

## H1 Geschichte des Stromwandlers, Teil 2

### Anforderungen an Stromwandler

Um den Messfehler möglichst gering zu halten kamen 1907 bereits 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  $\pm 0,5\%$  bzw.  $\pm 40$  oder  $\pm 20$  min festgelegt sind.

Die VDE Kommission für Messinstrumente legte 1921 „Regeln für die Bewertung und Prüfung von Meßwandlern“ vor. Hierin wird u. a. vereinbart:

- 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  $I_1 - I_2$ .

In der 1938 herausgegebenen VDE 0570 wird K-L für die Primär- und k-l für die Sekundärwicklung (nach IEC später P1-P2 und S1-S2) festgelegt. [6]

Um eine merkbare Einbauregel zu schaffen, wurde in der Praxis oftmals zur Sammelschiene K (wie Kraftwerk) und zum Abgang L (wie Leitung) verwandt.

In den 20er Jahren ist in den deutschen amtlichen Beglaubigungsvorschriften angeführt: „Die Nennbürde eines Stromwandlers muß mindestens  $0,6\ \Omega$  bei einer sekundären Nennstromstärke 5 Amp. sein. Für Stromstärken vom Nennwert bis zu dessen fünften Teil darf der Stromfehler  $\pm 0,5\%$ , der Fehlwinkel  $\pm 40$  Minuten nicht überschreiten. Für Stromstärken unter  $1/5$  bis  $1/10$  des Nennwertes darf der Stromfehler  $\pm 1\%$ , der Fehlwinkel  $\pm 60$  Minuten nicht überschreiten.“ [13]

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 Nenn-

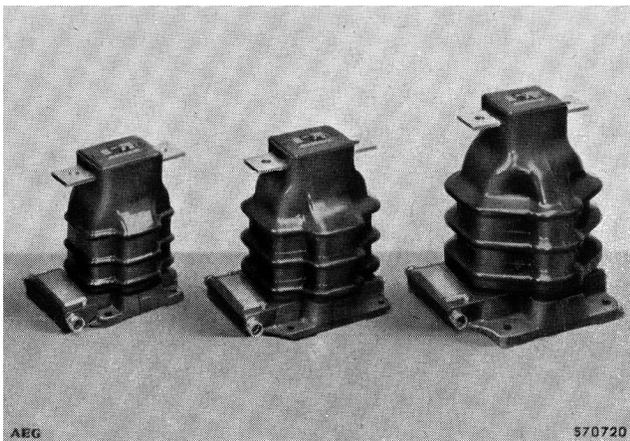


Bild 1: Gießharzisierte Stromwandler, AEG

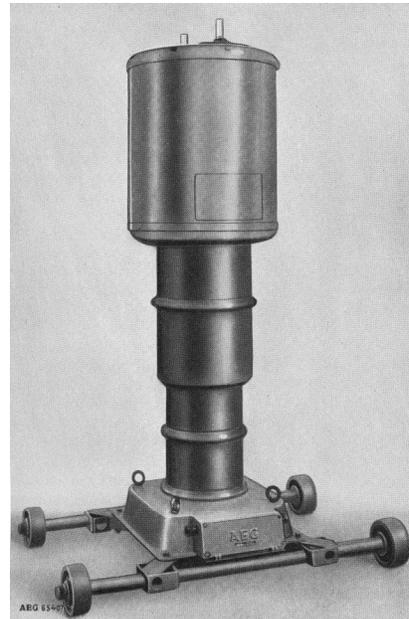


Bild 2: Gießharzstromwandler AY110, AEG

bürde und einem sekundären Leistungsfaktor von 1,0 der Stromfehler bei primärseitigen Nennstrom den Betrag von  $\pm 5\%$  nicht überschreiten, vom 10 fachen Nennstrom ab soll der Sekundärstrom gegenüber dem aus der Übersetzung errechneten stark abfallen. Dagegen darf der Stromfehler zusätzlich bei 40 fachem Nennstrom  $\pm 10\%$  nicht überschreiten. [7] 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  $K_{Ir}$  und jetzt Genauigkeitsgrenzfaktor ALF (Accuracy Limit Factor).

