

Faseroptische Sensoren : Teil 2 : Faseroptische Stromsensoren

Autor(en): **Stierlin, Roland**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **82 (1991)**

Heft 1

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-902913>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Faseroptische Sensoren

Teil 2: Faseroptische Stromsensoren

Roland Stierlin

Ein Trend zur elektronischen Überwachung und Steuerung ist auch bei Hoch- und Mittelspannungsanlagen klar erkennbar. Dieser Trend und die steigenden Bandbreite- und Genauigkeitsanforderungen bei der Messung elektrischer Grössen fördern die Entwicklung einer neuen Generation von Messgeräten, die sich zwangslos in eine elektronische Systemumwelt einfügen sollten. Optische, speziell faseroptische Stromsensoren bieten eine attraktive Lösung für die Strommessung.

Aujourd'hui, une tendance aux systèmes de contrôle et de commande électroniques est visible également dans les installations de hautes et moyennes tensions. Cette tendance et la demande croissante de systèmes de mesure de plus de bande-passante et de précision favorise les développements de nouvelles unités de mesure s'accommodant parfaitement aux systèmes électroniques. Les senseurs optiques, spécialement à fibre-optiques, apportent une alternative attractive pour la mesure pour le mesure du courant.

Adresse des Autors

Dr. Roland Stierlin, Asea Brown Boveri
Forschungszentrum, 5405 Baden.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, dem Leser ein besseres Verständnis der vielfältigen Entwicklung auf dem Gebiet der optischen Stromsensoren zu ermöglichen, aber auch Gründe darzulegen, wieso solche Sensoren in der Hochspannungstechnik von grossem Interesse sind. Nach einer kurzen Beschreibung der konventionellen Stromwandler folgen ein paar allgemeine Bemerkungen über nichtkonventionelle Stromwandler. Die anschliessende kurze Einführung in einige Begriffe der Optik soll dem Leser helfen, nicht nur das Funktionsprinzip der optischen Stromsensoren besser zu verstehen, sondern auch die grundlegenden technischen Probleme zu erfassen. Den Abschluss bildet die Beschreibung zweier moderner Konzepte für faseroptische Stromsensoren. Die dabei getroffene Auswahl ist zweifellos willkürlich und gibt nur einen kleinen Ausschnitt wieder aus der weltweit laufenden Forschungs- und Entwicklungsaktivität. Es sei hier ausdrücklich auf andere Konzepte hingewiesen [1; 2; 3; 4].

Da die Entwicklungsarbeiten im Gange sind, ist es verfrüht, über experimentelle Resultate zu berichten. Dies muss zu einem späteren Zeitpunkt nachgeholt werden.

Konventionelle Stromwandler

Das Messen von Wechselstrom in elektrischen Hoch- und Mittelspannungsnetzen erfolgt zurzeit ausschliesslich mit konventionellen Stromwandlern [5; 6]. Der konventionelle Stromwandler ist ein Transformator, der fast im Kurzschluss betrieben wird, mit einer kleinen, variablen Bürde auf der Sekundärseite. Der Sekundärstrom I_2 ist im Idealfall ein getreues Abbild des Primärstromes I_1 :

$$I_1 = K_n I_2$$

K_n : Nennübersetzung

mit K_n als Nennübersetzung. Die Sekundärseite wird belastet durch direkt angeschlossene Ampèremeter, Stromschreiber, Schutzrelais usw. Verschiedene Wandler, zum Beispiel für die Anzeige, den Schutz oder die Abrechnung, können in einer gemeinsamen, tragenden und isolierenden Struktur vereint werden. Die ideale Stromabbildung wird gestört durch den für die Aufrechterhaltung des Magnetfeldes im Transformator Kern benötigten Magnetisierungsstrom (Leerlaufstrom) und die angeschlossene Bürde. Der entstehende Gesamtfehler enthält einen Amplitudenfehler F_i und einen Phasenfehler δ_i . Für F_i gilt:

$$F_i = \frac{K_n I_2 - I_1}{I_1} 100\% , \quad (2)$$

Stromwandler erfüllen strenge, international festgelegte Genauigkeitsanforderungen. Vier Genauigkeitsklassen sind auszugsweise in Tabelle I aufgeführt. Konventionelle Stromwandler sind bewährte und kostengünstige Strommessgeräte, die über eine lange, wartungsfreie Lebensdauer (>20 Jahre) verfügen.

Um bei Freiluft-Stromwandlern die Sekundärwicklung gegen die Hochspannung zu isolieren und entstehende Wärme abzuführen, werden die Wandler häufig mit Öl gefüllt. Damit bilden sie ein permanentes, wenn auch kleines Sicherheitsrisiko. Durch lokal hohe, elektrische Feldstärken können Teilentladungen ausgelöst werden und sich explosionsartig ausbreiten. Dies führt zur Zerstörung des Stromwandlers und zur Gefährdung der näheren Umgebung.

Genauigkeits- klasse	Verwendungszweck	Anforderung		
			F_i	δ_i
0.1	Präzisions- und Eichwand- ler	$1 \times I_1$	$\pm 0.1\%$	$:\pm 5 \text{ min}$
		$\frac{1}{20} \times I_1$	$\pm 0.4\%$	$:\pm 15 \text{ min}$
0.2	Genauere Leistungsmessung, Energieverrechnung	$1 \times I_1$	$\pm 0.2\%$	$:\pm 10 \text{ min}$
		$\frac{1}{20} \times I_1$	$\pm 0.75\%$	$:\pm 30 \text{ min}$
1	Anzeige, Kontrollzähler Leistungs-, Richtungsrelais	$1 \times I_1$	$\pm 1\%$	$:\pm 60 \text{ min}$
		$\frac{1}{20} \times I_1$	$\pm 3\%$	$:\pm 3^\circ$
5	Überstromschutzregler, Maximalstrom- und Thermorelais	$1 \times I_1$	$\pm 5\%$	—

Tabelle I IEC-Normenauszug (IEC Nr. 185 1966)

Bei Stromwandlern für gekapselte Anlagen ist der Primärleiter mit Vorteil ein reguläres Bauelement der Anlage und nur der Niederspannungsteil des Wandlers wird zusätzlich eingebaut. Die Isolation ist in diesem Falle gewährleistet durch das unter hohem Druck stehende Isoliergas SF₆.

ABB hat eine langjährige Erfahrung im konventionellen Wandlerbau. Bereits 1954 (damals BBC) wurde eine eigene Abteilung für die Herstellung von Messwandlern gebildet. Bis zum Jahre 1966 waren bereits 100 000 und bis 1979 waren 250 000 Messwandler produziert worden und dies

