_R}{B_{satt}}$$

Dieser ist für diese Klasse wie folgt definiert: $K_{R,P}$ nicht festgelegt, $K_{R,P(R)} \leq 10\%$

KLASSE PX, PX(R)

Die Definition dieser Wandler erfolgt über die Angabe von mindestens einem Punkt der Magnetisierungskennlinie (I_e, U_k) im linearen Arbeitsbereich in der I-U-Darstellung. Der sekundäre Innenwiderstand ist eine Typenschildangabe – **Abb. 6.**

Die Messabweichungen werden dann für die entsprechende Aussteuerung der Kennlinie berechnet.

Remanenzfaktor:

$K_{R,PX}$ nicht festgelegt, $K_{R,PX(R)} \leq 10\%$

KLASSE TP

Die Klassen TP (transient performance) definieren das Übertragungsverhalten der Wandler über die Definition des transienten Übertragungsverhaltens und einer sättigungsfreien Übertragungszeit. Dabei ist eine zugrunde liegende Schließfolge (z.B. C-O-C-O) für die Berechnung angegeben. Das transiente Übertragungsverhalten der Wandler wird über die beiden Faktoren:

Genauigkeitsklasse	bei primärem Bemessungsstrom		Gesamtmessabweichung bei Bemessungs-Genauigkeits-Grenzstrom
	Strommessabweichung	Fehlwinkel	
5P(R)	1%	1°	5%
10P(R)	3%	–	10%

Der sekundäre Innenwiderstand R_{ct} des Stromwandlers ist i.d.R. bei Wandlern dieser Klassen keine Typenschildangabe. Die Bestimmung des Innenwiderstandes muss für eine ordnungsgemäße Dimensionierung messtechnisch erfolgen.

Tab. 1 Norm-Genauigkeitsklassen 5P und 10P [1]

Klasse	bei primärem Bemessungsstrom		Transiente Fehlergrenzwerte unter festgelegten Bedingungen der Schließfolge
	Übersetzungsmessabweichung	Fehlwinkel	
TPX	0,5%	0,5°	$\hat{\epsilon} = 10\%$
TPY	1%	1°	$\hat{\epsilon} = 10\%$
TPZ	1%	3°	$\hat{\epsilon}_{oc} = 10\%$

(ϵ_{oc} – nur für Wechselstromanteil)*

*TPZ-Kerne haben eine geringe Magnetisierungsinduktivität (geringerer Anstieg der Magnetisierungskennlinie (vgl. **Abb. 7**)) und damit eine geringe sekundäre Zeitkonstante. Der evtl. im Kurzschlussstrom enthaltene exponentiell abklingende Gleichanteil wird auch im ungesättigten Fall von TPZ-Kernen kaum übertragen. Die Genauigkeitsangabe bezieht sich daher nur auf den Wechselstromanteil.

Tab. 2 Norm-Genauigkeitsklassen TP [1]

K_{SSC} ... Faktor des symmetrischen Bemessungskurzschlussstromes (ssc... symmetrical short circuit current) und

K_{td} ... transienter Dimensionierungsfaktor (td... transient dimensioning) beschrieben.

Dabei müssen die angesetzte sättigungsfreie Übertragungszeit t_{gl} , der sekundäre Innenwiderstand R_{ct} des Stromwandlers und die primäre Netzzeitkonstante T_p angegeben werden – **Tab. 2.**

Remanenzfaktor:

$K_{R,TPX}$ nicht festgelegt, $K_{R,TPY} \leq 10\%$, $K_{R,TPZ} \leq 10\%$ (durch die Auslegung ist i.d.R. $K_{R,TPZ} \ll 10\%$ gegeben [2])

Wandlerklasse	P (R)	PX (R)	TPX / TPY / TPZ
Grenzspannung	U_{ALF}	$\approx U_k \cdot F^*$	U_{dl}
Überstromfaktor	ALF	$K_X \cdot F^*$	$K_{td} \cdot K_{SSC}$
Fehlergröße	ϵ	I_e	ϵ, ϵ_{AC}

Tab. 3 Vergleich der Größen der unterschiedlichen Klassen [2]

* Der Faktor F ist abhängig von der Art des verwendeten Eisenkerns. Für PX: $F = 1,2..1,3$ und für PX(R): $F = 1,1$.

Abb. 6 Magnetisierungskennlinie des Stromwandlers mit Angabe eines Punktes auf der Kennlinie

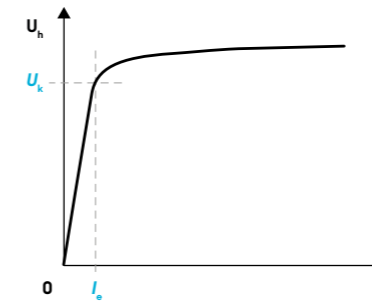
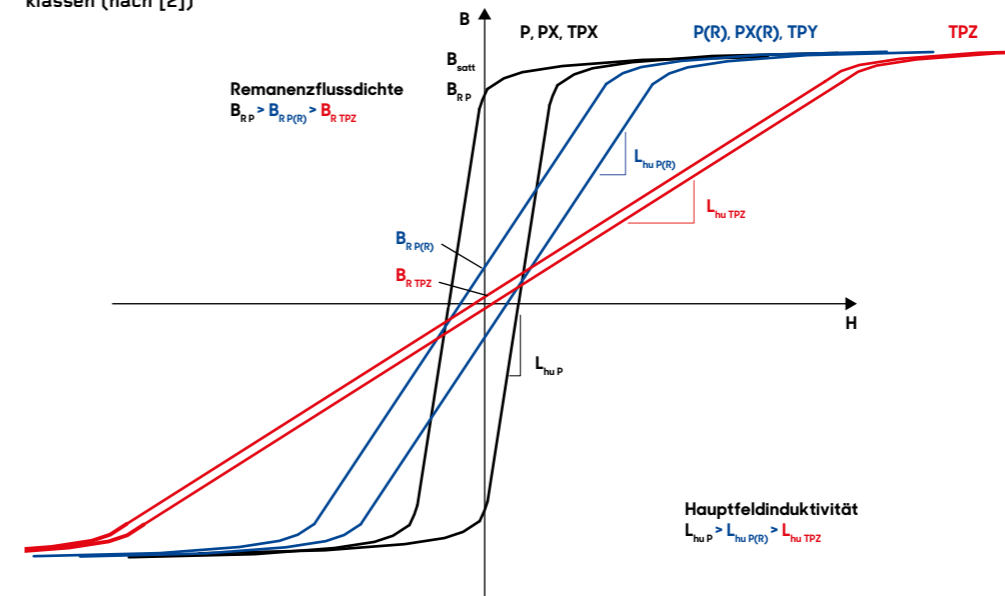


Abb. 7 Vgl. des prinzipiellen Verlaufs der Magnetisierungskennlinie verschiedener Wandlerklassen (nach [2])



VERGLEICH DER MAGNETISIERUNGSKENNLINIEN VERSCHIEDENER WANDLERKLASSEN

Bei Wandlern mit geschlitztem Eisenkern (TPZ) ist die Hauptfeldinduktivität sehr klein, da die Magnetisierungskennlinie sehr flach ansteigt – **Abb. 7.**

Bei Wandlern mit wenig geschlitztem Eisenkern (P(R), PX(R), TPY – zur Reduktion der Remanenz) ist die Hauptfeldinduktivität etwas höher, da die Magnetisierungskennlinie etwas stärker ansteigt.

Bei Wandlern mit geschlossenem Eisenkern (P, PX, TPX) ist die Hauptfeldinduktivität sehr groß, da die Magnetisierungskennlinie sehr steil ansteigt.

RELEVANTE PARAMETER DER WANDLERKLASSEN ZUR DIMENSIONIERUNG – **Tab. 3**

Quellen

- 1 DIN Deutsches Institut für Normung e. V. und VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informations-technik e.V., 2014. DIN EN 61869-2 (VDE 0414-9-2): Messwandler – Teil 2: Zusätzliche Anforderungen für Stromwandler (IEC 61869-2:2012); Deutsche Fassung EN 61860-2:2012. Berlin 2013
- 2 G. Ziegler, Digitaler Differentialschutz: Grundlagen und Anwendung, zweite Auflage, Erlangen 2013

DIMENSIONIERUNG



Jörg Meyer,

geb. 1979, nach dem Studium Elektrotechnik mit dem Schwerpunkt Elektrische Energietechnik an der Berufsakademie Sachsen Projektierungs- und Inbetriebnahmeingenieur für Sekundärtechnik in Umspannwerken. Promotion an der TU Dresden auf dem Gebiet der Niederspannungsschutztechnik. Derzeit Mitarbeiter an der Professur für Elektroenergieversorgung der TU Dresden und am NARC® (National Arc Fault Research Center).

STATIONÄRES ÜBERTRAGungsverhalten

Das Ziel ist die Berechnung des Betriebsüberstromfaktors ALF' (Accuracy Limit Faktor).

Der Betriebsüberstromfaktor gibt an,

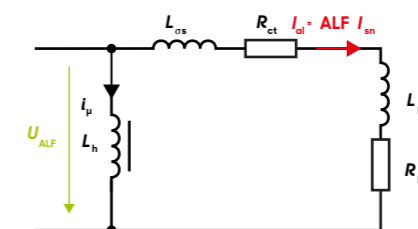
- bei welchem Vielfachen des Bemessungsstromes,
- bei von Bemessungsbürde abweichender Bebürdung (Betriebsbürde),
- bei sinusförmigem Stromverlauf der Stromwandler die Anforderungen an die Genauigkeit gerade noch einhält, also noch nicht zu sättigen beginnt.

HERLEITUNG:

Dimensionierungsgrundlage ist die max. Hauptfeldspannung U_{ALF} , bis zu welcher der Wandler betrieben werden kann, dass gerade noch keine Sättigung auftritt und damit die Anforderungen an die Genauigkeit noch eingehalten werden. Aus den Herstellerangaben kann U_{ALF} mit den Bemessungsgrößen (Index: r - linke Spalte) berechnet werden und damit schließlich auf die tatsächlichen Betriebsbedingungen (Index: b - rechte Spalte) umgerechnet werden.

Abb. 1 Ersatzschaltbild des Stromwandlers an der Genauigkeitsgrenze

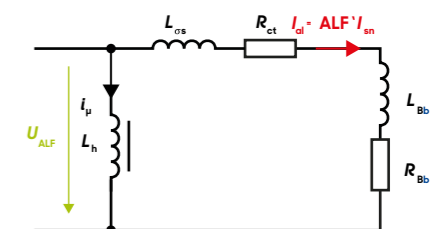
Bemessungsbürde (Index: n)



$$U_{ALF} = ALF I_{sn} [R_{ct} + R_{Bn} + j\omega(L_{os} + L_{Bn})]$$

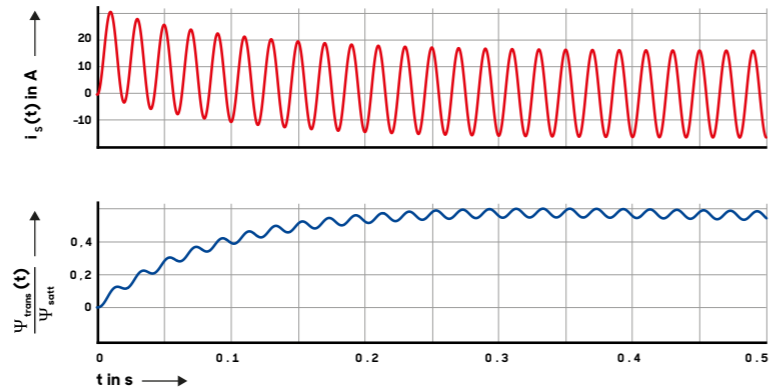
a) mit Bemessungsgrößen

Betriebsbürde (Index: b)



$$U_{ALF} = ALF' I_{sn} [R_{ct} + R_{Bb} + j\omega(L_{os} + L_{Bb})]$$

b) mit Betriebsgrößen



Die maximale Hauptfeldspannung U_{ALF} ist konstruktiv vom Wandler vorgegeben und darf nicht überschritten werden. U_{ALF} gilt also für beide Betriebsfälle gleichermaßen (die Gleichungen können damit gleichgesetzt werden) – **G1. 1**:

$$ALF I_{sn} [R_{ct} + R_{Bn} + j\omega(L_{\sigma s} + L_{Bn})] =$$

$$ALF' I_{sn} [R_{ct} + R_{Bb} + j\omega(L_{\sigma s} + L_{Bb})]$$

Der Betriebsüberstromfaktor ALF' kann damit wie folgt berechnet werden – **G1. 2**:

$$ALF' = ALF \frac{[R_{ct} + R_{Bn} + j\omega(L_{\sigma s} + L_{Bn})]}{[R_{ct} + R_{Bb} + j\omega(L_{\sigma s} + L_{Bb})]}$$

Unter der Vernachlässigung der sekundären Streureaktanz $L_{\sigma s}$ und der Betragsbildung der Zähler- und Nennerimpedanzen folgt – **G1. 3**:

$$ALF' = ALF \frac{|R_{ct} + Z_{Bn}|}{|R_{ct} + Z_{Bb}|}$$

Der sekundäre Innenwiderstand R_{ct} des Wandlers hat einen Einfluss (siehe **G1. 3**) auf den Betriebsüberstromfaktor. Er sollte bei der Berechnung des Betriebsüberstromfaktors berücksichtigt werden.

TRANSIENTES ÜBERTRAGungsverhalten

Ziel: Berechnung des transienten Überdimensionierungsfaktors K_{tf}

Der transiente Überdimensionierungsfaktor gibt an, um das Wievielfache der Stromwandler im Vergleich zur stationären Dimensionierung überdimensioniert werden muss, damit er

- bei von Bemessungsbürde abweichender Bebürdung,

- bei (voll)verlagertem Stromverlauf
- für die Zeit t_{ci} (sättigungsfreie Übertragungszeit) sättigungsfrei überträgt.

TRANSIENTFAKTOR $K_{tf}(t)$

Die transiente Stromwandlerdimensionierung basiert auf der Berechnung der maximal möglichen Flussamplitude im Kernmaterial und berücksichtigt dabei die Verlagerung des zu übertragenden Stromes. Für die Berechnung des transienten Überdimensionierungsfaktors wird zunächst der sich ergebende Fluss bei verlagertem Primärstrom ins Verhältnis zur Flussamplitude bei sinusförmigem (unverlagertem) Primärstrom gesetzt – **G1. 4**:

$$K_{tf}(t) = \frac{\psi_{trans}(t)}{\psi_{stat}}$$

Für den stationären Fluss bei sinusförmigem (unverlagertem) Strom gilt – **G1. 5**:

$$\psi_{stat}(t) = R_s \int \hat{i}_s \cos(\omega t) dt$$

Ergibt sich – **G1. 6**:

$$\psi_{stat}(t) = \frac{\hat{i}_s}{\omega} R_s \sin(\omega t) = \hat{\psi}_{stat} \sin(\omega t)$$

TRANSIENTER KERNFLUSSVERLAUF

Abb. 2 soll die Problematik des Flussverlaufes bei verlagertem Kurzschlussstrom verdeutlichen. Aufgrund des integralen Zusammenhangs zwischen Hauptfeldspannung und magnetischem Kernfluss steigt dieser stark an.

Zur Berechnung der maximal möglichen Flussamplitude muss zunächst der Flussverlauf be-

Abb. 2 Stromverlauf (verlagert) und ungesättigter Flussverlauf (bezogen auf Sättigungsfluss ψ_{stat})

rechnet werden. Der dafür notwendige Verlauf der Hauptfeldspannung ergibt sich aus der Maschengleichung der Sekundärseite – siehe **Abb. 5** im Artikel „Anforderungen“ – **G1. 7**:

$$u_h(t) = R_s i_s(t) + L_s \frac{d i_s(t)}{dt}$$

Damit ergibt sich der transiente magnetische Flussverlauf im Kernmaterial über das Induktionsgesetz – siehe **G1. 8** im Artikel „Anforderungen“ – **G1. 8**:

$$\psi_{trans}(t) = \int u_h(t) dt + \psi_0$$

Vereinfachend wird hierbei die sekundäre Induktivität L_s und der Remanenzfluss vernachlässigt. Es ergibt sich aus den Gleichungen (7) und (8) – **G1. 9**:

$$\psi_{trans}(t) = R_s \int i_s(t) dt$$

Mit dem berechneten sekundären Stromverlauf aus **G1. 15** im Artikel „Anforderungen“ kann

geschrieben werden – **G1. 10**:

$$\psi_{trans}(t) = R_s \int \hat{i}_s \left[\frac{T_s}{T_p - T_s} \cos(\theta) \left(e^{-t/T_s} - e^{-t/T_p} \right) + \frac{\omega T_s}{1 + \omega^2 T_s^2} \left(\sin(\omega t + \theta) - \omega T_s \cos(\omega t + \theta) - (\sin(\theta) - \omega T_s \cos(\theta)) e^{-t/T_s} \right) \right] dt$$

Die Lösung des Integrales ergibt für den Kernfluss des Wandlers schließlich folgenden Ausdruck – **G1. 11**:

$$\psi_{trans}(t) = \hat{i}_s R_s \left[\frac{T_s}{T_p - T_s} \cos(\theta) \left(T_p e^{-t/T_p} - T_s e^{-t/T_s} \right) + \frac{\omega^2 T_s^2}{1 + \omega^2 T_s^2} \left(-\frac{1}{\omega^2 T_s} \cos(\omega t + \theta) - \frac{1}{\omega} \sin(\omega t + \theta) + \left(\frac{1}{\omega} \sin(\theta) - T_s \cos(\theta) \right) e^{-t/T_s} \right) \right]$$

Mit folgender Näherung – **G1. 12**:

$$\frac{\omega^2 T_s^2}{1 + \omega^2 T_s^2} \approx 1$$



Für $f = 50$ Hz und $T_s \geq 45$ ms ist der Fehler der Näherung $\leq 0,5\%$ und damit zulässig – **Gl. 13**:

$$\psi_{\text{trans}}(t) = \frac{\hat{i}_s}{\omega} R_s \left[\frac{\omega T_s}{T_p - T_s} \cos(\theta) \left(T_p e^{-t/T_p} - T_s e^{-t/T_s} \right) - \frac{1}{\omega T_s} \cos(\omega t + \theta) - \sin(\omega t + \theta) + (\sin(\theta) - \omega T_s \cos(\theta)) e^{-t/T_s} \right]$$

Für den vollverlagerten Kurzschluss ($\theta = 0^\circ$) lässt sich diese Gleichung weiter vereinfachen zu **Gl. 14**:

$$\psi_{\text{trans}}(t) = \frac{\hat{i}_s}{\omega} R_s \left[\frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left(e^{-t/T_p} - e^{-t/T_s} \right) - \frac{1}{\omega T_s} \cos(\omega t) - \sin(\omega t) \right]$$

Mit **Gl. 4** und **Gl. 6** ergibt sich der Verlauf des Transientfaktors $K_{\text{tr}}(t)$ zu **Gl. 15**:

$$K_{\text{tr}}(t) = \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left(e^{-t/T_p} - e^{-t/T_s} \right) - \frac{1}{\omega T_s} \cos(\omega t) - \sin(\omega t)$$

Für die Berechnung des späteren Überdimensionierungsfaktors wird eine sog. Peak-Kurve aus dem Verlauf des Transientfaktors berechnet. Dabei wird die Amplitude der überlagerten Sinus- und Kosinusanteile genähert – **Gl. 16**:

$$K_{\text{tr peak}}(t) = \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left(e^{-t/T_p} - e^{-t/T_s} \right) + 1$$

Beide Kurven sind in **Abb. 3** dargestellt.

SÄTTIGUNGSFREIE ÜBERTRAGUNGSZEIT

Wird während der Übertragung des verlagerten Stromes die maximale Sättigungsflussdichte des Wandlers erreicht, beginnt dieser zu sättigen. In **Abb. 4** ist dies bei ca. 80 ms. Bis zu diesem Zeitpunkt t_{al} (sättigungsfreie Übertragungszeit) überträgt der Wandler sättigungsfrei und hält damit die geforderte Genauigkeit ein.