Bürde und Nennbürde waren dagegen schon in den VDE Wandlerregeln von 1922 enthalten. Sie wurden in Anlehnung an einen amerikanischen Ausdruck gewählt. [14]

Für den durch unterschiedliches Wandlerverhalten und ungleicher Bürde entstehenden Nullstrom prägt A. v. Schaubert 1927 den Begriff „Falschstrom“ [15]

In den 50er Jahren werden nach einer Absprache mit den Herstellern Wandler der Reihen 10 bis 30 innerhalb einer Spannungsreihe mit gleichen Anschluss- und Befestigungsmaßen ausgestattet. [16]

Im Jahre 1909 verfasst G. Keinath die erste Doktorarbeit auf dem Gebiet der Messwandler. [15]

### Fertigung von Gießharzwandlern für die Mittel- und Hochspannung

Nachdem in den Kriegs- und Nachkriegsjahren die Entwicklungsarbeiten zum Stillstand gekommen waren, wurde 1953 bei AEG mit Hilfe neuer synthetischer Isolierstoffe, dem so-

genannten Gießharz auf Äthoxylinbasis, ein- und zweipolige Spannungswandler bis Reihe 30 geschaffen. Die Gießharz-isolierung wurde auch für Stromwandler bald angewandt (Bild 1).

1957 liefert AEG für 110 kV den gießharzisierten Stromwandler AY110. [1]

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 fertigt Pfiffner erste kunstharzvergossene Wandler. [17]

**Gleichstromwandler**

Koch & Sterzel bringt 1935 den sogenannten „Gleichstrom-Meßwandler“ für hohe Ströme (5...100 kA) auf den Markt (Bild 3). In einer Aussparung des Kernes ist der Gleichstromanker A (Bild 4) gelagert, der in der Regel von einem Drehstrommotor M angetrieben wird. Die Sekundärwicklung W2 des Wandlers ist mit der Ankerwicklung A und dem Messgerät B in Reihe geschaltet. Der Primärstrom im Leiter L erregt den Eisenkern E so, dass an den Kollektorbürsten des Ankers A eine EMK auftritt. Diese ruft in der Sekundärwicklung W2 einen Strom hervor, der das vom Primärstrom herrührende Feld aufzuheben trachtet. Das sich selbständig einstellende Gleichgewicht der beiden Felder bewirkt dass der Sekundärstrom dem Primärstrom proportional folgt. Als Sekundärnennstrom wurde 5 A gewählt.

Die AEG, entwickelt 1936 einen „Gleichstrom-Meßwandler“, der nach dem von Werner Krämer angegebenen Prinzip (Bild 5) aus einer von dem zu messenden Gleichstrom weit in den Sättigungsbereich vormagnetisierten Drossel mit zwei Teilkernen besteht, die von einer Hilfswechselspannung erregt werden (Bild 5). Bereits ein Jahr später