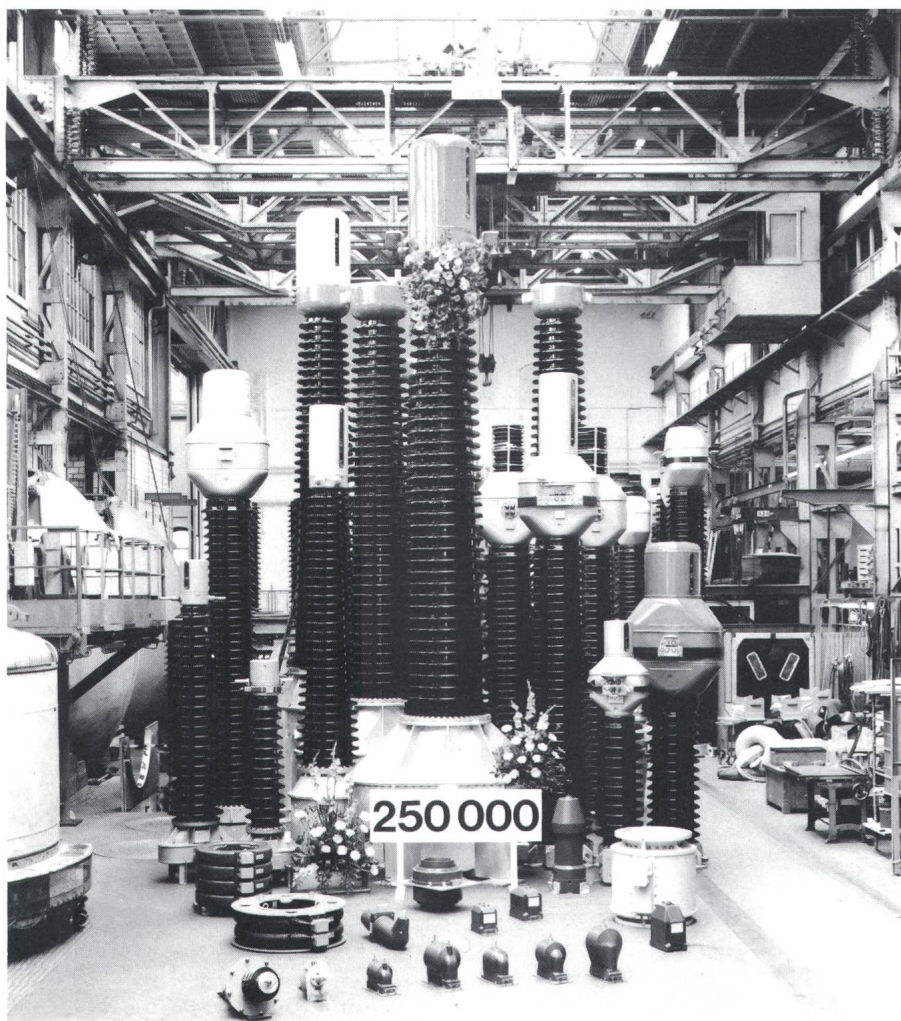


Bild 1 ABB-Sortiment der konventionellen Stromwandler

in einer Vielzahl von Varianten und für verschiedenste Betriebsspannungen (Bild 1). Der grösste je gefertigte Freiluft-Stromwandler war für Kanada bestimmt und für eine Betriebsspannung von 800 kV ausgelegt. Die Grösse dieses Stromwandlers erreicht kolossale Ausmasse, wie dies aus Bild 2 ersichtlich ist.

Nichtkonventionelle Stromwandler

Nichtkonventionelle Stromwandler sind von grossem Interesse, nicht nur für Spezialanwendungen in der Messtechnik und als Ersatz für die in elektrischen Stromversorgungsnetzen eingesetzten, konventionellen Stromwandler [7]. Der Trend zur Erhöhung der Netzspannung führt insbesondere bei Freiluftwandlern zu wachsendem Isolationsaufwand (Bild 2) und zu näherungsweise exponentiell ansteigenden Kosten für Herstellung und Installation. Die Entwicklung im Bereich der Steuerung und Überwachung von Hochspannungsanlagen zeigt, dass eine digitale Systemumwelt Einzug halten wird. Elektromechanische Relais und Stromschreiber werden längerfristig verdrängt. Damit werden die leistungsliefernden, klassischen Messwandler obsolet und das Interesse richtet sich auf Stromsensoren, deren Signalpegel sich besser in eine elektronische Systemumwelt einfügen. Moderne Konzepte für den Netzschutz verlangen Stromwandler mit erhöhter Bandbreite (5–10kHz) und möglichst linearer Kennlinie ohne Sättigungserscheinung bei hohen Überströmen.

Nach ersten Arbeiten an nichtkonventionellen Stromwandlern im Jahre 1956 wurde 1965 in den USA ein erster Prototyp eines nichtkonventionellen Freiluft-Stromwandlers in Betrieb genommen. Der Feldversuch mit dem «Traser» (Transformator + Laser = Traser) verlief durchaus befriedigend, doch erwies er sich als ungeeignet bezüglich Kosten und Lebensdauer. Der Traser und auch modernere Konzepte für nichtkonventionelle Stromwandler zeigen ein einheitliches Bauprinzip. Ein auf Hochspannung liegender Sensorkopf ist über eine elektrisch nichtleitende Verbindung mit der auf Erdpotential stehenden Auswerteinheit verbunden. Die Verbindung überbrückt die Potentialdifferenz und ermöglicht den Informationsaustausch über Mikrowellen-, Funk- oder Lichtsignale (Bild 3).

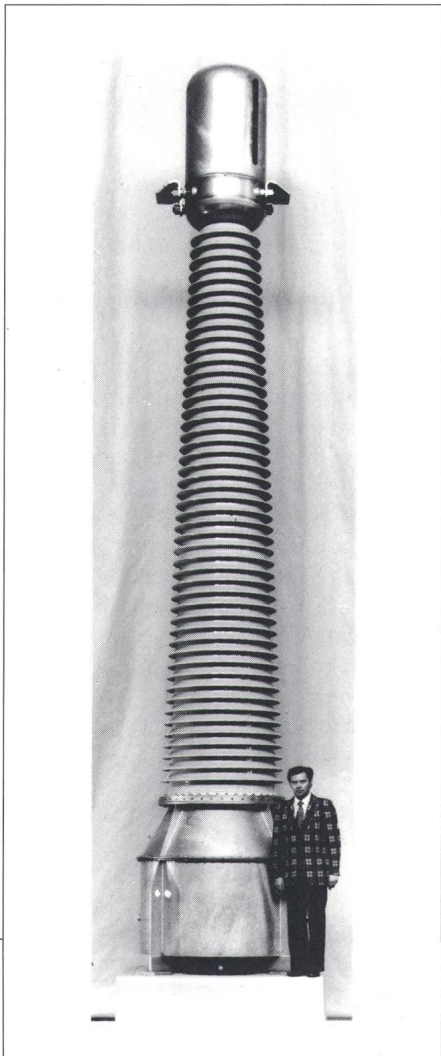


Bild 2 Konventioneller ABB-Stromwandler für 800-kV-Betriebsspannung

weit dieser Ansatz zu einer kostengünstigen Alternative für konventionelle Wandler führt, ist offen. Ein anderes bei ABB verfolgtes Konzept sieht vor, die gleiche Glasfaser für Leistungszufuhr als auch für die Informationsübertragung zu verwenden [9].

Bei gekapselten Anlagen (GIS-Anlagen) sind rein elektronische Stromwandler einsetzbar und zwar ohne besondere und teure Isolationsmassnahmen. Der Wandler ist bei entsprechender Bauweise bereits durch das Isoliergas SF₆ von der Hochspannung isoliert und liegt auf Erdpotential.

Nichtkonventionelle, optische Stromwandler

In optischen Stromwandlern wird der Strom mit Licht gemessen. Das

Licht spürt das durch den Leiter erzeugte Magnetfeld. Die Messung ist passiv und im Sensorkopf wird keine Hilfsenergie benötigt. Das Interesse an optischen Stromwandlern liegt in einer Reihe von Vorteilen, die sie gegenüber konventionellen oder elektronischen Wandlern aufweisen:

- passive Strommessung, keine Hilfsenergie im Sensorkopf,
- inhärente galvanische Trennung,
- Unempfindlichkeit gegen EMI,
- gute Integration in eine elektronisch, digitale Systemumwelt,
- hohe Bandbreite (MHz),
- kleines Volumen und Gewicht,
- keine Explosionsgefahr,
- Kostenvorteile bei hohen Betriebsspannungen.

Nichtkonventionelle, elektronische Stromwandler

Elektronische Freiluft-Stromwandler, wie zum Beispiel der obenerwähnte Traser sind dadurch charakterisiert, dass der Sensorkopf elektronische Komponenten enthält, die für die Messung und Übertragung der Strominformation notwendig sind. Die Leistungsversorgung der Elektronik im Sensorkopf erfolgt durch induktive Auskopplung der Energie aus dem Primärkreis oder durch Energiezufuhr aus der Auswerteinheit (Bild 3).