TRANSIENTER

ÜBERDIMENSIONIERUNGSFAKTOR K_{td}

Der transiente Überdimensionierungsfaktor ergibt sich, wenn in die Gleichung der Peak-Kurve des Transientfaktors $K_{\text{tr peak}}(t)$ für $t = t_{\text{al}}$ gesetzt wird. – **Gl. 17**:

$$K_{\text{td}} = K_{\text{tr peak}}(t = t_{\text{al}})$$

Mit **Gl. 16** kann der transiente Überdimensionierungsfaktor schließlich wie folgt berechnet werden – **Gl. 18**:

$$K_{\text{td}} = \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left(e^{-t_{\text{al}}/T_p} - e^{-t_{\text{al}}/T_s} \right) + 1$$

Dieser Überdimensionierungsfaktor muss nun bei der Dimensionierung der Stromwandler berücksichtigt werden. Die transiente Dimensionierung folgt hier nun wieder der gleichen Logik wie bei der stationären Dimensionierung.

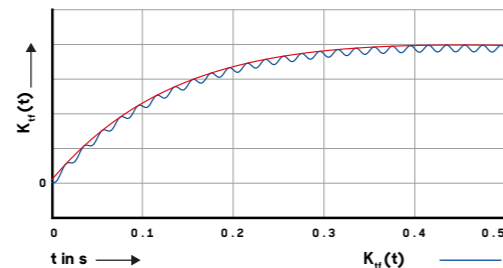


Abb. 3 Verlauf des Transientfaktors $K_{\text{tr}}(t)$ und dessen Peak-Kurve $K_{\text{tr peak}}(t)$

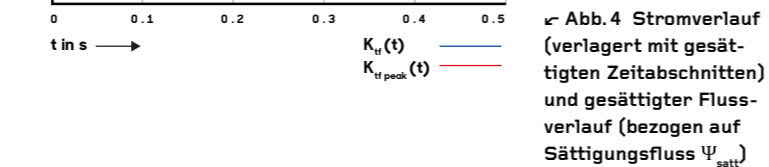


Abb. 4 Stromverlauf (verlagert mit gesättigten Zeitabschnitten) und gesättigter Flussverlauf (bezogen auf Sättigungsfluss Ψ_{satt})

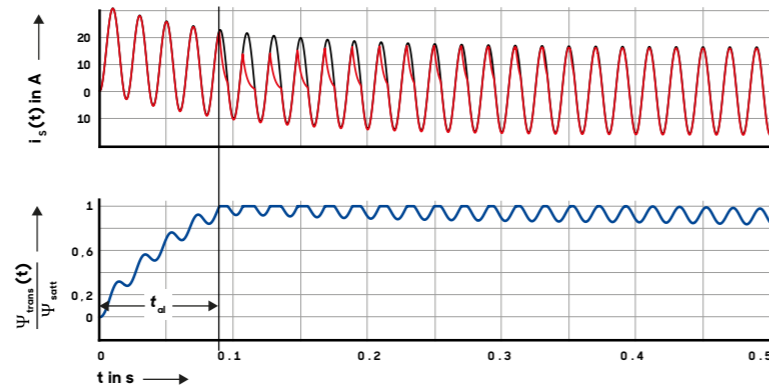


Abb. 5 Ersatzschaltbild des Stromwandlers an der Genauigkeitsgrenze mit Betriebsgrößen für transiente Dimensionierung

Abb. 6 Strom- und Flussverlauf bei erfolgloser AWE (große sekundäre Zeitkonstante)

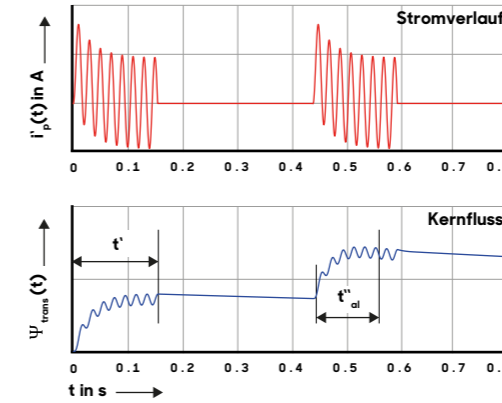
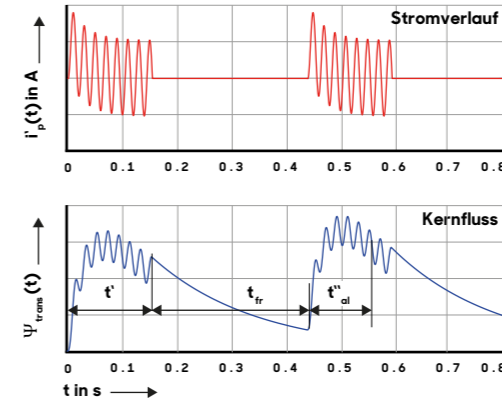


Abb. 7 Strom- und Flussverlauf bei erfolgloser AWE (kleine sekundäre Zeitkonstante)



GESAMTES ÜBERTRAGungsverhalten

Die maximale Hauptfeldspannung U_{ALF} ist konstruktiv vom Wandler vorgegeben und darf nicht überschritten werden, da sonst Sättigung eintritt. U_{ALF} darf also auch unter Berücksichtigung der transienten Überdimensionierung nicht überschritten werden (**Abb. 5**) – **Gl. 19**:

$$U_{\text{ALF}} = K_{\text{td}} \text{ALF}' I_{\text{sn}} [R_{\text{ct}} + R_{\text{Bb}} + j\omega(L_{\text{os}} + L_{\text{Bb}})]$$

Praktisch kann die Dimensionierung auf verschiedene Arten erfolgen.

1. Z.B. kann mit der bekannten Betriebsbürde und dem aus der Kurzschlussstromberechnung bekannten Überstromfaktor der vorhandene k_{td} des Wandlers berechnet werden. Mit diesem und der bekannten Netzzeitkonstante T_p kann die maximal mögliche sättigungsfreie Übertragungszeit t_{al} berechnet werden, womit bspw. das Schutzsystem überprüft werden kann. Oder:
2. Sollte eine Forderung für die sättigungsfreie Übertragungszeit t_{al} vorhanden sein, kann die maximal zulässige Betriebsbürde berechnet werden. Mit dieser darf dann der Wandler maximal betrieben werden, um die sättigungsfreie Übertragungszeit einzuhalten.

Quellen

1. DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, 2014. IEC/TR 61869-100, Instrument Transformers - Guide for Application of Current System Protection; englische Fassung, Frankfurt am Main 2014
2. Autorenkollektiv, RITZ Instrument Transformers GmbH, Standort Ottendorf-Okrilla, Fachwörterbuch Messwandler, sechste Auflage, Dresden 2017
3. H. Clemens; K. Rothe, Schutztechnik in Energiesystemen, 3. Auflage, Berlin 1991

BERÜCKSICHTIGUNG DER AUTOMATISCHEN WIEDEREINSCHALTUNG MIT SPANNUNGSLOSER PAUSE

Eine erhöhte Anforderung an das transiente Übertragungsverhalten von Stromwandlern ergibt sich bei der Verwendung von AWE. Die Entmagnetisierung des Kerns während der spannungslosen Pause ist abhängig von der Höhe der sekundären Zeitkonstante T_s und der Länge der Pausenzeit.

GROSSE SEKUNDÄRE ZEITKONSTANTE

Bei eisengeschlossenen Wandlern ohne Luftspalt, mit relativ großen sekundären Zeitkonstanten, erfolgt nahezu keine Entmagnetisierung während einer typischen Pausenzeit – **Abb. 6**.

Der Fluss startet nach der AWE-Pause nahezu am gleichen Punkt, bei dem er bei der Abschaltung aufhörte. Der transiente Überdimensionierungsfaktor ergibt sich dabei nach folgender Gleichung – **Gl. 20**:

$$K_{\text{td},(c-o-c-o)} = K_{\text{td}}(t') + K_{\text{td}}(t''_{\text{al}})$$

KLEINE SEKUNDÄRE ZEITKONSTANTE

Bei Eisenkernen mit Luftspalt (TPY, TPZ) erfolgt aufgrund der relativ kleinen sekundären Zeitkonstante eine signifikante Entmagnetisierung des Kerns innerhalb der AWE-Pausenzeit – **Abb. 7**.

Dieses exponentielle Abklingen des Flusses kann in der Berechnung des transienten Überdimensionierungsfaktors berücksichtigt werden. Dieser ergibt sich dabei nach folgender Gleichung (keine Sättigung bis t''_{al}) [1] – **Gl. 21**.

$$K_{\text{td},(c-o-c-o)} = K_{\text{td}}(t') e^{-\frac{(t_{\text{fr}} + t''_{\text{al}})}{T_s}} + K_{\text{td}}(t''_{\text{al}})$$



AUSLEGUNGS- BEISPIEL

Georg Wurzer,
geb. 1986, studierte
Elektrotechnik an der
Technischen Universität
Graz. Seit 2013 bei der
KNG - Kärnten Netz
GmbH im Bereich
Anlagenplanung und
Netzplanung tätig.

Bei Verwendung von Standardschutzkernen der Klasse P kann sowohl die Überprüfung des korrekten stationären als auch des transienten Übertragungsverhaltens auf einfache Weise durchgeführt werden. Im Fall von Sättigungserscheinungen kann Überdimensionierung ein Lösungsweg sein.

Wie die ersten beiden Artikel gezeigt haben, wird das Übertragungsverhalten eines Stromwandlers von wenigen Faktoren bestimmt:

- Bemessungsübersetzung $K_n = I_{pn} / I_{sn}$
- Innenwiderstand der Sekundärwicklung R_{ct}
- Bemessungs-Genauigkeitsgrenzfaktor ALF
- Bemessungsleistung S_n

Die im fehlerfreien Betrieb zur Messung bzw. meist auch für das stationäre Übertragungsverhalten ausreichenden Wandlerdaten müssen für ein korrektes, transientes Verhalten ggf. überdimensioniert werden. D. h., die zuvor aufgelisteten Faktoren können vom Wandler-

hersteller soweit angepasst werden, bis die erforderlichen Kriterien erfüllt sind.

Weitere Möglichkeiten zur Wandler-Dimensionierung nach EN 61869 sind Wandler mit reduzierter Remanenz und Festlegung von E_K mit Klassen PX oder PXR. Oder es wird das transiente Übertragungsverhalten mit Wandler-Klassen TPX, TPY, TPZ definiert.

Die Überdimensionierung birgt folgende Nachteile bzw. Herausforderungen:

- Mehrkosten
- abweichende Spezifikation von existierenden Betreiber-Standards
- Größere Bauformen und in Folge Platzprobleme in standardisierten Gehäusen bzw. Anlagen

STATIONÄRES VERHALTEN

In der Praxis wurde bei der Dimensionierung lange Zeit nur der Betriebs-Genauigkeitsgrenzfaktor ALF' ermittelt und mit dem aus der Schutz- bzw. Kurzschlussberechnung ermittelten Sollwert verglichen – **G1.1**:

$$ALF' = ALF \cdot \frac{R_{ct} + Z_{Bn}}{R_{ct} + Z_{Bb}}$$

$$\rightarrow ALF' = ALF \cdot \frac{R_{ct} + R_{Bn}}{R_{ct} + R_{Bb}}$$

ALF – Bemessungs-Genauigkeitsgrenzfaktor
 ALF' – tatsächlicher Genauigkeitsgrenzfaktor bei Betriebsbürde ALF'

Z_{ct}, R_{ct} – Innenwiderstand der Sekundärwicklung

Z_{Bn}, R_{Bn} – Bemessungsbürde

Z_{Bb}, R_{Bb} – angeschlossene Bürde einschl. Leitungen

Wobei die Ermittlung der Bemessungsbürde aus der Bemessungsleistung erfolgt und bei 1-A-Stromwandlern gleich ist – **G1.2**:

$$Z_{Bn} = R_{Bn} = \frac{S_n}{I_{sn}^2}$$

S_n – Bemessungsleistung

Z_{Bn}, R_{Bn} – Bemessungsbürde

I_{sn} – sekundärer Bemessungsstrom

Laut dem FNN-Leitfaden zum Einsatz von Schutzsystemen in elektrischen Netzen ist es

in der Praxis ausreichend, wenn die ohmschen Anteile der Impedanzen verwendet werden. Es wird darauf hingewiesen, dass Wandler mit geringer Leistung einen verhältnismäßig großen Innenwiderstand haben können [1].

Das Verhältnis K_{SSC} des maximalen Kurzschlussstromes zum Wandlernennstrom wird in Gl.3 berechnet – **G1.3**:

$$K_{SSC} = \frac{I_K''}{I_{pn}}$$

Ein Stromwandler besitzt ein korrektes stationäres Verhalten, wenn die folgende Bedingung erfüllt ist – **G1.4**:

$$ALF' \geq K_{SSC}$$

Die Angaben zum Genauigkeitsgrenzfaktor gelten für den stationären Kurzschlussstrom. Eine Dimensionierung rein nach dieser Methode ist nur für kleine Netzzeitkonstanten empfehlenswert, da das Gleichstromglied des Kurzschlussstromes schnell abklingt und dadurch die Wandler schnell aus der Sättigung kommen. Bei größeren Netzzeitkonstanten ist zusätzlich das transiente Verhalten eines Stromwandlers zu berücksichtigen – siehe nachfolgende Ausführungen. Oft ist auch in diesem Fall für UMZ-Schutzeinrichtungen das stationäre Übertragungsverhalten des Wandlers ausreichend. Bei Differential- und Distanzschutzeinrichtungen ist das transiente Verhalten der Wandler zu beachten [1].

TRANSIENTES VERHALTEN

Wie im Artikel „Dimensionierung“ (ab S.16) bei **G1.12** angeführt, kann der Transientfaktor K_{tf} bei eisengeschlossenen Wandlern P, PX, TPX ohne AWE, einem Verhältnis der Zeitkonstanten von $T_s \gg T_p$ und hohen Pausenzeiten vereinfacht ermittelt werden – **G1.5**:

$$K_{tf} = 1 + \omega \cdot T_p$$

Für ein ausreichendes transientes Verhalten muss der bereits zuvor angeführte Betriebs-Genauigkeits-Grenzfaktor die folgende Bedingung zusätzlich erfüllen – **G1.6**:

$$ALF' \geq K_{SSC} \cdot K_{tf}$$



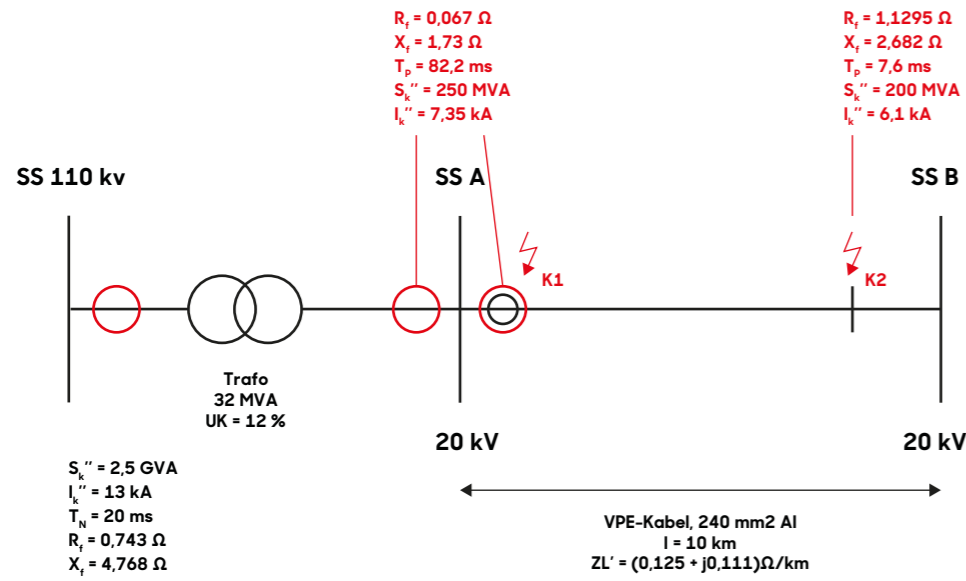


Abb. 1 Stromwandler-Position (roter Kreis) und Netzdaten des Beispiels

BERECHNUNGSBEISPIEL

Im nachfolgenden Beispiel soll die Möglichkeit aufgezeigt werden, durch Überdimensionierung ein korrektes stationäres und transientes Übertragungsverhalten eines Stromwandlers zu erreichen.

Für einen Kabelabgang an SS A wird aufgrund der Lastsituation und dem Standard des Anlagenbetreibers ein Stromwandler 150/1A der Klasse 5P20 mit 15 VA definiert. Aufgabe ist es zu überprüfen, ob dieser für einen 3-poligen Kurzschluss am Kippunkt (= 0,85 * ZL) ausreicht, und ggf. durch Erhöhung von Kennwerten eine Anpassung herbeizuführen.

Die Anlagenkonfiguration und die Werte aus der Netzberechnung sind in **Abb. 1** dargestellt.

Die weiteren erforderlichen Werte sind definiert mit:

- ALF = 20
- R_{ct} = 3,0 Ohm
- R_{Bn} = 15 VA = 15 Ohm bei 1 A sekundär
- R_{Bb} = 1,0 Ohm

Die Überprüfung des stationären Übertragungsverhaltens zeigt eine ausreichende Dimensionierung – **Gl. 7:**

$$ALF' = ALF \cdot \frac{R_{ct} + R_{Bn}}{R_{ct} + R_{Bb}} \geq K_{SSC} = \frac{I_{K''}}{I_{pn}}$$

$$ALF' = 20 \cdot \frac{3,0 \Omega + 15 \Omega}{3,0 \Omega + 1,0 \Omega} \geq K_{SSC} = \frac{6100 \text{ A}}{150 \text{ A}}$$

$$ALF' = 90 \geq K_{SSC} = 40,66 - \text{ausreichend}$$

Die Überprüfung des transienten Übertragungsverhaltens zeigt hingegen eine unzureichende Dimensionierung – **Gl. 8:**

$$ALF' = ALF \cdot \frac{R_{ct} + R_{Bn}}{R_{ct} + R_{Bb}} \geq K_{SSC} \cdot K_{tf} = K_{SSC} \cdot (1 + \omega \cdot T_p)$$

$$ALF' = 20 \cdot \frac{3,0 \Omega + 15 \Omega}{3,0 \Omega + 1,0 \Omega} \geq 40,66 \cdot (1 + \omega \cdot 7,6 \text{ ms})$$

$$ALF' = 90 \geq K_{SSC} \cdot K_{tf} = 137,8 - \text{nicht ausreichend}$$

Es wird nun versucht, durch Erhöhung der Kernleistung und des primären Bemessungsstromes das transiente Übertragungsverhalten zu optimieren – **Gl. 9:**

$$K_{SSC} = \frac{I_{K''}}{I_{pn}} = \frac{6100 \text{ A}}{300 \text{ A}} = 20,33$$

$$ALF' = 20 \cdot \frac{3,0 \Omega + 30 \Omega}{3,0 \Omega + 1,0 \Omega} \geq 20,33 \cdot (1 + \omega \cdot 7,6 \text{ ms})$$

$$ALF' = 165 \geq K_{SSC} \cdot K_{tf} = 68,88 - \text{ausreichend}$$

Der Innenwiderstand der Sekundärwicklung steigt bei höherer Windungszahl auf 5,0 Ohm. Ein weiterer Weg wäre die Erhöhung des Bemessungs-Genauigkeitsgrenzfaktors.

