Eine Revolution in der Gleichstrommessung

Autor(en): **Bohnert, Klaus / Guggenbach, Peter**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **96 (2005)**

Heft 23

PDF erstellt am: **04.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-857883

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Eine Revolution in der Gleichstrommessung

Faseroptische Stromsensoren für die elektrolytische Metallgewinnung

Strommesssysteme sind unverzichtbar bei der elektrolytischen Metallgewinnung. Bisher waren zur Messung von Gleichströmen bis zu 500 kA komplizierte Stromwandler erforderlich. Diese auf dem Hall-Effekt basierenden Geräte sind nicht nur sperrig, sondern auch schwer: Manche Messwandler wiegen bis zu 2000 kg. Sie arbeiten zwar genau und zuverlässig, doch ihr komplexer Aufbau erfordert eine aufwändige Installation und Inbetriebnahme – potenzielle Fehler durch asymmetrische Magnetfelder oder Übersprechen durch benachbarte Ströme müssen minimiert werden. Sensoren auf Lichtwellenleiterbasis sind darum ein Quantensprung auf dem Gebiet der Gleichstrommessung. Der faseroptische Stromsensor ist sehr genau und lässt sich einfach installieren.

Klaus Bohnert, Peter Guggenbach

Die Lichtwellenleitertechnik hat die Leistungsfähigkeit und Geschwindigkeit der weltweiten Kommunikationsnetze entscheidend gesteigert. Neben der Kommunikation werden Lichtwellenleiter heute in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt, zum Beispiel in der Sensorik und Messtechnik. Da die Hauptkomponenten naturgemäss nicht leitend und weit gehend unempfindlich gegen elektromagnetische Störungen sind, eignen sich faseroptische Sensoren besonders gut zum Messen von Strömen und hohen Spannungen in Unterstationen, wo sie die herkömmlichen schweren Messwandler ersetzen können.

Die ersten faseroptischen Stromsensoren werden bereits seit Jahren in Stromversorgungsunternehmen genutzt. Sie basieren meist auf dem Faraday-Effekt, der im separaten Kasten auf Seite 25 erklärt wird. Die Einsatzmöglichkeiten beschränken sich jedoch nicht auf die Elektrizitätswirtschaft: Ein weiterer Bereich ist die elektrolytische Metallgewinnung. Zur Herstellung von Aluminium, Kupfer, Mangan, Zink, Stahl und Chlor werden riesige Mengen von Energie benötigt. Eine typische Aluminium-Potline arbeitet mit einer Gleichspannung von 1000 Volt und einer Stromstärke von mehreren 100 000 Ampère. Um solche Ströme aus dem Drehstromnetz zu beziehen, werden dutzende Gleichrichter zusammengeschaltet. Die Steuerung der Prozesse erfordert Gleichstromsensoren mit einer Genauigkeit von 0,1%. Damit können die Prozesse genau gesteuert und nicht zuletzt der Energieverbrauch überwacht werden. Das ist besonders wichtig, denn ein Messfehler von 0,1% bei 500 kA ergibt eine Abweichung von 0,5 MW – eine Leistung, die ausreicht, um 1000 Haus-