Bei ABB wurde erfolgreich ein elektronischer Freiluft-Stromwandler realisiert, der in ersten Feldtests die Genauigkeitsanforderungen der IEC Klasse 0.2 erfüllt hat [8]. Die Elektronik im Sensorkopf wird bei diesem Wandlertyp aus dem Magnetfeld des Primärleiters gespeist, und für die Informationsübertragung werden Multimode-Glasfasern eingesetzt. Inwie-

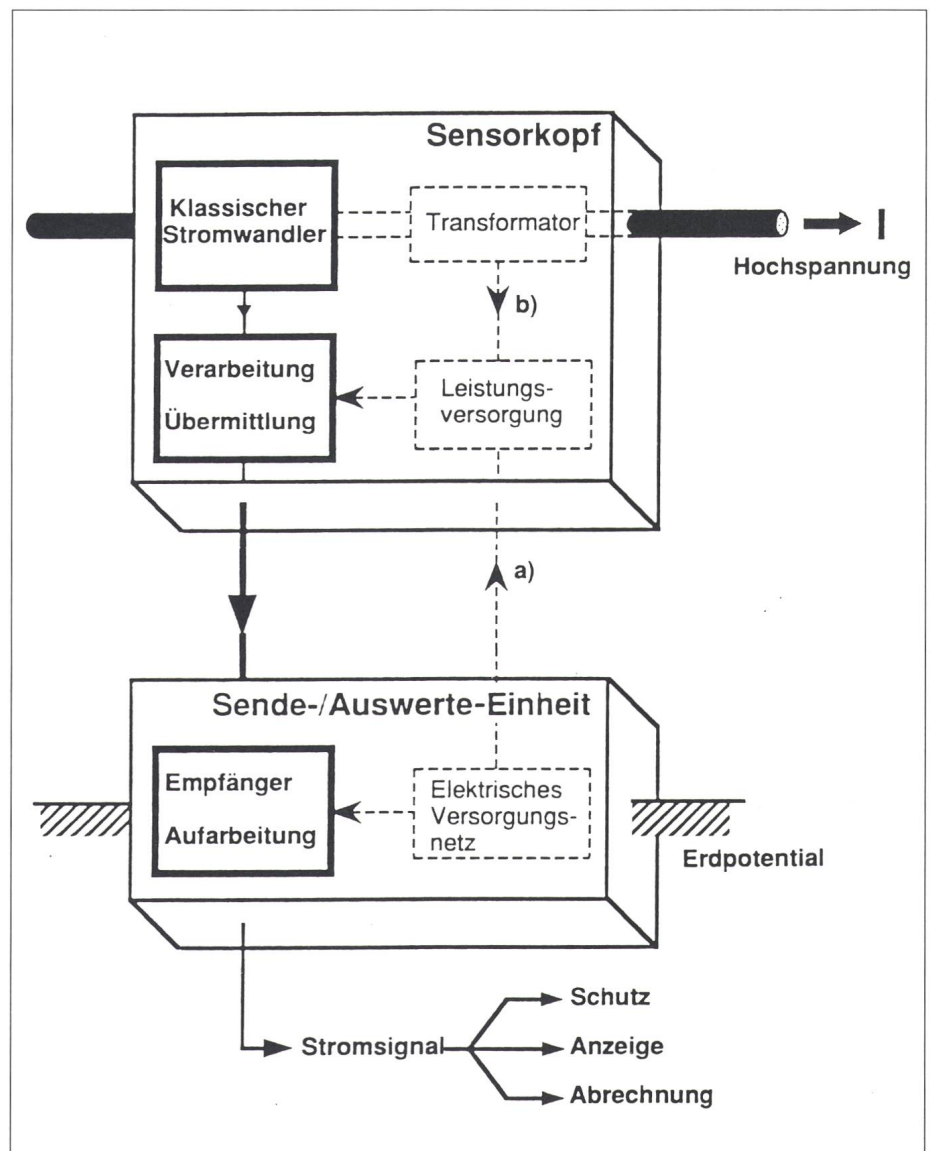


Bild 3 Prinzipschema eines nichtkonventionellen Stromwandlers

Die Verbindungen a und b bezeichnen alternative Möglichkeiten der Leistungsversorgung

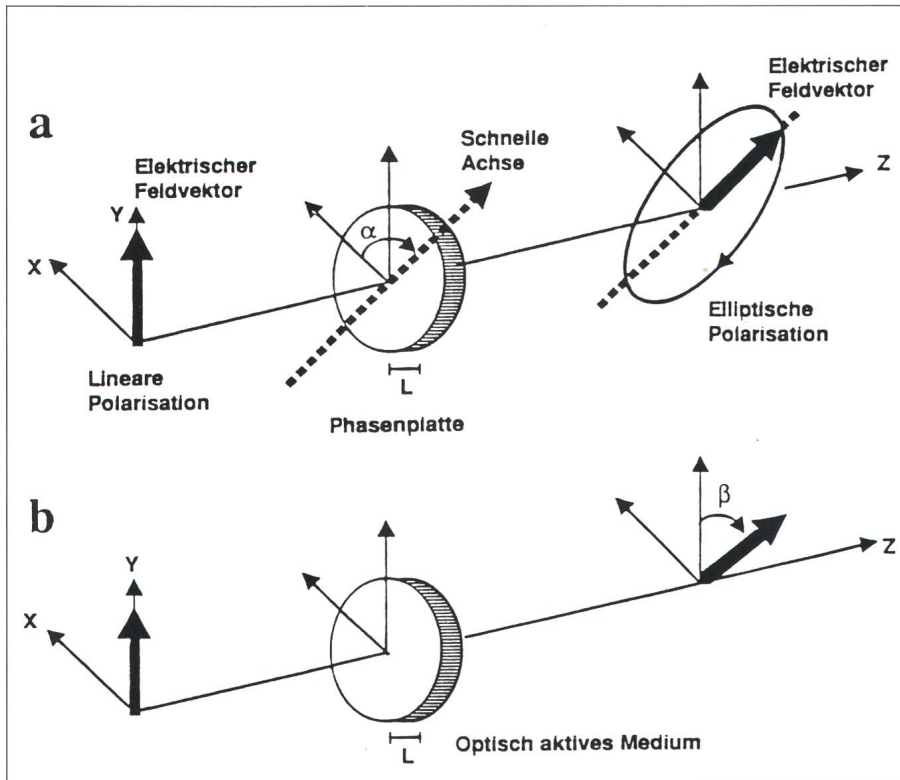


Bild 4 Veränderung des Polarisationszustandes von linear polarisiertem Licht beim Durchgang durch:

- a eine Phasenplatte
- b ein optisch aktives Medium

Die Nachteile der optischen Stromwandler liegen in der Empfindlichkeit gegen Temperaturänderungen und Vibrationen und der noch unsicheren Länge der wartungsfreien Lebensdauer.

Mit dem Beginn des nächsten Kapitels wird die nur historisch begründbare Bezeichnung «nichtkonventioneller, optischer Stromwandler» ersetzt durch «optischer Stromsensor». Damit wird auch berücksichtigt, dass optische Stromsensoren keine Stromwandler im ursprünglichen Sinne mehr sind.

Die Polarisation von Licht

Monochromatisches Licht (Laserslicht) kann näherungsweise als eine elektromagnetische Transversalwelle beschrieben werden, bei der das elektrische und magnetische Feld an jedem Ort und zu jeder Zeit senkrecht zueinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stehen [10]. Monochromatisches Licht hat eine bestimmte Frequenz ν_0 , eine Wellenlänge λ , eine Ausbreitungsgeschwindigkeit c (Phasengeschwindigkeit) und eine Polarisation. Die Wellenlänge λ und die

Ausbreitungsgeschwindigkeit c hängen von den entsprechenden Größen im Vakuum wie folgt ab: $\lambda = \lambda_0/n$ und $c = c_0/n$, wobei n der Brechungsindex ist. In isotropen Medien (z.B. Wasser, spannungsfreie Gläser) ist der Brechungsindex unabhängig von der Ausbreitungsrichtung und der Polarisation des Lichtes. Für das Produkt aus λ und ν_0 gilt $\lambda \cdot \nu_0 = c$. Das Licht ist linear polarisiert, wenn an einem festen Ort das elektrische Feld des Lichtes in einer festen Schwingungsebene schwingt. Linear polarisiertes Licht entsteht beim Durchgang von Licht durch einen (linearen) Polarisator. Gelangt linear polarisiertes Licht senkrecht durch einen zweiten Polarisator (Bild 4) wird die Intensität je nach Winkel α zwischen der Richtung der linearen Polarisation und der Durchlassrichtung des zweiten Polarisators abgeschwächt (Gesetz von Malus):

$$P = P_0 \cos^2 \alpha, \tag{3}$$

P_0 ist die einfallende Lichtleistung. Das Licht ist zirkular polarisiert, wenn das elektrische Feld an einem festen Ort mit der Frequenz des Lichtes rotiert ohne dabei den Betrag zu ändern.

