

## **Der optoelektronische Strom- und Spannungswandler für GIS und AIS**

Volker Karius, Emil Haefely & Cie. AG

### **1. Einleitung**

In den elektrischen Netzen der Energieübertragung werden Strom- und Spannungswandler zu Messzwecken, zum Beispiel für Abrechnungs- und Schutzzwecke eingesetzt. Die konventionelle Technik arbeitet mit magnetischen Uebertragungselementen unter der Verwendung von mehr oder weniger hochwertigen magnetischen Werkstoffen. Auf diese Weise lassen sich verhältnismässig hohe Leistungen zum Betreiben von Schutz- und Messelementen auf die Niederspannungsseite übertragen. Auch in der konventionellen Schutz- und Messtechnik hat die Entwicklung auf dem Gebiet der Relaisstechnik zur deutlichen Verringerung des Leistungsbedarfs in den letzten 20 Jahren beigetragen, was zu heute allgemein niedrigeren Wandlerleistungen und Aktivteilvermögen führte.

Mit dem Einzug der Netzleittechnik, die sich zur Steuerung und Ueberwachung der Hoch- und Mittelspannungsanlagen Rechnern mit digitaler Systemumwelt bedient, kann die Leistungsanforderung an Mess- und Schutzwandler nochmals erheblich verringert werden. Die in den vergangenen 20 Jahren ebenfalls fortgeschrittene Entwicklung auf dem Gebiet der elektrooptischen Messtechnik und die Erprobung solcher Systeme weist den Weg in Richtung einer neuen Wandlergeneration. Durch Ablösung des magnetischen Uebertragungssystems durch elektrooptische Sensoren entfällt die direkte Kopplung von Hoch- und Niederspannung und damit auch der Aufwand an Isolation zwischen beiden Systemen. Die Uebertragung von Mess-Signalen über Distanzen mit Lichtwellenleitern und deren Umwandlung in digitale elektrische Signale ist Stand der Technik. Mit einer geeigneten Schnittstelle ist also der direkte Anschluss an ein Leitsystem unter Umgehung einer heute noch aufwendigen zwischen-geschalteten Relaisstation möglich. Die denkbaren Systemlösungen werden am Schluss der Ausführung aufgezeigt.

Unter Berücksichtigung der genannten Vorzüge liegt es auf der Hand, dass die Wünsche hinsichtlich einer neuen Wandlergeneration immer stärker werden. Die Frage des uneingeschränkten Einsatzes insbesondere in der Messtechnik und dort, wo Wandler zu Abrechnungszwecken eingesetzt werden, wird im Zusammenhang mit der Genauigkeit und der Zuverlässigkeit der neuen Systeme zu beurteilen sein.

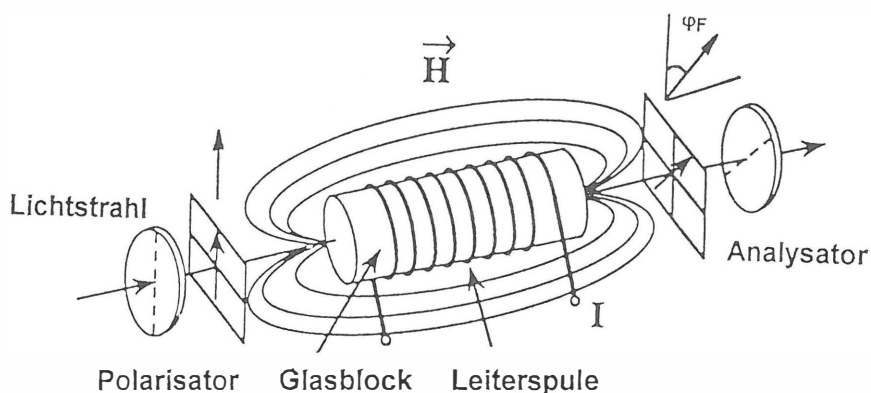
## 2. Elektrooptische Sensoren zur Strom- und Spannungsmessung

