

In diesem Kapitel erlernen Sie, wie die Polarisations-Eigenschaften eines faseroptischen Stromsensors durch die sogenannten Stokes-Parameter, die Polarisations-Einheitsvektoren oder die Polarisationsvariablen charakterisiert werden können. Außerdem ist hier das Messprinzip für die Signalverarbeitungseinheit dargestellt.

2.1 Optischer Teil des Sensors

2.1.1 Stokes-Parameter

Da das elektrische Feld einer Lichtwelle nicht ohne weiteres gemessen werden kann, sind Methoden entwickelt worden, die auf der Ermittlung bestimmter optischer Leistungen, den sogenannten Stokes-Parametern beruhen. Die Stokes-Parameter

S_0 bis S_3 werden wie folgt gebildet:

$S_0 \triangleq$ Totale Leistung (polarisiert und nichtpolarisiert)

$S_1 \triangleq$ Leistung durch einen linearen horizontalen Polarisator minus Leistung durch einen linearen vertikalen Polarisator

$S_2 \triangleq$ Leistung durch einen linearen $+45^\circ$ -Polarisator minus Leistung durch einen -45° -Polarisator

$S_3 \triangleq$ Leistung durch einen rechtsdrehenden zirkularen Polarisator minus Leistung durch einen linksdrehenden zirkularen Polarisator

Der Betrag der optischen Leistung der im polarisierten Teil der Lichtwelle enthalten ist, erhält man aus:

$$P_{\text{polarisiert}} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}. \quad (2.1)$$

Der Polarisationsgrad, *DOP für Degree of Polarisation*, wird entsprechend

$$\text{DOP} = \frac{P_{\text{polarisiert}}}{P_{\text{polarisiert}} + P_{\text{nichtpolarisiert}}} = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2} \quad (2.2)$$

gebildet.

Darin sind die normierten Stokes-Parameter wie folgt definiert

$$s_1 = \frac{S_1}{S_0}, s_2 = \frac{S_2}{S_0}, s_3 = \frac{S_3}{S_0}. \quad (2.3)$$

mit dem Wertebereich

$$-1 \leq s_v \leq 1, v \in \{1, 2, 3\}. \quad (2.4)$$

Für die Messung der Stokes-Parameter wurde ein Messplatz der Fa. Newport verwendet, der aus folgenden Komponenten besteht:

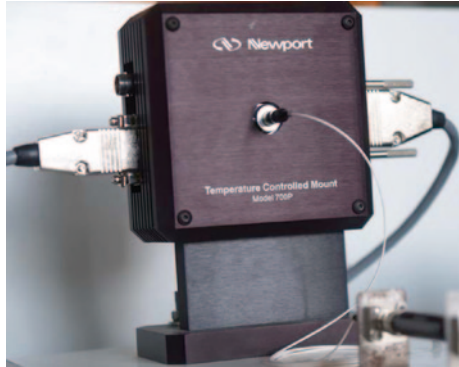
- Temperature Controlled Mount; Modell 700P
- Laser Diode Driver; Modell 501B
- Temperature Controller; Modell 325B
- Polarisation Syntesizer; PSY-101.

Der Temperature Controlled Mount nach Abb. 2.1 dient zur Aufnahme der Laserdioden und ist mit dem Laser-Dioden-Treiber und dem Temperature Controller, entsprechend Abb. 2.2 verbunden.

Mit Hilfe des Laser-Dioden-Treibers erfolgt die Ansteuerung der Laserdioden. Durch den Temperature Controller wird gewährleistet, dass die eingestellte Betriebstemperatur der Laserdioden konstant bleibt.

Die Abb. 2.3 zeigt unseren Polarisationsmessplatz einschließlich der Visualisierung des Polarisations-Einheitsvektors, der Poincaré-Kugel und der Anzeige der Stokes-Parameter auf dem Notebook.