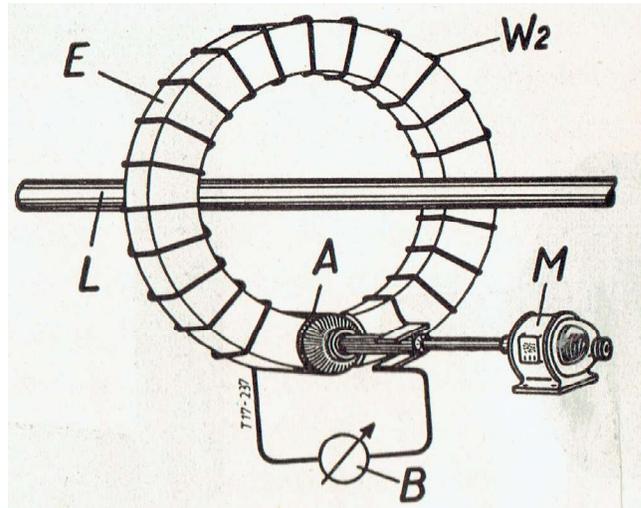


Bild 4: Prinzip Gleichstrom-Meßwandler, Koch & Sterzel

werden für Elektrolyseanlagen Gleichstrom-Messwandler zur Strommessung bis 30 kA gefertigt. [11] Später werden sie bei der Hochspannungs-Gleichstromübertragung eingesetzt. So fertigte RITZ 1976 den ersten Gleichstromwandler für 500 kV (Bild 6). Bei einem Kriechweg von 24.000 mm haben solche Wandler ein einteiliges Porzellan mit einer Höhe von 8 m. [10]

**Stromwandler im Höchstspannungsnetz**

1953 lieferte RITZ neun 380-kV-Stromwandler (Bild 7) mit kapazitivem Spannungswandlerteil an die Königliche Wasserfallgesellschaft nach Nordschweden für das erste Höchstspannungsnetz der Welt mit 380 kV, Stützer-Stromwandler in Kreuzringbauweise, mit hermetischem Luftabschluss, dimensioniert für Betriebstemperaturen von -50 °C bis +60 °C, mit einteiligem, 4 m langen Isolator, mit 4,5 m Gesamthöhe geeignet für stehenden Eisenbahntransport. [2]

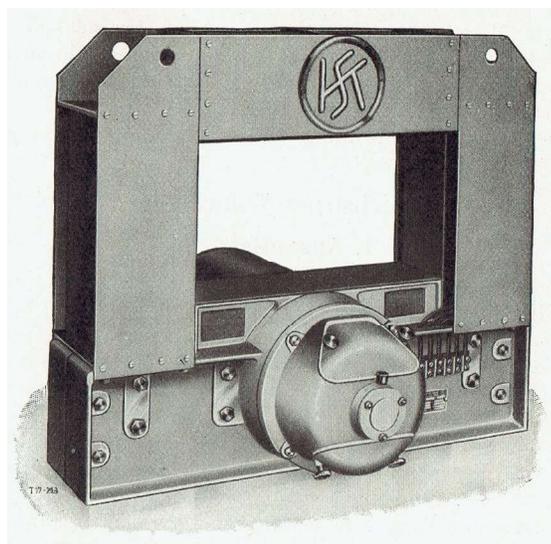


Bild 3: Gleichstrom-Meßwandler mit Motor, Koch & Sterzel

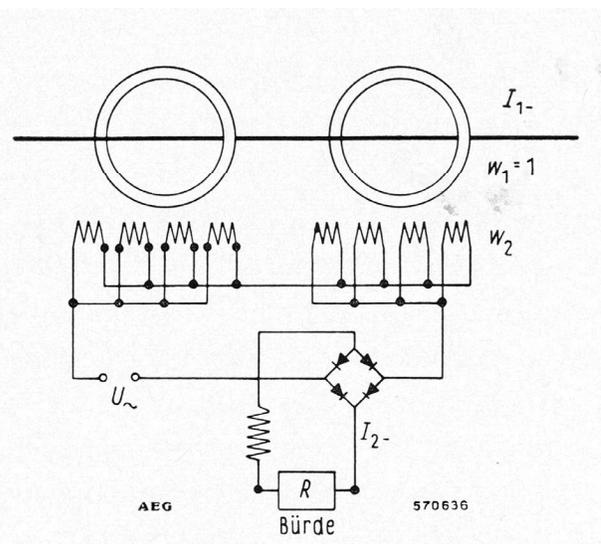


Bild 5: Grundsätzliche Schaltung Gleichstromwandler, Krämer, AEG

1957 erfolgte durch RITZ eine Lieferung an das RWE (Rheinisch Westfälisches Elektrizitätswerk) über 3 Stück 380-kV-Kombiwandler (mit kapazitivem Spannungswanderteil), Die Wandler gehörten zum ersten Teilstück (von Rommerskirchen nach Hoheneck) der zunächst deutschen und später europäischen 420-kV-Verbundleitung. Weitere je 3 gleiche Wandler lieferten Siemens und AEG. [2]