### 2.1 Messprinzipien

Für die Messung von elektrischen Grössen auf optischem Weg werden Quarzglas, Lichtwellenleiter niedriger Doppelbrechung (LBF) oder piezoelektrische Quarze eingesetzt. Die Messung des elektrischen Stromes beruht auf Ausnutzung des Faraday-Effektes gemäss Bild 1, hier angewendet auf einen Quarzglasblock. Im Idealfall, d.h. ohne Berücksichtigung von Störeffekten infolge Anisotropie des Materials wird linear polarisiertes Licht in einem magnetischen Feld, das von einem stromdurchflossenen Leiter erzeugt wird, in seiner Polarisations Ebene um den Winkel  $\varphi_F$  gedreht. Dabei gilt allgemein

$$\varphi_F = V \int H \, dl = VNI$$

mit  $V$  als **Verdet** Konstanten, die vom Material und der Wellenlänge des Lichtes abhängt.



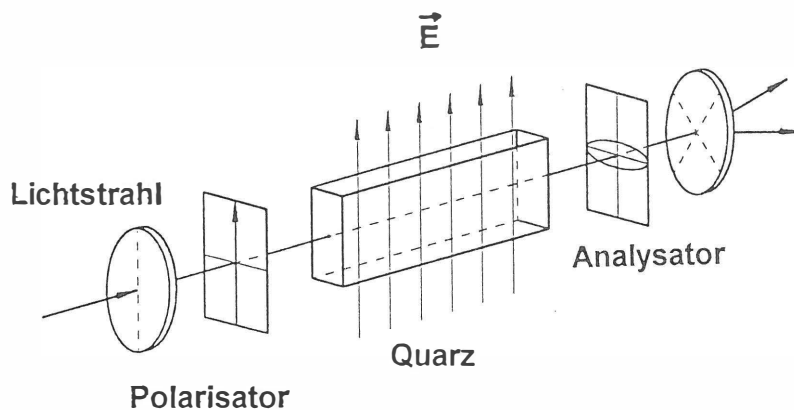
**Bild 1**  
**Faraday Effekt**

Die Messung elektrischer Spannung beruht weitgehend auf dem Pockels-Effekt gemäss Bild 2(1.). Die Ausbildung dieses Effektes ist mit der Anisotropie eines piezoelektrischen Quarzes verbunden. Eine linear polarisierte ebene Welle wird in einem optisch anisotropen Medium infolge von Doppelbrechung in zwei Teilwellen aufgespalten, die auf ihrem Weg durch das Medium jeweils unterschiedliche Brechungsindizes sehen. Das führt zu unterschiedlicher Phasengeschwindigkeit beider Lichtwellen. Ein longitudinal oder transversal zur Wellenausbreitung gerichtetes externes elektrisches Feld induziert einen zusätzlichen feldstärkenabhängigen Betrag zur Phasenverschiebung. Die Teilwellen interferieren im Moment des Austritts aus dem Medium. Die zusätzliche Phasenverschiebung ist gegeben durch

$$\Delta\Gamma = 2\pi n_0^3 r E (L/\lambda)$$

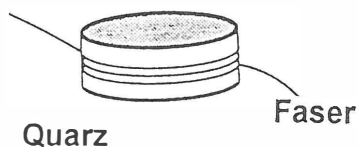
wobei  $n_0$  der Brechungsindex für den feldfreien Fall,  $r$  der elektrooptische Koeffizient,  $E$  der Betrag der elektrischen Feldstärke,  $L$  die Länge des Kristalls und  $\lambda$  der Wellenlänge des Lichtes ist.

Ein anderes Verfahren nutzt die Symmetrieeigenschaften des inversen piezoelektrischen Effektes in einem scheibenförmigen Quarzkristall aus. Die Scheibe in Bild 2(2.) ändert in einem elektrischen Feld periodisch ihren Durchmesser. Die Änderung des Durchmessers kann auf optischem Weg gemessen werden.



**Bild 2**  
Pockels Effekte und  
inverser piezoelek-  
trischer Effekt

### 1. Pockels Effekt



### 2. Inverser piezo- elektrischer Effekt

Die entsprechenden durch die Felder induzierten Effekte sind nicht reziprok, d.h. sie lassen sich im Analogbereich nicht kompensieren. Die Feldeffekte sind aber auch von ähnlicher Größenordnung wie die Störeffekte, hervorgerufen durch

- torsionsbedingte induzierte lineare Doppelbrechung (reziprok).
- Doppelbrechung infolge Verunreinigung und Unsymmetrie im Material.
- Doppelbrechung induziert durch Biegung und andere mechanische Beanspruchungen (nicht reziprok).
- temperaturbedingte Polarisationsänderungen (reziprok).