Abb. 2.1 Temperature Controlled Mount (Foto Winkler)



2.1.2 Polarisationsellipse

Die Berechnung der Polarisationsellipse erfolgt mit Gl. (2.5) ff.

$$\frac{X^2}{|e_x|^2} + \frac{Y^2}{|e_y|^2} - \frac{2XY\cos\psi}{|e_x||e_y|} = \sin^2\psi \quad (2.5)$$

$$\Psi = \Psi_y - \Psi_x. \quad (2.6)$$



Abb. 2.2 Laser Diode Driver, Temperature Controller, Polarisation Synthesizer (Foto Winkler)

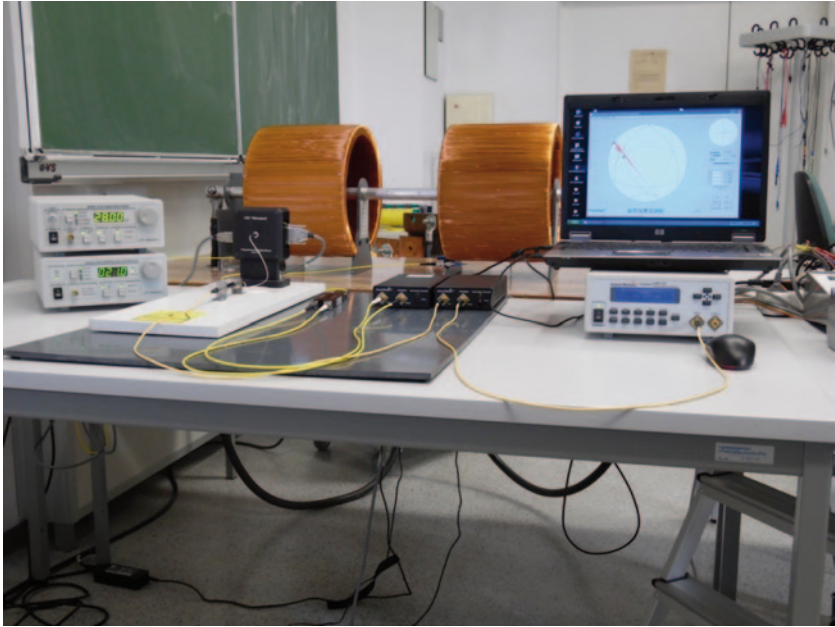


Abb. 2.3 Optischer Teil des Stromsensors mit Polarisations-Messgerät (Foto Pohl)

Voraussetzung Die Parameter des Polarisations-Einheitsvektors $|e_x|, |e_y|, \psi$ sind berechnet und damit bekannt.

Die Umstellung von (2.5) zur Normalform einer quadratischen Gleichung mit ihren Lösungen ergibt

$$Y^2 - 2 \frac{|e_y|}{|e_x|} \cos\psi XY + \frac{|e_y|^2}{|e_x|^2} X^2 - |e_y|^2 \sin^2\psi = 0 \quad (2.7)$$

$$Y_{1/2} = \frac{|e_y|}{|e_x|} X \cos\psi \pm \sqrt{\frac{|e_y|^2}{|e_x|^2} X^2 \cos^2\psi - \frac{|e_y|^2}{|e_x|^2} X^2 + |e_y|^2 \sin^2\psi} \quad (2.8)$$

Zwischenrechnung:

$$\sqrt{\frac{|e_y|^2}{|e_x|^2} X^2 \cos^2\psi - \frac{|e_y|^2}{|e_x|^2} X^2 + |e_y|^2 \sin^2\psi}$$

$$\begin{aligned}
&= \sqrt{\frac{|e_y|^2}{|e_x|^2} X^2 \left[\underbrace{\cos^2 \psi - 1}_{= -\sin^2 \psi} \right] + |e_y|^2 \sin^2 \psi} \\
&= \sqrt{-\frac{X^2}{|e_x|^2} + 1} |e_y| \sin \psi \\
&= \frac{|e_y|}{|e_x|} \sin \psi \sqrt{|e_x|^2 - X^2}
\end{aligned}$$

Lösungen der quadratischen Gleichung:

$$\begin{aligned}
Y_{1/2} &= \frac{|e_y|}{|e_x|} X \cos \psi \pm \frac{|e_y|}{|e_x|} \sin \psi \sqrt{|e_x|^2 - X^2} \\
\underline{\underline{Y_{1/2} &= \frac{|e_y|}{|e_x|} \left[X \cos \psi \pm \sqrt{|e_x|^2 - X^2} \sin \psi \right]}} \quad (2.9)
\end{aligned}$$

Wir erzwingen reelle Lösungen durch Einschränkung des Definitionsbereiches von X :

$$\begin{aligned}
|e_x|^2 - X^2 &\geq 0 \rightarrow X_{\max, \min} = \pm \sqrt{|e_x|^2} = \pm |e_x| \\
\underline{\underline{-|e_x| &\leq X \leq |e_x|}}
\end{aligned}$$

Es folgen Beispiele für Entartungen der Polarisationsellipse. Dargestellt wird grundsätzlich Y über X .