Abb. 2 Kurzschluss- und Sekundärstrom 150/1A 5P20 15VA

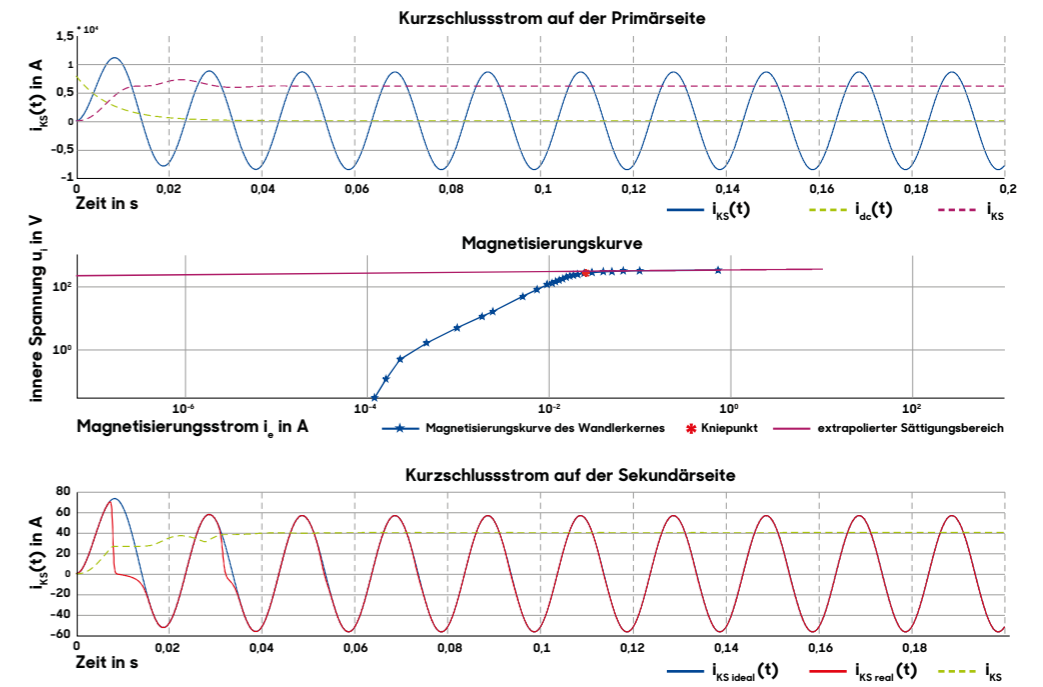
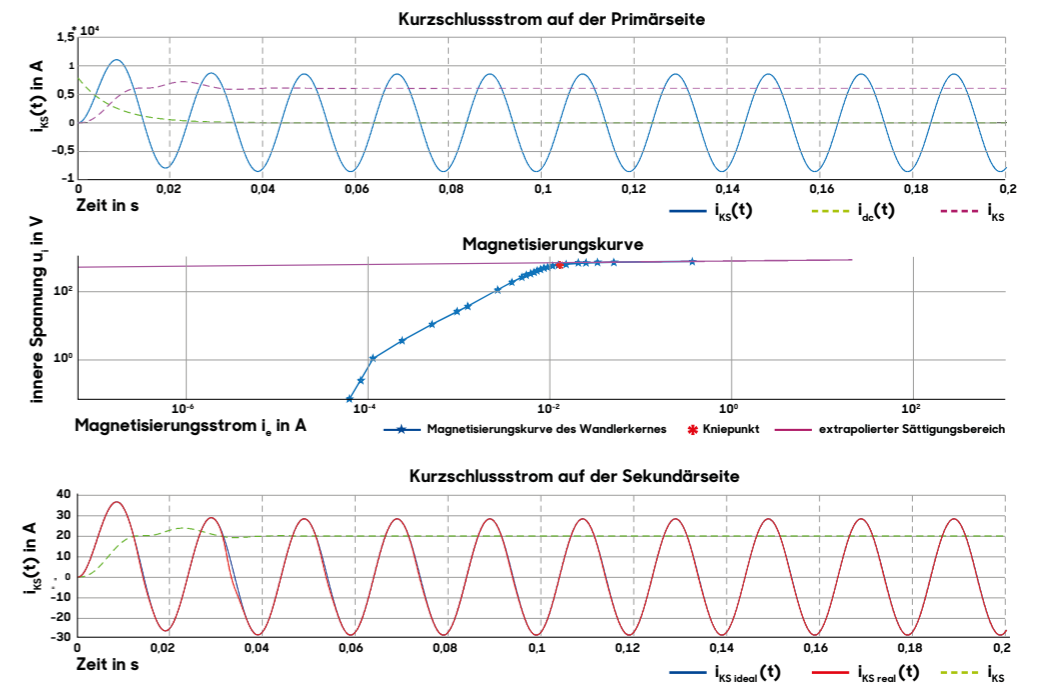


Abb. 3 Kurzschluss- und Sekundärstrom 300/1A 5P20 30VA



Quellen

- 1 VDE/FNN, Leitfadensystem zum Einsatz von Schutzsystemen in elektrischen Netzen, VDE, Berlin 2009
- 2 G. Wurzer, Präsentationsunterlage Strom- und Spannungswandler: Auslegung, Spezifikation und Übertragungsverhalten, Kärnten Netz GmbH, Klagenfurt 2016

ZUSAMMENFASSUNG

Mit den vereinfachten Formeln für den Standardschutzkern der Klasse P und den Ergebnissen einer Netzberechnung kann das stationäre und transiente Übertragungsverhalten relativ rasch überprüft werden. Wenn die Lastbedingungen es zulassen, kann, zusätzlich zur Leistungserhöhung, eine Erhöhung des Nennstromes das notwendige Übertragungsverhalten auch bei einer Remanenz herbeiführen. Eine größere Bauform und höhere Herstellungskosten sind zu berücksichtigen.

ETAPPEN DER INNOVATION

GESCHICHTE DES STROMWANDLERS

Ende des 19. Jahrhunderts sind schon Messwandler bekannt. Um mit empfindlichen Messgeräten größere Spannungen oder Ströme zu messen, benutzte man davor Shunts in Form ohmscher Widerstände.

In den Jahren 1887 bis 1899 fertigte S&H sogenannte Stromzeiger – **Abb. 1**. Das Instrument besteht im Wesentlichen aus einer Spule, in die zwei weiche Eisenstäbchen hineinragen und je nach Größe des Stromes mehr oder weniger hineingezogen werden. Diese Bewegung wird mittels Hebel auf einen Zeiger übertragen, der auf einer Skala den Strom direkt in Ampere anzeigt [1]. Mit diesem direkt messenden Amperemeter können Wechsel- und Gleichströme bis 1800 A gemessen



Abb. 1 Strommesser auf Potenzial, S&H, um 1890

werden. Die Skalengröße von einem Durchmesser von 28 cm ermöglichte auch eine Ablesung bei einer Installation auf Potenzial.

Die ersten Messwandler, auch Messtransformatoren genannt, entstanden in Deutschland um die Wende des 19. Jahrhunderts. Die hauptsächlichen Gründe für die Verwendung von Wandlern in Schaltanlagen waren:

- Fernhaltung der Hochspannung von der Berührung zugänglichen Messgeräten, Zählern und Relais,
- Wandeln von Strömen beliebiger Stärke in eine für die Messung geeignete Größe gleicher Phasenlage und Frequenz,
- Trennung von Warte und Schalttafel bzw. Freiluftanlage.

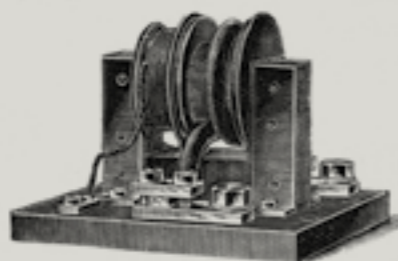


Abb. 2 Stromwandler, AEG, 1898

ERSTE STROMWANDLER

Das erste Stromwandlerpatent stammt aus dem Jahre 1882 [2] und 1898 erfindet *G. Benischke*, AEG, den Stromwandler – **Abb. 2** [3][4]. In seinem Standardwerk *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik* schreibt er: „Die jüngeren Elektrotechniker lernen die Schwierigkeiten, die früher bestanden, und die man durch Meßinstrumenten-Gehäuse aus Isolierstoff nebst isolierender Befestigung derselben, durch isolierte Aufstellung der ganzen Schalttafel samt Bedienungsgang, durch Schutzfenster usw. zu überwinden suchte, gar nicht mehr kennen. Die Schwierigkeiten waren so groß, daß eine Anwendung von mehr als 10000 V. im praktischen Betriebe unmöglich war. Das wurde erst anders durch die Erfindung der Stromwandler vom Verfasser im Jahre 1898 (ETZ, 1899, S. 86).“

Abb. 3 zeigt links einen der ersten Wandler, die für Betriebsspannungen bis 7500 V bestimmt waren. Dass Stromwandler-Sekundärwicklungen stets geschlossen sein müssen, war damals noch nicht bekannt. Es wurde erwähnt, dass mit einem Messgerät in mehreren Leitungen ohne hochspan-

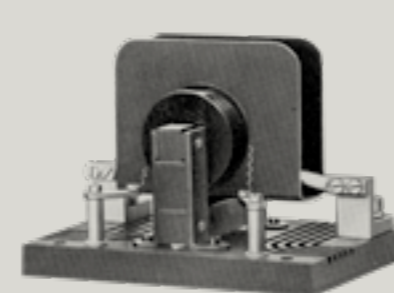


Abb. 3 Stromwandler Typ A und Spannungswandler, AEG, 1899

nungsseitige Umschaltungen gemessen werden kann, wenn nur jeder dieser Leitungen die Primärwicklung eines Stromwandlers eingeschaltet wird, an deren Sekundärwicklungen das Messgerät mit einem einfachen Umschalter angeschlossen werden kann. Rechts ist ein dreiphasiger Spannungswandler abgebildet. Die drei Hochspannungswicklungen bestehen aus mehreren nebeneinander angeordneten scheibenförmigen Teilspulen. Die Spannungswandler werden so bewickelt, dass die Sekundärspannung immer rund 125 V beträgt. [5]

Zur Isolierung wurde Luft sowie Stabilit und Kunstglimmer benutzt. Etwa 1906 baute man die Stromwandler schon als Topfwandler mit Öl- oder Massefüllung – **Abb. 4**.

F. Schrottko, S & H, konstruierte 1900 den Stromtransformator Modell N51. Der aus Blechen zusammengesetzte Eisenkern hat die Form eines Rechteckes und trägt auf seinen Schenkeln die aus vielen Windungen bestehende Sekundärspule, darüber die wenigen Windungen der Primärseite. Er wurde für Primärströme bis 1000 A und Spannung bis 3000 V gebaut.



Abb. 4 Masseisolierter umschaltbarer Stromwandler, 1908

1900 erhält *G. Dietze* in Meran, Südtirol, sein Patent „Gerät zum Anzeigen und Messen pulsierender oder wechselnder magnetischer Felder“, DRP 117605, und entwickelt 1902 den tragbaren Einleiterstromwandler in Zangenform, den Dietze-Anleger [6] – **Abb. 5**.

Wandler für Hochspannungsanlagen wurden – wie bei Leistungstransformatoren schon üblich – mit Ölisololation versehen. **Abb. 6** zeigt, dass die beiden Anschlüsse der drei Primärwicklungen zunächst mit getrennten Isolatoren durch den Ölkessel geführt wurden.

Solche Wandler hielten bereits Spannungen bis 30 kV aus. Recht bald wur-

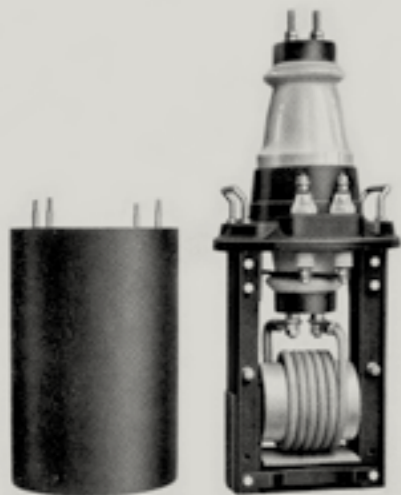
de die Bedeutung der Hochspannungsmesswandler erkannt, und die Anforderungen an Genauigkeit, Prüfspannung und Leistung führten bereits 1907 bei AEG zu einer Stromwandlerbauform, dem sogenannten Universalwandler – **Abb. 7**, mit einem Stromfehler von nur noch 1 % bei einer Leistung von 45 VA. Als Isolation diente Transformatoröl. Die ursprüngliche Betriebsspannung 33 kV wurde bald durch Vergrößerung der Abmessungen auf 44 und 77 kV gebracht.

Für Spannungen bis 10 kV wurde die Ölfüllung 1908 durch eine Vergussmasse ersetzt, die im geschmolzenen Zustand unter Vakuum eingefüllt wurde. Sie hatte den Vorteil, dass die Wicklungen ohne besondere Maßnahmen



← Abb. 5 Strommessung mit Dietze-Anleger

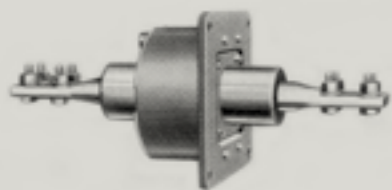
→ Abb. 6 Ölisolierter Stromwandler, AEG, 1906



↑ Abb. 7 Universalwandler, AEG, 1907



← Abb. 8 Umschaltbarer Stromwandler Form PF, AEG



↖ Abb. 9 10-kV-Stabstromwandler mit Hartpapierisolation, AEG

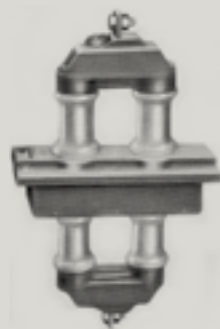


Abb. 10 Schleifenstromwandler DS, AEG

gut gegen Verschiebung durch die dynamischen Wirkungen von Kurzschlussströmen gesichert waren – **Abb. 8**.

Die Isoliermasse wurde später mit Quarzsand versetzt, um ihre Wärmeleitfähigkeit zu vergrößern. Für Einleiter-Durchführungsstromwandler wurde Hartpapierisolation unmittelbar auf den Kupferbolzen gewickelt – **Abb. 9**, später wurde bei Stromstärken über 500 A Porzellanisolation verwendet.

Eine wesentliche Verbesserung der Leistung und der Kurzschlussfestigkeit brachte die Gegenmagnetisierung für den Stromwandlerbau der AEG (*Vahl*, DRP 528349 von 1925). Die Kernleistung stieg durch diese Kunstschtaltung auf etwa das Zwei- bis Dreifache und es gelang, die hinsichtlich ihrer Kurzschlussfestigkeit unübertrefflichen Einleiterwandler für wesentlich kleinere Nennströme, als dies vorher möglich war, brauchbar zu machen. Durch Anwendung des gleichen Prinzips bei den Doppeldurchführungswandlern (Schleifenstromwandlern) – **Abb. 10** – gelang es, auch für noch kleinere Primärströme Wandler sehr hoher Kurzschlussfestigkeit zu schaffen.

Im Jahre 1911 entstand bei der AEG der erste 110-kV-Stromwandler als Topfwandler – **Abb. 11**, allerdings wieder mit Öl gefüllt.

Um einen wirksamen Schutz gegen eine Wanderwelle zu erreichen, beginnt 1916 eine Diskussion über den Einsatz von ohmschen Parallelwiderständen

an den Primäranschlüssen von Stromwandlern als Überspannungsschutz [7], und um 1925 wird dies fast immer realisiert.

1919 entwickelt *F. J. Fischer*, Koch & Sterzel, Pat.-Nr. 325 495 – **Abb. 12**, das Funktionsprinzip „Querloch“. Die mit reiner Porzellanisolation versehenen Querlochwandler wurden für Nennströme von 5 bis 800 A und für Spannungen bis etwa 30 kV sowohl als Stützerstromwandler – **Abb. 13** – als auch als Durchführungsstromwandler – **Abb. 14** – gebaut. [8]

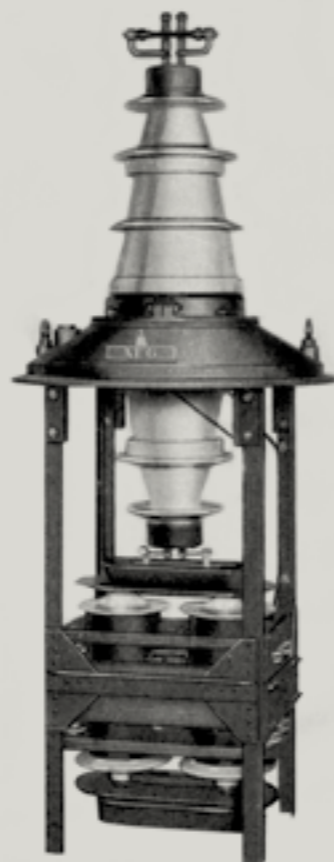


Abb. 11 110-kV-Topfstromwandler, AEG, 1911

Bei Durchführungs- und Querlochwandlern benutzte man mehrere Kerne mit Sekundärwicklungen zusammen mit einer gemeinsamen Primärwicklung und trennte Mess- und Relaisstromkreise, die ja ganz verschiedenen Bedingungen genügen müssen. Das Sortiment Stromwandler von H&B aus dem Jahre 1921 zeigen die Bilder in **Abb. 15**. [9]

Einen Stromwandler der Siemens Schuckert Werke aus dem Jahre 1925 zeigt **Abb. 16**. Die technischen Daten lauten: 20/64 kV, 50 Hz, 20/5 A, 0,6 Ω, $n < 10$, Kl. 0,5. 1929 entwickelt S. Z. de *Ferranti* zur Erfassung des Erdschlussstromes den nach ihm benannten Ferranti-Wandler – **Abb. 17**, auch Ersatzstromwandler oder heute Kabelumbauwandler genannt. [10].

Die Isolation der Hochspannungswicklung der Mittelspannungswandler 6 bis 30 kV aus Öl bzw. Compoundmasse in Verbindung mit Papier führte bei den wachsenden Kurzschlussleistungen der Anlagen und den dadurch hervorgerufenen Zerstörungen solcher Stromwandler, die für die großen

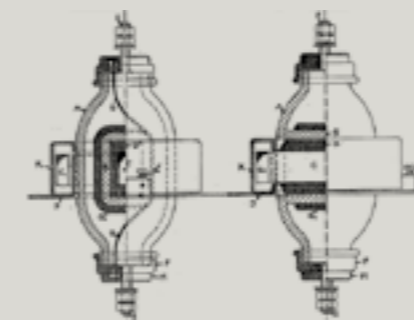


Abb. 12 Querloch-Durchführungswandler, Koch & Sterzel, 1919

Kurzschlussströme nicht ausgelegt waren, zu unangenehmen Begleiterscheinungen in Form von Brand und Verrußen. Daraus ergab sich die Notwendigkeit, trockenisierte Wandler zu schaffen. Als idealer Isolierstoff für Trockenstromwandler wurde das Porzellan erkannt, das nur den einen Nachteil hat, dass zur Herstellung sehr hohe Temperaturen erforderlich sind. Der gesamte Isolierkörper musste also vor dem Aufbringen der Wicklungen usw. vollkommen fertiggestellt werden. Die Entwicklung führte bei der AEG dazu, dass ein U-förmiges Porzellanrohr – **Abb. 18** – als Isolator für die Primärwicklung verwendet wurde.

Die nachträgliche Einbringung der Wicklung in einen fertigen Isolierkörper ist aber immer mit gewissen Schwierigkeiten verbunden. Es wurde daher nach Konstruktionen mit mehrteiligen Porzellankörpern gesucht. Mit dem zweiteiligen Porzellankörper wurde von der AEG 1937 mit dem AL 10 eine brauchbare Verbindungsart ohne zusätzlichen Raumbedarf und ohne Vergussmassen – **Abb. 19** – gefunden.