Es ist das Ziel der Entwicklung der Sensoren, die Störeffekte so gut wie möglich unterdrücken zu können, sowohl durch die Messanordnung selbst, als auch durch elektronische Massnahmen bei der Signalverarbeitung.

## 2.2 Elektrooptische Sensoren zur Messung des Stromes

Zum Erreichen genügender Empfindlichkeiten hinsichtlich des Messsignals und der Bestrebung, die Störeffekte soweit wie möglich bereits im analogen Messsignal zu unterdrücken, sind unterschiedliche Sensorentypen entwickelt worden:

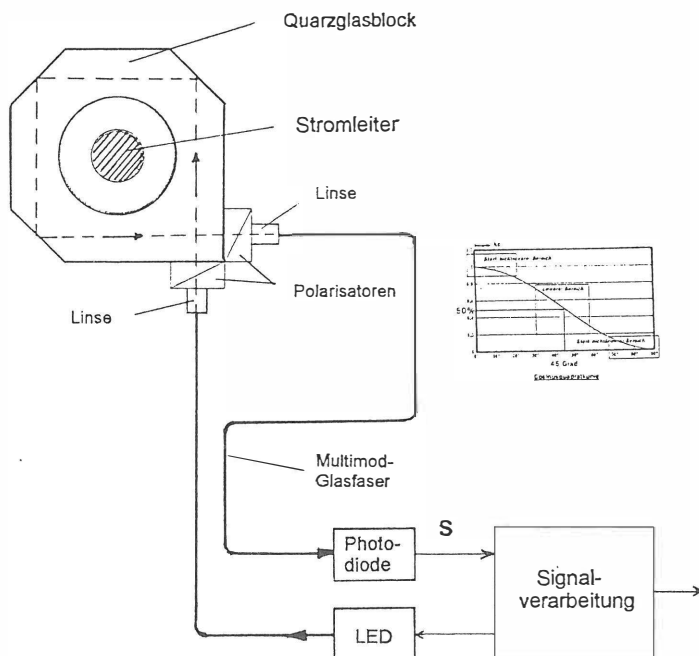
- |  |                                 |
|--|---------------------------------|
| 1. Massivoptischer Stromsensor                 | mit Eisenkern<br>ohne Eisenkern |
| 2. Faseroptischer polarimetrischer Stromsensor | ohne Reflexion<br>mit Reflexion |
| 3. Sagnac Stromsensor                          |                                 |

### 2.2.1 Massivoptischer Stromsensor

Der Aufbau eines massivoptischen Stromsensors ist in Bild 3 dargestellt. Als Sensormaterial wird ein Borsilikatglas verwendet. Das Licht wird aus einer LED über eine Multimodefaser zum Sensorkopf geführt und vor Einkopplung in den Glasblock mit Hilfe einer Linse zentriert und linear polarisiert. Nach einmaliger Umrundung des elektrischen Leiters wird das Licht durch einen im Winkel von  $45^\circ$  zur Polarisationssebenen des Lichtes gedrehten Polarisator (Analysator) geschickt, damit gemäss Bild 3 (Ausschnitt) das Ausgangssignal der Lichtintensität  $I_L$

$$I_L = I_{L0} \cos^2(\varphi_F)$$

in den linearen Bereich der  $\cos^2$ -Kurve fällt.



