

Diese Beschreibung charakterisiert die Eigenschaften der Erfindung bezüglich des gelösten technischen Problems und den Fortschritt gegenüber dem Stand der Technik.

---

## 2.1 Durch die Erfindung gelöstes technische Problem

Die Messung elektrischer Ströme auf beliebigem Potenzial ohne Einfügen des Messsystems in den elektrischen Stromkreis stellt ein grundsätzliches Problem der Messtechnik dar. Dieses Problem wurde durch die vorgelegte Erfindung bei Kompensation aller nachteiligen Effekte wie z. B. der Doppelbrechung in Lichtwellenleitern oder Temperaturschwankungen gelöst.

---

## 2.2 Bisherige Lösungen und Stand der Technik

Das Problem wurde bisher nur durch eine aufwendige Signalverarbeitung im Messsystem und dann nur näherungsweise gelöst.

### 2.3 Nachteile der bekannten Lösungen

Durch die Nachteile, dass die schwankende Doppelbrechung selbst in der Näherung im Messwert enthalten ist oder der Zusammenhang zwischen Messwert und Messgröße nichtlinear ist, lassen sich die bekannten fremden Lösungen charakterisieren.

---

### 2.4 Aufgabe der Erfindung

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, alle nachteiligen Effekte bei der potenzialgetrennten Messung elektrischer Ströme ohne Eingriff in den elektrischen Stromkreis der Messgröße zu eliminieren.

---

### 2.5 Lösung der Aufgabe durch die Erfindung

Diese Aufgabe wurde erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass ein völlig neuer Ansatz mit den Eigenschaften

- parallele Anregung des Messsystems durch eine handelsübliche Laserdiode mit optional konstanter Strahlungsleistung,
- Schutz der Laserdiode vor reflektiertem Licht durch Einschaltung eines handelsüblichen optischen Isolators,
- Verwendung von zwei handelsüblichen linearen Polarisatoren zur Herstellung und Auswertung linearer Polarisationen als Voraussetzung für die Anwendung des Faraday-Effektes zur Polarisationssebenen-Drehung des Lichtes in einer ersten und einer zweiten Spule, jeweils aus handelsüblichen Lichtwellenleitern (LWL) gefertigt,
- Verwendung von drei elektromagnetischen Spulen aus elektrischen Leitern, entsprechend Abb. 2.1, 2.2 und 2.3, die ineinander mit jeweils einer LWL-Spule gewickelt sind, zur Erzeugung der Übersetzungsverhältnisse  $\ddot{u}$  und  $-\ddot{u}$  zwischen den Messwerten  $i_0$  und  $i_1$  sowie jeweils der Messgröße  $i$  als elektrischen Strom und damit Realisierung eines mehrfachen optischen Transformatorprinzips,
- automatische Kompensation der Doppelbrechungen  $\Delta n$  und  $\Delta n_0$  durch Beschaltung der Enden der zwei LWL-Spulen mit jeweils handelsüblichen  $-90^\circ$ -Faraday-Rotator-Mirrors unter Ausnutzung der Eigenschaften der zugehörigen neuen Sensor-Differenzialgleichung (DGL),