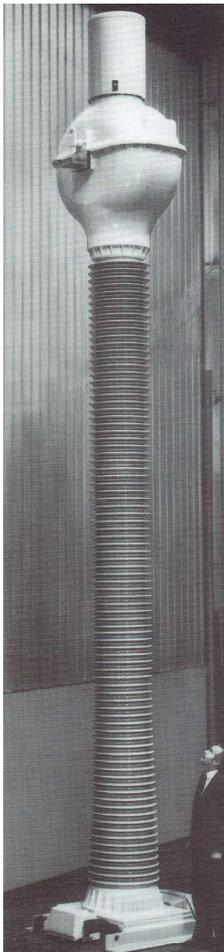
Für das erste 735-kV-Netz in Kanada entwickelte Sprecher & Schuh den in *Bild 8* gezeigten Stromwandler, Übersetzung 2000/5/5/5 A, 3 Relaiskerne, Klasse 10 L 400 bei  $10 \times I_n$  (das entspricht etwa 3 Kernen zu je 200 VA,  $n > 10$ ). [8]

### Nichtkonventionelle Stromwandler

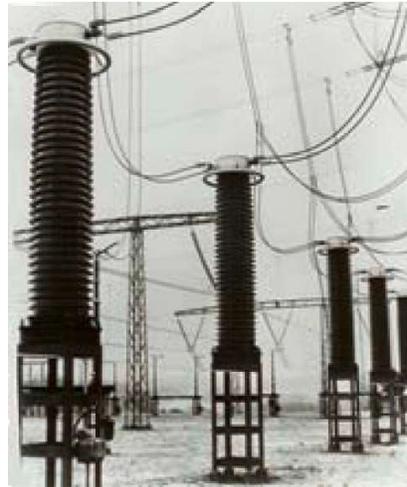
In *Bild 9* sind die Messprinzipien konventioneller und nicht-konventioneller Stromwandler [18] zusammengestellt. *Bild 9a* zeigt den konventionellen induktive Stromwandler, wie er auch heute noch als Standardlösung in 50- bzw. 60-Hz-Elektroenergieübertragungs- und Verteilungsanlagen sowie 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Bahnanlagen gilt. Ein Messprinzip, welches auch die Gleichstrommessung gestattet, benutzt den Hall-Effekt (*Bild 9b*). 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 den 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 (*Bild 9c*) – nach einer Erfindung von Rogowski und Steinhaus im Jahre 1912.

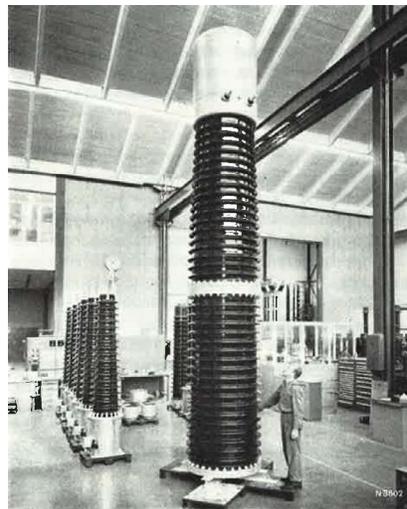
Der große Spannungsunterschied zwischen Primär- und Sekundärseite erfordert eine hohe und teurere Isolation. Daher lag es nahe, einen Niederspannungswandler auf Hochspannungspotenzial zu installieren und den Sekundärwert auf nicht-elektrischem Wege zum Erdpotential zu übertragen. Das analoge Ausgangssignal eines konventionellen Stromwandlers wird digitalisiert und dann über einen Lichtwellenleiter (LWL) zum Erdpotential gebracht, dekodiert und dann digital oder analog angezeigt (*Bild 9a*). Anstelle des Stromwandlers können auch Stromsen-



