



Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein
Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

⑫ PATENTSCHRIFT A5

⑳ Gesuchsnummer: 5797/82

㉒ Anmeldungsdatum: 01.10.1982

㉓ Priorität(en): 17.10.1981 DE 3141325

㉔ Patent erteilt: 15.01.1987

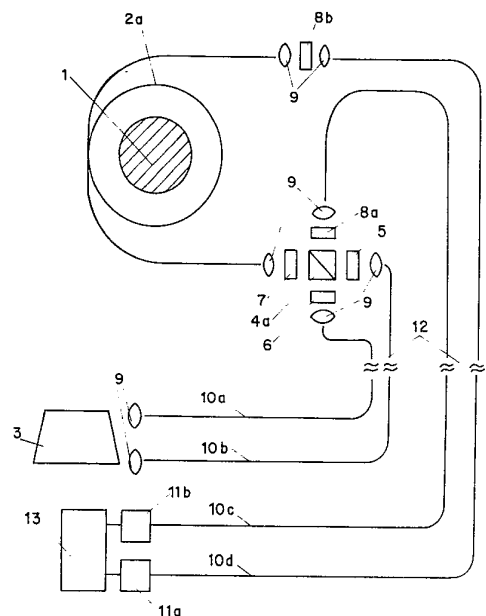
㉕ Patentschrift veröffentlicht: 15.01.1987

㉗ Inhaber:
BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie.,
Baden

㉘ Erfinder:
Dändliker, René, Prof. Dr., Corcelles NE

⑤④ Verfahren zur Strommessung an einem elektrischen Leiter durch den Faraday-Effekt.

⑤⑦ Zwei Lichtwellen einer Laserlichtquelle (3) mit verschiedenen Frequenzen (ω_1 , ω_2) werden je über einen zuführenden Lichtleiter (10a, 10b) einer Anordnung mit Polarisatoren (5, 6, 7, 8a) und einem Strahlteiler (4a) zugeführt. Die eine diese Anordnung verlassende Welle besteht aus einer links- und einer rechts-zirkularpolarisierten Komponente mit der ersten (ω_1) bzw. der zweiten Frequenz (ω_2). Sie wird über eine optische Spule (2a) geleitet und einem Analysator (8b) zugeführt. Die optische Spule (2a) umfasst einen elektrischen Leiter (1). Die den Analysator (8b) verlassende Welle wird über einen ersten wegführenden Lichtleiter (10d) und einen Photodetektor (11a) einer Phasenvergleichsanordnung (13) zugeführt. Die andere Welle, welche die Anordnung mit Polarisatoren (5, 6, 7, 8a) und Strahlteiler (4a) verlässt, wird unmittelbar über einen zweiten wegführenden Lichtleiter (10c) und einen Photodetektor (11b) der Phasenvergleichsanordnung (13) zugeführt. Die Phase (29) zwischen den Intensitäten der der Phasenvergleichsanordnung (13) zugeführten Wellen ist das Zweifache der Drehung der Polarisations ebene des durch die optische Spule (2a) geleiteten Lichtes.



PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zur Messung des Stromes (j) in einem elektrischen Leiter (1) durch den Faraday-Effekt mit

- einer den Leiter (1) umgebenden optischen Spule (2a, b, c), welche aus einem Lichtleiter besteht,

- einer Laser-Lichtquelle (3), deren Licht über einen zuführenden Lichtleiter (10a, b) zur optischen Spule (2a, b, c) gelangt, und

- einer von der Spule (2a, b, c) entfernten Empfangsanordnung (13, 11a, 11b), welche über einen wegführenden Lichtleiter (10c, 10d) mit der Spule (2a, b, c) in Verbindung steht,

- wobei die Drehung der Polarisationssebene des durch die Spule (2a, b, c) geleiteten Lichtes ein Maß für den durch den elektrischen Leiter (1) fließenden Strom (j) darstellt,

dadurch gekennzeichnet, dass

- über einen ersten zuführenden Lichtleiter (10a) und einen zweiten zuführenden Lichtleiter (10b) voneinander getrennt zwei Wellen einer ersten Frequenz (ω_1) und einer zweiten Frequenz (ω_2) von der auf Erdpotential liegenden