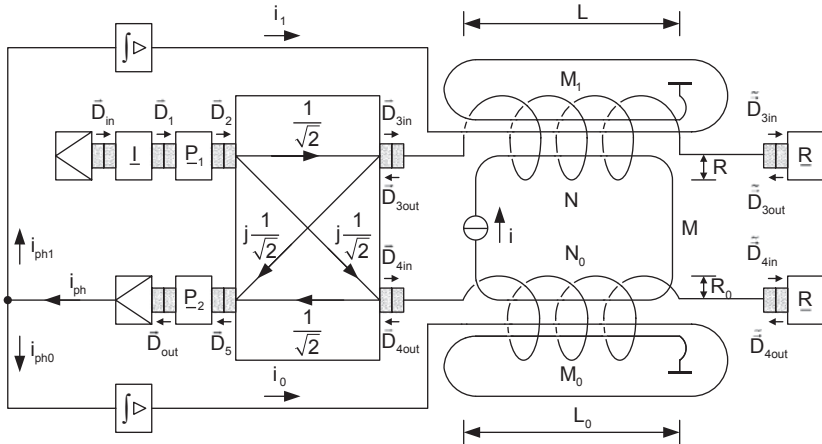


Abb. 2.1 Reflektierender Faraday-Effekt-Stromsensor

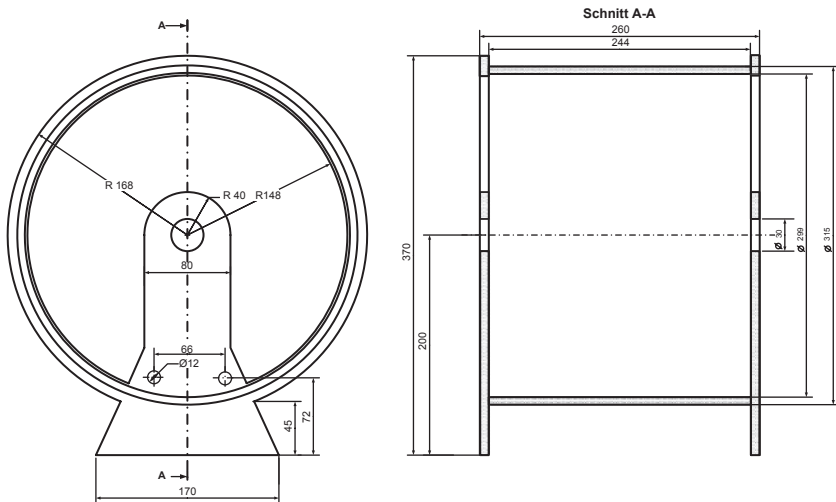


Abb. 2.2 Konstruktiver Aufbau eines Spulenkörpers

- Verwendung einfacher stabiler Regelkreise mit integrierenden Stromverstärkern zur Elimination der bleibenden Regelabweichung,
- einfacher linearer Zusammenhang zwischen Messgröße und Messwerten, vermittelt durch die Proportionalitätsfaktoren „Windungszahlverhältnisse“ der elektromagnetischen Spulen zuzüglich konstanter Anteile zur Arbeitspunkteinstellung.



**Abb. 2.3** Spule mit sichtbarer äußerer Kupferwicklung und nicht sichtbarer interner LWL-Wicklung. (Foto Winkler)

## 2.6 Neues und Kern der Erfindung

Das wesentlich Neue und der Kern der Erfindung sind in der gleichzeitigen Applikation der folgenden Ideen zu sehen:

1. Automatische Kompensation der Doppelbrechung unter Ausnutzung der Eigenschaften der abgeleiteten Sensor-Differenzialgleichung und der  $-90^\circ$ -Faraday-Rotator-Mirrors am Ende der ersten und zweiten LWL-Spule,
2. Verwendung von Regelkreisen mit optischer Rückkopplung zur Herstellung des linearen Zusammenhanges zwischen den Messwerten  $i_o$  bzw.  $i_1$  und jeweils der Messgröße  $i$  ohne störende Doppelbrechung im LWL,
3. Ermittlung der exakten Messwerte  $i_o$  und  $i_1$  als Lösungen einer neuen, den Sensor beschreibenden nichtlinearen Differenzialgleichung (DGL),
4. Verwendung des Integratorprinzips in den Schleifen der Regelkreise zur Elimination der bleibenden Regelabweichungen.

## 2.7 Wesentliche und zusätzliche Vorteile der Erfindung

Als wesentliche bzw. zusätzliche Vorteile der vorgelegten Erfindung sind zu nennen:

- Das Messsystem zeichnet sich durch einen einfachen Aufbau aus.
- Der faseroptische Stromsensor ist auch zur potenzialgetrennten Messung elektrischer Ströme einsetzbar.
- Die Erfindung eignet sich sowohl für die Messung kleiner Ströme im mA-Bereich als auch zur Bestimmung großer Ströme im kA-Bereich, jeweils in Abhängigkeit von der Dimensionierung des Sensors.
- Der Sensor ist in einem großen Frequenzbereich einsetzbar, abhängig von seiner Dimensionierung.
- Die Herstellung des erfindungsgemäßen Stromsensors lässt sich mit verfügbaren Bauelementen und Technologien leicht realisieren.

## 2.8 Erläuterung der Erfindung

### 2.8.1 Analyse des Faraday-Effekt-Stromsensors

Ausgehend von Abb. 2.1 wird der optische Teil des Stromsensors durch die elektrische Verschiebungsflussdichte  $\vec{D}$  (die Indizes von  $\vec{D}$  entsprechend den zugehörigen Orten im Messsystem) für Licht als elektromagnetische Welle dargestellt.