*Bild 6: Gleichstromwandler, 500 kV, RITZ*



*Bild 7: 380-kV-Stromwandler OSWF 380, RITZ*



*Bild 8: Montage des 735-kV-Stromwandlers S&S, 1964*

soren verwendet werden. Die auf Hochspannungspotenzial befindlichen A/D-Wandler benötigen eine auch bei Netzfehlern vorhandene Hilfsenergie. 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 die Hilfsenergie auf optischen 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 (*Bild 9e*) 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 Lagedifferenz der Polarisationssebenen von Aus- und Eingang kann die Primärstromstärke ermittelt werden. Die Vorstellung magneto-optischen Stromwandlers mit Faradaysensor erfolgte 1966. [19, 20]

Bereits im Jahre 1956 wurde aus der UdSSR und 1962 aus den USA über den Einsatz magneto-optischer Verfahren bei der Strommessung in Hochspannungsanlagen be-

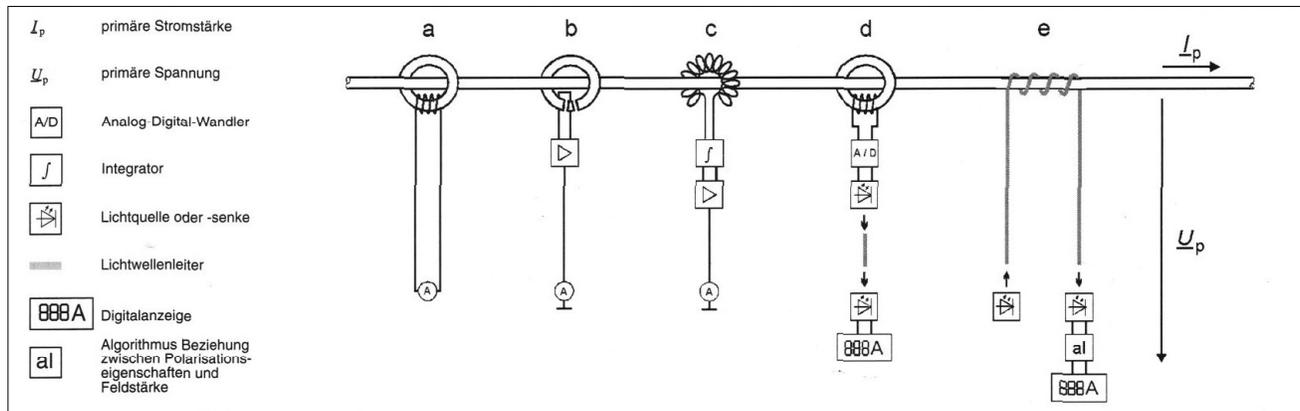


Bild 9: Messprinzipien konventioneller und nichtkonventioneller Stromwandler

a) induktiver Stromwandler, b) Hall-Sonde, c) Rogowski-Spule, d) induktiver Stromwandler mit digitaler, optischer Schnittstelle, e) magnetooptischer Stromwandler (Faraday-Effekt)

richtet. Der erste Prototyp eines unkonventionellen Stromwandlers für Freiluftanlagen war jedoch im Jahre 1965 ein Gerät mit Pulsfrequenzmodulation und Lichtimpulsübertragung, der Traser. [20]

Die ersten aktiven Stromwandler wurden bereits in den sechziger und siebziger Jahren entwickelt. Beim „Traser“-Wandler (Bild 10) wird als Messwertempfänger ein gewöhnlicher Stromwandlerkern mit verringerter Isolation verwendet. Das Wandlersignal wird in ein optisches Signal umgewandelt (E/O-Wandlung) und einen Lichtwellenleiter bzw. ein Faserbündel an die Auswerteeinheit übertragen, wo das Signal in ein elektrisches Signal umgewandelt wird. (O/E-Wandlung).