**Bild 3**  
**Massivoptischer**  
**Stromsensor mit**  
 **$\cos^2$  - Kurve**

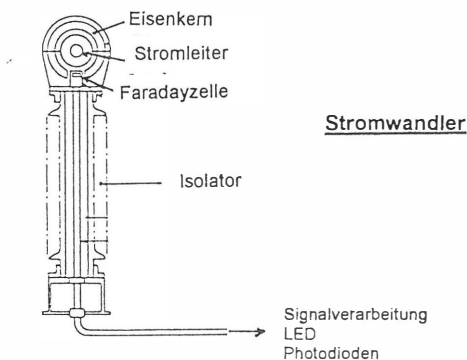
Nach Einkopplung des Lichtes in eine zweite Multimodefaser und nach Umwandlung des optischen Signals in ein elektrisches erhält man ein Signal der Grösse

$$S = S_0 \cos^2(\varphi_F + 45^\circ) = S_0 (1 - \sin(2\varphi_F))$$

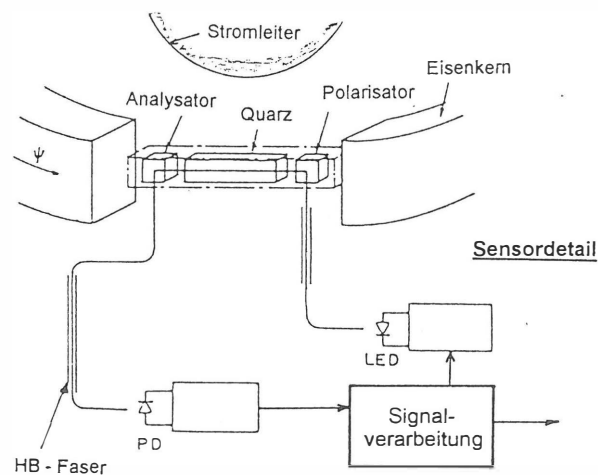
Aufgrund des einmaligen Umgangs um den elektrischen Leiter ist die Faradaydrehung gering.

Daher ist eine relativ aufwendige Elektronik für die Filterung des Signals und die Störunterdrückung notwendig. Für einen solchen Sensor wird gemäss ABB Westinghouse nach Untersuchungen in der Anlage die Erfüllung der Genauigkeitsklasse IEC 0,5 angegeben.

Als massivoptischer Stromsensor kann ein Glasblock auch in den Luftspalt eines magnetischen Kerns, der einen Leiter umschliesst, gebracht werden (Bild 4). Die Lichteinspeisung- und Analyse wie Umwandlung in das elektrische Signal unterscheidet sich im wesentlichen nicht von der oben beschriebenen Methode, jedoch ist die Multimodefaser durch eine Monomodefaser hoher Doppelbrechung (HB-Faser) ersetzt. Der Luftspalt des Kerns ist so gewählt, dass eine lineare Charakteristik gewährleistet ist.



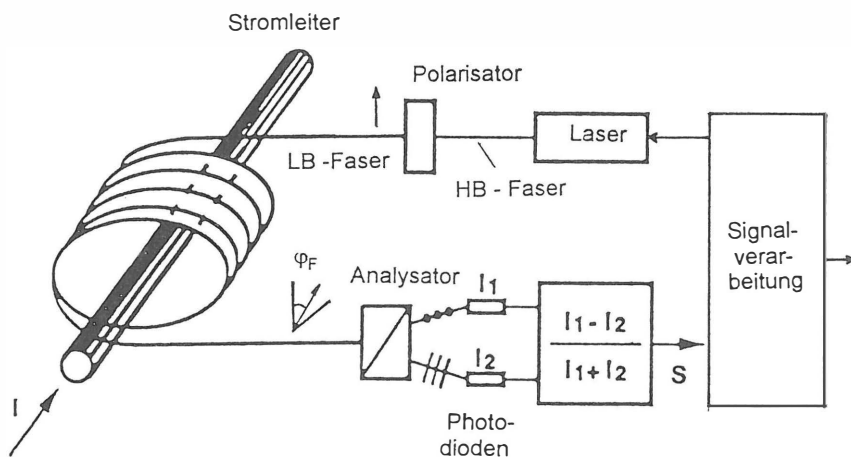
**Bild 4**  
**Fehlerstromdetektor**



Dieser Stromsensor wird als sogenannter Fehlerstromdetektor für die Auslösung des Ueberschutztes eingesetzt. Für den Uebersetzungsfehler im Strombereich von 250-3000 A wird  $\pm 1\%$  angegeben. Jedoch muss mit einer Variation des Signals im Temperaturbereich zwischen  $-20^\circ\text{C}$  bis  $80^\circ\text{C}$  von  $\pm 1,5\%$  gerechnet werden.