Je nach Drehsinn unterscheidet man zwischen rechts und links zirkular polarisiert. Der allgemeine Fall eines elliptischen Polarisationszustandes liegt vor, wenn die elektrische Feldstärke entlang der Ausbreitungsrichtung auf einer Ellipse rotiert. Ein Lichtstrahl kann auch unpolarisiert sein, wie zum Beispiel das Licht einer Glühlampe.

Doppelbrechung

Von Doppelbrechung spricht man, wenn in einem Material die Phasengeschwindigkeit des Lichts vom Polarisationszustand und der Ausbreitungsrichtung abhängt. Man unterscheidet zwischen linearer und zirkularer Doppelbrechung, wobei letztere auch als optische Aktivität bezeichnet wird. Bei der linearen Doppelbrechung wird nur die uniaxiale Doppelbrechung betrachtet.

Fällt linear polarisiertes Licht senkrecht auf eine geeignet geschliffene Scheibe aus kristallinem Quarz (Phasenplatte), so gibt es zwei Richtungen der Schwingungsebene, in denen die lineare Polarisation des Lichtes durch die Phasenplatte nicht beeinflusst wird. Die zugehörigen Phasengeschwindigkeiten sind jedoch verschieden. Die schnelle Achse bezeichnet diejenige Richtung mit dem kleineren Brechungsindex n_F , die langsame Achse diejenige mit dem größeren Brechungsindex n_S . Die Differenz Δn der beiden Brechungsindizes ist die lineare Doppelbrechung $\Delta n = n_S - n_F$. Für kristallinen Quarz gilt:

$$n_S = 1,5534, n_F = 1,5443, \Delta n = 0,0091, (\lambda_0 = 589 \text{ nm})$$

Mit einer Phasenplatte kann der Polarisationszustand von Licht gezielt verändert werden. Linear polarisiertes Licht, das senkrecht auf eine Phasenplatte trifft, wird entlang den beiden Kristallachsen in zwei senkrechte Feldkomponenten zerlegt. Die beiden zugehörigen, elektromagnetischen Teilwellen gehen unabhängig und mit je eigener Phasengeschwindigkeit durch das Phasenplättchen. Schwingen die Teilwellen zu Beginn im Takt, so ergibt sich nach Durchlaufen der Phasenplatte eine Phasendifferenz $\Delta\beta$ (in Grad):

$$\Delta\beta = \frac{360^\circ}{\lambda_0} \Delta n L \tag{4}$$

L ist die Dicke des Plättchens. Wird L so gewählt, dass $\Delta\beta = 90^\circ + n \cdot$

Material	Wellenlänge λ	Verdet-Konstante V	$dV/dT (T_{RT}^1)$
Quarzglas diamagnetisch	633 nm	$0.26 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{A}$	0.0
	820 nm	$0.15 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{A}$	
	1300 nm	$0.06 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{A}$	
FR 5 Hoga, Spezialglas paramagnetisch	633 nm	$-5.24 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{A}$	$0.018 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{AK}$
	820 nm	$-3.12 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{A}$	
	1300 nm	$-1.24 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{A}$	

1) $T_{RT} = 20^\circ\text{C}$

Tabelle II Verdet-Konstante V für verschiedene Wellenlängen und Materialien, inklusive Temperaturabhängigkeit

180°, entsteht ein $\lambda/4$ -Plättchen. Je nach Drehlage des $\lambda/4$ -Plättchens ergeben sich für das transmittierte Licht unterschiedliche, elliptische Polarisationszustände (Bild 4a).

Lineare Doppelbrechung ist auch in isotropen Materialien beobachtbar, wenn äussere Einflüsse wie elastische Deformation, elektrische oder magnetische Felder dem isotropen Material eine Vorzugsrichtung aufprägen. Wird zum Beispiel ein isotropes Material in einer Richtung leicht gedehnt, so entsteht stressinduzierte Doppelbrechung mit der schnellen Achse in Richtung der Dehnung. Wird das Material gestaucht, so liegt die schnelle Achse senkrecht zur Richtung der Kompression (ebene Spannungsoptik).

Ein Material ist zirkular doppelbrechend, wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeit von rechts und links zirkular polarisiertem Licht verschieden ist. Die Differenz $\Delta n_C = n_R - n_L$ der beiden unterschiedlichen Brechungsindizes n_R und n_L ist die zirkulare Doppelbrechung. Durch zirkulare Doppelbrechung wird die Schwingungsebene von linear polarisiertem Licht um einen Winkel φ gedreht,

$$\varphi = \frac{360^\circ}{\lambda_0} \frac{\Delta n_C}{2} L = D L \quad (5)$$

L ist die Länge des durchlaufenen Weges. Je nach Material ergeben sich völlig verschiedene Werte für D . In einer wässrigen Lösung von Rohrzucker (10 g auf 1 l Wasser) ist $D = 5^\circ/\text{m}$, mit Flüssigkristallen können Werte von $D = 40^\circ/\mu\text{m}$ erreicht werden. In isotropen Materialien kann zirkulare Doppelbrechung auch durch ein Magnetfeld erzeugt werden. Diese Erscheinung wird als Faraday-Effekt bezeichnet und ist für die optische Strommessung von grundlegender Bedeutung.

Der Faraday-Effekt

Bereits im Jahre 1846 entdeckte *M. Faraday*, dass ein magnetisches Feld in einem durchsichtigen, isotropen Material zirkulare Doppelbrechung erzeugt. Die Polarisationsrichtung von linear polarisiertem Licht, welches sich in Richtung des Magnetfeldes bewegt, wird um den Winkel φ_F gedreht,

$$\varphi_F = V H L,$$

$$V: \text{Verdet-Konstante } [V] = \text{ }^\circ/\text{A} \quad (6)$$

wobei V die Verdet-Konstante mit der Einheit $^\circ/\text{A}$ und L die Länge des durchlaufenen Weges im Material ist. Die Drehung erfolgt bei Blick in Richtung des Magnetfeldes im Uhrzeigersinn. Kehrt das Magnetfeld oder der Lichtstrahl seine Richtung, so ändert die Drehung das Vorzeichen. In Tabelle II sind die Werte der Verdet-Konstante für verschiedene Wellenlängen und Materialien aufgeführt. Dia- und paramagnetische Materialien zeigen einen Faraday-Effekt, der sich in Grösse und Temperaturabhängigkeit stark unterscheidet.

Die Erklärung des Faraday-Effektes ist mit einem klassischen Modell der Wechselwirkung von Licht und Materie möglich (Lorentz-Modell). Das elektrische Feld der einfallenden elektromagnetischen Welle regt die Elektronen des Materials zu erzwungenen Schwingungen an. Auf die bewegten Ladungen wirkt infolge des Magnetfeldes die Lorentz-Kraft. Die schwingenden Ladungen präzessieren daher zusätzlich mit der Larmor-Frequenz ω_L . Eine einfallende rechts- bzw. linkszirkular polarisierte Welle erfährt eine Frequenzveränderung von $\omega_0 + \omega_L$ bzw. $\omega_0 - \omega_L$. Unter Berücksichtigung der Dispersion ergibt sich daraus der Faraday-Effekt.