Laser-Lichtquelle (3) zu einer auf Messpotential liegenden Strahlteiler-Anordnung (4a) geführt werden,

- dass die zwei Wellen vor Eintritt in die Strahlteiler-Anordnung (4a) senkrecht zueinander linear polarisiert werden,

- dass nach Austritt aus der Strahlteiler-Anordnung (4a)

- die eine austretende Welle hinsichtlich der einen Frequenz (ω_1) rechts- und hinsichtlich der anderen Frequenz (ω_2) linkszirkularpolarisiert sind, und

- die andere austretende Welle linear polarisiert wird in einer Richtung, die um 45° geneigt ist zu den Richtungen des Eintritts, und

- dass die die zirkular polarisierten Komponenten umfassende Welle sodann durch die optische Spule (2a) geleitet wird, und

- dass sie danach auch linear polarisiert wird, und

- dass sie danach über einen ersten wegführenden Lichtleiter (10d) einer auf Erdpotential liegenden Phasenvergleichsanordnung (13) zugeführt wird, und

- dass die andere die Strahlteiler-Anordnung (4a) verlassende Welle über einen zweiten wegführenden Lichtleiter (10c) unmittelbar der Phasenvergleichsanordnung (13) zugeführt wird, und

- dass mittels der Phasenvergleichsanordnung (13) die Phasendifferenz (2ϑ) der Intensitäten der beiden zugeführten Wellen als Maß für den Wert des zu messenden Stromes (j) gemessen wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Schwebungsfrequenz (Ω) als Differenz der beiden Wellenfrequenzen ($\omega_1 - \omega_2$) zwischen 1 kHz und 1 MHz gewählt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass von der optischen Spule (2a) eine zweite Welle abgeleitet wird derart, dass die Phasendifferenz ($2\vartheta'$) zwischen den beiden entgegengesetzt zirkular polarisierten Komponenten einer anderen Windungszahl (N') der Spule (2a) entspricht als die Phasendifferenz (2ϑ) der zirkular polarisierten Komponenten der ersten Welle, wobei die andere Windungszahl (N') sehr viel kleiner ist als die erste Windungszahl (N) und die Phasendifferenz ($2\vartheta'$) der zweiten Welle beim maximal auftretenden Messstrom (j_{\max}) 90° nicht überschreitet.

4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass von der optischen Spule (2a) eine zweite Welle abgeleitet wird derart, dass die Phasendifferenz ($2\vartheta'$) zwischen den beiden entgegengesetzt zirkular polarisierten Komponenten einer anderen Windungszahl (N') der Spule (2a) entspricht als die Phasendifferenz (2ϑ) der zirkular polarisierten Komponenten der ersten Welle, wobei die massge-

benden Windungszahlen (N, N') derart gewählt werden, dass die Differenz ($2(\vartheta - \vartheta')$) der beiden Phasendifferenzen ($2\vartheta, 2\vartheta'$) beim maximal auftretenden Messstrom (j_{\max}) 90° nicht überschreitet.

5. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die zweite Welle mittels einer zweiten, den elektrischen Leiter (1) neben der ersten (2a) umfassenden optischen Spule (2b) abgeleitet wird.

6. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, dass in der Phasenvergleichsanordnung (13) die durch die in der zweiten Welle enthaltenen zirkular polarisierten Komponenten bestimmte Phasendifferenz ($2\vartheta'$) zur Bestimmung des 180° -Intervalls verwendet wird, in dem die durch den zu messenden Strom (j) bewirkte Phasendifferenz (2ϑ) liegt, und die durch die zirkular polarisierten Komponenten in der ersten Welle bestimmte Phasendifferenz (2ϑ) zur Messung des Wertes des Stromes (j).

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass Konvexlinsen (9) an den entsprechenden Ein- und Ausgängen der Lichtleiter (10a, 10b, 10c, 10d) das Licht ein- und auskoppeln.

8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Laser-Lichtquelle (3) ein He-Ne-Laser ist.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Laser-Lichtquelle (3) eine GaAlAs-Laserdiode ist.

10. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die zuführenden Lichtleiter (10a, 10b) monomode und die wegführenden Lichtleiter (10c, 10d) monomode oder multimode Lichtleiter sind.