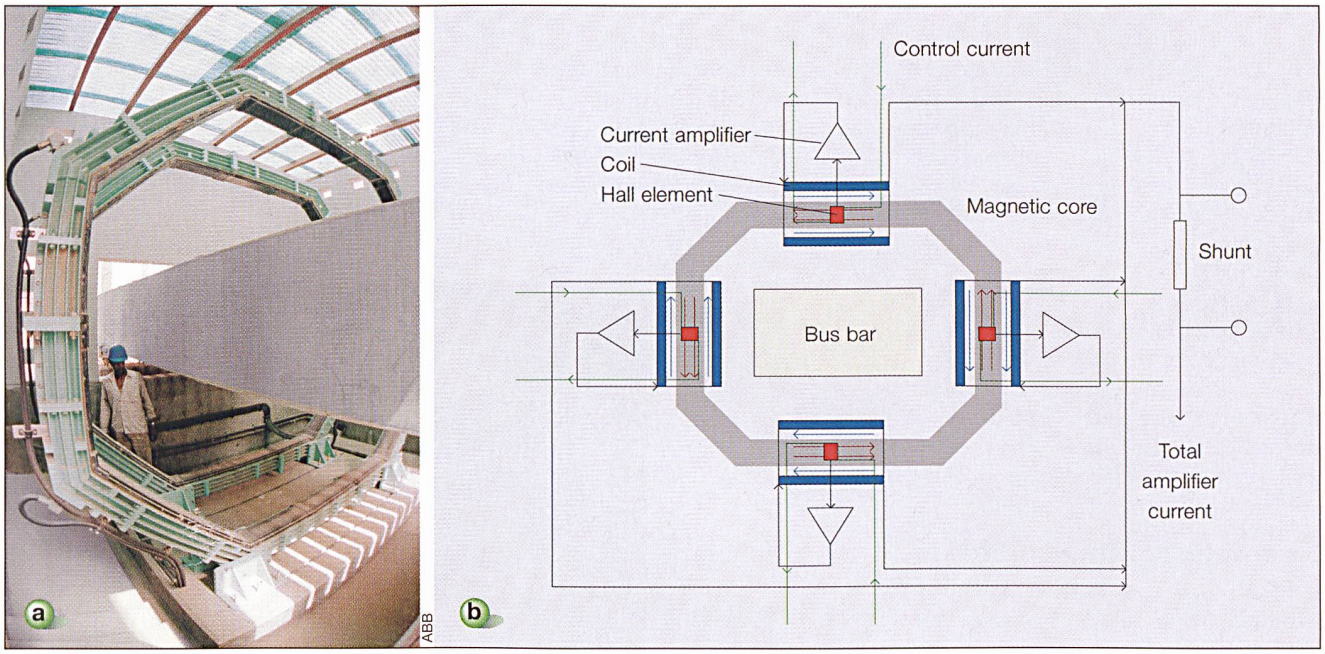

Bild 1 Hall-Effekt-Gleichstromwandler
a: Zwei herkömmliche Hall-Effekt-Stromwandler für 400 kA; b: Hall-Effekt-Stromwandler mit Aufhebung des Magnetflusses (Prinzip)

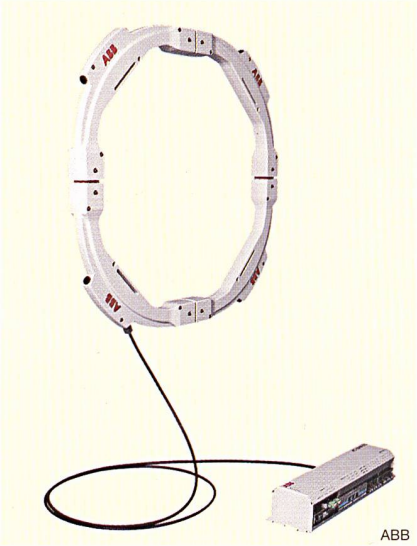

Bild 2 Faseroptischer Stromsensor mit Steuer- und Regelsystem

Das optoelektronische Modul des Sensors ist im Steuer- und Regelungssystem integriert. Dieses auf Faserkreiseltechnik basierende Modul misst die magnetooptischen Phasenverschiebungen.

halte mit wertvoller Energie zu versorgen!

Hall-Effekt-Stromwandler

Traditionell werden Ströme bei der elektrolytischen Metallgewinnung mit Hilfe des Hall-Effekts[1)] über einen Hochleistungs-Stromwandler mit Magnetflussaufhebung gemessen (Bild 1). Dieser besitzt einen Magnetkern, der die Strom führenden Schienen umgibt. Innerhalb des Kerns sind in Abständen mehrere Halbleiter-Hall-Elemente angeordnet, mit denen das Magnetfeld erfasst wird. Die Signale der Hall-Elemente werden Stromverstärkern zugeführt, deren Ausgangsstrom wiederum durch Spulen fliesst, die den Magnetkern umgeben. Diese Spulen erzeugen ein Magnetfeld, das das Feld des Primärstroms aufhebt. Die Summe der Sekundärströme ist dann proportional zum Primärstrom.