Der Faraday-Effekt ermöglicht eine optische Messung des lokalen Ma-

gnettfeldes. Wird das Magnetfeld durch einen stromführenden Leiter erzeugt, so ist es möglich, von der Grösse des Drehwinkels φ_F auf die Stärke des fliessenden Stromes I zurückzuschliessen. Diese Umrechnung ist aber abhängig von der Geometrie der Leiter-Sensor-Anordnung und reagiert damit empfindlich auf thermisch bedingte Ausdehnung oder Schrumpfung der Anordnung. Zusätzliche Probleme ergeben sich aus der magnetischen Einstreuung durch Nachbarleiter, insbesondere bei hohen Stromspitzen. Eine messtechnisch bessere Lösung ergibt sich, wenn das Faraday-Material um den Leiter angeordnet wird (Bilder 5–8), so dass das Licht den Leiter ein- bzw. N -mal umkreist. Aus Gleichung (6) und dem Ampèreschen Durchflutungsgesetz folgt für den totalen Drehwinkel φ_F in dieser Anordnung:

$$\varphi_F = V N I \quad (7)$$

Der Drehwinkel φ_F ist dabei unabhängig von der genauen Lage des Stromleiters. Bei Wechselstrom ist I durch $I \cdot \sin(2\pi f_0 t)$ zu ersetzen, wobei f_0 die Netzfrequenz ist. Mit dem Faraday-Effekt wird der momentane Stromwert gemessen und nicht etwa der Effektivwert.

Beispiel 1

$$N = 20 \quad I = 2\text{ kA}$$

$$\lambda = 1,3 \mu\text{m} \quad \varphi_F = 2,4^\circ$$

Wie Beispiel 1 zeigt, ist der Faraday-Effekt ein relativ kleiner Effekt und damit auch anfällig auf äussere Störungen. Die Vielzahl der optischen Stromsensoren basieren auf dem Faraday-Effekt in einem durchsichtigen Material (z.B. Glas), welches meist um den elektrischen Leiter herum angeordnet wird. Andere magnetooptische Effekte existieren und sind im Prinzip für optische Strommessung verwendbar. Insbesondere könnte der Zeeman-Effekt in aktiven Glasfasern eine interessante Alternative bieten, doch ist dafür weitere Forschungsarbeit notwendig.

Bei den auf dem Faraday-Effekt beruhenden Stromsensoren lassen sich zwei Hauptklassen ausmachen. Beim massivoptischen Stromsensor ist der Sensorkopf im wesentlichen ein Glasblock und das Licht wird durch Reflexion an den Seitenflächen um den Leiter herum geleitet. Beim faseropti-

schen Stromsensor besteht der Sensorkopf im wesentlichen aus einer auf einen Spulenkörper gewickelten Glasfaser, in der das Licht um den Leiter geführt wird. Der massivoptische Stromsensor wird im folgenden Abschnitt kurz beschrieben.

Der massivoptische Stromsensor

Insbesondere in den USA (Westinghouse ABB gemeinsam mit Tennessee Valley Authority, Square D) und in Japan (Toshiba gemeinsam mit Tokyo Electric Power Company) wird intensiv an einem massivoptischen Stromsensor gearbeitet. Ein erfolgreicher, einjähriger Feldtest von Westinghouse konnte Ende 1988 in den USA abgeschlossen werden [11]. Im Parallelbetrieb mit einem konventionellen Präzisionsstromwandler wurde demonstriert, dass der optische Stromsensor den Anforderungen der Genauigkeitsklasse IEC 0,5 und besser genügt.

Der Aufbau des massivoptischen Stromsensors ist am Beispiel des Westinghouse Sensors in Bild 5 schematisch dargestellt. Licht aus einer LED wird über eine Multimode-Verbindungsfaser zum Sensorkopf ge-

führt. Das aus der Glasfaser austretende, divergente Licht wird durch eine Linse (SLF, für Selfoc Lens) parallel gerichtet und durch den anschließenden Polarisator linear polarisiert. Nach einmaliger Umrundung des elektrischen Leiters wird das Licht über einen weiteren Polarisator in eine zweite Multimode-Verbindungsfaser eingekoppelt. Die Durchlassrichtung des zweiten Polarisators ist um 45° gegen die Polarisationsrichtung des austretenden Lichtes gedreht. Fließt ein Strom, so ergibt sich mit dem Gesetz von Malus (3) und $\alpha = 45^\circ + \varphi_F$, das folgende elektrische Signal:

$$S = S_o (1 - \sin(2\varphi_F)) = S_{DC} - S_{AC} \quad (8)$$

S_o ist proportional zur Lichtleistung. Um unabhängig von optischen Leitungsverlusten und Intensitätsschwankungen der LED zu sein, kann das Verhältnis der beiden Teilsignale (S_{DC} , S_{AC}) gebildet oder das DC-Signal dazu verwendet werden, die optische Leistung der LED auf einen konstanten Wert zu regeln. Nachteilig wirken sich beim massivoptischen Stromsensor die hohen Herstellungs-

kosten für den Glasblock und die geringe geometrische Flexibilität aus. Die bei nur einem Lichtumgang und kleinen Strömen geringe Faraday-Drehung erfordert eine aufwendige Elektronik.

Der faseroptische Stromsensor

An der Entwicklung des faseroptischen Stromsensors wird international seit Ende der siebziger Jahre gearbeitet [4; 12; 13]. Die enorme Entwicklung der Optoelektronik und der Glasfaser-Herstellungstechnologie hat in den letzten Jahren zu deutlich verbesserten Komponenten geführt. Dies rückt die erfolgreiche Realisierung eines faseroptischen Stromsensors in greifbare Nähe. So stehen zum Beispiel zuverlässige, starke Halbleiterlasersquellen, rauscharme Photodioden, neuartige Polarisatoren und speziell optimierte Singlemode-Sensor- und Verbindungsfasern zur Verfügung. Eine stark verbesserte Glasfaser-Verbindungstechnologie ist ein weiterer wichtiger Schritt zur Praxistauglichkeit.

Für die genaue Messung des Faraday-Effektes in der Sensorfaser muss der Polarisationszustand (linear oder zirkular polarisiert) entlang der Glasfaser genau definiert bleiben, was den Einsatz einer Singlemode-Glasfaser auch für die Zuleitung erforderlich macht. Die polarisationserhaltende Singlemode-Glasfaser (HB-Glasfaser), welche linear polarisiertes Licht über längere Strecken (>100 m) fast unbeeinflusst durch äussere Störungen überträgt, eignet sich sehr gut für die Lichtzuleitung, aber auch für die Übermittlung der in der Faraday-Rotation enthaltenen Strominformation. Bei der Sensorfaser ergab sich das Problem, dass zuerst die hohe, intrinsische Doppelbrechung in Standard Singlemode-Glasfasern ($10^\circ \dots 100^\circ/\text{m}$) reduziert werden musste. Durch sorgfältige Kontrolle und Optimierung des Herstellungsprozesses oder durch Verdrillen der noch weichen Glasfaser während des Ziehprozesses gelang es, Doppelbrechungswerte von unter $1^\circ/\text{m}$ zu erhalten. Diese sogenannten LB-Glasfasern (LB: Low Birefringence) sind kommerziell erhältlich. Neuerdings wird eine weiterentwickelte Version hergestellt, die Twisted-LB-Glasfaser. Eine LB-Glasfaser wird dabei im kalten Zustand nochmals verdrillt und diese Verdrillung durch Aufbringen eines zweiten Plastikman-

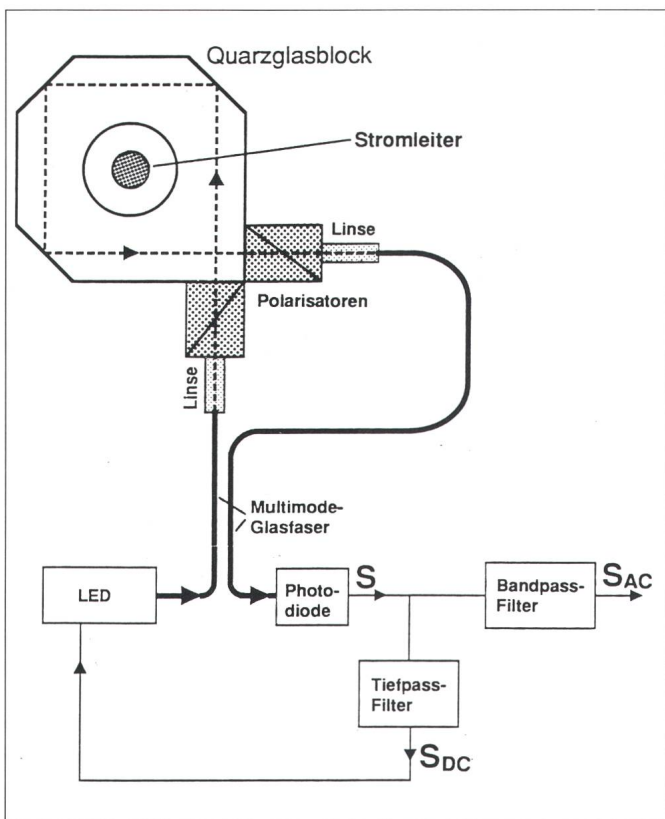


Bild 5 Aufbau des massivoptischen Stromsensors, wie er bei Westinghouse entwickelt wurde