Abb. 13 Querloch-Stützerstromwandler, Koch & Sterzel, 1919

ANFORDERUNGEN AN STROMWANDLER

Um 1907 kamen 1%-Wandler und um 1912 sogar schon 0,5%-Wandler auf den Markt, allerdings mit recht erheblichem Materialaufwand. 1915 erließ die PTR ihre „Bestimmungen für die Beglaubigung von Meßwandlern“, in denen sogenannte Beglaubigungsfehlergrenzen für die Übersetzungsfehler und Fehlwinkel bereits auf $\pm 0,5\%$ bzw. ± 40 oder ± 20 min festgelegt wurden. Die VDE-Kommission für Messinstrumente legte 1921 „Regeln für die Bewertung und Prüfung von Meßwandlern“ vor. Hierin wird u. a. festgelegt:

- Die sekundäre Nennstromstärke beträgt in der Regel 5 A; bei großer Leitungslänge im Sekundärkreis ist vorzugsweise 1 A zu wählen.
- Die Anschlüsse sind gleichsinnig zu bezeichnen. Stromwandlerwicklungen primär L_1-L_2 , sekundär l_1-l_2 . In der 1938 herausgegebenen VDE 0570 wird K-L, k-l festgelegt. [11]

Um eine merkbare Einbauregel zu schaffen, wurde in der Praxis oftmals zur Sammelschiene K (wie Kraftwerk)

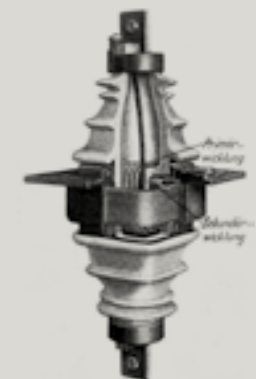


Abb. 14 Querloch-Durchführungswandler, Koch & Sterzel

und zum Abgang L (wie Leitung) verwandt. In der IEC wurde P1-P2 für die Primär- und S1-S2 für die Sekundärwicklung eingeführt.

In den 20er Jahren ist in den deutschen amtlichen Beglaubigungsvorschriften angeführt: „Die Nennbürde eines Stromwandlers muß mindestens 0,6 Ω bei einer sekundären Nennstromstärke 5 Amp. sein. Für Stromstärken vom Nennwert bis zu dessen fünften Teil darf der Stromfehler $\pm 0,5\%$, der Fehlwinkel ± 40 Minuten nicht überschreiten. Für Stromstärken unter $\frac{1}{5}$ bis $\frac{1}{10}$

des Nennwertes darf der Stromfehler $\pm 1\%$, der Fehlwinkel ± 60 Minuten nicht überschreiten.“ [12]

Die „Regeln für die Bewertung und Prüfung von Meßwandlern“ des VDE von 1922 fordern bei Stromwandlern mit Klasse H, dass bei Bürden zwischen null und Nennbürde und einem sekundären Leistungsfaktor von 1,0 der Stromfehler bei primärseitigem Nennstrom den Betrag von $\pm 5\%$ nicht überschreiten, vom 10-fachen Nennstrom ab soll der Sekundärstrom gegenüber dem aus der Übersetzung er-

rechneten stark abfallen. Dagegen darf der Stromfehler zusätzlich bei 40-fachen Nennstrom $\pm 10\%$ nicht überschreiten. Die Begriffe „Überstromziffer“ und „Nennüberstromziffer“ wurden zum ersten Mal in den VDE-Wandlerregeln von 1932 gebraucht. Aus der Überstromkennziffer n wurde dann der Bemessungs-Genauigkeits-Grenzfaktor K_r und jetzt Genauigkeitsgrenzfaktor ALF (Accuracy Limit Factor).

Bürde und Nennbürde waren dagegen schon in den VDE-Wandlerregeln von 1922 enthalten. Sie wurden in Anleh-

Abb. 15 Sortiment Stromwandler, H&B, 1921 [9]

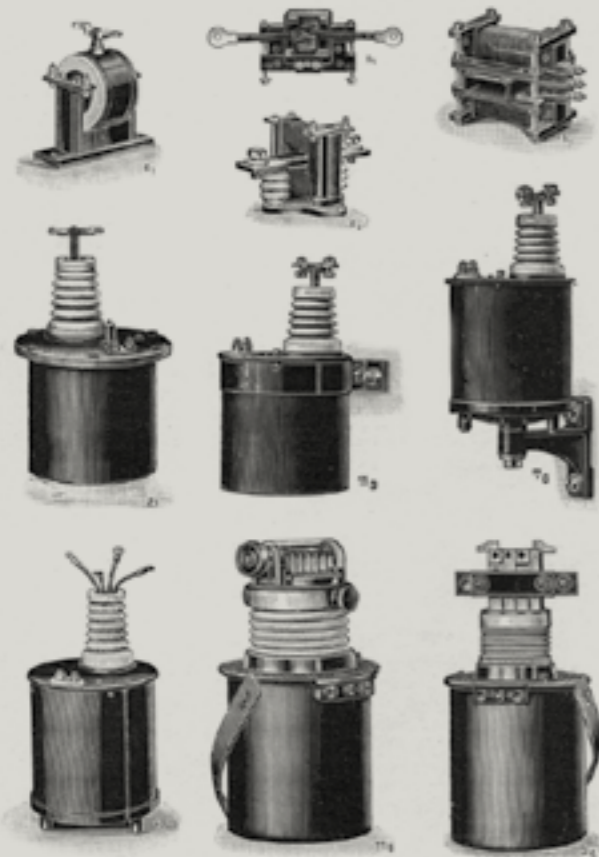


Abb. 16 Stromwandler A20P1, SSW, 1925



Abb. 18 ↘ U-Rohr-Stromwandler, AEG, AP 10 und AP 20, 1937

Abb. 17 Ferranti-Wandler

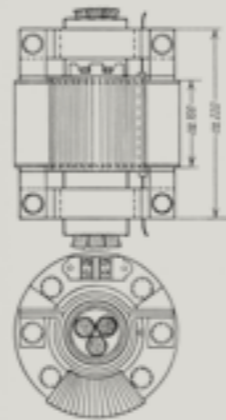
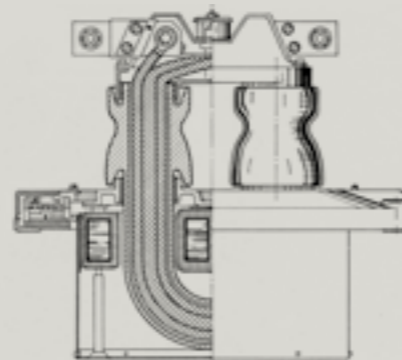


Abb. 18. Eisenker



nung an einen amerikanischen Ausdruck gewählt. [13] Für den durch unterschiedliches Wandlerverhalten und ungleiche Bürde entstehenden Nullstrom prägte man 1927 den Begriff „Falschstrom“. [6]

Im Jahre 1909 verfasste G. Keinath die erste Doktorarbeit auf dem Gebiet der Messwandler. [6] In den 50er Jahren wurden nach einer Absprache mit den Herstellern Wandler der Reihen 10 bis 30 innerhalb einer Spannungsreihe mit gleichen Anschluss- und Befestigungsmaßen ausgestattet. [14]

FERTIGUNG VON GIESSHARZ-WANDLERN FÜR DIE MITTEL-SPANNUNG

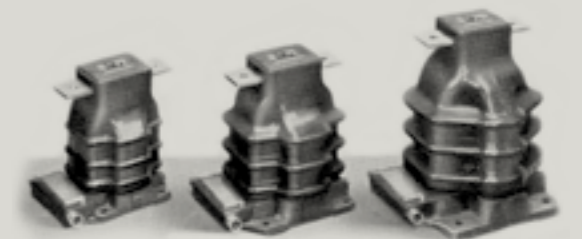
Nachdem in den Kriegs- und Nachkriegsjahren die Entwicklungsarbeiten zum Stillstand gekommen waren, wurde 1953 bei AEG mit Hilfe neuer synthetischer Isolierstoffe, dem sogenannten Gießharz auf Äthoxylinbasis, ein- und zweipolige Spannungswandler bis Reihe 30 geschaffen. Die Gießharzisolierung wurde auch für Stromwandler bald angewandt – Abb. 20.

Der Vorteil der Gießharzausführung gegenüber der bewährten Porzellanausführung liegt hauptsächlich darin, dass sich infolge der hohen mechanischen Festigkeit des Harzes ein höherer dynamischer Grenzstrom ergibt. Dies war deshalb so wertvoll, weil die durch neue Schutzrelais ermöglichten kurzen Fehlerklärungszeiten die thermische Beanspruchung gegenüber der dynamischen etwas zurücktreten lassen. [5] 1947 fertigte Pfiffner erste kunstharzvergossene Wandler. [15]

Abb. 19 10-kV-Stromwandler AL 10, AEG, 1937



Abb. 20 Gießharzisierte Stromwandler, AEG



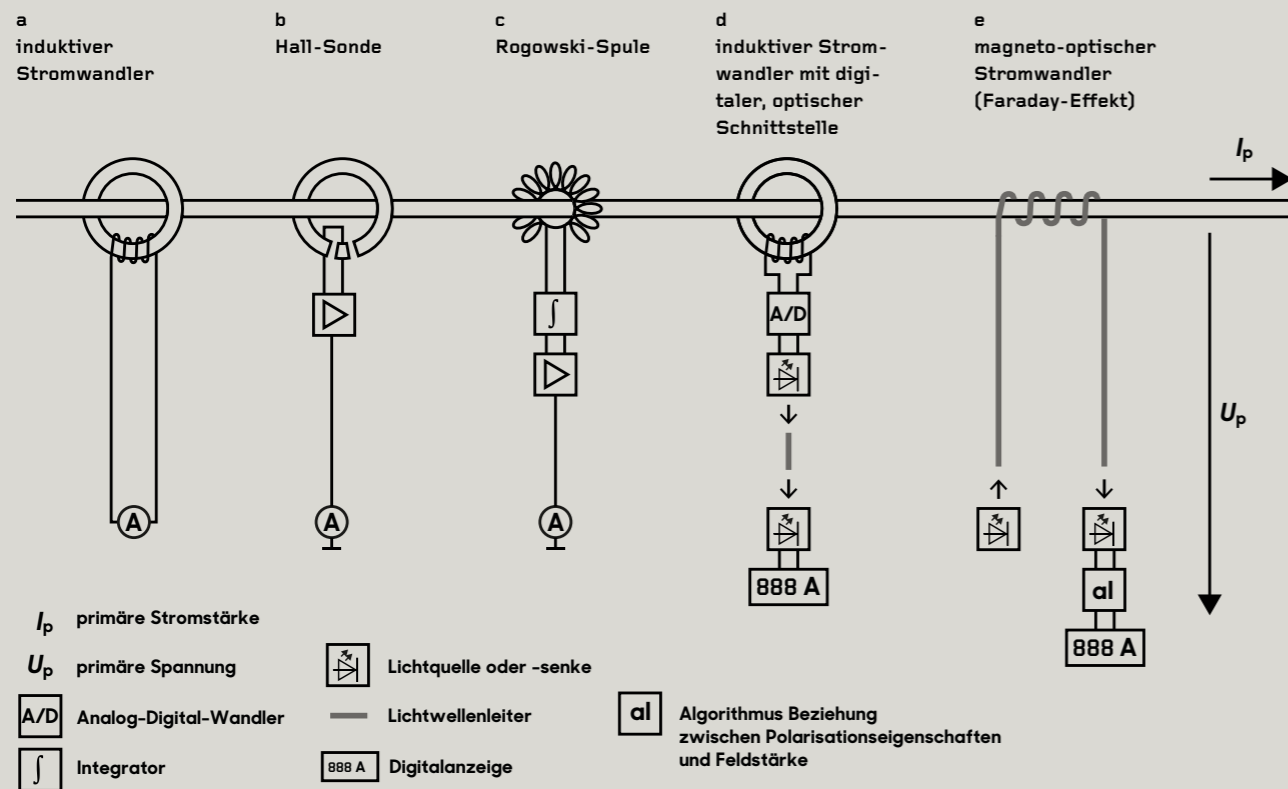
NICHTKONVENTIONELLE STROM- UND SPANNUNGSWANDLER

In Abb. 21 sind die Messprinzipien konventioneller und nichtkonventioneller Stromwandler [16] zusammengestellt. Abb. 21a zeigt den konventionellen induktive Stromwandler, wie er auch heute noch als Standardlösung in 50- bzw. 60-Hz-Elektroenergieübertragungs- und Verteilungsanlagen sowie 16% Bahnanlagen gilt. Ein Messprinzip, welches auch die Gleichstrommessung gestattet, benutzt den Hall-Effekt – Abb. 21b. Auch hier wird die magnetische Flussdichte um den stromdurchflossenen Primärleiter analog dem konventionellen Wandler in einem Ringkern konzentriert, aber dieser weist einen Luftspalt auf. In dem darin angeordneten Hallsensor übt ein Magnetfeld auf die Ladungsträger eine Kraft aus und erzeugt eine ihm proportionale Spannung, die wiederum einen entsprechenden Sekundärstrom treibt. Der Arbeitsbereich reicht von 0 Hz bis einige kHz. Insbesondere zur Überwachung schneller Vorgänge bei

Schalthandlungen oder Störungen eignen sich Spulen ohne Eisenkern, wie z. B. die Rogowski-Spule, Abb. 21c – nach einer Erfindung von Rogowski und Steinhaus im Jahre 1912. Hier wird die Sekundärwicklung unbelastet betrieben.

Der große Spannungsunterschied zwischen Primär- und Sekundärseite erforderte eine hohe und teurere Isolation. Daher lag es nahe, einen Niederspannungswandler auf Hochspannungspotenzial zu installieren und den Sekundärwert auf nicht elektrischem Wege zum Erdpotenzial zu übertragen. Das analoge Ausgangssignal eines konventionellen Stromwandlers wird digitalisiert und dann über einen Lichtwellenleiter (LWL) zum Erdpotenzial gebracht, dekodiert und dann digital oder analog angezeigt – Abb. 21d. Anstelle des Stromwandlers können auch Stromsensoren verwendet werden. Die auf Hochspannungspotenzial befindlichen A/D-Wandler benötigen eine auch bei Netzfehlern vorhandene Hilf-

Abb. 21 Messprinzipien konventioneller und nichtkonventioneller Stromwandler



senergie. Es handelt sich also um sogenannte aktive Wandler. In der ersten Entwicklungsphase wurden hierzu kleine Strom- und Spannungswandler auf Hochspannungspotenzial vorgesehen. Der geringer werdende Energiebedarf der elektronischen Bauteile ermöglichte es, die Hilfsenergie auf optischem Wege über LWL vom Erdpotential auf das Hochspannungspotenzial zu leiten. Die nicht mehr elektrische, sondern optische Übertragung der Messwerte führte zu der Überlegung, die Information selbst auf optischem Wege zu gewinnen. Beim magneto-optischen Messprinzip – **Abb. 21e** – dient der LWL nicht nur als Übertragungsmedium, sondern auch

als Stromsensor. Beim Faraday-Effekt erfährt die Polarisationssebene durch ein Magnetfeld in Ausbreitungsrichtung der Lichtwelle eine Drehung. Aus der vom Magnetfeld abhängigen Lageänderung der Polarisationssebenen von Aus- und Eingang kann die Primärstromstärke ermittelt werden. Die Vorstellung des magneto-optischen Stromwandlers mit Faradaysensor erfolgte 1966. [17][18]

Bereits im Jahre 1956 wurde aus der UdSSR und 1962 aus den USA über den Einsatz magneto-optischer Verfahren bei der Strommessung in Hochspannungsanlagen berichtet. Der erste Prototyp eines unkonventionellen Strom-

wandlers für Freiluftanlagen war jedoch im Jahre 1965 ein Gerät mit Pulsfrequenzmodulation und Lichtimpulsübertragung, der Traser. [18] Die ersten aktiven Stromwandler wurden bereits in den 60er Jahren entwickelt. Bei diesem Prinzip ist der Messwertempfänger ein gewöhnlicher Stromwandlerkern mit verminderter Isolation. Das Messsignal wird in ein optisches Signal überführt und über einen Lichtwellenleiter an die Auswerteeinheit übertragen. [19]

Die ersten aktiven Stromwandler wurden bereits in den sechziger und siebziger Jahren entwickelt. Beim „Traser“-Wandler – **Abb. 22** – wird als

Messwertempfänger ein gewöhnlicher Stromwandlerkern mit verringerter Isolation verwendet. Das Wandlersignal wird in ein optisches Signal umgewandelt (E/O-Wandlung) und von einem Lichtwellenleiter bzw. einem Faserbündel an die Auswerteeinheit übertragen, wo das Signal in ein elektrisches Signal umgewandelt wird (O/E-Wandlung). Die Sendeelektronik wird sowohl mit elektrischer Energie durch die Hochspannung als auch durch den zu messenden Strom selbst gespeist, damit eine sichere Funktion auch in Schwachlastzeiten oder bei Störfällen gewährleistet ist. [20]

Die Fortschritte bei der Herstellung von Lichtleitern ermöglichten auf einfache Weise eine Messbereichsanpassung an nahezu beliebige Nennströme. Dazu wird der Lichtwellenleiter mehrmals um den stromführenden Hauptleiter gewunden, wobei eine Empfindlichkeitsanpassung über die Windungszahl erreicht wird. Der erste Prototyp eines faseroptischen Stromwandlers wurde 1979 in der Fawley-Station eingesetzt. Mit diesem System wurden Ströme von 10 A bis 14 kA bei einer Messabweichung von 2 % registriert. [20]

Lesen Sie mehr Details zur Geschichte des Stromwandlers auf unserer Website: www.netzschutz-magazin.com

Quellen

- 1 Katalog der Erzeugnisse der Firmen Siemens & Halske und Siemens-Schuckertwerke im Deutschen Museum zu München, Berlin 1906
- 2 W. Hermsstein, Entwicklungstendenzen im Wandlerbau. In: Elektrizitätswirtschaft 68/1969, S. 246–257

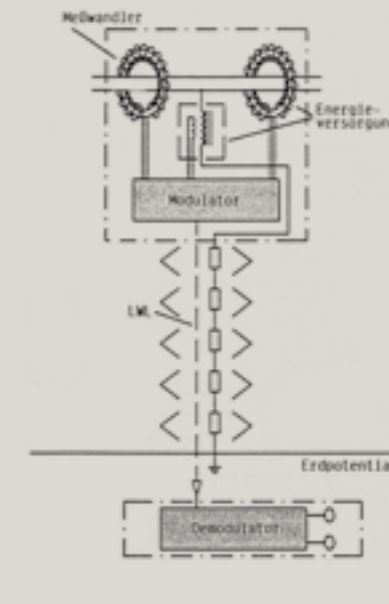


Abb. 22 Traser-Stromwandler

Walter Schossig,

geb. 1941, Autor des Buches „Netzschuttechnik“ und der History-Serie in der PAC World. Als Absolvent der Ingenieurschule Elektroenergie Zittau arbeitete er über 40 Jahre als Elektroingenieur, von 1967 an war er bei der Thüringer Energie AG, Erfurt, für Relaischutz verantwortlich. Mitarbeit im VDEW-AA „Relais- und Schutztechnik“, im Normenausschuss DKE K434 „Messrelais und Schutz-einrichtungen“ und im Bayernwerk-AK „Schutz-einrichtungen“. Bis heute aktiv im VDE AK.