### 2.2.2 Polarimetrischer Stromsensor

Beim polarimetrischen Stromsensor (Bild 5) wird das Licht aus einer Laserdiode direkt in eine integrierte HB-Faser eingekoppelt und zum Sensorkopf geschickt. Der Sensorkopf besteht aus einer LB-Faser (Monomodefaser niedriger Doppelbrechung) mit N-Windungen um den elektrischen Leiter. In dieser Faser wird das vorher linear polarisierte Licht eingekoppelt und erfährt eine Faradaydrehung, die um die Anzahl der Windungen der Faser wächst, wenn ein elektrischer Strom durch den Leiter fließt. Am Ausgang wird das Licht in zwei in ihren Polarisationssebenen senkrecht zueinander stehenden Analysatoren (Polarisatoren) analysiert.



**Bild 5**  
**Polarimetrischer**  
**Stromsensor**

In einer elektrischen Auswerteinheit wird das in elektrische Signale umgewandelte Licht verarbeitet, und es ergibt sich ohne Berücksichtigung von Störeffekten ein elektrisches Signal der Grösse

$$S = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \sin(2\varphi_F) \approx 2\varphi_F = 2VNI \sin(\omega t)$$

Man kann Störeffekte, insbesondere temperaturabhängige, torsionsinduzierte zirkulare Doppelbrechung, messtechnisch am Signalausgang unterdrücken, wenn man das Licht am Ende der LB-Faser mit einem Spiegel reflektiert. Unter Verwendung einer sogenannten Twisted-LB-Faser kann dieser Effekt noch erheblich verbessert werden, weil mit zunehmender Torsion der Einfluss der linearen Doppelbrechung auf das Ausgangssignal verschwindet. Der Messfehler kann dadurch reduziert werden.

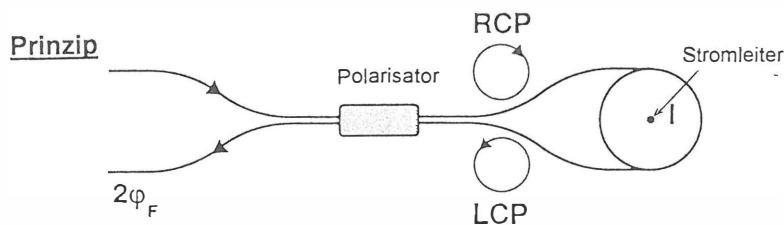
### 2.2.3 Der Sagnac Stromsensor

Das grundsätzliche Prinzip des Sagnac Stromsensors ist in Abbildung 6 (oben) dargestellt. Rechts- und linkszirkular polarisiertes Licht wird von beiden Seiten her in eine LB Faser des Sensorkopfes eingekoppelt, in dessen Mitte der stromführende Leiter angeordnet ist. Jede Lichtwelle erfährt durch das Magnetfeld bei stromdurchflossenem Leiter eine feldproportionale Faraday-Drehung, was zu einer Phasendifferenz zwischen beiden

Lichtwellen führt. Diese Phasendifferenz kann durch Interferenzbildung gemessen werden und beträgt

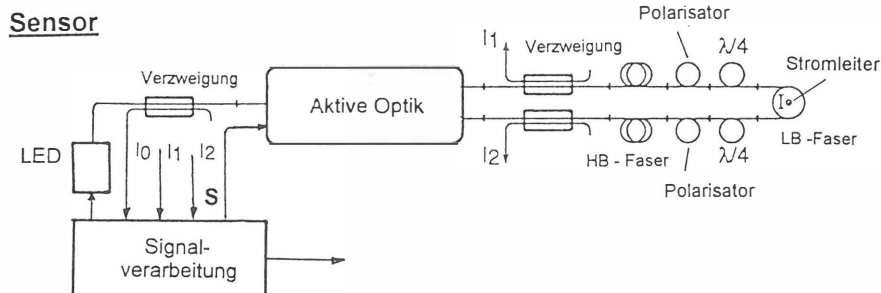
$$\Delta\beta = 2\varphi_F = 2NVI$$

Die Vorteile dieses Sensortyps bestehen darin, dass sich durch die Ueberlagerung von zwei unabhängig, in entgegengesetzter Richtung durch die Faser laufenden Lichtstrahlen alle reziproken Störeffekte, wie temperaturbedingte Polarisationsänderungen und torsiionsbedingte zirkulare Doppelbrechung unterdrückt werden.