Diese Art von Messwandler ist zwar sehr genau, doch auch äusserst komplex, und kann bis zu 2000 kg wiegen. Ausserdem ist eine aufwändige Einrichtung nötig, um Fehler durch asymmetrische Magnetfelder oder Übersprechen von benachbarten Stromschienen zu vermeiden.

Faseroptik kontra Hall-Effekt

Im Vergleich zu Hall-Effekt-Gleichstromwandlern ist der faseroptische Stromsensor um bis zu einem Faktor 10 genauer und weniger empfindlich gegenüber Temperaturschwankungen. Der faseroptische Sensor erkennt auch bidirektionale Magnetfelder – misst also Ströme in beide Richtungen. Eine örtliche Umkehr der Feldrichtung durch starke benachbarte Ströme hat somit keine Auswirkung auf die Genauigkeit des Sensors. Da er generell unempfindlich ist gegenüber komplexen Feldverteilungen oder hohen benachbarten Strömen, wird die Platzierung wesentlich flexibler. Weil der faseroptische Sensor weniger komplex aufgebaut ist und man die Feldverteilung kaum berücksichtigen muss, reduzieren sich Installation und Inbetriebnahme von mehreren Tagen auf wenige Stunden.

Ein faseroptischer Sensor spricht mit der Abtastrate von 4 kHz schneller auf Stromspitzen und -wellen an als ein Hall-Effekt-Gleichstromwandler. Dies verbessert die Regelung des Systems. Zudem wurde die Langzeitstabilität gegenüber dem konventionellen Wandler verbessert und der Stromverbrauch ist vernachlässigbar klein (ein herkömmlichen Sensor nimmt bis zu mehreren Kilowatt Leistung auf).

Faseroptischer Stromsensor

Der faseroptische Stromsensor (Bild 2) zur Messung von hohen Gleichströmen in der elektrolytischen Metallgewinnung ist ein «Ableger» eines Sensors für Hochspannungs-Schaltanlagen. Da bei der elektrolytischen Metallgewinnung viel grössere Stromschienen verwendet werden als in Hochspannungs-Schaltanlagen, musste der Sensorkopf dafür weiterentwickelt und angepasst werden. Der Sensor basiert auf dem Faraday-Effekt (siehe Kasten). Zu den Hauptbestandteilen gehören, wie in Bild 4 gezeigt, ein optoelektronisches Modul und eine optische Sensorfaser mit einseitigem Anschluss, die den Stromleiter umgibt [1].

Das optoelektronische Modul besteht aus einer Halbleiter-Lichtquelle, einer Detektionseinheit und einem digitalen Signalprozessor. Die Lichtquelle sendet zwei Lichtwellen mit zueinander senkrechter linearer Polarisation über eine Verbindungsfaser zur Sensorfaser. Eingangs der Sensorfaser werden die Lichtwellen durch einen faseroptischen Phasenverzögerer in eine links und eine rechts zirkular polarisierte Lichtwelle umgewandelt.

Im Magnetfeld des Stroms bewegen sich diese Lichtwellen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit durch die Sensorfaser, wodurch sich ein optischer Wegunterschied und damit ein optischer Phasenunterschied $\Delta\phi$ ergeben. Am Ende der Faser werden die Wellen reflektiert und gelangen auf gleichem Weg zum optoelektronischen Modul zurück. In der Detektionseinheit werden die beiden Lichtwellen zur Interferenz gebracht. Der Signalprozessor wandelt den optischen Phasenunterschied zwischen den Wellen in ein digitales Signal um.

Der Phasenunterschied des gesamten Umlaufs ist proportional zum Linienintegral des Magnetfelds entlang des durch die Sensorfaser beschriebenen Wegs und somit ein direktes Mass für den Strom. Das Signal ist unabhängig von der jeweiligen Magnetfeldverteilung, solange die Anzahl der Sensorfaserwindungen ganzzahlig ist (bei den hohen Strömen in der elektrolytischen Metallgewinnung genügt bereits eine einzige Faserwindung). Ausserdem gibt es keine Querempfindlichkeit gegen Ströme ausserhalb der Faserspule. Weder der Durchmesser noch die Form der Faserwindungen haben irgendwelche Auswirkungen.