- 3 A. Imhof, 100 Jahre Messwandler. In: Bull. ASE/UCS 70/1979, S. 228–236
- 4 G. Benischke, Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik, Berlin 1918
- 5 B. Schweder, Forschen und Schaffen. Beiträge der AEG zur Entwicklung der Elektrotechnik bis zum Wiederaufbau nach dem zweiten Weltkrieg, Band 1–3, Hrsg. AEG, Berlin 1965
- 6 M. Walter, Strom- und Spannungswandler, München und Berlin 1937
- 7 E. Wirtz, Überspannungsschutz bei Stromwandlern. In: ETZ 37/1916, S. 69–70
- 8 Buchhold/Happoldt: Elektrische Kraftwerke und Netze, 3. Auflage 1956
- 9 Preisliste Schalttafel-Meßgeräte, 11. Teil, Tl. Stromwandler, Te, Td, Ts, Spannungswandler, Hartmann & Braun A.-O., Frankfurt am Main 1921
- 10 R. Rüdtenberg, Relais und Schutzschaltungen in elektrischen Kraftwerken und Netzen, Berlin 1929
- 11 Regeln für Klemmenbezeichnungen. In: ETZ 60/1939, S. 511–512
- 12 I. Goldstein, Die Meßwandler – ihre Theorie und Praxis, Berlin 1928

- 13 M. Walter, Die Entwicklung der Strom- und Spannungswandler (Messwandler). In: Elektrizitätswirtschaft 65/1966, S. 710–717
- 14 H. Krauß, Beiträge des Meßwandlerbaus zur Vereinheitlichung der Schaltanlagen. In: AEG-Mitteilungen 49/1959
- 15 Meilensteine, PFIFFNER Messwandler AG
- 16 H. Seifert; H.-G. Latzel; A. Braun, Nichtkonventionelle Strom- und Spannungswandler. In: PTB-Mitteilungen 112/2002, S. 44–50, September 2002, S. 3–7, Sonderdruck aus H. 1 und 3
- 17 A. Braun, 30 Jahre unkonventionelle Messwandler: 1965 bis 1995. In: PTB-Mitteilungen 106/1996, S. 193–199
- 18 E. Marx, Hochspannungs-Praktikum, Berlin 1941
- 19 G. Balzer, Aufgaben und Entwicklung der Schutztechnik. In: Schutztechnik – heute und morgen, S. 9–30, VDE-Bezirksverein Frankfurt am Main, Arbeitsgemeinschaft vom 4.11. bis 25.11.1996
- 20 B. Gimber; H. Kunz; H. Hirsch, Nichtkonventionelle Wandler, Schlüsselkomponenten für die digitale Stationsleittechnik. In: Elektrizitätswirtschaft 90/1991, S. 250–254



SENSORTECHNIK

Advertorial

Michael Steiner,
geb. 1969, Leiter Technik und Vertrieb bei Dr. tech. J. Zelisko GmbH. Zelisko existiert seit 1918 und ist u. a. Hersteller für Mittelspannungsmesswandler mit Sitz in Mödling/Österreich. Zelisko gehört zur Knorr-Bremse Gruppe mit ca. 28.000 Mitarbeitern und rund 6 Mrd. Euro Umsatz. Weitere Informationen: www.zelisko.at

Co-Autor:
Bruno Herzog,
Siemens Schweiz

MS-Schaltanlage bei IBC Chur © Zelisko GmbH

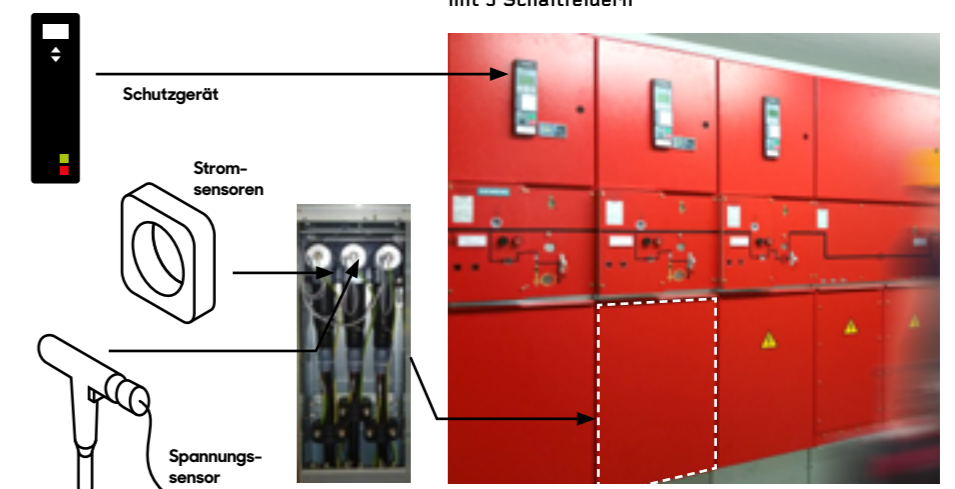
Zur weiteren Erhöhung der Versorgungssicherheit und zur Vorbereitung auf künftige Herausforderungen wie der Elektromobilität oder dem Nachweis der Spannungsqualität auf der Mittelspannungsseite setzt der Schweizer Energieversorger IBC auf fernsteuerbare Netzstationen und die Sensortechnik von Zelisko.

Ziele der Netzmodernisierung bei IBC Energie Wasser Chur in Graubünden/Schweiz sind die weitere Erhöhung der Versorgungszuverlässigkeit durch die Fernsteuerbarkeit von Trafostationen aus der Netzleitstelle sowie die genaue Messung von Strom und Spannung in den Netzstationen zur Netzüberwachung und Lastflusssteuerung. IBC wurde 1896 gegründet und versorgt seine Kunden mit Strom, Erdgas und Wasser. Die Versorgung des 10-kV-Mittelspannungs (MS)-Netzes mit isoliertem Sternpunkt erfolgt über 4 Unterwerke und ca. 200 Ortsnetzstationen.

IBC-STRATEGIE

IBC entschied vor einigen Jahren, neue und zu modernisierende Trafostationen mit den gasisolierten Siemens-MS-Schaltanlagen (**Abb. 1**) auszurüsten. Dabei kommen Vakuum-Leistungsschalter, digitale Schutzgeräte für den gerichteten Überstrom-Zeit-Schutz und Zelisko-Strom (I)- und Spannungs (U)-Sensoren zum Einsatz.

Abb. 1 Mittelspannungs-Schaltanlage mit 5 Schaltfeldern



Wesentliche Vorteile sind:

- niedrigere Ausfallzeiten durch schnelle Fehlererkennung / Umschaltungen
- geringer Platzbedarf
- einfache Sensor-Nachrüstung in Altstationen
- Kabelprüfung mit DC oder VLF ohne Demontage der U-Sensoren
- kein Kippschwingungsrisiko / keine Dämpfungswiderstände
- keine Kalibrierung des Systems Schutz-/Sensor vor Ort
- Kosteneinsparung im Vergleich zu konventionellen MS-Wandlern

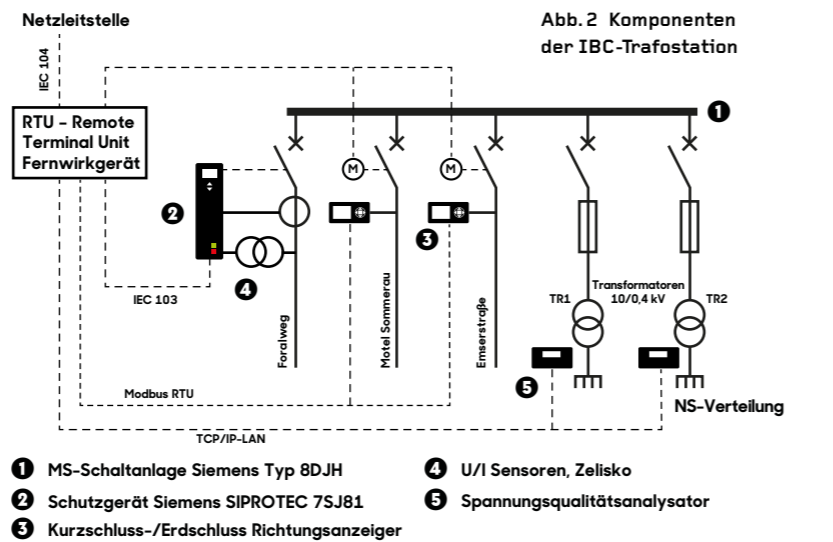
Am Beispiel der Trafostation zeigt die schematische Darstellung in **Abb. 2** die wesentlichen Komponenten der Netzstation mit der fernsteuerbaren MS-Schaltanlage, den beiden Verteiltransformatoren, die NS-Verteilung sowie die notwendigen Komponenten zur Steuerung der Trafostation, zur Erfassung der Messwerte und zur Kommunikation mit der zentralen Leitstelle. Die I-Sensoren für die einzelnen Phasenströme und zur Erdschlusserfassung sind im Durchführungsbereich der MS-Schaltanlage untergebracht, wie **Abb. 3** zeigt. Die U-Sensoren werden im Kabel-T-Stecker anstelle des Schraubkonus-Einsatzes montiert.

Das Überstrom-Zeit-Schutzgerät und die Kurzschluss-/Erdschluss-Anzeiger detektieren die Kurzschluss- und Erdschlussströme richtungsgenau und lösen damit die notwendigen Schalthandlungen aus. Über diese Geräte werden auch die normalen Betriebsdaten ($I/U/\cos\phi/\dots$) erfasst. Die Kommunikation innerhalb der Station zur RTU und von der RTU zur Leitstelle erfolgt mit unterschiedlichen Protokollen wie z.B. Modbus RTU oder IEC 60870-5-104.

IBC hat in den letzten drei Jahren ca. 20 fernsteuerbare Stationen mit rund 40 Schutzgeräten in Betrieb genommen. Auch eine Reihe anderer Schweizer Energieversorger hat das IBC-Konzept gewählt und erfolgreich im Einsatz.

STROM- UND SPANNUNGSENSOREN SIND KLEINSIGNAL-MESSWANDLER

Die Zelisko-U/I-Sensoren sind passive Sensoren, welche keine Hilfsspannung benötigen. Sie sind kompatibel mit unterschiedlichen Geräten ver-



- 1 MS-Schaltanlage Siemens Typ 8DJH
- 2 Schutzgerät Siemens SIPROTEC 7SJ81
- 3 Kurzschluss-/Erdschluss Richtungsanzeiger
- 4 U/I Sensoren, Zelisko
- 5 Spannungsqualitätsanalysator

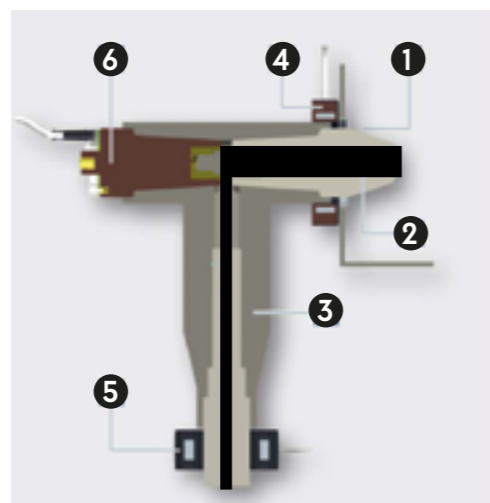


Abb. 3 Anbauorte für die U-/I-Sensoren am Kabel-T-Stecker

- 1 MS-Schaltanlage
- 2 Durchführung
- 3 Kabelanschluss mit T-Stecker
- 4 I-Sensor
- 5 I-Sensor, teilbar
- 6 U-Sensor



- 1 Phasen-Stromsensor SMCS-JW 1001 nicht teilbar
- 2 Phasen-Stromsensor SMCS/T-JW 1002 teilbar für Nachrüstung
- 3 Multifunktions-Stromsensor SMCS3-JW 1004 für Phasen- und Erdschlusserfassung
- 4 Erdschlusserfassungssensor GAE 120/SENS-JW 1003 teilbar mit Di Ø 120 mm
- 5 Freiluft-Kombisensor SMKS-K1114
- 6 Kombisensor für AIS-Schaltanlagen

Abb. 5 Zelisko-Stromsensoren für unterschiedliche Anwendungen

Abb. 4 Funktionsprinzip Stromsensor

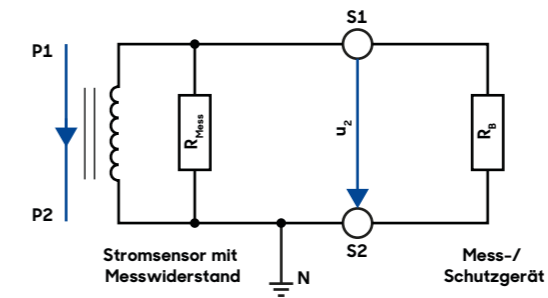
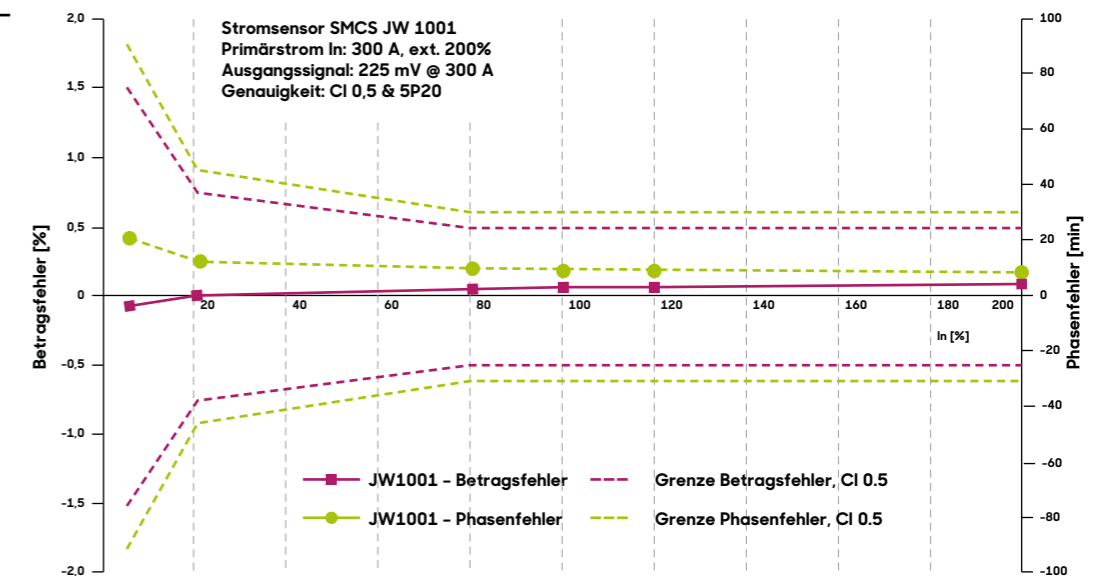


Abb. 6 Zulässige und gemessene Betrags- und Winkelfehler



schiedener Hersteller, wie Messwertumformer, Schutzgeräte und RTUs. Sicherergestellt wird die Kompatibilität durch die Auslegung und Prüfung der U/I-Sensoren nach der internationalen Messwandlernorm IEC60044-7/8 bzw. künftig nach IEC61869-6/10/11. Damit sind zulässige Betrags- und Winkelfehler sowohl im normalen Betriebsbereich als auch im Fehlerfall eindeutig definiert. Gerade die Einhaltung der zulässigen Winkelfehler ist für die Richtungsbestimmung bei Erdschlussfehlern wichtig. Der vorliegende Artikel konzentriert sich auf die Zelisko-Stromsensoren. Die Spannungssensoren als ohmsche Teiler werden in einem späteren NETZSCHUTZ-Magazin näher beschrieben.

FUNKTIONSPRINZIP STROMSENSOR

Der Strom(I)-Sensor ist ein fast leistungsloser induktiver Kleinsignal-Stromwandler, dessen Sekundärwicklung den Primärstrom über einen genauen Messwiderstand in ein Spannungssignal umwandelt, wie in **Abb. 4** gezeigt wird.

Typische-Eckdaten für den Stromsensor sind:

- Standard: IEC 60044-8, künftig IEC61869-6 und -10
- Primärstrom: 300 A, ext. 200%
- Ausgangssignal: 225 mV @ 300 A
- Genauigkeit: Klasse 0,5 & 5P20
- Nennbürde: $\geq 20 \text{ k}\Omega$
- Umgebungsbedingungen: -25°C bis $+70^\circ\text{C}$

Wichtig aus Zelisko-Sicht ist die Genauigkeit und Stabilität der Messwerte über einen weiten Temperaturbereich, auch bei EMV-Belastung und hoher Luftfeuchtigkeit am Einbauort. Durch die Auslegung der Sensoren und einer Reihe spezieller Prüfungen wird eine hohe Zuverlässigkeit gesichert. Die Stromsensoren sind wartungsfrei. Eine aufwendige Kalibrierung vor Ort oder eine Fehlerkompensation über die angeschlossenen Geräte entfällt. Wie normale Messwandler werden alle Sensoren im Werk stückgeprüft und mit einer Seriennummer versehen.

STROMSENSOREN FÜR VIELFÄLTIGE ANFORDERUNGEN

Aufgrund der unterschiedlichen Anwendungsfälle bei gas- und luftisolierten Schaltanlagen hat Zelisko diverse Ausführungen und Geometrien mit kundenspezifischen Ausprägungen entwickelt, wie die Beispiele in **Abb. 5** zeigen.

Stromsensoren 1 bis 4 (**Abb. 5**) im Durchführungsbereich der Schaltanlage bzw. auf dem Kabel sind wie NS-Wandler für das Isolationsniveau 0,72/3 kV ausgelegt. Der dreipolige I-Sensor 3 kann mit zwei oder drei Phasenstromsensoren und einem Summenstromsensor für die empfindliche Erdschlusserfassung ausgeführt werden.

Alle Stromsensoren erfüllen die vereinbarte Klassengenauigkeit nach IEC 60044-8 bzw. IEC61869-6 und 10. **Abb. 6** zeigt die zulässige Fehlertrompete und die gemessenen Fehler für einen typischen Phasen-Stromsensor SM-CS-JW1001 in Messklasse CI 0,5; dieser Sensor erfüllt gleichzeitig die Schutzklasse 5P20.

MESSUNG HOCHFREQUENTER OBERSCHWINGUNGEN

Vor allem der zunehmende Einsatz von Leistungselektronik wie Umrichter und Gleichrichterschaltungen auf der Kundenseite beeinflusst durch Netzrückwirkungen die Qualität der Spannung und des Stroms, z.B. durch Oberschwingungen.

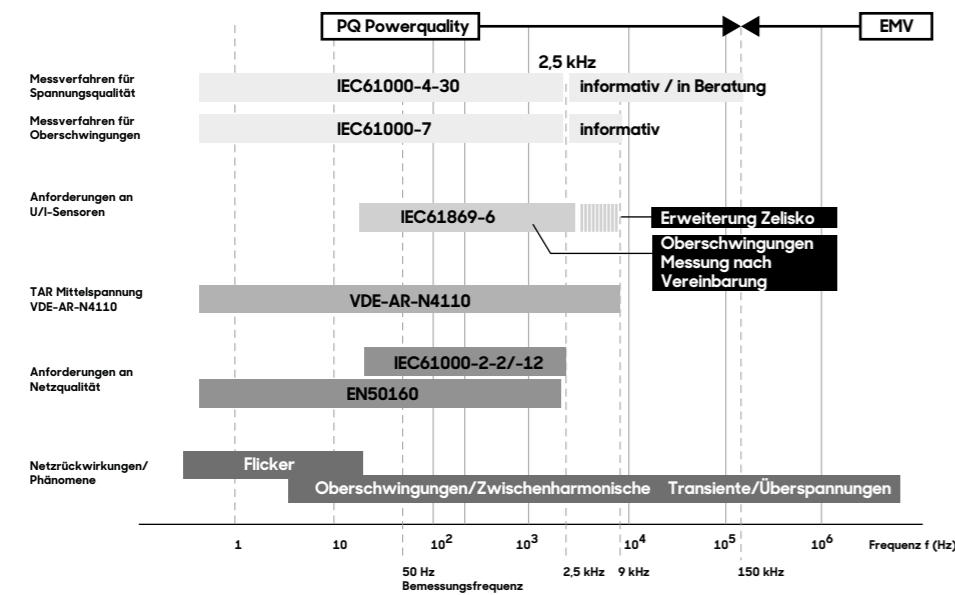


Abb. 7 Standards zu Netzqualität

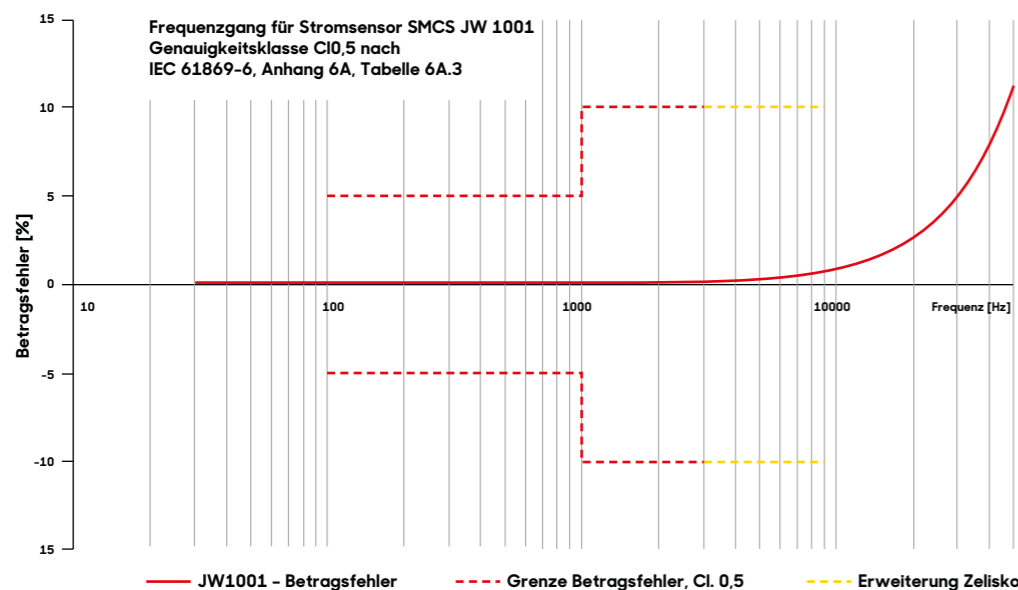


Abb. 8 Frequenzgang für Stromsensor SMCS-JW 1001

Abb. 7 zeigt eine Auswahl von Standards zur Erfassung und Beschreibung der Netz-Qualität (Power Quality). Anforderungen an die Spannungsqualität im öffentlichen MS- und NS-Versorgungsnetz sind z.B. in der EN 50160 definiert. Zunehmend wichtig wird die Überwachung der Spannungs- und Stromqualität, um unzulässige Abweichungen zu erkennen und rechtzeitig geeignete Abhilfemaßnahmen einleiten zu können. Die neuen techn. Anschlussregeln TAR Mittelspannung VDE-AR-N 4110 mit Anwendungspflicht ab Mai 2019 wurden kürzlich veröffentlicht. Neben vielen anderen Anforderungen sind auch zulässige Oberschwingungen am MS-Netzanschlusspunkt zu ermitteln und ggf. zu überwachen.