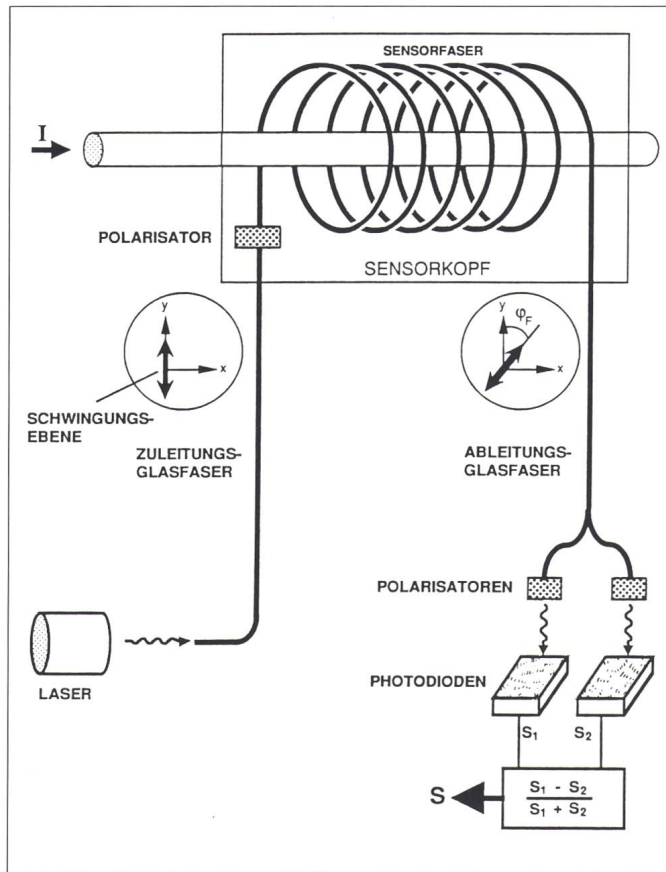


Bild 6
Principalschema eines faseroptischen Stromsensors mit polarimetrischer Detektion

tels fixiert. Twisted-LB-Glasfasern sind relativ unempfindlich gegen äussere Einflüsse und können problemlos um den Leiter gewickelt werden (siehe nächster Abschnitt). Eine Ideallösung ist mit der HB-Spun-Glasfaser in Aussicht, aber noch sind produktionstechnische Hindernisse wegzuräumen.

Für die Detektion der Faraday-Rotation kann die in Bild 6 dargestellte polarimetrische Detektion verwendet werden. Der Lichtstrahl wird nach Durchlaufen der Glasfaserwicklungen in zwei gleiche Teile aufgespalten. Beide Teilstrahlen gelangen durch einen Polarisator auf je eine Photodiode. Die beiden Polarisatoren stehen senkrecht aufeinander und sind so orientiert, dass ohne Strom gleichviel Licht durch beide Polarisatoren geht. Fließt ein Strom, so ändert sich die Lichtstärke in den beiden Teilstrahlen. Bildet man das Verhältnis von Differenz und Summe der beiden Photodiodensignale, so ergibt sich im Idealfall das folgende, normierte Signal:

$$S = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} = \sin(2\varphi_F) \approx 2\varphi_F = 2VNI \sin(2\pi f_0 t) \quad (9)$$

Die besondere Attraktivität des faseroptischen Stromsensors liegt im geringen Volumen und Gewicht sowie der geometrisch flexiblen und potentiell kostengünstigen Bauweise des Sensorkopfes.

Induzierte lineare Doppelbrechung

Wird die LB-Glasfaser um den Stromleiter gewickelt, so entsteht durch das Biegen eine stressinduzierte Doppelbrechung (schnelle Achse in radialer Richtung), die mit dem Faraday-Effekt störend interferiert. In diesem Fall wird das Ausgangssignal S für den in Bild 6 dargestellten Stromsensor nicht mehr durch (9), sondern durch folgenden Ausdruck wiedergegeben:

$$S = 2\varphi_F \frac{\sin \gamma}{\gamma}, \quad (10)$$

$$\gamma = \sqrt{(2\varphi_F)^2 + \Delta\beta_L^2}$$

Die Phasendifferenz $\Delta\beta_L$, die sich durch die biegeinduzierte Doppelbrechung ergibt, hängt ab von der Wellenlänge λ , dem Biegeradius R , dem

Glasfaser-Durchmesser d und der Wicklungszahl N ,

$$\Delta\beta_L = 76,4 N \frac{d^2}{\lambda R} \frac{m^2}{\mu m m} [^\circ] \quad (11)$$

Beispiel 2

$N = 20, I = 2 \text{ kA}, d = 80 \mu\text{m}, \lambda = 1,3 \mu\text{m}, R = 10 \text{ cm}$

Doppelbrechung: $\Delta\beta_L = 75,2^\circ$
Signal ohne Doppelbrechung: $S = 0,084$
Signal mit Doppelbrechung: $S = 0,06$

Nebst der Verkleinerung des nutzbaren Sensorsignals S um zirka 26% in Beispiel 2 wird durch die biegeinduzierte Doppelbrechung auch eine unerwünschte Temperaturabhängigkeit eingeführt. Für den relativen Temperaturkoeffizienten gilt:

$$\frac{1}{\Delta\beta_L} \frac{d\Delta\beta_L}{dT} \approx 5,7 \cdot 10^{-4} \frac{1}{^\circ\text{C}} \quad (12)$$

Wird die LB-Glasfaser mit der Wicklung um den Stromleiter zusätzlich noch verdreht (Twisted-LB-Glasfaser), so wird der Einfluss der biegeinduzierten Doppelbrechung stark vermindert. Für das Sensorsignal S gilt in diesem Fall, bei gleichem Sensoraufbau wie bisher, ein ähnlicher Ausdruck wie (10), nur das zur Faraday-Rotation die durch die Verdrehung erzeugte optische Drehung φ_D addiert werden muss:

$$S = 2(\varphi_F + \varphi_D) \frac{\sin \gamma}{\gamma}, \quad (13)$$

$$\gamma = \sqrt{(2(\varphi_F + \varphi_D))^2 + \Delta\beta_L^2}$$

Die Drehung φ_D ist proportional zur mechanischen Verdrehung τ und der Länge L der Glasfaser, $\varphi_D = 1/2 \cdot g \cdot \tau \cdot L$, mit $g = 0,15$. Für den Stromsensor wird die Verdrehung so gewählt, dass die induzierte optische Aktivität viel grösser ist als die induzierte lineare Doppelbrechung. Wird der Detektor noch so orientiert, dass bei fehlendem Strom das Ausgangssignal Null ist, so vereinfacht sich (13) näherungsweise auf den idealen Ausdruck (9):

$$S \approx 2\varphi_F = 2NI \sin(2\pi f_0 t) \quad (14)$$

Beispiel 3

Daten siehe Beispiel 2,
 $\tau = 10 \text{ Umdrehungen/m}, L = 2\pi R = 12,6 \text{ m}$
 $\varphi_D = 3402^\circ$ und
 $2\varphi_D = 6804^\circ \gg \Delta\beta_L = 75,2^\circ$

Die optische Drehung φ_D ist wie die biegeinduzierte Doppelbrechung temperaturabhängig. Der relative Temperaturkoeffizient ist näherungsweise bekannt:

$$\frac{1}{\varphi_D} \frac{d\varphi_D}{dT} \cong 1,1 \cdot 10^{-4} \frac{1}{^\circ\text{C}} \quad (15)$$

In einem Temperaturbereich von $\pm 50^\circ\text{C}$ ändert sich der Drehwinkel im obigen Beispiel um $\pm 18,7^\circ$. Die sich daraus ergebende Veränderung des Arbeitspunktes muss entweder aktiv mit einer zusätzlichen Dreheinheit nachgeregelt werden oder eine Änderung des Konzepts für den faseroptischen Stromsensor (Bild 6) wird notwendig. Es ist bekannt, dass bei der Spiegelung des Lichts am Ende der Twisted-LB-Glasfaser die erzeugte Drehung rückgängig gemacht wird (reziproker Effekt), dass dies aber nicht für die Faraday-Drehung gilt, welche dabei verdoppelt wird (nicht-reziproker Effekt). Durch Spiegelung des Laserlichtes am Glasfaserende wird die Drehung φ_D rückgängig gemacht und damit die Temperaturabhängigkeit eliminiert. Am Sensoreingang ergibt sich jetzt neu das Problem der Auskopplung des Lichtes aus dem Zuleitungskanal.