Der Zeitunterschied zwischen der links und rechts zirkularen Lichtwelle nach einem Umlauf beträgt je nach Stromstärke zwischen 10^{-21} und 10^{-15} Sekunden. Da eine direkte Messung nicht möglich ist, wird stattdessen der Weg- bzw. Phasenunterschied – der einem Bruchteil

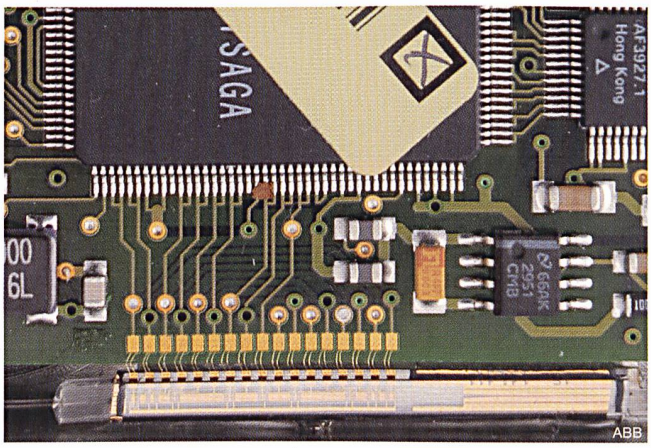

Bild 3 Ein Hauptbestandteil der Detektionseinheit ist ein Lithiumniobat-Phasenmodulator auf Wellenleiterbasis

der optischen Wellenlänge (820 nm) entspricht – mit hoher Präzision gemessen. Dazu werden die Wellen zur Interferenz gebracht, d. h. sie werden übereinander gelegt. Entsprechend ihrer relativen Verzögerung überlagern sich die Wellen entweder konstruktiv oder destruktiv. Der kleinste messbare Wegunterschied ist 100-mal kleiner als der Durchmesser eines Wasserstoffatoms und entspricht einer Stromstärke von 0,25 A (bei einer einzigen Faserwindung und einer Sekunde Messzeit). Die höchste messbare Stromstärke, die einem Wegunterschied von einer ganzen Wellenlänge entspricht, beträgt derzeit ±600 kA (±500 kA + 20% Überstrom).

Der Betrieb der Sensorspule im Reflexionsmodus hat unter anderem den Vorteil, dass das Ausgangssignal des Sensors unempfindlich gegenüber mechanischen Stössen und Schwingungen ist. Im Reflexionsmodus wechselt die Polarisation der Lichtwellen am Ende der Schleife. Dadurch heben sich die durch Vibrationen hervorgerufenen reziproken Phasenverschiebungen gegenseitig auf, während sich die nicht reziproken magneto-optischen Phasenverschiebungen während des Umlaufs verdoppeln.

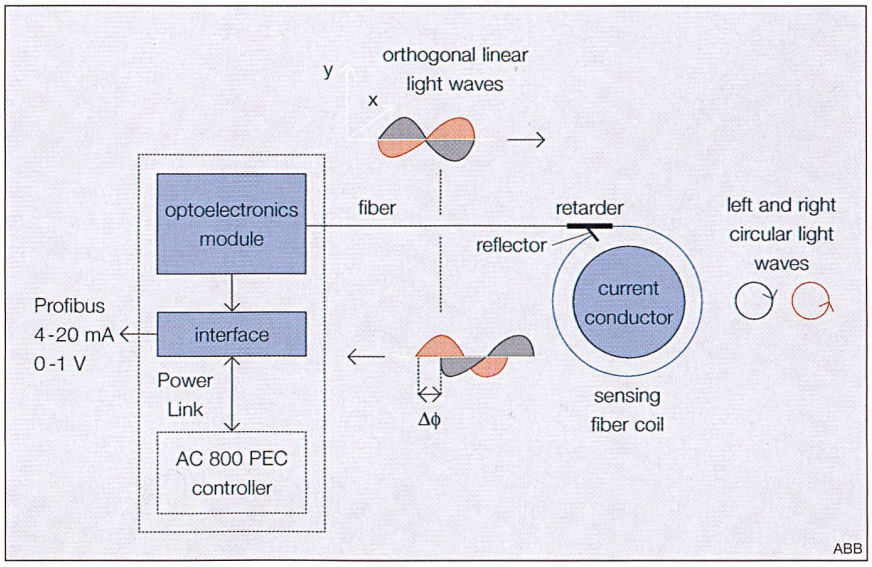

Bild 4 Schematische Darstellung des faseroptischen Sensors zur Messung von hohen Gleichströmen