Messwandler nach IEC-Standard sind nur für die Grundfrequenz von 50 Hz ausgelegt und typgeprüft. Konventionelle induktive Strom- und Spannungswandler mit Eisenkern und Kupferwicklung übertragen höhere Frequenzen nur sehr unzureichend, wie in der Fachwelt bekannt ist. Je nach Fabrikat/Bauart können durch Resonanzverstärkung oder Dämpfung sehr hohe Messfehler auftreten. Neu ist, dass für Strom- und Spannungssensoren nach IEC 61869-6, Anhang 6A, auch Messtoleranzen für Oberschwingungen bis 3 kHz vereinbart werden können.

Zelisko-U/I-Sensoren wurden mit Zusatzmaßnahmen für eine saubere Übertragung der Oberschwingungen auch über die 3 kHz hinaus bis 9 kHz ertüchtigt und erfolgreich geprüft, wie **Abb. 8** beispielhaft zeigt. Für den Bereich von 3 bis 9 kHz werden die gleichen Fehlergrenzwerte wie für 1,5 bis 3 kHz eingehalten.

ZUSAMMENFASSUNG

Die beschriebene Anwendung der Zelisko-Kleinsignal-Wandler (U/I-Sensoren) in fernsteuerbaren Netzstationen bei IBC/Schweiz führt zu einer höheren Versorgungssicherheit und eine Reihe weiterer Kundenvorteile. Die U/I-Sensoren nach der internationalen Messwandlernorm IEC 61869 bzw. IEC 60044 sind in einer breiten Produktpalette verfügbar. Zur Überwachung der Power-Quality auf der Mittelspannungsseite können die Zelisko-U/I-Sensoren in ertüchtigter Ausführung auch zur Messung von Oberschwingungen bis 9 kHz eingesetzt werden.



- Innenraum Stromwandler
- Innenraum Spannungswandler
- Freiluft Stromwandler
- Freiluft Spannungswandler
- Ringkernstromwandler
- Kabelumbauwandler
- Ringkernstromwandler für MV und HV GIS
- Niederspannungswandler
- Stromwandler für Generator und Leistungstransformatoren
- Metallgekapselte Spannungswandler
- Strom- und Spannungssensoren

| www.zelisko.at |



ZELISKO

DISTANZSCHUTZ MIT MERGING UNITS

Michael Kleemann, geb. 1982, Diplom in Elektrotechnik 2007 und Promotion 2012 an der TU Dortmund. Seit 2014 Entwicklungsingenieur bei Sprecher Automation in Berlin. Mit dem Schwerpunkt auf Algorithmen trägt er zur Entwicklung von Netzschutzgeräten der SPRECON-E-P Reihe bei.

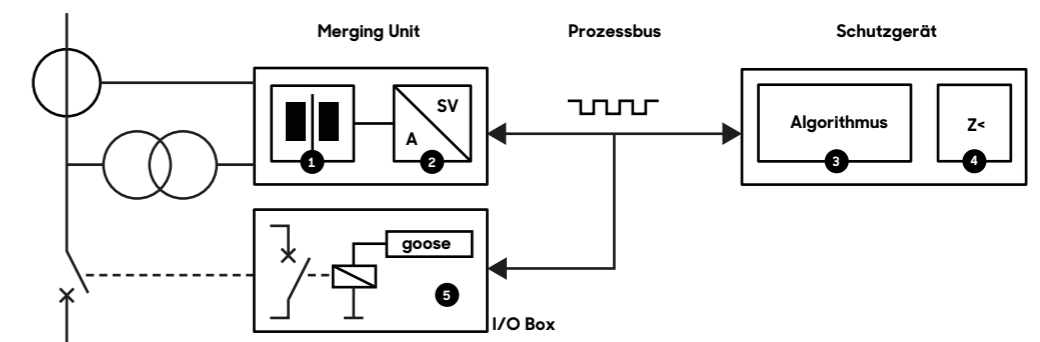
Über einen standardisierten Prozessbus können Schutzgeräte mit Merging Units anderer Hersteller kommunizieren. Müssen in diesem Fall die Algorithmen im Schutzgerät die Merging Unit berücksichtigen? Der Beitrag geht dieser Frage mit einer experimentellen Untersuchung nach.

Merging Units sind die Brücken zwischen einem Prozessbus und den Strom- bzw. Spannungswandlern. Sie bilden die analogen sekundären Ströme und Spannungen der Wandler als digitale Größen auf den Prozessbus ab. Einen Prozessbus nach Stand der Technik definiert [1].

Abb. 1 zeigt ein exemplarisches Distanzschutzsystem mit einem Prozessbus nach [1]. Es besteht aus einem Leistungsschalter, Wandlern, einem Schutzgerät, einer Merging Unit und einer I/O Box. Die Merging Unit beinhaltet im Wesentlichen zwei Komponenten: eine Anpassschaltung⁽¹⁾ und Mikroelektronik⁽²⁾. Die Anpassschaltung wandelt die analogen sekundären Ströme und Spannungen in Signale im Bereich

weniger Volt um, damit die Mikroelektronik diese weiterverarbeiten kann. Diese Mikroelektronik besteht typischerweise aus Filtern, Analog-Digital-Wandlern und einem Mikroprozessor. Letzterer speist fortlaufend Ströme und Spannungen als digitale Sampled Values (SV) in den Prozessbus ein. Anhand dieser SV bestimmt ein Schutzgerät mithilfe eines Algorithmus⁽³⁾ Impedanzen. Eine Distanzschutzfunktion⁽⁴⁾ wertet diese Impedanzen aus. Wenn eine selektive Fehlerklärung notwendig ist, sendet das Schutzgerät ein Auslösekommando als Generic Object Oriented Substation Event (GOOSE) Telegramm auf den Prozessbus. Bei Erhalt dieses Kommandos betätigt eine I/O Box⁽⁵⁾ dann den Leistungsschalter.

Abb. 1 Distanzschutzsystem mit einer Merging Unit (schematisch)



Ein Distanzschutzsystem mit einem standardisierten Prozessbus ermöglicht es, Merging Unit und Schutzgerät von unterschiedlichen Herstellern zu beziehen. Über die Kompatibilität auf Protokollebene hinausgehend stellt sich dann die Frage, ob sich der Algorithmus im Schutzgerät für die transienten Eigenschaften der Merging Unit eignet. Um diese Frage zu beantworten, stellen wir eine Untersuchung mit einer kommerziell verfügbaren Merging Unit aus dem Jahr 2017 an. Diese ist kompatibel zu einem Prozessbus nach [1]. Ihre transienten Eigenschaften sind unbekannt und derzeit noch in keiner Norm definiert.

METHODIK ZUR UNTERSUCHUNG EINES DISTANZSCHUTZES MIT EINER MERGING UNIT

Abb. 2 zeigt die Untersuchungsmethodik und Tab. 1 die darin verwendeten Geräte und Werkzeuge. Das erste Werkzeug ist eine transiente Netzsimulation. Wir wenden hier einen Testfall aus [2] an: einen Leiter-Erde-Kurzschluss auf einer beidseitig gespeisten Hochspannungsfreileitung. Aus dieser Simulation erhalten wir transiente Strom- und Spannungsverläufe.

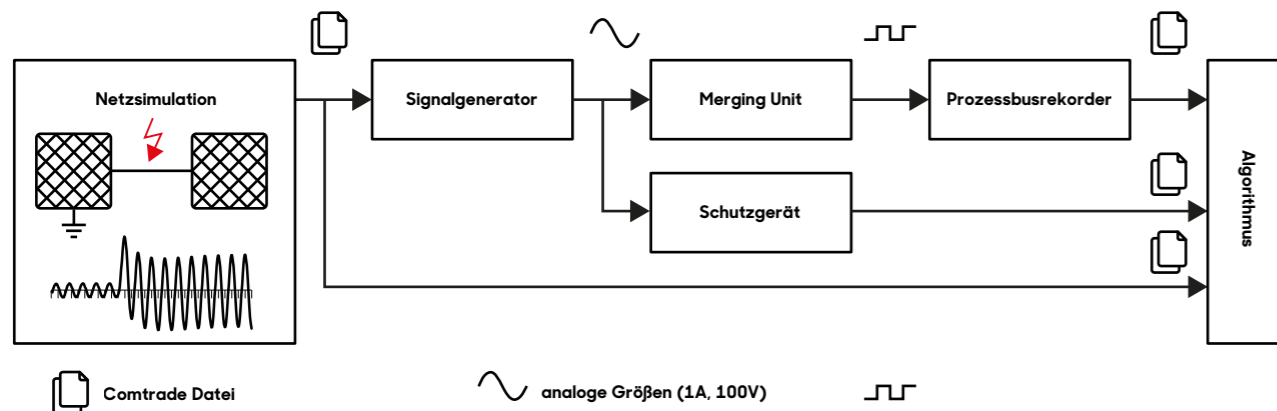


Abb. 2 Untersuchungsmethodik

Tab. 1 Verwendete Geräte und Werkzeuge

Verwendete Geräte und Werkzeuge	
transiente Netzsimulation	Omicron RelayLabTest
Schutzgerät	Sprecher SPRECON DD6
Signalgenerator	Omicron CMC256
Prozessbusrekorder	Omicron DANE0 400
Algorithmus Simulation und Auswertung	Matlab

Ein Signalgenerator erzeugt daraus analoge Größen mit den Normpegeln 1 A und 100 V. Mit diesen Größen beaufschlagen wir die Merging Unit. Die von ihr erzeugten SV erfassen wir mithilfe eines Prozessbusrekorders. Abschließend liest ein Algorithmus die SV ein und bestimmt Impedanzen. Außerdem zeichnet ein konventionelles Schutzgerät die analogen Ströme und Spannungen auf. Ein Vergleich der Momentanwerte sowie der durch den Algorithmus bestimmten Impedanzen wird dann eine Bewertung erlauben. Als Referenz werden wir die unverfälschten Strom- und Spannungsverläufe aus der Netzsimulation heranziehen.

EINFLUSS DER MERGING UNIT AUF DIE MOMENTANWERTE

Wir vergleichen die Momentanwerte, die Schutzgerät und Merging Unit erfassen, mit der Referenz – Abb. 3. Auf Seiten des Schutzgeräts zeigen weder der Spannungs- noch der Stromverlauf erkennbare Fehler. Auf Seiten der Merging Unit ist zwar der Spannungsverlauf ideal. Im Stromverlauf sind jedoch Abweichungen erkennbar: Zum einen ist der Verlauf ein wenig verzögert, d.h. wir sehen einen Winkel-

Abb. 3 Momentanwerte der Ströme und Spannungen

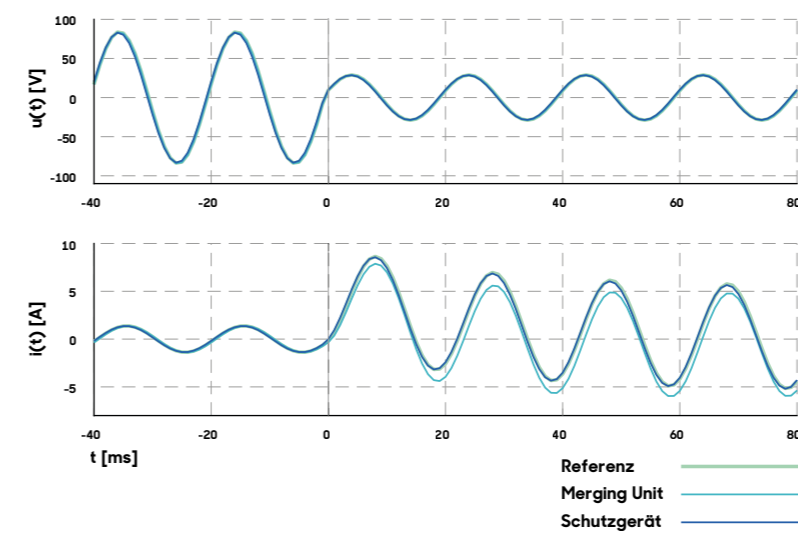


Abb. 4 Durch den Algorithmus bestimmte Impedanzen

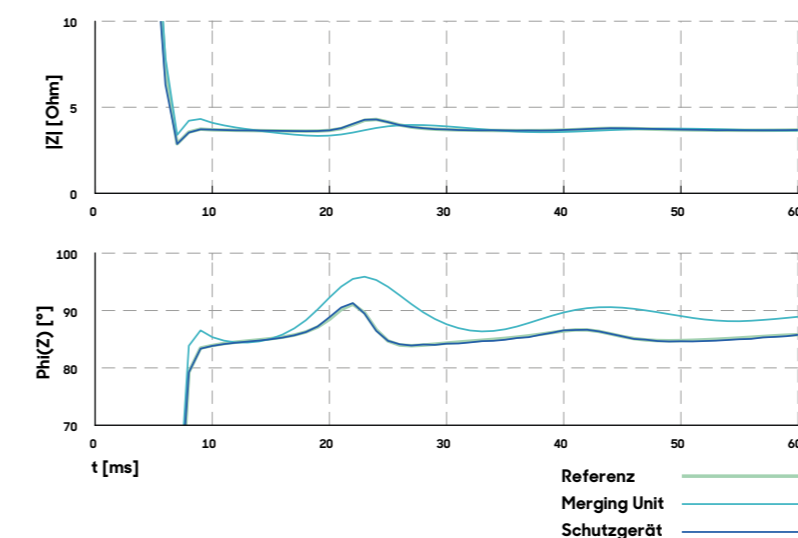
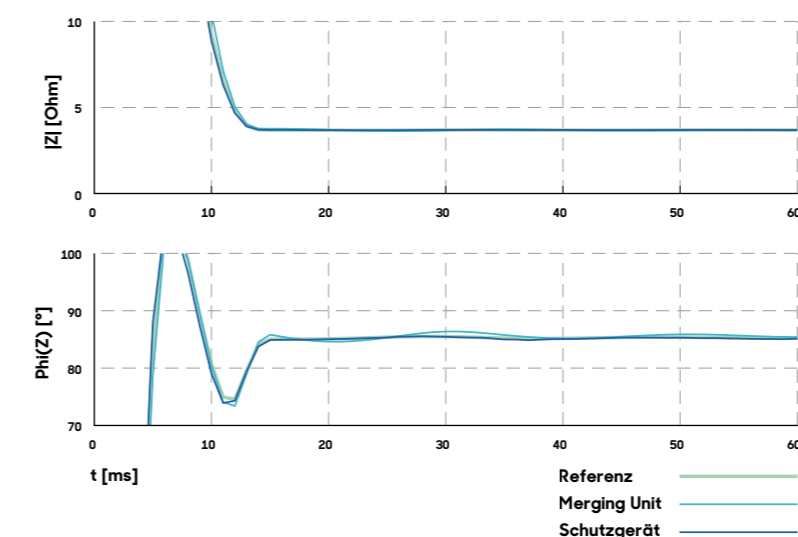


Abb. 5 Impedanzen mit abgestimmtem Algorithmus



fehler. Zum anderen wird der Gleichanteil nicht getreu übertragen, die Abklingzeitkonstante ist verkürzt. Im Folgenden werden wir sehen, wie stark diese Abweichungen den Algorithmus beeinflussen.

EINFLUSS DER MERGING UNIT AUF DEN ALGORITHMUS

Aus den Verläufen von Strom und Spannung bestimmen wir Impedanzen. Dazu verwenden wir einen Algorithmus nach [3] erweitert um das Admittanzverfahren nach [4]. Dieser Algorithmus harmonisiert so gut mit dem Schutzgerät, dass der Verlauf der Impedanz quasi deckungsgleich mit der Referenz ist – Abb. 4. Derselbe Algorithmus zeigt ein anderes Verhalten mit der Merging Unit. Er bestimmt den Betrag der Impedanz mit einem minimalen Fehler. Der Winkel weicht deutlicher von der Referenz ab: Auch 60 ms nach Beginn des Kurzschlusses verbleibt noch ein Fehler von etwa 3,5°. Anschließend werden wir versuchen, den Winkelfehler mit einer Abstimmung des Algorithmus zu reduzieren.

ABSTIMMUNG DES ALGORITHMUS AUF DIE MERGING UNIT

Da wir nun das transiente Verhalten der Merging Unit besser kennen, können wir den Algorithmus abstimmen. Zuerst reduzieren wir den Einfluss des ungetreuen Gleichglieds im Stromverlauf mit einem DC Blocker. Dann kompensieren wir den Winkelfehler mit einem statischen Offset. Dies verbessert die Genauigkeit der Impedanzbestimmung, sodass die Abweichungen im Betrag und Winkel quasi null sind – Abb. 5. Die Abstimmung ist also effektiv. Ob sie notwendig ist, hängt von der Anwendung ab. Ob sie möglich ist, hängt vom Wissen über die transienten Eigenschaften der Merging Unit ab.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchung sollte zeigen, ob der Algorithmus eines Distanzschutzgeräts für einen Prozessbus unabhängig von der Merging Unit gewählt werden kann. Dazu sind transiente Strom- und Spannungsverläufe mit einer Merging Unit erfasst worden. Der so erhaltene transiente Stromverlauf wich geringfügig vom Ideal ab. Diese Abweichung verleitet einen exemplarischen Impedanzalgorithmus zu einem Winkelfehler von wenigen Grad, während der Impedanzbetrag quasi fehlerfrei war. Mit



einer Abstimmung des Algorithmus konnte der Winkelfehler dann eliminiert werden.

Die Untersuchung hat anhand eines Beispiels gezeigt, dass ein funktionierendes Distanzschutzsystem möglich ist, ohne die Merging Unit im Detail zu kennen. Allerdings deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die transienten Eigenschaften der Merging Units nicht rückwirkungsfrei auf die Algorithmen in den Schutzgeräten sind. Zusätzliche Messfehler, wenn auch irrelevant für die tatsächliche Anwendung, sind zu erwarten. Deshalb sollten Anwender ein Distanzschutzsystem vor Inbetriebnahme mit transienten Prüfgrößen validieren. Ein optimales Schutzsystem ist jedoch nur zu erreichen, indem Algorithmus und Merging Unit aufeinander abgestimmt werden.

Die transienten Eigenschaften von Merging Units sollten klassifiziert werden – und zwar in ähnlicher Weise, wie dies die Norm [5] für konventionelle Stromwandler vorgibt. In diesem Sinne erarbeitet das Technical Committee TC38 im IEC derzeit die Norm [6] speziell für Merging Units [7]. Diese Norm wird die Grundlage schaffen, um die Algorithmen in den Schutzgeräten über Hersteller Grenzen hinweg optimal auf Merging Units abzustimmen.