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Strommessung nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

Ein solches Verfahren ist bekannt aus einer Reihe von drei Artikeln mit dem gemeinsamen Titel «Magneto-optical Current Transformer» von A. Papp und H. Harms in Appl. Optics, 15. November 1980, Nr. 19, Seiten 3729 bis 3745.

Darin wird ein Verfahren zur Strommessung mit einer sogenannten optischen Spule beschrieben. Das Labormuster des instrumentellen Stromwandlers besitzt die Güteklasse 0.2, bezogen auf die VDE Norm 0414. Dabei wird Licht einer Lichtquelle mit einer sehr engen Bandbreite über einen Linearpolarisator und eine einkoppelnde Linse einem Lichtleiter zugeführt, welcher direkt mit der optischen Spule verbunden ist. Laser-Lichtquellen erfüllen die Bedingung der Bandbreite besonders gut, und daher werden ein He-Ne-Laser oder eine Laserdiode, z.B. ein GaAlAs-Laser verwendet. Ein wegführender Lichtleiter führt das Licht über einen Linearpolarisator zu einer Detektionsanordnung. Diese Anordnung besteht aus einer Linse, welche das Licht auskoppelt, einem Wollaston-Prisma als Strahlteiler, zwei Photodetektoren und einer Signalverarbeitungseinrichtung. Die Anforderungen, die an die gesamte Anordnung gestellt werden müssen, sind hoch. Die Lichtleiter müssen über ihre ganze Länge so wenig wie möglich doppelbrechende Eigenschaften aufweisen, damit die Faraday-Rotation überhaupt beobachtet wird. Um die störende Doppelbrechung in den optischen Fasern zu reduzieren, werden die Fasern mechanisch in einer Richtung entgegengesetzt der Richtung der Doppelbrechung gedreht und entsprechend fixiert. Das Messsystem ist grundsätzlich nichtlinear, im Messbereich begrenzt und empfindlich auf Intensitätsänderungen.

Ein ähnliches Verfahren wird beschrieben von S.C. Rashleigh und R. Ulrich in Appl. Phys. Lett. 34 (11), 1. Juni 1979,

S. 768–770. Die dort verwendete Messanordnung besteht, in der folgenden Reihenfolge angeordnet, aus einem He-Ne-Laser, einem Linearpolarisator, einem lichteinkoppelnden Mikroskopobjektiv, einer zuführenden optischen Faser, welche mechanisch verbunden ist mit einer optischen Spule, welche ihrerseits wieder mit einer wegführenden optischen Faser verbunden ist, einem lichteauskoppelnden Mikroskopobjektiv, einem die Doppelbrechung der Fasern teilweise kompensierenden Soleil-Babinet-Kompensator, einem Wollaston-Prisma, welches das Licht in zwei senkrecht zueinander stehende Linearpolarisationen aufspaltet, und zwei Photodetektoren, womit die Intensitäten, und indirekt die zu messende Faraday-Rotation bestimmt werden. In diesem Aufsatz werden verschiedene Probleme der Doppelbrechung auf mögliche Lösungen untersucht. Dazu wird unter anderem die Faser, aus welcher die optische Spule besteht, mechanisch gedreht und zwischen zwei Fixierpunkten festgeklemmt.

Da es sich hier um eine Absolutmessung handelt, ist es ebenfalls sehr wichtig, die systematischen Fehler so gut wie möglich zu kompensieren oder wenigstens quantitativ zu erfassen. Das System besitzt grundsätzlich die gleichen Nachteile wie die vorher beschriebene Anordnung.

Da die beschriebenen Anordnungen im wesentlichen gedacht sind für die Strommessung an Hochspannungsleitungen, liegt die optische Spule auf Hochspannungspotential. Die opto-elektronischen Elemente, d.h. die Laserlichtquellen und die Detektoren, und die Auswerteelektronik müssen dagegen auf Erdpotential liegen.

Die Nachteile der beiden Anordnungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Bestimmung der Faraday-Rotation ist abhängig vom Verhältnis der beiden gemessenen Intensitäten. Die beiden opto-elektronischen Detektionskanäle müssen deshalb genau abgeglichen sein und bleiben.

- Die Bestimmung der Faraday-Rotation ist nur für relativ kleine Drehwinkel ($<6^\circ$) linear und nur bis 90° eindeutig. Elektronische Korrektur der Nichtlinearität und zusätzliche Messung mit einem um 90° verschobenen Detektionssystem sind nötig.