Zwei grundsätzlich verschiedene Konzepte für faseroptische Stromsensoren sollen in den folgenden Abschnitten kurz vorgestellt werden.

Der polarimetrische Sensortyp

In Bild 7 wird ein von ABB verfolgtes Konzept für einen faseroptischen Stromwandler vorgestellt. Polarisiertes Licht aus einer Halbleiter-Lichtquelle (z.B. Laserdiode) wird in eine direkt an die Quelle integrierte HB-Glasfaser eingekoppelt. Die HB-Glasfaser ist dabei so orientiert, dass ihre optische Achse parallel zur Polarisationsrichtung steht. Das durch die HB-Glasfaser übertragene, linear polarisierte Licht wird im Sensorkopf über einen integriert-optischen Y-Verzweiger in die Sensorfaser (Twisted-LB-Glasfaser) eingekoppelt. Die Polarisationsrichtungen dieses Y-Verzweigers und der Verbindungsstellen mit den Glasfasern sind dabei von kritischer Bedeutung.

Die Sensorfaser ist an einem Ende verspiegelt und reflektiert das einfallende Licht in die Sensorfaser zurück. Der Spiegel ist so ausgeführt, dass ein Bruchteil des Lichtes transmittiert wird. Dieses Licht wird über einen Polarisator und ein einfaches optisches System auf eine Multimode-Glasfaser abgebildet. Der Polarisator ist so orientiert, dass er zum Beispiel bei einer Temperatur von 20°C unter 45° zur Polarisationsrichtung des einfallenden Lichtes steht. Da die Sensorfaser eine Twisted-LB-Glasfaser ist,

dreht sich die Polarisationsrichtung wie bereits erwähnt mit der Änderung der Temperatur und macht damit eine einfache Temperaturmessung möglich. Das reflektierte Licht wird im Y-Verzweiger in die Ableitungs-HB-Glasfaser ausgekoppelt. Die optische Achse dieser HB-Glasfaser ist genau um 45° gedreht, bezüglich der optischen Achse der Zuleitungs-Glasfaser. Das Licht wird danach auf einen polarimetrischen Detektor geführt, der gegenüber der HB-Glasfaser so orientiert ist, dass man ein zu (9) analoges Ausgangssignal erhält, aber als Folge der Spiegelung mit verdoppelter Faraday-Rotation.

Es soll hier noch kurz auf zwei weitere Konzepte für polarimetrische Stromsensoren hingewiesen werden. In einem Fall wird nur eine Sensorwicklung verwendet und eine Erhöhung der Faraday-Rotation dadurch erzielt, dass das Licht in der Wicklung mehrere Male hin und zurück geführt wird. Dies wird durch teilweise Verspiegelung der Sensorfaser an Anfang und Ende erreicht. Ein zweites Konzept beruht auf der Verwendung einer HB-Spun-Glasfaser als Sensorfaser. Die biegeinduzierte Doppelbrechung interferiert bei dieser Sensorfaser nicht mit dem Faraday-Effekt, was eine Verdrillung unnötig macht. Eine Konfiguration wie in Bild 6 wird wieder möglich. Experimentelle Resultate haben die erwarteten Eigenschaften der HB-Spun-Glasfaser bestätigt, doch ist die erhebliche Temperaturabhängigkeit noch störend. Eine weitere Entwicklung ist notwendig.

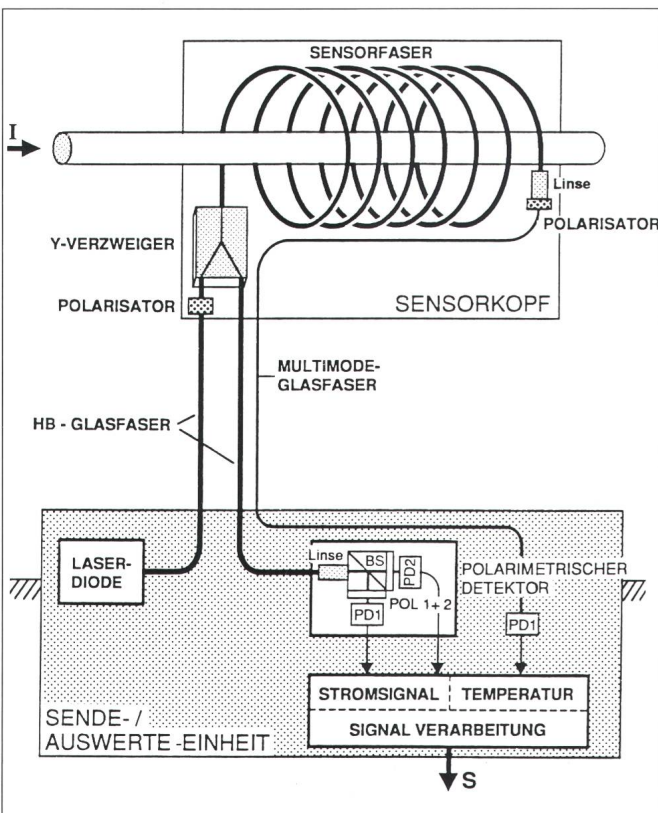


Bild 7
Aufbau eines faseroptischen Stromsensors mit polarimetrischer Detektion.

Dieser Typ wird zur Zeit bei ABB entwickelt.
BS Strahlteiler
PD Photodiode
POL Polarisor

Der Sagnac-Sensortyp

Nebst dem polarimetrischen Sensortyp wurde bereits Ende der achtziger Jahre ein anderes, im Aufbau und Verständnis etwas schwierigeres Konzept entwickelt, das sich eng am faseroptischen Kreisler orientiert [14]. Der Sagnac-Stromsensor wurde auch in der Schweiz intensiv untersucht, insbesondere am Institut de Microtechnique (IMT), Université Neuchâtel, bei Prof. Dändliker in Zusammenarbeit mit ABB, aber auch an der ETH Lausanne bei Prof. Robert.

Ein möglicher Grundaufbau des Sagnac-Stromsensors ist in Bild 8 dargestellt und entspricht in seinen Grundzügen dem Sagnac-Interferometer. Linear polarisiertes Laserlicht wird in beiden HB-Glasfasern zum Sensorkopf und dort über zwei $\lambda/4$ -Platten in die Sensorfaser geführt. Die beiden

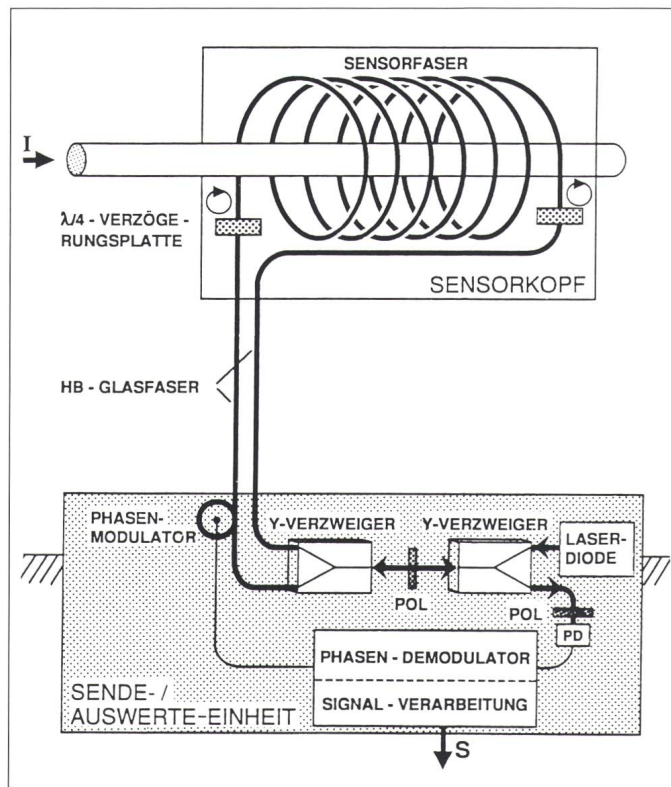


Bild 8
Aufbau eines
faseroptischen
Stromsensors als
Sagnac-
Interferometer.
 Dieser Typ wird
 zurzeit bei ABB
 gemeinsam mit dem
 IMT entwickelt.