Quellen

- 1 IEC, 61850-9-2: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3, 2008.
- 2 IEC, 60255-121: Measuring relays and protection equipment – Part 121: Functional requirements for distance protection, 2013.
- 3 A. Malnes; und I. Morrison, Real time calculation of resistance and reactance for transmission line protection by digital computers. In: *Electrical Engineering Transactions, Institute of Engineers of Australia, 1971*, S. 16-23
- 4 C. Liebermann; J. Meyer; P. Schegner; M. Kleemann, Zuverlässige Impedanzberechnung für Leiter-Erde-Schleifen. In: *Netzschutz – Das Magazin für Schutztechnik, 2/2017*
- 5 IEC 61869-2: Instrument transformers – Part 2: Current transformers, 2012.
- 6 IEC 61869-13: Instrument Transformers, Part 13: Stand Alone Merging Unit, in Bearbeitung.
- 7 V. Skendzic; D. Dolezilik, New and Emerging Solutions for Sampled Value Process Bus IEC 61850-9-2 Standard – An Editor's Perspective. In: *Proceedings of Southern African Power System Protection & Automation Conference*, 8.-10. 11. 2017.

SPRECON-E-P DD..6

Die Serie schützt, steuert und automatisiert Energieanlagen.



Zusammengefasst

Die modularen Geräte werden als Hauptschutz von Freileitungen und Kabeln aller wichtigen Netz- und Sternpunktbehandlungsarten der MS- und HS-Ebene eingesetzt. Systemschutzfunktionen wie Q-U-Schutz, automatische Frequenzentlastung und Pendelschutz ergänzen das Leistungsspektrum.

HAUPTMERKMALE

- Jetzt neu mit Prozessbus(anschluss)
- Sechssystemiger Distanzschutz mit drei Anregeverfahren
- Eigenständige Systemschutz- und Erdschlussortungsfunktionen
- Konsequente Trennung von Schutz und Leittechnik
- Integrierte IT-Sicherheit
- Backup mit SD-Card
- IP-basierte Wirkchnittstelle
- Analoge Ausgänge, redundante Spannungsversorgung

OPTISCHE STROM- WANDLER



Optische Strommessungen haben sich in den vergangenen Jahren nur wenig durchgesetzt, vor allem wegen der fehlenden Kompatibilität zu analogen Schnittstellen der Schutz- und Messtechnik im Feld. Neue Standards beschreiben heute Schnittstellen für digitale Gerätetechniken mit digitalisierten Mess-eingängen und bilden die Grundlage für interoperable Einsatzmöglichkeiten von nichtkonventionellen Strommessungen.

Adventorial

Jens Eilart, geboren 1965, Absolvent der Technischen Hochschule Dresden, Fachabteilung Energietechnik im Verkehrswesen. Seit 1990 im Bereich Energietechnik, speziell Sekundärtechnik aktiv. Seit 2017 Projekt- und Applikationsspezialist für nichtkonventionelle Wandler und digitalisierte Schaltanlagen.

ALTERNATIVE OPTISCHE STROMWANDLER

Bereits 1845 erbrachte Michael Faraday unter Laborbedingungen den ersten Hinweis, dass Licht und Magnetismus miteinander in Beziehung stehen. Seine Studien behandelten einen magneto-optischen Effekt, der die Drehung der Polarisations Ebene einer linear polarisierten elektromagnetischen Welle in einem Medium beschreibt, wenn darin ein Magnetfeld parallel zur Ausbreitungsrichtung der Welle herrscht. [1]

In Bezug auf optische Strommessungen bedeutet dies, dass der Winkel von polarisiertem Licht um ein stromführendes Element sich mit der Veränderung des fließenden Stromes dreht. Die Änderung des Rotationswinkels β ist direkt proportional zur Stromänderung.

Die Strommessung in Sensoren nach dem Faraday-Effekt kann in verschiedenen Ausprägungen erfolgen. Grundsätzlich sollten aber alle Sensoren kompakt und auf einer rein passiven optischen Basis ausgeführt sein. Zusätzliche positive Eigenschaften resultieren aus der Genauigkeit und Linearität der Messung. Hochgenaue Erfassungen für Power-Quality-Studien können in gleicher Weise realisiert werden wie sättigungsfreie Messungen von Kurzschlussströmen. Wichtig ist hier, dass für alle Anwendungen lediglich ein Sensor benötigt wird und sich damit die Vielzahl der unterschiedlichen Stromwandlerkerne deutlich reduzieren lässt.

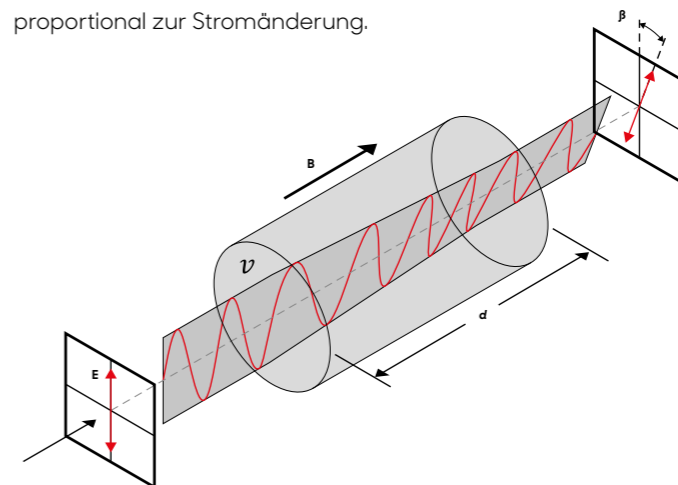


Abb. 1 Polarisationsdrehung aufgrund Faraday-Effekt [2]

© Jens Eilart

Die vorgenannten Beispiele zeigen deutliche Vorteile gegenüber den konventionellen Anwendungen in heutigen Umspannwerken. Allerdings darf demgegenüber die nicht vorhandene Kompatibilität zu gängigen Schutz- und Messtechniken nicht unerwähnt bleiben. Eine Standardisierung von Primär- und Sekundärtechnik in Schaltanlagen ist damit nur begrenzt möglich.

Trotzdem haben sich in der Vergangenheit einige kleinere, aber trotzdem wichtige Märkte mit einer guten Akzeptanz entwickelt. Den größten Marktanteil hat die Anwendung bei HGÜ-Anlagen. Ein zweites Einsatzgebiet findet sich in der Messung und Auswertung von sehr großen Strömen. Bei der Fertigung von großen, stromstarken Erzeugungs- und Verteilungssegmenten sind optische Stromwandler nicht mehr wegzudenken. Eine dritte Applikation ergibt sich beim Betrachten der Messgenauigkeit in sehr kleinen Strombereichen. Vor allem bei Kompensationsanwendungen sind bei auftretenden Fehlern ausgesprochen kleine Differenzströme mit einem großen Frequenzspektrum die Folge. Die Messung des

kompletten Spektrums ist mit speziellen optischen Stromwandlern problemlos möglich. [3]

Den größten Marktanteil für Messwandler haben allerdings noch immer energietechnische Anlagen mit einem Hauptaugenmerk auf digitale Schutzfunktionen. Wurden in der Vergangenheit unabhängige Stromwandlerkerne für unterschiedliche Schutzanwendungen als notwendig erachtet, so bietet die Anwendung des Kommunikationsstandards IEC 61850 hier eine vollkommen neue Grundlage. Nachdem Stationsbusanwendungen gemäß IEC 61850-8-1 mittlerweile in vielen Ländern als Stand der Technik angesehen werden, ist mittlerweile ein deutliches Interesse an der Nutzung der vorgenannten Vorteile von optischen Stromwandlern zu erkennen. Als Basis werden hier IEC 61850-9-2LE oder IEC 61689 gesehen. Optische Wandler-Technologien und dazugehörige Merging Units mit der Möglichkeit der direkten Einspeisung in ein Prozessbussystem sind nunmehr interoperabel einsetzbar und können somit auch dem Wunsch nach Standardisierung der Primär- und Sekundärtechnik entsprechen.

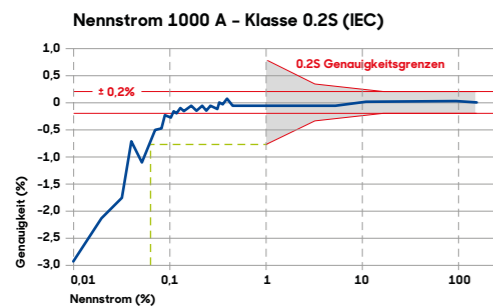


Abb. 2 Genauigkeit einer Strommessung mit Faraday-Effekt im Vergleich mit der Kennlinie eines konventionellen Stromwandlers, IEC, Klasse 0,2S [5]

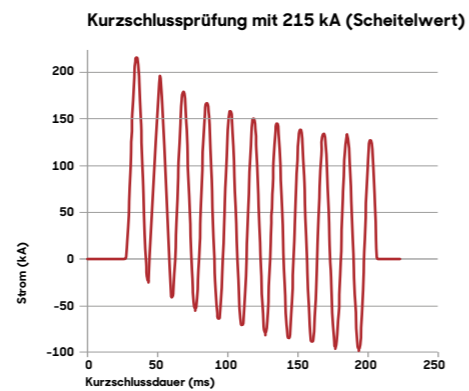


Abb. 3 Sättigungsfreie Aufzeichnung eines vollverlagerten Kurzschlussstromes mit einem optischen Messsystem [5]

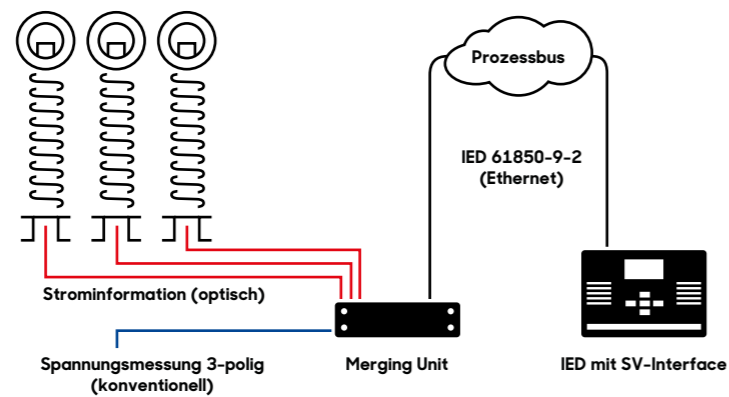


Abb. 4 Prinzipielle Darstellung einer Prozessbus-Architektur

PRAXIS SAMMELN

NEUE UND BEWÄHRTE LÖSUNGEN FÜR
STEIGENDE HERAUSFORDERUNGEN*

ALS
EINZELHEFTE
ZU
BESTELLEN

MIT DETAILLIERTEN,
GRAFISCH EDITIERTEN
SCHALTPLÄNEN,
DIAGRAMMEN, TABELLEN
UND ABBILDUNGEN



03 2017
ERDSCHLUSSSCHUTZ
Zuverlässige Detektion mit innovativen Technologien



01 2018
LICHTBOGENSCHUTZ
Menschenleben schützen und Anlagen vor Schaden bewahren



02 2018
ÜBERSTROMZEITSCHUTZ
Basis- und Reserveschutz

Bestellungen an office@netzschutz-magazin.com
oder per Post an EET Verlag GmbH, Westbahnstraße 7/6a,
1070 Wien, Österreich

Preis pro Heft: € 45,00 zzgl. MwSt. und Versand

* Das Magazin ist als Kompendium aufgebaut. Jedes Heft ist einem Thema gewidmet. Je mehr Hefte, desto mehr Lösungen – von Leitungsschutz bis Erdschlussschutz, von Maschinenschutz bis Spezialschutz, von Allgemein bis UMZ-Schutz.



Heute sind optische Stromwandler ein wichtiger Bestandteil des GE-Produktportfolios. Sie stellen zusammen mit leistungsfähigen Systemen der Schutz- und Leittechnik, Zeitsynchronisations- und Netzwerkkomponenten sowie Systemen für eine zustandsgesteuerte Wartung der Betriebsmittel die Grundlage des Angebotes für digitale Schaltanlagen dar. GE verfügt in diesem Segment über eine große Anzahl an Referenzen in der ganzen Welt. Als eine der wichtigsten kann das Projekt „Poste Intelligent“ in Frankreich (UW Blocaux) [4] gesehen werden. In dieser Anlage ist sehr deutlich

zu erkennen, wie vielfältig Digitalisierung zum heutigen Zeitpunkt nutzbar ist.

ANWENDUNG VON OPTISCHEN STROMWANDLERN IN SCHALTANLAGEN

Die flexiblen optischen Stromwandler stehen heute in unterschiedlichen Bauweisen zur Verfügung. Die Basis ist hier weitestgehend vergleichbar und stellt ein hochflexibles Lichtwellenleitersystem in der Art eines Ringes um die stromführenden Teile dar. Die sicher bekannteste Anwendung ist die freistehende Lösung in AIS-Anlagen. Die Konstruktion des

Abb. 5 Montage am Leistungsschalter

© Jens Eilert

Sensors ist in allen Anwendungen vergleichbar, eine Anpassung an die Spannungsebene im Umspannwerk erfolgt lediglich bei der Höhe des freistehenden Isolators. Entgegen anderen konventionellen Lösungen dient der sogenannte Stabkern lediglich dem Schutz des Lichtwellenleiters, eine Verwendung von Gas oder Öl kann hier vollständig ausgeschlossen werden.

Die flexible Ringarchitektur kann aber auch für die Installation an Anlagenteilen vorgesehen werden. Die Montage an einem Live-Tank-Leistungsschalter ist in einfacher Weise möglich. Installationen an Schaltern von verschiedenen Herstellern gehören heute zu den GE-Referenzen. Die Möglichkeit einer nachträglichen Installation im Umspannwerk ist durch ein System gegeben, in dem Lichtwellenleiter in einem flexiblen Schlauchsystem direkt verlegt werden. Auch hier gibt es verschiedene Referenzen, z.B. den nachträglichen Anbau an Leistungstransformatoren oder die direkte Installation an Hybrid-Schaltmodulen.

ANWENDUNG BEI TEILVERKABELTEN HOCHSPANNUNGSLEITUNGEN

Häufig wird bei teilverkabelten Hochspannungsleitungen eine Blockade von Wiedereinschaltungen bei Fehlern im Kabel vorgesehen, weitläufig angewendete Praxis ist die zusätzliche Installation eines Leistungsdifferentialschutzsystems. Der Installationsaufwand

an den Übergabestationen ist in diesen Fällen recht groß.

Eine alternative Lösung stellt auch hier die Anwendung von optischen Stromwandlern dar. Mit einer speziellen Applikation kann das Lichtsignal eines Stromwandlers über eine Strecke von maximal 30 Kilometern übertragen werden. In solchen Fällen reduziert sich die Lösung auf die notwendige Installation an lediglich einer Übergabestation. Auch hier gibt es diverse Referenzen, einige davon in Europa. Aktuell entsteht in der Schweiz eine erste Lösung in Mitteleuropa, weitere Realisierungen sollen folgen.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Bericht zeigt, dass die Anwendung von optischen Stromwandlern an Bedeutung gewinnt, nicht nur in kleineren Nischenprojekten. Vor allem die nachweisbaren Vorzüge dieser Technologien können in vielen Anwendungen Vorteile hinsichtlich der Genauigkeit und Linearität der Messung sowie der Flexibilität bei der Installation bringen.

Die optischen Stromwandlerlösungen von GE bieten eine sehr hohe Flexibilität und Projektorientiertheit für anwender- und umweltfreundliche Lösungen in Gleich- und Wechselstromanlagen und bilden eine ideale Voraussetzung für die Realisierung von digitalisierten Schaltanlagen in der näheren Zukunft.

Quellen

- 1 www.spektrum.de: Lexikon der Physik – Faraday-Effekt
- 2 J. Cardenas, Optical/Digital Substation, Projektinformation anlässlich CIGRE B5 Kolloquium 2017, Auckland, Neuseeland
- 3 J. N. Blake; A. H. Rose, Optical Current Sensors in the Modernization of the Electric Power Grid: Digital Substation Challenges, 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors 2014
- 4 T. Buhagiar; J-P Cayuela; A. Procopiou; S. Richards, J. Jesus, C. F. Chow, Poste Intelligent – The next generation smart substation for the french power grid, Paris 2014
- 5 K. Seliger; J. Eilert, COSI – Nichtkonventionelle Wandler für Prozessbus – Anwendungen in digitalen Schaltanlagen, Poster anlässlich Tutorial Schutz und Leittechnik, Berlin 2018

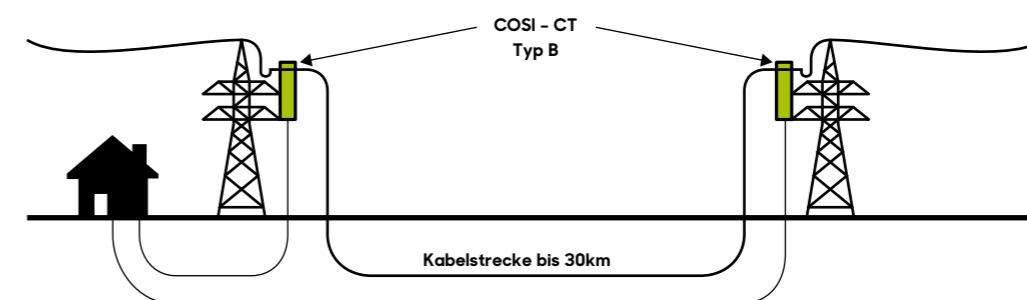


Abb. 6 Prinzip einer Kabelüberwachung mit optischen Stromwandlern [5]

INBETRIEBNAHME- PRÜFUNG



Strom- und Spannungswandler sind wichtige Komponenten im Gesamtsystem der Schutztechnik. Deshalb ist es wichtig, den Wandler nicht nur als einzelnes Betriebsmittel zu betrachten, sondern immer im Gesamtsystem zu prüfen.

Advertorial

Marcus Stenner

absolvierte seine Lehre zum Energieanlagen-elektroniker bei Miele. Nach erfolgreichem Abschluss 1999 studierte er bis 2004 Energietechnik an der FH Bielefeld. Seit 2004 ist er bei OMICRON tätig und war zuerst für die Inbetriebnahme und Prüfung von Schaltanlagen zuständig. Nach einem Ausflug in die Produktschulung übernahm er 2010 die Verantwortung für das Team Messen, Prüfen, Inbetriebnahme und kundenspezifische Prüfunterstützung.

Umspannwerk © OMICRON electronics GmbH

Ein guter Zeitpunkt für den Nachweis der korrekten Funktionalität von Strom- und Spannungswandlern ist die Inbetriebnahme. Leider steht bei der Inbetriebnahme zunehmend weniger Zeit zur Verfügung. Daher muss überlegt werden, wie die Wandler mit dem Schutzsystem hinreichend in einer angemessenen Zeit geprüft werden können. Dieser Artikel soll als Vorschlag eines Prüfplans gesehen werden, wie eine Inbetriebnahme bzw. Schutzsystemerneuerung aussehen könnte.

WER DEFINIERT, WAS UND WIE GEPRÜFT WERDEN MUSS?

Um eine gleichbleibende Prüfqualität und Vergleichbarkeit zu gewährleisten, sollte der Umfang der Prüfung sowie die Art der Durchführung vom Anlagenbetreiber in einer Richtlinie vorgegeben und kontrolliert werden. Hat der Anlagenbetreiber keine Richtlinie vorliegen, kann der Leitfaden des Forum Netztechnik Netzbetrieb (FNN) zur Orientierung dienen.

In diesem Leitfaden zum Einsatz von Schutzsystemen in elektrischen Netzen von 2009 wird eine Empfehlung ausgegeben, wie Wandler während der Inbetriebnahme geprüft werden können:

- Vergleich der Typenschildangaben mit den geforderten Werten
- Isolationsprüfung zum Nachweis, dass Isolationswerte der einzelnen Kerne gegen Erde und gegeneinander eingehalten werden
- Überprüfung der Beschaltung und Übersetzung der einzelnen Stromwandlerkerne, möglichst mittels Primäreinspeisung des Wandlers
- Wickelsinnprüfung, soweit die Überprüfung durch Einsichtnahme in die Werksprüfprotokolle des Wandlerherstellers nicht möglich ist
- Messung der Betriebsbürde
- Messung der Innenbürde, falls nicht bekannt.