- Die Verwendung derselben optischen Faser für die Überbrückung der Spannungsdifferenz (Hochspannungsleitung) wie für die optische Spule zur Messung des Faraday-Effektes bringt das zusätzliche Problem, dass die Doppelbrechung in der Faser die Messung sehr empfindlich stört. Die Eigendoppelbrechung, eventuell kompensiert durch geeignete Torsion der Faser, beschränkt die maximale Länge der Faser und damit auch die Windungszahl der optischen Spule. Induzierte Doppelbrechung durch mechanische Spannungen muss durch äusserst sorgfältige Halterung und Verlegung der Faser vermieden werden. Diese Bedingungen sind für die Zuleitungen zur optischen Spule schwieriger zu erfüllen als für diese selbst.

Die Erfindung stellt sich daher die Aufgabe, die bekannten Verfahren zur Strommessung an einem elektrischen Leiter durch den Faraday-Effekt derart zu verbessern, dass die obigen Nachteile nicht auftreten.

Diese Aufgabe wird bei dem eingangs genannten Verfahren erfindungsgemäss gelöst durch den kennzeichnenden Teil des Anspruchs 1.

Einige wichtige Vorteile der Erfindung werden im folgenden aufgeführt:

- Die Phasenmessung bringt einen linearen und unbeschränkten Messbereich für die Faraday-Rotation.

- Die Verwendung zweier getrennter Lichtleiter für die Übertragung der beiden optischen Frequenzen stellt keine

Anforderungen an die Polarisations-eigenschaften (Doppelbrechung) der Lichtleiter für die Übertragungsstrecke.

- Die Verwendung von zwei getrennt auf Hochspannung geführten optischen Frequenzen ermöglicht die Erzeugung eines virtuell rotierenden Polarisations-Analysators durch rein passive optische Elemente auf Hochspannungspotential.

Andere wichtige Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der folgenden Beschreibung einiger anhand von Zeichnungen erläuteter Beispiele der Erfindung. Dabei zeigt:

10 Fig. 1 eine Anordnung zur Strommessung an einem elektrischen Leiter durch den Faraday-Effekt,

Fig. 2 eine Ausführungsform zur Verbesserung der Phasenmessung, und

15 Fig. 3 eine Variante der Ausführungsform gemäss Fig. 2.

In Fig. 1 ist der elektrische Leiter 1 dargestellt, der von einer aus einem Lichtleiter bestehenden optischen Spule 2a umschlungen wird. Die Laser-Lichtquelle 3 zur Erzeugung von Lichtwellen der Frequenz ω_1 bzw. ω_2 besteht mit Vorteil aus einem He-Ne-Laser oder aus einer GaAlAs-Diode.

Das Licht der Laserlichtquelle 43 gelangt getrennt über die einkoppelnden Konkavlinen 9 in die zuführenden monomodalen Lichtleiter 10a und 10b. Diese liegen nach der Hochspannungsbereichsgrenze 12 auf Hochspannungspotential. Der Frequenzunterschied $\Omega = \omega_1 - \omega_2$ zwischen den Frequenzen der beiden Lichtwellen liegt etwa zwischen 1 kHz und 1 MHz. Das Licht mit der Frequenz ω_1 wird aus dem monomodalen Lichtleiter 10a über eine auskoppelnde Konkavlinse 9 einem Linearpolarisator 6 zugeführt. Das Licht mit der Frequenz ω_2 aus dem monomodalen Lichtleiter 10b wird über eine andere auskoppelnde Konkavlinse 9 dem Linearpolarisator 5 zugeführt. Die Polarisationsrichtungen der beiden Polarisatoren 5 und 6 stehen senkrecht zueinander. In dem Strahlteiler 4a werden die beiden Lichtwellen überlagert, und dann einerseits einem Zirkularpolarisator 7 zugeführt, und andererseits über einen unter 45° zu den Richtungen der Polarisatoren 5, 6 polarisierenden Linearpolarisator 8a und eine einkoppelnde Konkavlinse 9 dem multimodalen Lichtleiter 10c zugeführt. Der Zirkularpolarisator 7 ist ein 4-Plättchen, das die Lichtwellen mit den Frequenzen ω_1 und ω_2 entsprechend ihren Polarisationsrichtungen in entgegengesetzt zirkular-polarisierte Wellen umwandelt. Hinter dem Zirkularpolarisator 7 und der optischen Spule 2a entsteht also eine Lichtwelle, die die entgegengesetzt zirkular polarisierten Komponenten