Beispiel 1

$|e_x| = 0, |e_y| = 1, \psi = 0$ (vertikale lineare Polarisation) (Abb. 2.4)

Beachten Sie immer: $|e_x|^2 + |e_y|^2 = 1$

$$\begin{aligned}
\rightarrow Y_{1,2} &= \frac{|e_y|}{|e_x|} X & \rightarrow Y_1 = Y_2 = Y \\
|e_x| Y_{1,2} &= |e_y| X, \text{ bei: } |e_x| = 0 \text{ und } |e_y| = 1 \\
\rightarrow &\boxed{X = 0, Y_{1,2} = \text{beliebig}}
\end{aligned}$$

Abb. 2.4 Vertikale lineare Polarisation

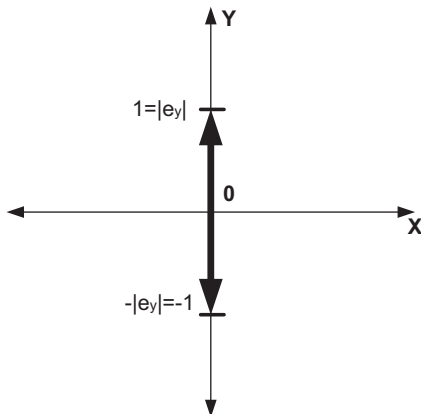
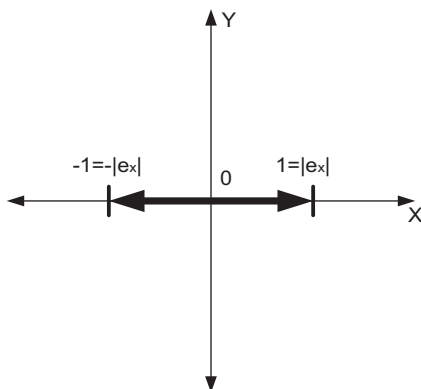


Abb. 2.5 Horizontale lineare Polarisation



Aus Symmetriegründen beachten Sie bitte: $-|e_y| \leq Y \leq |e_y|$

Beispiel 2

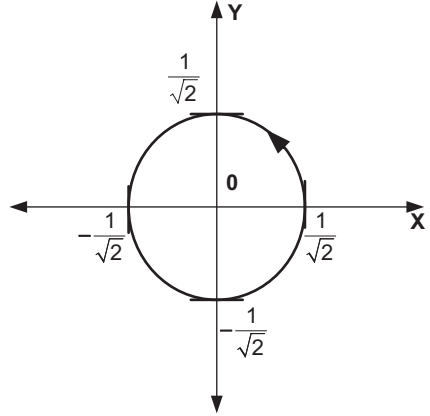
$|e_y| = 0$, $|e_x| = 1$, $\psi = \pi$ (horizontale lineare Polarisation) (Abb. 2.5)

$$Y_{1/2} = -\frac{|e_y|}{|e_x|} \quad X = -\frac{0}{1} \quad X = 0$$

$$\rightarrow \boxed{Y_1 = Y_2 = 0 \text{ und } X \text{ beliebig}}$$

Beachten Sie bitte: $-|e_x| \leq X \leq |e_x|$

Abb. 2.6 Zirkular linksdrehende Polarisation



Beispiel 3

$|e_x| = |e_y| = \frac{1}{\sqrt{2}}, \psi = \frac{\pi}{2}$ (zirkular linksdrehende Polarisation) (Abb. 2.6)

$$Y_{1/2} = \sqrt{|e_x|^2 - X^2} = \pm \sqrt{\frac{1}{2} - X^2}$$

$$-|e_x| = -\frac{1}{\sqrt{2}} \leq X \leq \frac{1}{\sqrt{2}} = |e_x|$$

Das Ziel unserer Untersuchungen ist eine reale Darstellung der Verhältnisse in Form von Abb. 2.7.

Weiterhin gilt: $\psi_{\min} \leq \psi \leq \psi_{\max}$ und zugehörig z.B. $|e_{x \min}|, |e_{y \min}|$ für ψ_{\min} .