Sensorkopf

Für die Genauigkeit eines faseroptischen Stromsensors ist eine spannungsfreie Verpackung der Sensorfaser entscheidend. Jede Form von mechanischer Spannung stört die zirkularen Lichtwellen und damit auch die gemessene magneto-optische Phasenverschiebung. Selbst Spannungen, die durch das Schrumpfen einer üblichen Faserummantelung bei niedrigen Temperaturen auftreten, sind nicht akzeptabel.

Die Sensorfaser wird deshalb in einen flexiblen «Sensorstreifen» verpackt (Bild 5). Damit lässt sich eine hervorragende Genauigkeit (innerhalb von 0,1%) über einen Temperaturbereich von –40 bis +85 °C erzielen, während die flexible Konstruktion den Transport und die Installation erleichtert. Die Temperaturabhängigkeit des Faraday-Effekts (eine Veränderung von 0,7% über 100 °C) wird durch eine entgegengesetzte Wirkung des Verzögerers ausgeglichen. Ein zusätzlicher Vorteil ist, dass die im Werk vorgenommene Kalibrierung des Sensors nicht durch den Transport oder den Einbau beeinträchtigt wird. Somit ist keine Neukalibrierung nach der Installation vor Ort mehr erforderlich.

Der Sensorstreifen mit der Sensorfaser ist in einem modularen Gehäuse untergebracht, dessen einzelne Segmente aus faserverstärktem Epoxidharz bestehen. Dieses Gehäuse lässt sich mit Hilfe verschieden langer gerader Segmente problemlos an Stromschienen mit unterschiedlichem Querschnitt anpassen (Bild 6). So lässt sich der Sensor installieren, ohne dass dafür die Strom führenden Schienen geöffnet werden müssen.

Optoelektronisches Modul

Das optoelektronische Modul basiert auf der gleichen Technologie wie faseroptische Kreisel. Optische Kreisel haben ihre mechanischen Pendants mittlerweile in vielen Navigationssystemen abgelöst und ihre Fähigkeiten unter schwersten Bedingungen zu Lande, zu Wasser und in der Luft bewiesen. Der integrierte digitale Signalprozessor sorgt für eine hohe Genauigkeit und eine hervorragende langfristige Stabilität. Ausserdem kompensiert die Detektionseinheit mit Hilfe eines geschlossenen Regelkreises die durch den Strom hervorgerufene optische Phasenverschiebung und liefert dadurch

Der Faraday-Effekt

Die meisten optischen Strommesssysteme basieren auf dem Faraday-Effekt, benannt nach dem englischen Wissenschaftler Michael Faraday (1791–1867). Bei diesem auch als magnetooptischer Effekt bezeichneten Phänomen kommt es zu einer Drehung der Polarisationsebene einer linear polarisierten Lichtwelle, wenn sie sich unter Einwirkung eines Magnetfelds durch ein Medium (z. B. ein Stück Glas) bewegt. Statt des linearen Lichts können auch links und rechts zirkular polarisierte Lichtwellen verwendet werden. In einem Magnetfeld bewegen sich die beiden zirkularen Wellen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Dadurch ergibt sich ein Phasenunterschied, der eine Drehung der resultierenden linearen Welle um den Winkel φ_F bewirkt. In einem Stromsensor bewegt sich das Licht entlang eines geschlossenen Pfads, der durch die um den Leiter herum angeordnete Faser vorgegeben ist. Im Reflexionsmodus ergibt sich der Phasenunterschied aus der Gleichung

$$\Delta\phi_F = 4V\,N \oint \vec{H}\,d\vec{s} = 4V\,N\,I$$

V = Verdet-Konstante, ein stoffabhängiges Mass für die Stärke des Faraday-Effekts
N = Anzahl der Umläufe des Lichts um den Leiter
I = Stromstärke
Durch den geschlossenen Pfad hängt das Signal nur von der Stromstärke und der Anzahl der Faserwindungen, nicht aber von dimensionalen Grössen wie dem Durchmesser oder der Form einer Faserwindung ab.