Vorzugsweise, aber nicht zwingend, liegt als Ausgangssignal der Laserdiode der linear polarisierte Jones-Vektor

$$\vec{D}_{\text{in}} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

in normierter Form vor.

Nach der Laserdiode ist ein optischer Isolator mit der Jones-Matrix  $\underline{I}$  geschaltet, der die Laserdiode vor reflektiertem Licht schützt. Es gilt:

$$\underline{\underline{\vec{D}_1}} = \underline{I} \vec{D}_{\text{in}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \underline{\underline{\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}}} \quad (2.2)$$

Am Eingang des linearen horizontalen Polarisators mit der Jones-Matrix  $\underline{P}_1$  erhalten wir nach (2.2) ein 45°-linear polarisiertes Eingangslicht.

Am Ausgang des Polarisators 1 ergibt sich

$$\underline{\underline{\vec{D}_2}} = \underline{P_1} \vec{D}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \underline{\underline{\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}}}, \quad (2.3)$$

also horizontal polarisiertes Licht.

Das Signal  $\vec{D}_2$  wird in einen optischen 3 dB-Richtkoppler mit den Transmissionen  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  bzw.  $j \frac{1}{\sqrt{2}}$  ( $j = \sqrt{-1}$ ) eingespeist.

Damit erhalten wir am oberen Ausgang/Eingang 3 des Kopplers:

$$\underline{\underline{\vec{D}_{3in}}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \vec{D}_2 = \underline{\underline{\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}}} \quad (2.4)$$

Für die LWL-Spule mit der Windungszahl  $N$  und der Länge  $L$  gilt mit dem Doppelbrechungsparameter  $\delta$  und dem Faraday-Winkel  $\alpha$  die Beschreibung:

$$\vec{D}_{3out} = \underline{J}(\delta, \alpha) \vec{D}_{3in} \quad (2.5)$$

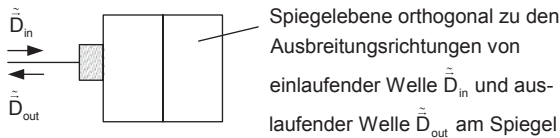
$\underline{J}(\delta, \alpha)$  ist die Jones-Matrix der ersten LWL-Spule für die Vorwärts- und Rückwärtsrichtung, einschließlich der  $-90^\circ$ -Faraday-Drehung des am Ende der ersten LWL-Spule vorhandenen  $-90^\circ$ -Faraday-Rotator-Mirrors mit der Jones-Matrix bzw. Streumatrix  $\underline{R}$  entsprechend Abb. 2.4.

Es gilt:

$$\vec{D}_{out} = \underline{R} \vec{D}_{in} \quad \text{mit} \quad \underline{R} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Für  $\underline{J}(\delta, \alpha)$  gilt entsprechend der weiterführenden Literatur:

$$\underline{J}(\delta, \alpha) = \begin{pmatrix} \cos(d/2) + j \frac{\delta}{2} \frac{\sin(d/2)}{d/2} & -\alpha \frac{\sin(d/2)}{d/2} \\ \alpha \frac{\sin(d/2)}{d/2} & \cos(d/2) - j \frac{\delta}{2} \frac{\sin(d/2)}{d/2} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$



**Abb. 2.4** Faraday-Rotator-Mirror

Dabei ist  $d$  die Abkürzung für

$$d = \sqrt{\delta^2 + 4\alpha^2} \quad (2.8)$$

mit

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n \int_0^{2L} d\ell \quad (2.9)$$

$$\underline{\underline{\alpha = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta n L}}} \quad (2.10)$$

und

$$\alpha = V \oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} - \frac{\pi}{2} \quad (2.11)$$

$$\alpha = V \left[ \int_0^{2\pi NR} \frac{M_i + M_1 i_1}{2\pi R} d\ell - \int_{2\pi NR}^0 \frac{M_i + M_1 i_1}{2\pi R} d\ell \right] - \frac{\pi}{2} \quad (2.12)$$

$$\underline{\underline{\alpha = 2 VN (M_i + M_1 i_1) - \frac{\pi}{2} = \tilde{\alpha} - \frac{\pi}{2}}} \quad (2.13)$$

Dabei bedeuten:

$\lambda$	Wellenlänge des Lichtes
$\Delta n$	Doppelbrechung der 1. LWL-Spule
$V$	Verdet-Konstante der 1. LWL-Spule
$R$	Radius der 1. LWL-Spule
$L$	Länge der 1. LWL-Spule
$N$	Windungszahl der 1. LWL-Spule
$M$	Windungszahl der 1. elektromagnetischen Spule
$M_1$	Windungszahl der 2. elektromagnetischen Spule
$i$	elektrischer Strom (Messgröße)
$i_1$	elektrischer Strom (1. Messwert)
$\vec{H}$	magnetische Feldstärke, herrührend von $i$ und $i_1$ , vor der Kompensation

Somit erhalten wir für die erste LWL-Spule eine von  $\delta$  und  $\alpha$  abhängige Jones-Matrix  $\underline{J}(\delta, \alpha)$  gemäß (2.7) und damit

$$\vec{D}_{3out} = \underline{J}(\delta, \alpha) \vec{D}_{3in} \quad (2.14)$$

$$\bar{D}_{3out} = \begin{pmatrix} \cos(d/2) + j \frac{\delta}{2} \frac{\sin(d/2)}{d/2} & -\alpha \frac{\sin(d/2)}{d/2} \\ \alpha \frac{\sin(d/2)}{d/2} & \cos(d/2) - j \frac{\delta}{2} \frac{\sin(d/2)}{d/2} \end{pmatrix} \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

$$\bar{D}_{3out} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \cos(d/2) + j \frac{\delta}{2} \frac{\sin(d/2)}{d/2} \\ \alpha \frac{\sin(d/2)}{d/2} \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

In ähnlicher Weise ergibt sich am Eingang/Ausgang 4 des 3dB-Richtkopplers:

$$\bar{D}_{4in} = j \frac{1}{\sqrt{2}} \bar{D}_2 \quad (2.17)$$

$$\bar{D}_{4in} = j \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

$$\bar{D}_{4out} = \underline{J}(\delta_o, \alpha_o) D_{4in} \quad (2.19)$$

$$\underline{J}(\delta_o, \alpha_o) = \begin{pmatrix} \cos(d_o/2) + j \frac{\delta_o}{2} \frac{\sin(d_o/2)}{d_o/2} & -\alpha_o \frac{\sin(d_o/2)}{d_o/2} \\ \alpha_o \frac{\sin(d_o/2)}{d_o/2} & \cos(d_o/2) - j \frac{\delta_o}{2} \frac{\sin(d_o/2)}{d_o/2} \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

$$d_o = \sqrt{\delta_o^2 + 4 \alpha_o^2} \quad (2.21)$$

$$\delta_o = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_o \int_o^{2L_o} d\ell \quad (2.22)$$

$$\delta_o = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta n_o L_o \quad (2.23)$$

$$\alpha_o = V_o \oint \bar{H}_o d\bar{\ell} - \frac{\pi}{2} \quad (2.24)$$

$$\alpha_o = V_o \left[ \int_o^{2\pi N_o R_o} \frac{M_o i_o - Mi}{2\pi R_o} d\ell - \int_{2\pi N_o R_o}^o \frac{M_o i_o - Mi}{2\pi R_o} d\ell \right] - \frac{\pi}{2} \quad (2.25)$$

$$\alpha_o = 2 V_o N_o (M_o i_o - Mi) - \frac{\pi}{2} = \tilde{\alpha}_o - \frac{\pi}{2} \quad (2.26)$$



Dabei bedeuten:

$\lambda$	Wellenlänge des Lichtes
$\Delta n_o$	Doppelbrechung der 2. LWL-Spule
$V_o$	Verdet-Konstante der 2. LWL-Spule
$R_o$	Radius der 2. LWL-Spule
$L_o$	Länge der 2. LWL-Spule
$N_o$	Windungszahl der 2. LWL-Spule
$M$	Windungszahl der 1. elektromagnetischen Spule
$M_o$	Windungszahl der 3. elektromagnetischen Spule
$i$	elektrischer Strom (Messgröße)
$i_o$	elektrischer Strom (2. Messwert)
$\vec{H}_o$	magnetische Feldstärke, herrührend von $i$ und $i_o$ , vor der Kompensation

$$\vec{D}_{4out} = \underline{J}(\delta_o, \alpha_o) \vec{D}_{4in} \quad (2.27)$$