$$A_+ = a_+ \exp\{i(\omega_1 t + \varphi_1 + \vartheta)\}, \text{ und}$$

$$A_- = a_- \exp\{i(\omega_2 t + \varphi_2 - \vartheta)\}$$

umfasst. Dabei sind a_+ und a_- die (reellen) Amplituden der rechts- bzw. linkszirkular polarisierten Wellen. $\delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ ist die relative Phase am Eingang der optischen Spule 2a, und $\vartheta = V \cdot N \cdot j$ die Faraday-Rotation mit der Verdet-Konstanten V , der Windungszahl N der optischen Spule 2a, und dem elektrischen Strom j , der den Leiter 1 durchfliesst. Die relative Phase der beiden zirkular polarisierten Wellen A_+ und A_- erscheint als Phase $(\Delta\varphi + 2\vartheta)$ der Schwebungsfrequenzen Ω in der Intensität $I(t)$ des Lichtes hinter einem unter 45° mit den Polarisationsrichtungen der Polarisatoren 5, 6 polarisierenden Analysator 8b, nämlich

$$65 \quad I(t) = 1/2 |A_+ + A_-|^2 = 1/2(a_+^2 + a_-^2) + a_+ a_- \cos(\varphi t + \Delta\varphi + 2\vartheta).$$

Der Analysator 8b ist zweckmässig zwischen zwei licht-

koppelnden Konvexlinsen angeordnet, wodurch die Lichtwelle dem wegführenden multimodalen Lichtleiter 10d zugeführt wird, ohne dass eine mechanische Bindung dieses Lichtleiters 10d mit der optischen Spule 2a besteht. Die Lichtleiter 10c und 10d befinden sich nach der Hochspannungsbereichsgrenze 12 auf Erdpotential.

Die über den Lichtleiter 10c über den Photodetektor 11b zur Phasenvergleichsanordnung 13 geführte Lichtwelle ergibt als Referenzsignal

$$I_r = a_r \cos(\omega t + \Delta\varphi).$$

Die oben genannte Intensität $I(t)$ erzeugt über den Photodetektor 11a in der Phasenvergleichsanordnung 13 das Messsignal I_m . Als Photodetektoren können z.B. Photodioden verwendet werden. Als Phasenmessanordnung kann im einfachsten Fall zum Beispiel das Phasenmeter 305 der Firma Dranetz, South Plainfield, N.J., USA verwendet werden:

Durch Vergleich der Phasen der beiden Signale, also der Phase am Eingang und am Ausgang der optischen Spule 2a, kann die Faraday-Rotation genau, unabhängig von den Amplituden a_+ und a_- , linear und über Winkelbereichen -180° bis $+180^\circ$ und 0° 360° gemessen werden.

Die Übertragung der Intensitätssignale durch die Lichtleiter 10c und 10d stellt weder Anforderungen an die Polarisations-eigenschaften noch an die Verlusteigenschaften (Amplitudenänderung) der Lichtleiter auf der Übertragungstrecke. Das einzige auf Doppelbrechung und mechanische Spannung kritische Lichtleiterstück ist die optische Spule 2a. Bei gleicher Qualität des Lichtleiters kann die Windungszahl N der optischen Spule 2a, und damit die Messempfindlichkeit, erhöht werden. Weil eine reine optische Kopplung zwischen den Lichtleitern 10a, b, c, d und der optischen Spule 2a besteht, kann nämlich die maximal verwendbare Lichtleiterlänge ausschliesslich für die optische Spule 2a benützt werden.

Wenn eine eindeutige Strommessung mit der vorstehend beschriebenen Anordnung auszuführen ist, ist es notwendig, die Phase der Faraday-Rotation absolut bestimmen zu können. Eine solche Messung der Phase kann nur vorgenommen werden mit einem Phasenmeter mit unbeschränktem Messbereich. Dabei wird im wesentlichen die Phase in einem Intervall von 180° sehr genau gemessen, und es tritt eine automatische Umschaltung des Messbereiches auf, wenn die Phase ausserhalb des ursprünglichen Messbereiches liegt. Die jeweilige Umschaltung wird positiv oder negativ gezählt, so dass die absolute Phase eindeutig bestimmt ist, wenn der Nullwert einmal vorgegeben ist. Ein solches Phasenmeter wurde von J. Mastner in der DE-OS 3 006 840 beschrieben.