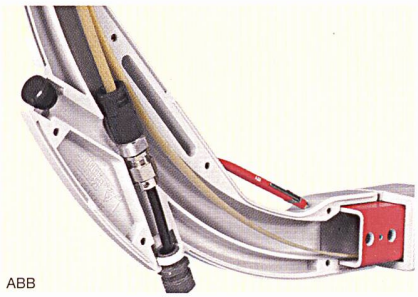

Bild 5 Ein Ecksegment des Sensorkopfgehäuses
Die Sensorfaser ist in einem flexiblen und robusten Sensorstreifen untergebracht

ein absolut lineares Ausgangssignal über den gesamten dynamischen Bereich.

Das optoelektronische Modul ist in ein Steuer- und Regelsystem integriert (Bild 2), das bis zu 70 Meter vom Sensorkopf entfernt platziert werden kann. Das optoelektronische Modul liefert ein digitales Ausgangssignal mit einer Auflösung von 24 Bit über eine synchrone Schnittstelle. Dieses digitale Signal wird über das optische ABB-Protokoll Powerlink[2] an den Rechner gesendet.

Für den Stand-alone-Betrieb ist ein digitales Signal zur Übertragung über das Feldbusprotokoll Profibus DP Slave verfügbar. Zusätzlich stehen analoge Ausgangssignale von 0(4) bis 20 mA und 0(0,2) bis 1 V zur Verfügung.

Weitere Anwendungen

Zu den Zielmärkten für faseroptische Stromsensoren gehören, wie oben erwähnt, Mess-, Steuer- und Schutzaufgaben in Hochspannungs-Schaltanlagen. Auf Grund seiner deutlich geringeren Grösse und des reduzierten Gewichts kann der Sensor in bestehende Geräte wie Leistungsschalter oder Durchführungen integriert werden, um Platz und Installationskosten zu sparen.

Darüber hinaus ist der Sensor für die Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) interessant, bei der elektrische Leistung über grosse Entfernungen transportiert wird. Ein weiteres viel versprechendes Anwendungsgebiet ist der elektrische Schienenverkehr. Hier wurden bereits einige Dutzend Sensoren auf der Basis eines Prototyps in Schutzsysteme für Unterstationen der italienischen Eisenbahn installiert.

Bild 6 Montage des Sensorkopfgehäuses an den Stromschienen

Referenz

[1] K. Bohnert, G. Gabus, J. Nehring, H. Brändle: Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor. Journal of Lightwave Technology 20 (2002) 2, 267–276

Angaben zu den Autoren

Dr. Klaus Bohnert ist Senior Principal Scientist am ABB Forschungszentrum in Baden-Dättwil und leitet das Projekt «Faseroptischer Stromsensor».
ABB Schweiz AG, Segelhof, CH-5405 Baden-Dättwil, klaus.bohnert@ch.abb.com

Dr. Peter Guggenbach ist seit 1999 Leiter des Profitcenters für ABB Hochleistungsstromrichter. Seit 2005 hat er die Leitung des Geschäftsbereichs Leistungselektronik der ABB übernommen.
ABB Schweiz AG, Austrasse, CH-5300 Turgi, peter.guggenbach@ch.abb.com

[1] Hall-Effekt: Wirkt ein magnetisches Feld auf einen Halbleiter, so werden sich bewegende positive und negative Ladungen in entgegengesetzte Richtungen abgelenkt (Lorentz-Kraft). Durch diese Ladungstrennung entsteht eine Spannung (Hall-Spannung), die proportional zur Stärke des Magnetfelds ist.

[2] Powerlink ist hier ein ABB-spezifisches Protokoll und hat nichts gemeinsam mit Ethernet-Powerlink, dem Echtzeit-Protokoll für Ethernet