2.1.3 Polarisations-Einheitsvektor

Die Berechnung von $|e_x|, |e_y|, \psi$ erfolgt aus den gemessenen Stokes-Parametern:

$$\left. \begin{aligned} |e_x| &= \sqrt{\frac{1+s_1}{2}}, \quad |e_y| = \sqrt{\frac{1-s_1}{2}} \\ \psi &= \psi_y - \psi_x = \arccos \left[\frac{s_2}{\sqrt{1-s_1^2}} \right] \quad \text{oder} \quad \psi = \psi_y - \psi_x = -\arcsin \left[\frac{s_3}{\sqrt{1-s_1^2}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

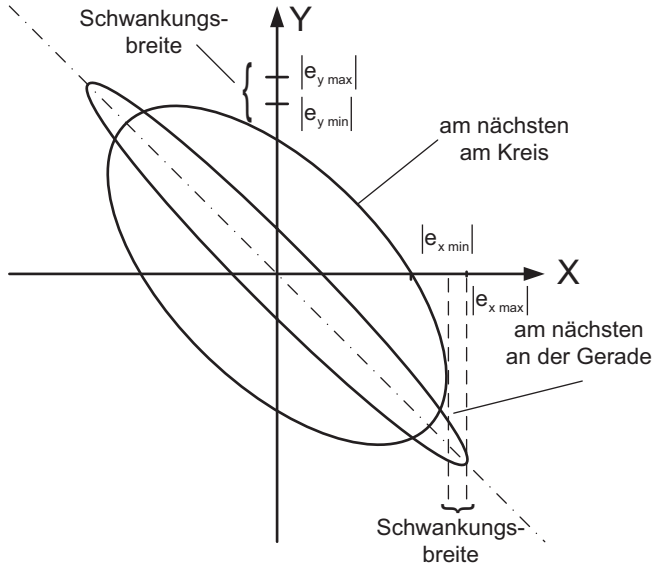


Abb. 2.7 Extremwerte der Polarisationsellipse und des Polarisations-Einheitsvektors

Die spätere Berechnung benutzen wir u. A.

$$\psi = \psi_y - \psi_x = -\arccos \left[\frac{s_2}{\sqrt{1-s_1^2}} \right]. \quad (2.11)$$

Der Polarisations-Einheitsvektor lässt sich aus den Stokes-Parametern ermitteln.
Ausgangspunkt sind die Definitionen

$$\begin{aligned} \text{Definition 1: } s_1 &= |e_x|^2 - |e_y|^2 \\ s_2 &= e_x e_y^* + e_x^* e_y \\ s_3 &= j[e_x e_y^* - e_x^* e_y] \end{aligned}$$

$$\text{Definition 2: } \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |e_x| e^{-j\psi_x} \\ |e_y| e^{-j\psi_y} \end{pmatrix}$$

$$\boxed{|e_x|^2 + |e_y|^2 = 1} \quad (\text{Voraussetzung}) \quad (2.12)$$

Herleitung: $s_1 = |e_x|^2 - 1 + |e_x|^2 = 2|e_x|^2 - 1$

$$\rightarrow |e_x|^2 = \frac{1+s_1}{2}$$

$$\rightarrow |e_x| = \sqrt{\frac{1+s_1}{2}} \quad (2.13)$$

$$s_1 = 1 - 2|e_y|^2$$

$$\rightarrow |e_y|^2 = \frac{1-s_1}{2}$$

$$\rightarrow |e_y| = \sqrt{\frac{1-s_1}{2}} \quad (2.14)$$

$$s_2 = |e_x||e_y|e^{j(\psi_y - \psi_x)} + |e_x||e_y|e^{-j(\psi_y - \psi_x)} \quad \text{Definition: } \psi = \psi_y - \psi_x$$

$$s_2 = |e_x||e_y|[e^{j\psi} + e^{-j\psi}] \quad \text{mit } e^{j\psi} + e^{-j\psi} = 2\cos\psi$$

$$\rightarrow \cos\psi = \frac{s_2}{2|e_x||e_y|} \quad \text{mit } |e_x| = \sqrt{\frac{1+s_1}{2}} \text{ und } |e_y| = \sqrt{\frac{1-s_1}{2}}$$

$$\rightarrow \cos\psi = \frac{s_2}{\sqrt{(1-s_1)(1+s_1)}} \quad \text{mit } (1-s_1)(1+s_1) = 1-s_1^2$$

$$\rightarrow \cos\psi = \frac{s_2}{\sqrt{(1-s_1^2)}}$$

$$\rightarrow \psi = \psi_y - \psi_x = \arccos \left[\frac{s_2}{\sqrt{1-s_1^2}} \right] \quad (2.15)$$

$$s_3 = j[|e_x||e_y|e^{j(\psi_y - \psi_x)} - |e_x||e_y|e^{-j(\psi_y - \psi_x)}]$$