Die Eingangssignale, welche diesem Phasenmeter zugeführt werden, müssen dauernd vorhanden sein, und ihre zeitlich veränderliche Phasenverschiebung muss genügend zuverlässig verfolgt werden können, damit keine Messumschaltungen verloren gehen. Bei der Strommessung durch den Faraday-Effekt sind diese Bedingungen möglicherweise nicht immer erfüllt, insbesondere dann nicht, wenn sehr hohe und schnelle Stromänderungen im elektrischen Leitungssystem auftreten (Kurzschlüsse).

Diese Probleme treten nicht auf, wenn ausser dem Referenzsignal $I_r = a_r \cos \Omega t$ am Eingang der optischen Spule, und dem Messsignal $I_m = a_m \cos(\Omega t + 2\vartheta)$ am Ausgang der optischen Spule, mindestens ein zweites Messsignal $I'_m = a'_m \cos(\Omega t + 2\vartheta')$ zur Verfügung gestellt wird. Die Phase $2\vartheta'$ dieses zweiten Messsignals I'_m entspricht einer anderen Windungszahl N' der optischen Spule als die Phase 2ϑ des ersten Messsignals I_m . Dieses zweite Messsignal I'_m kann erhalten werden durch Ableiten eines Signals bei einer anderen Win-

dungszahl N' der optischen Spule 2c als die ursprüngliche Windungszahl N . Eine solche Möglichkeit ist dargestellt in Fig. 2. Hier wird von der optischen Spule 2c wie in Fig. 1 Licht ausgeleitet bei der Stelle I für die Windungszahl N zusätzlich aber noch bei der Stelle II für die Windungszahl N' . Beide Wellen umfassen wiederum entgegengesetzt zirkular polarisierte Komponenten. Analog Fig. 1 werden beide Wellen über koppelnde Konvexlinsen 9 und unter 45° zu den Polarisatoren 5, 6 der Fig. 1 geneigte Linearpolarisatoren 8b, 8b' zu den Lichtleitern 10d bzw. 10d' geführt. Lichtleiter 10d wird wie in Fig. 1 über einen (nicht gezeichneten) Photodetektor 11a, Lichtleiter 10d' wird wie in Fig. 1 über einen (nicht gezeichneten) Photodetektor 11a, Lichtleiter 10d' über einen weiteren (auch nicht gezeichneten) Photodetektor mit der (wiederum nicht gezeichneten) Phasenvergleichsanordnung verbunden.

In Fig. 3 ist eine Variante der Ausführungsform nach Fig. 2 dargestellt. Hier wird das zweite Messsignal I' durch eine zweite optische Spule 2b erhalten. Insbesondere ist die Verwendung einer grossen optischen Spule mit N Windungen und einer kleinen optischen Spule mit N' Windungen und einer kleinen optischen Spule mit N' Windungen, wobei $N' < N$ ist, für die Bestimmung des 180° -Intervalles zweckmässig. Dazu ist nach dem ersten Strahlteiler 4a noch ein zweiter 4b angeordnet. Der weitere Verlauf der Anordnungen ergibt sich unmittelbar durch ein Vergleich mit den Figuren 1 und 2.

Für die Faraday-Rotationen der beiden Signale I_m und I'_m gilt dann

$$\vartheta = VN_j, \quad \vartheta' = VN'_j,$$

wobei V die verdettsche Konstante der optischen Faser und j der elektrische Strom ist. Die Windungszahl N' wird so gewählt, dass die Phase $2\vartheta'$ beim maximalen Strom j_{\max} den Wert 90° nicht überschreitet. Damit kann jederzeit eindeutig festgestellt werden, in welchem 180° -Intervall sich das Phasenmeter befindet, weil die Phase $2\vartheta'$ dem jeweiligen 180° -Intervall eindeutig entspricht. Diese Phase wird mit einem Hilfs-Phasenmeter festgestellt.