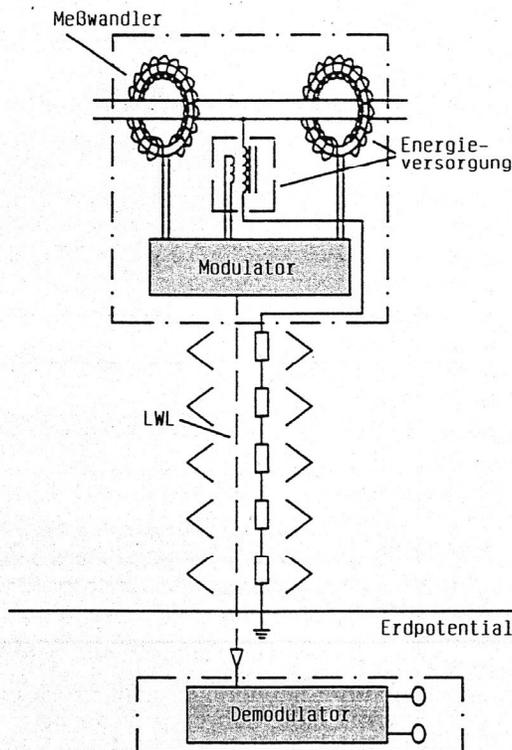


Bild 10: Traser-Stromwandler

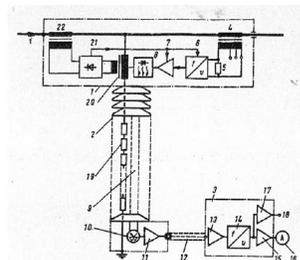


Bild 1 Prinzipschaltbild eines elektronischen Stromwandlers (1965)  
 1 Kopfgehäuse, 2 Stützeisolator, 3 Decodierstück, 4 Meßstromwandler, 5 Bürdenwiderstand, 6 Spannungs/Frequenz-Umsetzer, 7 Impulsverstärker, 8 LED, 9 Glasstab-Lichtleiter, 10 Fototransistor, 11 Signalverstärker, 12 Koaxialkabel, 13 Eingangsverstärker, 14 Frequenz/Spannungs-Umsetzer, 15 Spannungs/Strom-Verstärker, 16 Meßabgang, 17 Spannungsverstärker, 18 Schutzabgang, 19 Widerstandskette, 20 Versorgungstransformator, 21 Gleichrichter, 22 Sättigungsstromwandler

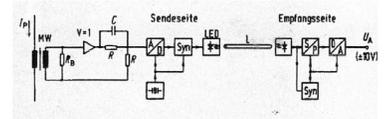


Bild 5 Optoelektronischer Stromwandler mit A/D-D/A-Wandlung (1975)  
 MW Meßstromwandler,  $R_B$  Bürdenwiderstand,  $C$  u.  $R$  Phasenkorrekturschaltung, Syn Synchronisationsschaltung, L Lichtwellenleiter, S/P Serien/Parallel-Wandlung

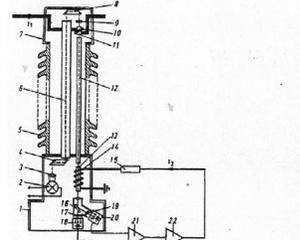


Bild 2 Magneto-optischer Stromwandler mit Faradaysensor (1966)  
 1 Fußgehäuse, 2 Lichtquelle, 3 Linsensystem, 4 Umlenssystem, 5 Stützeisolator, 6 u. 12 Kunststoffrohr, 7 Kopfgehäuse, 8 Umlenssystem, 9, 17 u. 19 Polarisationsfilter, 10 Primärspule, 11 u. 13 Schwerflintglasstab, 14 Kompensationsspule, 15 Bürde, 16 Strahlteiler, 18 u. 20 Fotodiode, 21 Differenzverstärker, 22 Leistungsverstärker

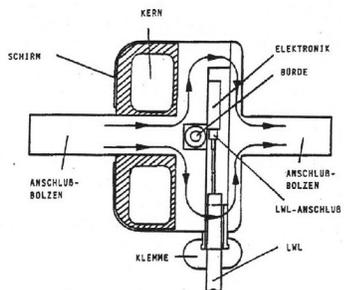


Bild 8 Sensor eines aktiven optischen Stromwandlers mit Rogowskispule (1992)