**Bild 6**  
**Sagnac**  
**Stromsensor,**  
oben : Prinzip  
unten: Sensor

RCP : Rechtszirkular polarisiertes Licht  
LCP : Linkszirkular polarisiertes Licht



Der Aufbau eines derartigen Sensors zeigt Bild 6 (unten). Das Licht aus einer Laserdiode wird verzweigt und linear polarisiert. Mit Hilfe von  $45^\circ$  zur Polarisations Ebenen angeordneten  $\lambda/4$  Platten werden links- und rechtszirkular polarisierte Lichtwellen in die LB-Faser des Sensor-kopfes eingekoppelt. Das Licht wird über die Polarisatoren zurückgeführt und über zwei Verzweigungen die Signale I1 und I2 und nach der Eingangsverzweigung das Signal I0 gewonnen. Durch Verhältnissbildung der Teilsignale erhält man ein elektrisches Signal der Grösse

$$S = S_0 \sin (2\varphi_F)$$

Befriedigende Linearität und Genauigkeiten werden vom polarimetrischen und Sagnac Sensor unter Laborbedingungen erreicht. Störeffekte, hervorgerufen durch nicht reziproke lineare Doppelbrechung infolge Vibration, beeinträchtigen die Genauigkeit empfindlich. Der Sagnac Sensor scheint durch bessere Störeffektenunterdrückung Vorteile gegenüber dem polarimetrischen Sensor zu haben, insbesondere wegen des unproblematischen Anschlusses

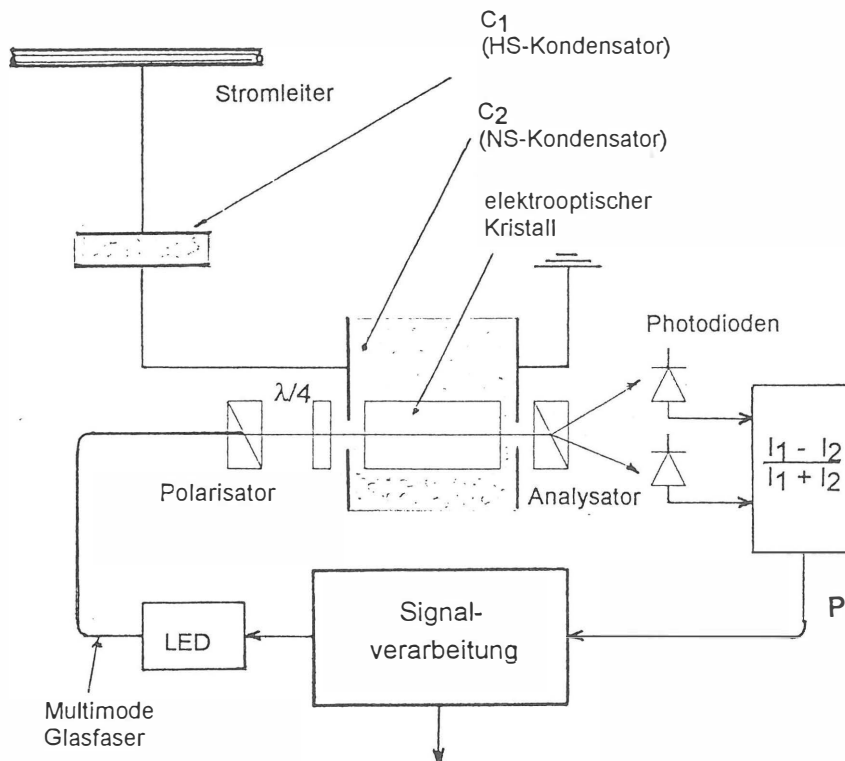
an eine aktive Optik mit Kompensationsmöglichkeiten der Störungen auf optischem Weg. An dieser neuen Technik wird zur Zeit gearbeitet.