$$s_3 = j|e_x||e_y|[e^{j\psi} - e^{-j\psi}] \quad \text{mit } e^{j\psi} - e^{-j\psi} = 2j\sin\psi$$

$$s_3 = -2|e_x||e_y|\sin\psi; j^2 = -1$$

$$-\sin\psi = \frac{s_3}{2|e_x||e_y|} \quad \text{mit } |e_x| = \sqrt{\frac{1+s_1}{2}} \text{ und } |e_y| = \sqrt{\frac{1-s_1}{2}}$$

$$\begin{aligned}
 -\sin\psi &= \frac{s_3}{\sqrt{1-s_1^2}} & \text{mit } -\sin\psi &= \sin(-\psi) \\
 \sin(-\psi) &= \frac{s_3}{\sqrt{1-s_1^2}} \\
 \rightarrow -\psi &= \arcsin\left[\frac{s_3}{\sqrt{1-s_1^2}}\right] \\
 \boxed{\psi} &= -\arcsin\left[\frac{s_3}{\sqrt{1-s_1^2}}\right]
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

2.1.4 Polarisationsvariable

Die Polarisationsvariable χ ist definiert als Verhältnis der Transversalkomponenten der Verschiebungsflussdichte gemäß

$$\chi = \frac{D_y}{D_x}. \tag{2.17}$$

Für die Übertragung einer Polarisation vom Eingang einer optischen Komponente zu deren Ausgang gilt die Polarisations-Übertragungsgleichung zwischen χ_{in} als Eingangspolarisation und χ_{out} als Ausgangspolarisation mit den Elementen der Jones-Matrix (J_{11} , J_{12} , J_{21} , J_{22}) entsprechend

$$\chi_{\text{out}} = \frac{J_{21} + J_{22} \chi_{\text{in}}}{J_{11} + J_{12} \chi_{\text{in}}}. \tag{2.18}$$

2.2 Elektronischer Teil des Sensors

Der elektronische Teil des Sensors ist in Abb. 1.2 dargestellt.

2.2.1 Messprinzip für die Signalverarbeitungseinheit

Für die alleinige messtechnische Bestimmung von Strom- und Spannungswerten mit handelsüblichen Messgeräten ist für die Signalverarbeitungseinheit nach Abb. 1.2 ein Messprinzip erforderlich.

Erfindungsgemäß soll dazu die Photodiode am Eingang vorläufig abgetrennt und durch die Reihenschaltung von Gleichspannungs- (U_q) und Wechselspannungsquelle (u_q) sowie einen geeignet dimensionierten Widerstand R_i ersetzt werden, dass sich ein Gleich- und Wechselstrom durch R_i so einstellt als ob die Photodiode zusammen mit dem gesamten optischen Teil ohne die Rückkopplungen angeschlossen wäre.

Das ist dann genau der Fall, wenn gilt:

$$U_q = R_i I_{phA}$$

(2.19)

und

$$\hat{u}_q = R_i \hat{i}_{ph\sim}$$

(2.20)

Dabei ist zu beachten, dass der Wechselspannungsanteil sowohl die Grundschiwingung als auch die erste Oberschwingung enthalten muss.

2.2.2 Messwerte für Ströme und Spannungen

Die Messwerte für die Ströme und Spannungen in der Signalverarbeitungseinheit nach Abb. 1.2 entnehmen Sie bitte Tab. 2.1. Darin kennzeichnen die „Dachwerte“ die Maximalwerte der Ströme und Spannungen ohne „Dach“ in Abb. 1.2, die sich nach einer Laufzeit τ aus der Überlagerung von Grundschiwingung und erster Oberschwingung ergeben. Ausführungen zur Laufzeit τ finden Sie in dem an letzter

Stelle der weiterführenden Literatur aufgeführten Essential.

Tab. 2.1 Messwerte für Ströme und Spannungen in der Signalverarbeitungseinheit

Messgröße	I_{phA}	$\hat{i}_{ph0} = \hat{i}_{ph1}$	$\hat{u}_{10} = \hat{u}_{11}$	$\hat{u}_{20} = \hat{u}_{30}$ $\hat{u}_{21} = \hat{u}_{31}$	$\hat{i}_{0\sim} = \hat{i}_{1\sim}$	$\hat{u}_{m0} = \hat{u}_{m1}$
Messwert	1,25 μ A	0,4 nA	160 mV	16,5 V	460 mA	16,4 V

Test eines Faraday-Effekt-Stromsensors

Thiele, R.

2015, X, 53 S. 36 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-10095-7