$$\vec{D}_{4out} = \begin{pmatrix} \cos(d_o/2) + j \frac{\delta_o}{2} \frac{\sin(d_o/2)}{d_o/2} & -\alpha_o \frac{\sin(d_o/2)}{d_o/2} \\ \alpha_o \frac{\sin(d_o/2)}{d_o/2} & \cos(d_o/2) - j \frac{\delta_o}{2} \frac{\sin(d_o/2)}{d_o/2} \end{pmatrix} j \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

$$\underline{\underline{\vec{D}_{4out} = j \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \cos(d_o/2) + j \frac{\delta_o}{2} \frac{\sin(d_o/2)}{d_o/2} \\ \alpha_o \frac{\sin(d_o/2)}{d_o/2} \end{pmatrix}}} \quad (2.29)$$

Am Ausgang 5 des 3dB-Richtkopplers folgt:

$$\vec{D}_5 = \frac{1}{\sqrt{2}} \vec{D}_{4out} + j \frac{1}{\sqrt{2}} \vec{D}_{3out} \quad (2.30)$$

$$\underline{\underline{\vec{D}_5 = j \frac{1}{\sqrt{8}} \begin{pmatrix} \cos(d/2) + \cos(d_o/2) + j \left[ \frac{\delta}{2} \frac{\sin(d/2)}{d/2} \right] + \frac{\delta_o}{2} \frac{\sin(d_o/2)}{d_o/2} \\ \alpha \frac{\sin(d/2)}{d/2} + \alpha_o \frac{\sin(d_o/2)}{d_o/2} \end{pmatrix}}} \quad (2.31)$$

Nach dem zweiten Polarisator mit der Jones-Matrix  $\underline{P}_2$  erhalten wir schließlich

$$\vec{D}_{out} = \underline{P}_2 \vec{D}_5 \quad (2.32)$$

$$\vec{D}_{\text{out}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \vec{D}_5 \quad (2.33)$$

$$\vec{D}_{\text{out}} = j \frac{1}{\sqrt{8}} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(d/2) + \cos(d_o/2) + j \left[ \frac{\delta}{2} \frac{\sin(d/2)}{d/2} + \frac{\delta_o}{2} \frac{\sin(d_o/2)}{d_o/2} \right] \\ \alpha \frac{\sin(d/2)}{d/2} + \alpha_o \frac{\sin(d_o/2)}{d_o/2} \end{pmatrix} \quad (2.34)$$

$$\underline{\underline{\vec{D}_{\text{out}} = j \frac{1}{\sqrt{8}} \left( \alpha \frac{\sin(d/2)}{d/2} + \alpha_o \frac{\sin(d_o/2)}{d_o/2} \right)}}} \quad (2.35)$$

Für die optischen Leistungen gelten die Proportionalitäten

$$P_{\text{out}} \sim \vec{D}_{\text{out}}^* \vec{D}_{\text{out}}; \quad P_{\text{in}} \sim \vec{D}_{\text{in}}^* \vec{D}_{\text{in}} = 1 \quad (2.36)$$

Somit wird:

$$\underline{\underline{P_{\text{out}} = \frac{P_{\text{in}}}{8} \left[ \alpha \frac{\sin(d/2)}{d/2} + \alpha_o \frac{\sin(d_o/2)}{d_o/2} \right]^2}} \quad (2.37)$$

Mit der Photoempfindlichkeit  $S_E$  der ergibt sich für den Photostrom

$$\underline{\underline{i_{\text{ph}} = \frac{S_E P_{\text{in}}}{8} \left[ \alpha \frac{\sin(d/2)}{d/2} + \alpha_o \frac{\sin(d_o/2)}{d_o/2} \right]^2}} \quad (2.38)$$

## 2.8.2 Sensor-Differenzialgleichung

Nach Abb. 2.1 ergibt sich für den elektrischen Teil des Stromsensors zunächst:

$$i_{\text{ph}} = i_{\text{pho}} + i_{\text{ph1}} \quad (2.39)$$

$$i_o = \frac{V_{\text{io}}}{T_o} \int_0^t i_{\text{pho}} d\tau + I_{\text{oA}} \quad (2.40)$$

$$i_l = \frac{V_{\text{il}}}{T_l} \int_0^t i_{\text{ph1}} d\tau + I_{\text{lA}} \quad (2.41)$$

Reflektierender Faraday-Effekt-Stromsensor

Thiele, R.

2015, IX, 37 S. 7 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-09444-7