Der Einsatz von Stromsensoren für Ueberwachung und Schutz erscheint unter den gegebenen Umständen nicht mehr problematisch, insbesondere in Innenraumanlagen wie GIS. Für den Einsatz zu Messzwecken im Rahmen von Verrechnung elektrischer Energie müssen die Systeme noch unempfindlicher werden. In Aussenraumanlagen sind durch höher zu erwartende Störpegel die Anforderungen an die Unempfindlichkeit grösser als für GIS-Innenraumanlagen.

## 2.3 Elektrooptische Sensoren zur Messung der Spannung

### 2.3.1 Messung von Potentialdifferenzen mit dem Pockelsensor

Ein Beispiel eines Pockelsensor zur Spannungsmessung zeigt Bild 7. Die Kapazität auf Niederspannungsniveau eines kapazitiven Teilers ist mit einem Pockelskristall ausgerüstet. Das Licht aus einer Laserdiode wird in einen Lichtwellenleiter (LWL) eingekoppelt und durch einen Polarisator und einem  $\lambda/4$  Plättchen zirkular polarisiert.



**Bild 7**  
**Pockelsensor**  
**im kapazitiven**  
**Teiler**

Zirkular polarisiertes Licht besteht aus zwei Wellen, deren Polarisationsrichtungen senkrecht zueinanderstehen und die um ein Viertel ihrer Wellenlänge gegeneinander verschoben sind. Das elektrische Feld des Kondensators führt zu einer zusätzlichen Phasenverschiebung. Am Ausgang wird das Licht in zwei in ihrer Positionsebenen senkrecht zueinanderstehenden Analysatoren (Polarisatoren) analysiert. In einer elektrischen Auswerteinheit ergibt sich ohne Berücksichtigung von Störeffekten ein elektrisches Signal von

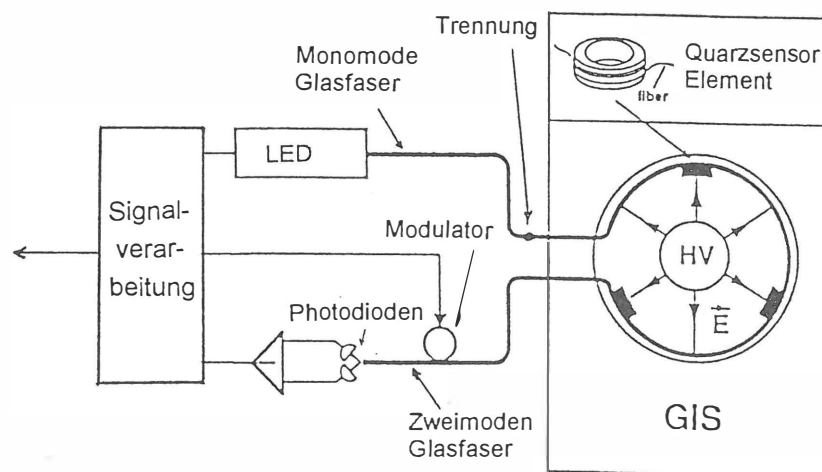


$$P = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \sin \beta$$

wobei der Winkel  $\beta$  der durch das elektrische Feld induzierten Phasenverschiebung entspricht.

### 2.3.2 Messung von Potentialdifferenzen mit einem Quarzsensord

Das Beispiel einer Spannungsmessung in einer GIS Anlage mit Hilfe einer piezoelektrischen Quarzscheibe im elektrischen Feld zeigt Bild 8. Die Quarzscheibe ändert bei Anlegen eines elektrischen Wechselfeldes senkrecht zur Quarzebene periodisch ihren Durchmesser in Abhängigkeit von der Grösse des Feldes. Um den Umfang des Quarzes ist eine Zweimodenfaser mit mehreren Windungen gewickelt, die durch die Umfangsänderung eine proportionale Längenänderung erfährt. Das durch eine Laserdiode eingekoppelte Licht erfährt in einer Zweimodenfaser eine differentielle Phasenverschiebung, die am Ausgang in den Detektoren analysiert wird.