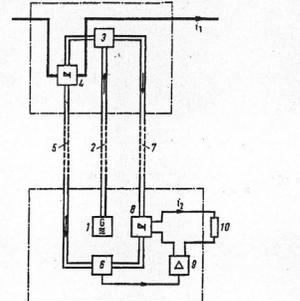


Bild 3 Stromwandler mit Mikrowellenleitern (1971)  
 1 Mikrowellengenerator, 2, 5 u. 7 dielektrischer Wellenleiter, 3 1'-Wellenleiter, 4 u. 8 Modulator, 6 Vergleichsglied, 9 Leistungsverstärker, 10 Bürde

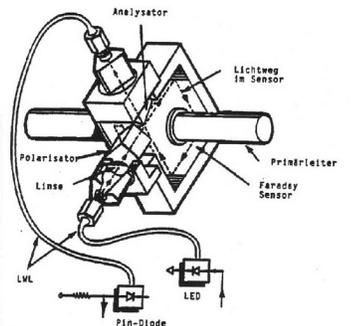


Bild 9 Sensor eines passiven optischen Stromwandlers mit Faradaysensor (1992)

Bild 11: Stromwandler 1965–1995 [3]



Bild 12: Vergleich klassischer Wandler und Sensoren, ABB

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. [9]

Die Fortschritte bei der Herstellung von Lichtleitern ermöglichte 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 [9]

Einen Rückblick auf die unkonventionellen Messwandler 1965 bis 1995 (Bild 11) gewährt *Andreas Braun*, BPT, in [3].

Ende der 90er Jahre suchte man nach Lösungen, die Abmessungen der Wandler für die in der Entwicklung befindlichen Mittelspannungsschaltzellen. Man erinnerte sich des 1912 erfundenen Prinzips der Rogowskispule der Erfassung des Magnetfeldes eines stromdurchflossenen Leiters mit einer eisenlosen Spule. Die klassischen elektromechanischen Schutzrelais werden durch digitale Geräte ersetzt und somit eine neue Umsetzung von Messgrößen im Mikroenergiebereich geschaffen. Bild 12 zeigt eine Gegenüberstellung eines klassischen Stromwandlers und eines Sensors, wie er bei der gasisolierten Mittelspannungsschaltzelle ZX1, ABB, zum Einsatz gelangte. [4]

Die Inbetriebnahme der ersten optischen Stromwandler (aktiver Typ) von ABB fand Mai 1992 statt. Ein passiver optischer Stromwandler wurde Anfang 1993 beim Badenwerk im Umspannwerk Daxlanden (Bild 13) installiert und unter realen Bedingungen erfolgreich getestet.

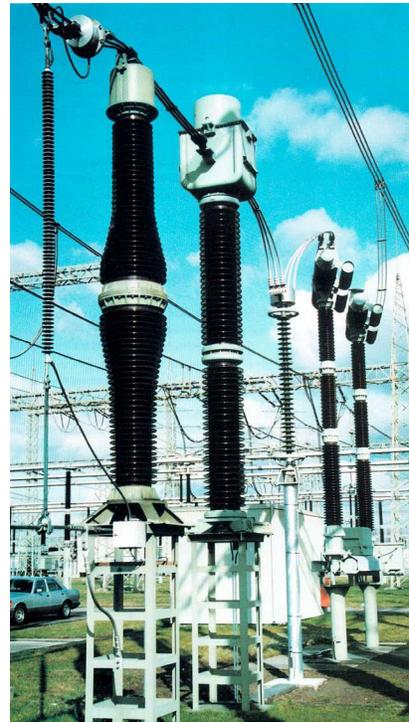


Bild 13: 380-kV-Versuchsfeld, UW Daxlanden, Badenwerk

li nach re:

- aktiver optischer Stromwandler
- konventioneller Spannungswandler
- konventioneller Stromwandler
- passiver optischer Stromwandler
- Leistungsschalter