Dieser Vorschlag zur Prüfung der Stromwandler und Stromwandlerkreise folgt der FNN-Empfehlung. Im Falle eines Fehlers gilt diese als anerkannter Stand der Technik und bietet so dem Prüfer ein gewisses Maß an Rechtssicherheit.

VORGESCHLAGENER PRÜFABLAUF EINES STROMWANDLERS

Die Aufnahme des Typenschildes ist wichtig, da dieses in allen Prüfprotokollen zur Identifizierung des Prüflings dient. So können falsch

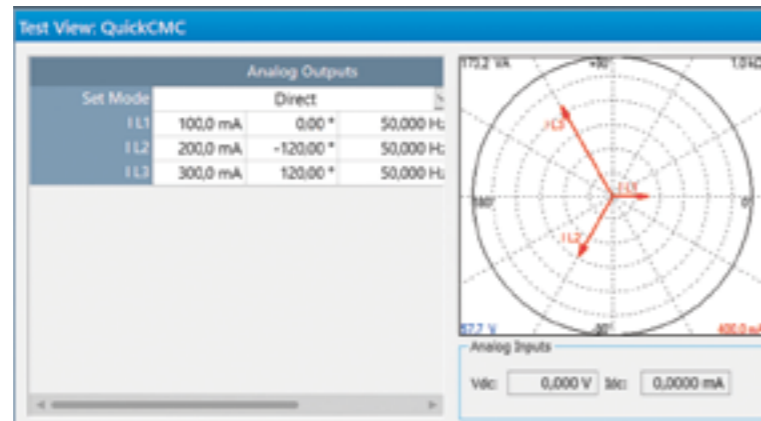


Abb. 1 Unsymmetrische Einspeisung mit dem QuickCMC

verbaute Wandler bereits durch den Vergleich der Typenschilddaten mit den Schalt- bzw. Anlagenplänen gefunden werden. Zu diesem Zeitpunkt macht es Sinn, die Einbaulage des Stromwandlers (Richtung P1 und P2) mit dem einphasigen Stromlaufplan zu vergleichen. Weist der Stromwandler eine primäre Verlaschung des Übersetzungsverhältnisses auf, sollte auch diese überprüft werden, bevor man mit den Messungen beginnt.

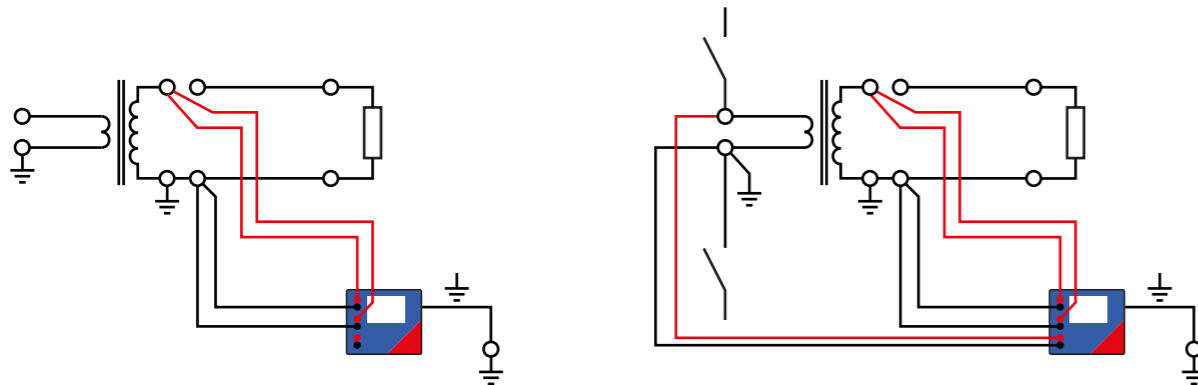
Als nächsten wichtigen Schritt empfehle ich die Einspeisung von unsymmetrischen Stromwerten, z.B. 100 mA, 200 mA, 300 mA, mit Hilfe eines Schutzprüfgeräts (Abb. 1), um die richtige Verdrahtung vom Wandlerklemmenkasten zum Schutzgerät zu gewährleisten. Die Kontrolle

der Werte kann über das Display oder mit der Stromzange am Gerät durchgeführt werden.

Die Isolationsmessung wird wie in der FNN-Empfehlung beschrieben durchgeführt. Die Messung des Isolationswiderstands führe ich mit einem Isolationsmessgerät mit 1000 VDC für max. 10 Sekunden pro Kern bzw. Leitung durch. Die Isolation der Kerne wird gegen Erden (hierfür muss die sekundäre Erdung an den Wandlerkernen aufgehoben werden) und alle Kerne werden gegeneinander gemessen. Des Weiteren sollte auch die sekundäre Verdrahtung auf einen guten Isolationswiderstand geprüft werden. Der Isolationswiderstand kann ab einem Wert von 100 MΩ als gut befunden werden. Nach der Messung können diese Kerne

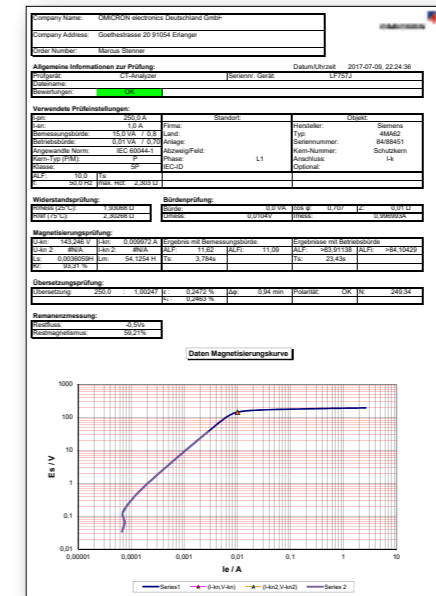
Abb. 2 ↖ Anschlusschema zur Betriebsbürdenmessung

Abb. 3 ↗ Anschlusschema zur Wandlermessung



Advertorial

Abb. 4 Beispiel eines Prüfberichts

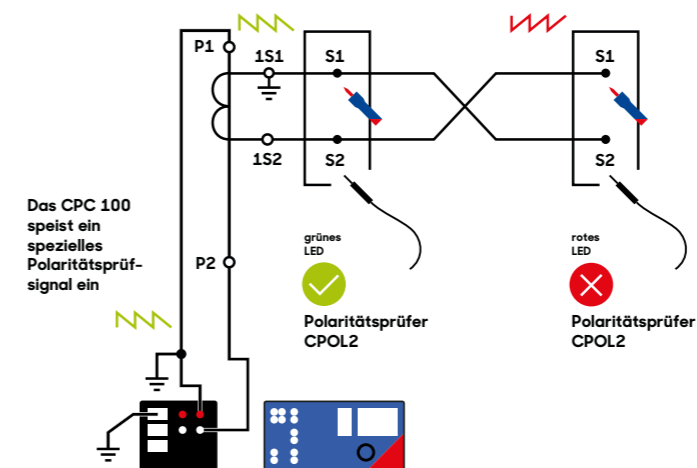


und die Kabel aufgeladen sein, daher sollten diese kurz geerdet werden. Die Überprüfung des Übersetzungsverhältnisses, Wickelsinns, der Betriebsbürde und Innenbürde können sowohl mittels Primäreinspeisung (z.B. mithilfe von OMICRONs CPC 100) als auch mittels Sekundäreinspeisung durchgeführt werden.

Die Prüfung mittels Sekundäreinspeisung (z.B. CT Analyzer von OMICRON) wird in zwei Prüfschritten durchgeführt. Im ersten Schritt wird auf der Bürdenseite des Sekundärkreises gemessen (Abb. 2).

Abb. 5 Verdrahtungsprüfung mit dem CPOL2

Im zweiten Schritt muss an der Wandlerseite des Sekundärkreises umverdrahtet werden (Abb. 3).



Durch die Verwendung des CT Analyzers kann die Prüfdauer auf ca. 5 Minuten pro Kern reduziert werden. Ein weiterer Vorteil der Prüfung mit dem CT Analyzer ergibt sich bei der automatischen Bewertung im Prüfbericht – vorausgesetzt, alle geforderten Daten vom Typenschild werden in die Prüfvorlage des CT Analyzers eingegeben.

AUSWERTUNG DER STROMWANDLER-PRÜFUNG

Die Bewertung umfasst die Gegenüberstellung der gemessenen Werte mit den in der entsprechenden Norm vorgegebenen Werten. Als Prüfer schaue ich mir die Ergebnisse an und mache eine Querkontrolle mit einem ähnlichen Kern aus einer anderen Phase oder Feld. Mit der Messung der Magnetisierungskennlinie kann auf einfachem Weg die richtige Kernzuordnung nachgewiesen werden.

NACH DER PRÜFUNG – SCHLUSSKONTROLLE

Nach der Prüfung müssen alle Erden erneut angeschlossen und die Stromkreise wieder geschlossen werden. Zur Kontrolle führe ich im Anschluss noch eine Primäreinspeisung mit ca. 50 % des Nennstromes durch und überprüfe bei allen verbauten Geräten am Display die Messwerte. Mit Hilfe eines Polaritätsprüfgeräts und der Einspeisung eines Rechtecksignals kann mit demselben Messaufbau mit Primäreinspeisung sehr leicht ein Verdrahtungsfehler bis zum Schutzgerät gefunden werden. Der Vorteil des Rechtecksignals liegt in der Vermeidung des Aufsättigens des Stromwandlers im Vergleich zur alten konventionellen Batteriemethode (Abb. 5).

Die Auswertung und Dokumentation der Prüfung wird durch den automatisch generierten Prüfbericht erleichtert und spart somit viel Zeit (Abb. 4). Die am häufigsten gefundenen Fehler sind:

- Verdrahtungsfehler (vertauschte Phasen)
- Mehrfach-Erdung der Stromkreise
- Isolationsfehler aufgrund nicht fachgerechten Absetzens von Kabeln (einschneiden in die einzelnen Adern)
- Überbürdung der Schutzkreise
- Falsche Einbaulage der Stromwandler bzw. einzelner Stromwandlerkerne
- Anschluss von Messgeräten an Schutzwandlerkerne und umgekehrt



Abb. 7 Signalkurvenvergleich mit OMICRONs DANEO 400



Abb. 6 Prüfung mit dem CPC 100, bei der der Prüfstrom durch einen konventionellen und durch einen nichtkonventionellen Wandler getrieben wird

AUSBLICK – NEUE WANDLERTYPEN

Mit Einzug von nichtkonventionellen Wandlern, auch bekannt als optische Wandler, der Messwerterfassung konventioneller Wandler durch Merging Units und der digitalen Messwertverteilung auf Prozessbusse ändert sich auch das Prüfen von Stromwandlern. Viele der oben genannten Prüfungen können nicht mehr durchgeführt werden.

Die Stromwandler können nur noch durch Primäreinspeisung überprüft werden, da die Stromwandler nur noch digitale Werte – sogenannte Sampled Values – ausgeben und keine analogen Sekundärgrößen. Mit dem CPC 100 kann der Primärstrom ausgegeben und der Sampled-Values-Stream direkt über die Ethernet-Schnittstelle im Prüfgerät zurückgelesen werden. Dies ermöglicht die Messung des Übersetzungsverhältnisses, der Polarität und Winkelfehler des optischen Stromwandlers.

In **Abb. 6** sieht man eine Prüfung mit dem CPC 100, bei der der Prüfstrom durch einen konventionellen und durch einen nichtkonventionellen Wandler getrieben wird. Zur Kontrolle, ob die Sampled Values im Prozessbus richtig projiziert wurden, haben wir die Sampled-Values-Streams beider Wandler mit dem DANEO 400 aufgezeichnet und verglichen. Dadurch konnten wir erkennen, dass die resultierende Signalform des nichtkonventionellen und konventionellen Wandlers in Betrag und Phase gleich waren. Wohingegen in der Betrachtung der harmonischen Komponenten Unterschiede zu erkennen sind.

ZUSAMMENFASSUNG

Durch den dargestellten Prüfplan konnte eine gleichbleibende Prüfqualität und Dokumentationstiefe mit einem sehr geringen Zeitaufwand während der Prüfung erreicht werden. Mit dem vorgefertigten Prüfbericht konnte auch der Aufwand für die zusammenfassende Dokumentation verringert werden.

Dieser Prüfplan ist als Empfehlung zu sehen und als eine Einladung, um über Alternativen zu diskutieren. Sollten Sie als Leser Fragen, Anmerkungen oder Verbesserungsvorschläge haben, würde ich mich freuen, mit Ihnen darüber zu diskutieren.

AKTUELLES

SEPT.

24./25.

Selektivschutztechnik
in Verteilungsnetzen
VDE-Seminare,
Offenbach/Main/Deutschland

SEMINAR

24. – 27.

Kabelfachtagung
Megger-Fachtagung,
Bauach/Deutschland

TAGUNG

26./27.

2. Dresdner Symposium
Sternpunkterdung
VDE-Symposium,
Dresden/Deutschland

TAGUNG

OKT.

04.

Beherrschung von Störlichtbögen
in Mittelspannungsanlagen
OVE-Seminar, Wien/Österreich

KONFERENZ

18./19.

56. Fachtagung der Österreichischen
Gesellschaft für Energietechnik im OVE
OVE-ÖGE-Tagung, Wien/Österreich

TAGUNG

NOV.

13./14.

Innovationen im Netz
ETG-CIRED-Workshop,
Berlin/Deutschland

TAGUNG

15./16.

DIN VDE 0101 Hochspannungs-
anlagen mit Nennwechsel-
spannungen über 1 kV
VDE-Seminar,
Offenbach/Main/Deutschland

SEMINAR

22./23.

Kurzschlussstromberechnung –
Berechnung in Drehstromnetzen
DIN EN 60909-0 (VDE 0102)
VDE-Seminar,
Offenbach/Main/Deutschland

SEMINAR

DEZ.

03.

Stromwandlerprüfung
Omicron-Seminar,
Erlangen/Deutschland

SEMINAR

NETZSCHUTZ

Impressum und Offenlegung

Herausgeber und Chefredakteur

Peter Schitz
Tel: +43 676 972 7269
Mail: peter.schitz@netzschutz-magazin.com

Abo- und Anzeigenverkauf

Beatrix Meindl
Tel: +43 1 345 12 35
Mail: office@netzschutz-magazin.com

Redaktion

Edith Weinlich

Art-Direktion

Capitale Wien / Berlin
Cora Akdogan, Daniel Perraudin

Lektorat

Ewald Schreiber

Redaktionsanschrift & Abo-service

Westbahnstraße 7/6a, 1070 Wien, Österreich
Tel: +43 1 345 12 35
Mail: office@netzschutz-magazin.com

Erscheinungsweise

4-mal jährlich

Vertrieb

Im Abonnement und als Einzelhefte erhältlich

Abo-Preise

Österreich
EUR 158,00 netto (EUR 173,80 brutto inkl. Versand)
Deutschland
EUR 158,00 netto (EUR 187,00 brutto inkl. Versand)
Schweiz
EUR 158,00 netto (EUR 170,00 brutto inkl. Versand)

Einzelheft-Preise

EUR 45,00 netto (EUR 55,55 brutto inkl. Versand)

Eigentümer (100%), Medieninhaber & Herausgeber

EET Verlag GmbH
Westbahnstraße 7/6a, 1070 Wien, Österreich
Tel: +43 1 3451235
Mail: office@netzschutz-magazin.com
Web: www.netzschutz-magazin.com
Firmenbuch-Gericht: Handelsgericht Wien
Firmenbuch-Nr.: FN 471292 b

Erfüllungsort und Gerichtsstand

1070 Wien, Österreich

Geschäftsführer: Peter Schitz
Gesellschaftsanteile (100%): e2solution Schitz
GmbH, Westbahnstraße 7/6a, 1070 Wien,
Österreich

Offenlegung gemäß § 25 Mediengesetz
Grundlegende Ausrichtung von NETZSCHUTZ
Fachmagazin zur Information über Wissens-
stand, Innovationen und Geräteentwicklungen
im Bereich der Elektrotechnik mit Fokus auf
Schutztechnik und Netzschutz. Die Inhalte rich-
ten sich insbesondere an Fachleute aus der
Schutztechnik und dienen der persönlichen In-
formation. Eine Haftung ist ausgeschlossen.

Unternehmensgegenstand
Betrieb eines Magazinverlags und einer Website

Herstellung & Druck

Grasl Druck & Neue Medien GmbH
Druckhausstraße 1, 2540 Bad Vöslau

Alle Rechte an Text, Bild, Grafik & Design
© Netzschutz. Vor Übernahme von Beiträgen,
Bildern oder Abbildungen ist die Zustimmung
des Verlages schriftlich einzuholen. Druck- und
Satzfehler vorbehalten.

Ecostruxure[™] Grid
Innovation At Every Level

Über
1 Mio.
Schutzgeräte
erfolgreich
im Einsatz

Kompetenz in Schutztechnik: Stations- und Netzautomatisierung
von der Mittel- bis zur Höchstspannungsebene



Baureihe Easergy MiCOM: Erweiterte Ausprägung am Beispiel
des bewährten Distanzschutz und Steuergerätes P439 in den
Anwendungen für Mittel- und Hochspannungsnetze.

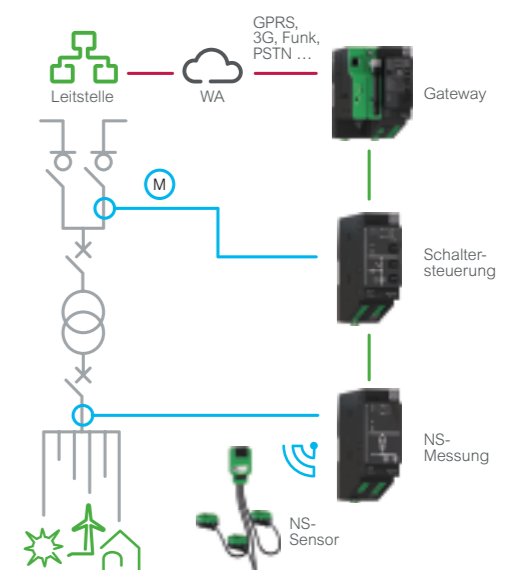
Schneider Electric liefert und leistet als Systemspezialist
für Sekundärtechnik:

- Schutzeinrichtungen für Erzeugung, Übertragung und Verteilung
- Komplexe Systemlösungen mit Easergy MiCOM Schutztechnik, PACis Stations- und Easergy Netzautomatisierung
- Mess- und Überwachungseinrichtungen
- Expertisen, Inbetriebnahmen, Seminare, Wartungen, Netzberechnungen, Instandhaltung

Das Leben ist Vorbild für unsere Produkte und Lösungen.

Sicherer, zuverlässiger Zugang zu effizient genutzter und nachhaltiger
Energie – das sehen wir als grundlegendstes Bedürfnis und Recht aller
Menschen.

Laden Sie unser kostenloses Whitepaper herunter!
Geben Sie den Keycode 72000P auf sereply.com ein.



schneider-electric.at | Energy Automation

Life Is On | Schneider Electric

GEHÖREN SIE DAZU!

**ABONNIEREN
SIE JETZT!**

**FÜR LESER
UND LESERINNEN, DIE
KOMPAKTE INFORMATION
AUF NEUESTEM STAND
HABEN WOLLEN.**

**FÜR UNTERNEHMEN,
DIE IHRE INNOVATIVEN
PRODUKTE VORSTELLEN
WOLLEN.**

**FÜR KOLLEGEN UND
KOLLEGINNEN, DIE
IHRE SICHT DER DINGE
IN BEITRÄGEN UND
FOTOS TEILEN WOLLEN.**

**Die sicherste Verbindung
zu NETZSCHUTZ**

+43 1 345 12 35

office@netzschutz-magazin.com

www.netzschutz-magazin.com

NETZSCHUTZ



Die nächste Ausgabe erscheint
im Dezember 2018:

Schwerpunkt

**TRANSFORMATOR-
DIFFERENTIALSCHUTZ**

Das Magazin für Schutztechnik