Dies gilt nur, wenn die Länge der Sensorfaser mit der Stärke und der Frequenz der Phasenmodulation optimal abgestimmt ist.

Der Vorteil des auf dem Sagnac-Interferometer aufbauenden Stromsensors besteht darin, dass er zwei unabhängige Lichtstrahlen für die Strommessung verwendet, wobei der eine als Referenz für den anderen dient. Damit ergibt sich eine hohe Gleichaktunterdrückung für reziproke Störeffekte, wie zum Beispiel induzierte lineare Doppelbrechung. Nicht-reziproke Effekte, wie der Faraday-Effekt oder der Sagnac-Effekt beim optischen Kreislauf, können daher deutlich störungsfreier gemessen werden. Erste Laborversuche haben gute Resultate gezeigt, weitere Entwicklungsarbeiten sind im Gange.

Danksagung

Für das Zustandkommen der vorliegenden Arbeit möchte der Autor allen Mitarbeitern der Gruppe CRBE.3 für ihre Mithilfe in vielen Diskussionen sowie den Herren Prof. René Dändliker und Guido Frosio vom IMT für zahlreiche Anregungen herzlich danken.

Literatur

- [1] G.W. Day et al.: Annealing of bend-induced birefringence in fiber-optic current sensors. Proceeding IOOC-ECOC (1985) S. 871.
- [2] S.C. Rashleigh: Magnetic-field sensing with a single-mode fiber. Optics Letters 6 (1981) S. 19.
- [3] T. Sawa et al.: Development of optical instrument transformer. IEEE Trans. on Power Delivery (1990) S. 380.
- [4] P. Royer et al.: Capteur de courant à fibre-optic. RGE Nr. 4 (1990) S. 176
- [5] A.J. Schwab: Hochspannungs Messtechnik. Springer Verlag 1981.
- [6] BBC Druckschrift Nr. CH-A-063 400 D: Stromwandler. Allgemeine Erläuterungen.
- [7] W. Müller, Unkonventionelle Messwandler für Höchstspannungsanlagen ETZ-A 93 (1972) S. 362.
- [8] G. Mastner et al.: A new family of electronic current transducers. CIGRE SC 34 Meeting, Turku Finnland 1987.
- [9] M. Adolfson: EHV series capacitor banks. A new approach to platform to ground signaling, relay protection and supervision. IEEE Trans. on Power Delivery 4 (1989) S. 1369.
- [10] D.S. Klinger et al.: Polarized light in optics and spectroscopy. Academic Press 1990.
- [11] T.W. Cease et al.: A magneto-optical current transducer. IEEE Trans. on Power Delivery 5 (1990) S. 548.
- [12] A.J. Rogers: Optical-fiber current measurement. Int. J. of Optoelectronics 3 (1988) S. 391.
- [13] S. Donati et al.: Magneto-optical fiber sensor for electrical industry: analysis of performance. IEE Proceedings 135 (1988) S. 372.
- [14] G. Frosio, R. Dändliker: Magneto-optic current sensors, heterodyne detection and Sagnac interferometer. Interner Bericht IMT (1989).

$\lambda/4$ -Platten stehen unter 45° zur Richtung der linearen Polarisation in der HB-Glasfaser, so dass auf beiden Seiten rechtszirkular polarisiertes Licht in die Sensorfaser gelangt. Die Sensorfaser ist zum Beispiel eine Twisted-LB-Glasfaser. Beim Durchgang durch die zweite $\lambda/4$ -Platte wird das Licht wieder vom zirkularen in den linearen Polarisationszustand zurückverwandelt. Die Polarisationsrichtung des austretenden Lichtes ist dabei parallel zu derjenigen des eintretenden. Das Licht wird über die beiden HB-Glasfasern zurückgeführt und in der Sende-Auswert-Einheit in einem ersten Verzweiger vereinigt und über einen Eingangspolarisator im zweiten Verzweiger vom Einganglichtpfad ausgekoppelt. Die beiden Verzweiger und der Eingangspolarisator sind notwendig, damit der Sensor reziprok ist. Reziprozität bedeutet in diesem Fall, dass die Phase der beiden ausgekoppelten Lichtstrahlen nicht davon abhängen, ob sie rechts oder links herum durch den Sensorkopf laufen.

Das Messsignal ist im Falle des Sagnac-Stromsensors nicht die Drehung der Polarisationsrichtung – diese ist durch die Orientierung der HB-Glasfasern fest vorgegeben –, sondern der Phasenunterschied der beiden Lichtstrahlen wird durch Interferenzbildung gemessen. Diese Phasendifferenz ist bei fehlendem Strom gleich Null. Fließt ein Strom, so erzeugt das

entstehende Magnetfeld eine nichtreziproke Phasenverschiebung $\Delta\beta$, die gegeben ist durch

$$\Delta\beta = 2 \varphi_F = 2 N V I \quad (16)$$

Aus messtechnischen Gründen sind kompliziertere Detektionsschemata notwendig. So wird zum Beispiel ein Phasenmodulator verwendet, der in eine der HB-Glasfaserzuleitungen eingebaut wird. Dazu kann ein Stück HB-Glasfaser auf einen Piezostretcher gewickelt und festgeklebt werden. Die Phase beider Lichtstrahlen wird durch den Modulator phasenmoduliert. Durch den Laufzeitunterschied, der dadurch entsteht, dass der rechts und der links umlaufende Lichtstrahl nicht zur gleichen Zeit den Modulator passieren, wird die Phase der beiden Lichtstrahlen nicht im gleichen Takt moduliert. Dies führt zu einer periodischen Änderung des Interferenzsignals. Analysiert man das Spektrum des Interferenzsignals, so findet man das für ein phasenmoduliertes Signal typische Spektrum mit einem DC-Anteil und AC-Anteilen bei der Modulationsfrequenz sowie höheren Harmonischen. Beschränkt man sich auf den DC- und den AC-Anteil bei der Modulationsfrequenz, so lässt sich durch Verhältnisbildung ein zu (9) analoges Signal gewinnen:

$$S = 1,16 \sin(2 \varphi_F) \quad (17)$$

Schweizerischer Elektrotechnischer Verein
Association Suisse des Electriciens
Associazione Svizzera degli Elettrotecnici
Swiss Electrotechnical Association



Wirksame Blitzschutzanlagen



Blitzschutzanlagen sind nicht billig. Sie können sogar teuer zu stehen kommen, wenn unsachgemäss geplant und ausgeführt, denn nachträgliche Änderungen sind immer mit hohen Kosten verbunden. Zudem besteht die Gefahr, dass derartige Anlagen im Ernstfall ihren Zweck nicht erfüllen.

Wir kennen die Probleme des Blitzschutzes und die optimalen Lösungen hierfür.

Wir stehen Privaten, Ingenieurunternehmen und kantonalen Instanzen zur Verfügung für Planung, Beratung, Kontrollen, Branduntersuchungen und Instruktionkurse.

Auskunft: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein, Starkstrominspektorat
Seefeldstrasse 301, Postfach, 8034 Zürich
Telefon 01/384 9111 - Telex 817431 - Telefax 01/55 14 26