## Quellen

- [1] Allmendinger, K., Zahorka, R.: Gießharzisierte Strom- und Spannungswandler für 110 kV. AEG-Mitteilungen 55 (1965) 1, 12–16
- [2] Chronik der technischen Entwicklung. Hochspannung. Ritz. 10 S.
- [3] Braun, A.: 30 Jahre unkonventionelle Messwandler: 1965 bis 1995. PTB-Mitteilungen 106 (1996) 3, 193–199
- [4] Voß, G.: Sensoren zur Strom- und Spannungsmessung in Schaltanlagen. ew 100 (2001) 19, 34–37
- [5] Schweder, B.: Forschen und Schaffen. Beiträge der AEG zur Entwicklung der Elektrotechnik bis zum Wiederaufbau nach dem zweiten Weltkrieg. Band 1, 472 S.; Band 2, 472 S. u. Band 3, 520 S., Hrsg. AEG, Berlin 1965
- [6] Regeln für Klemmenbezeichnungen. ETZ 60 (1939) 17, 511–512
- [7] Vorschriftenbuch des Verbandes Deutscher Elektrotechniker. Hrsg. Generalsekretariat des VDE, Dreizehnte Auflage, Stand: 31. Dezember 1925, Verlag von Julius Springer, Berlin: 1926
- [8] Erhart, L.: Stromwandler für 750 kV. Bulletin SEV 55 (1964) 9, 439–442
- [9] Gimber, B.; Kunz, H.; Hirsch, H.: Nichtkonventionelle Wandler, Schlüsselkomponenten für die digitale Stationsleittechnik. Elektrizitätswirtschaft 90 (1991) 6, 250–254
- [10] 50 Jahre RITZ. Erfahrungen und Qualität. Ritz Messwandler Hamburg.
- [11] Zahorka, R.: Die Gleichstromwandler der AEG. AEG-Mitteilungen 55 (1965) 1, 45–52

- [12] Schwarz, H.; Hudasch, M.: Optische Stromwandler – erster Feldversuch im 380-kN-Netz erfolgreich. ABB Technik (1994) 3, 12–18
- [13] Goldstein, I.: Die Meßwandler ihre Theorie und Praxis. Verlag von Julius Springer, Berlin 1928
- [14] Walter, M.: Die Entwicklung der Strom- und Spannungswandler (Messwandler). Elektrizitätswirtschaft 65 (1966) 23, 710–717
- [15] Walter, M.: Strom- und Spannungswandler. Verlag von R. Oldenburg, München und Berlin 1937
- [16] Krauß, H.: Beiträge des Meßwandlerbaus zur Vereinheitlichung der Schaltanlagen. AEG-Mitteilungen 49 (1959)
- [17] Meilensteine. PFIFFNER Messwandler AG
- [18] Seifert, H.; Latzel, H.-G.; Braun, A.: Nichtkonventionelle Strom- und Spannungswandler. PTB –Mitteilungen 112(2002), S. 44–50, September 2002, S. 3–7, Sonderdruck aus H. 1 und 3
- [19] Braun, A.: 30 Jahre unkonventionelle Messwandler: 1965 bis 1995. PTB-Mitteilungen 106 (1996) 3, 193–199
- [20] Marx, E.: Hochspannungs-Praktikum. Verlag von Julius Springer, Berlin 1941
- [21] Balzer, G.: Aufgaben und Entwicklung der Schutztechnik. Schutztechnik – heute und morgen. S. 9–30, VDE Bezirksverein Frankfurt am Main, Arbeitsgemeinschaft vom 4.11. bis 25.11.1996



*Dipl.-Ing. Walter Schossig  
VDE Thüringen  
VDE AK07 „Relais- und Schutztechnik“ und  
Mitarbeit Ausschuss „Geschichte der  
Elektrotechnik“  
[info@walter-schossig.de](mailto:info@walter-schossig.de)  
[www.walter-schossig.de](http://www.walter-schossig.de)*