**Bild 8**  
**Quarzsensord**  
**in SF6 Anlage**

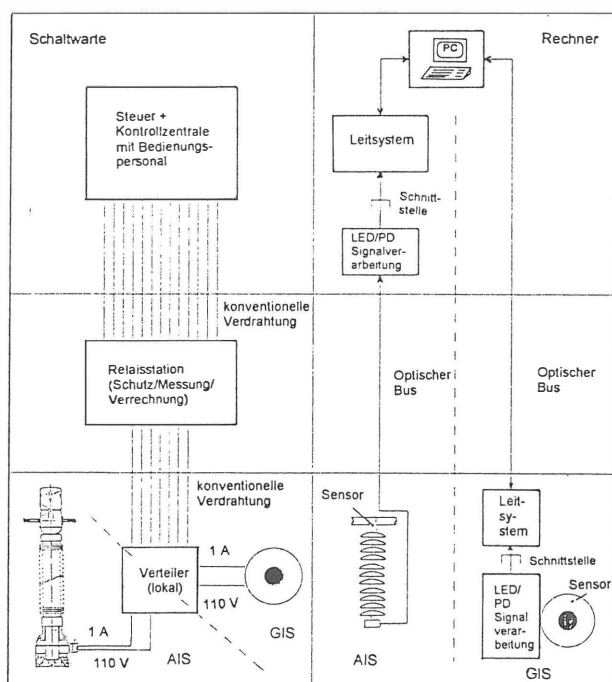
Die Messung mit dieser Methode eignet sich bei definierten Feldanordnungen, wie beispielsweise in einer GIS Anlage.

Derartige Sensoren befinden sich in Feldproben, in dessen Rahmen auch nähere Erkenntnisse hinsichtlich der Genauigkeitsgrenzen im Betrieb ermittelt werden.

### 3. Einsatzgebiete gegenwärtig und zukünftig

Der Einsatz von elektrooptischen Sensoren für die Aufgaben der Ueberwachung und Schutzfunktionen ist grundsätzlich nach dem Stand der heutigen Technik möglich. Das haben die Untersuchungen mit den verschiedenen Sensorentypen in Feldversuchen gezeigt. In Freiluftanlagen werden optische Stromsensoren gegenwärtig zur Ueberwachung von Kondensatorbatterien aber auch in Mittelspannungsschaltanlagen zur begrenzten Stromüberwachung eingesetzt.

Die weiträumige Anwendung der Sensortechnik ist verknüpft mit einer Einbindung in eine moderne Systemleittechnik. Bild 9 zeigt zum Verständnis dieser Verknüpfung eine Gegenüberstellung von traditioneller Technik und moderner und zukünftiger Lösungen. Messsystem mit Lichtquelle, Sensor und Signalverarbeitung sind als eine Einheit zu betrachten mit einer Schnittstelle zum Leitsystem. Die Definition einer solchen Schnittstelle wird noch im einzelnen zu erarbeiten sein. Das Schema gibt jedoch einen Anhaltspunkt dafür, dass der vermehrte Einsatz von Sensoren zur Strom- und Spannungsmessung erst mit dem Einzug moderner Leittechnik sinnvoll ist und somit die mögliche Reduktion von Kosten und Platzbedarf erst im Zusammenhang mit moderner Leittechnik ausgeschöpft werden kann. Dabei kann der Einzug der neuen Technik bei GIS Schaltanlagen möglicherweise durch die fehlende räumliche Trennung zwischen Sensor und Leitsystem schneller vorangehen. Aufgrund eines geringeren Stöpegels, insbesondere der mechanischen Störungen durch Vibrationen, finden optische Sensoren in Innenraumanlagen zudem noch günstigere Voraussetzungen vor als in Freiluftanlagen.



**Bild 9**  
Gegenüberstellung  
von traditionelle und  
zukünftige Leittechnik

Für den Einsatz optischer Sensoren, zur Messung von Spannung und Strom für Abrechnungszwecke, wo es auf kontinuierliche Genauigkeit von weniger als 0,2% Uebersetzungsfehler ankommt, sind noch Entwicklungen zur besseren Störunterdrückung notwendig. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt können die Resultate noch nicht befriedigen, d.h., dass die elektrooptischen Sensoren noch nicht den Grad der Störfreiheit erreicht haben, um einer Klassengenauigkeit von kleiner als 0,2% zu genügen.