Die Bedingungen für die eindeutige Messbarkeit der Phase lauten demnach:

$$2\vartheta'_{\max} = 2VN'_j_{\max} \leq 90^\circ \quad (1)$$

$$\delta\gamma \leq 90^\circ \cdot \vartheta'_{\max} / \vartheta_{\max} \leq 90^\circ \cdot N' / N \quad (2)$$

wobei $\delta\gamma$ die Genauigkeit für die Messung der Phase $2\vartheta'$ bedeutet.

Die zweite Bedingung besagt, dass die Genauigkeit $\delta\gamma$ mindestens ausreichen muss, um das entsprechende 180° -Intervall zu bestimmen. Z.B. für $\delta\gamma = 1^\circ$ des Hilfs-Phasenmeters ist bereits ein gesamter Phasenmessbereich von $2\vartheta_{\max} = \pm (45 \times 180^\circ) = \pm 8000^\circ$ abgedeckt. Die totale für die Strommessung massgebende Genauigkeit der Phasenmessung ist gegeben durch $\delta\gamma = 2\delta\vartheta$ des Haupt-Phasenmeters.

Als Alternative kann auch die Differenz der Windungszahlen N und N' so gewählt werden, dass die Differenz $(2\vartheta - 2\vartheta')$ beim maximalen Strom j_{\max} den Wert 90° nicht überschreitet. Diese Differenz wird dann mit dem Hilfs-Phasenmeter gemessen.

Durch die parallele Verwendung von zwei Haupt-Phasenmetern für die geraden, resp. ungeraden 180° -Intervalle (keine Inversion, resp. Inversion) können zusätzlich noch die Umschaltzeiten und Einschwingzeiten reduziert werden, um die Ansprechzeit der gesamten Phasenmessung möglichst klein zu machen.

Die Vorteile der Erfindung sind mannigfach. Als sehr

wichtiger Vorteil muss betrachtet werden, dass die zu- und wegführenden Lichtleiter Störungen wie Doppelbrechung und Schwächung der Lichtamplitude aufweisen mögen, ohne dass die Empfindlichkeit der Strommessung beeinflusst wird. Der Bereich, wo die ganze Anordnung am empfindlichsten ist, beschränkt sich nunmehr auf die eigentliche Messvorrichtung, nämlich die optische Spule. Gerade bei der optischen Spule sind die Probleme der Doppelbrechung am besten zu beheben (mechanische Torsion). Ein anderer wich-

tiger Vorteil der Erfindung ist, dass die Anordnung im Vergleich zum konventionellen Stromwandler viel kostengünstiger und raumsparender hergestellt werden kann, und trotzdem eine sehr grosse Empfindlichkeit und somit eine sehr genaue Strommessung aufweist. Ein anderer nicht zu vernachlässigender Vorteil ist, dass auch bei plötzlichen Stromänderungen wie Kurzschlüsse die genaue Erfassung des Stromwertes nicht behindert wird.

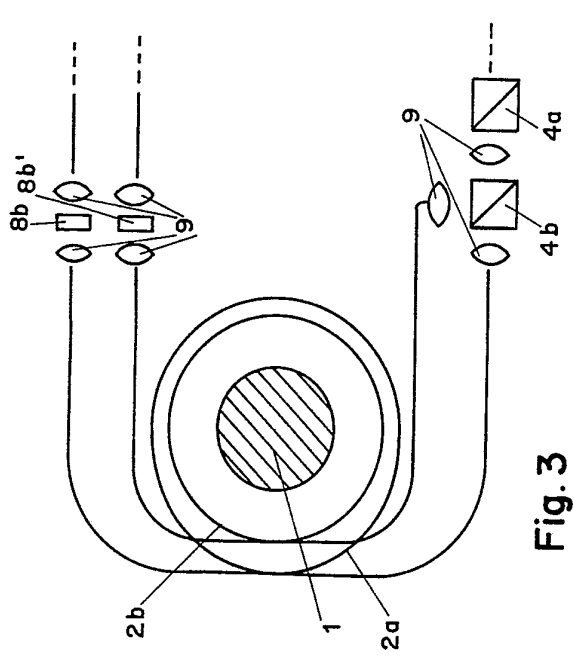


Fig. 1

Fig. 3

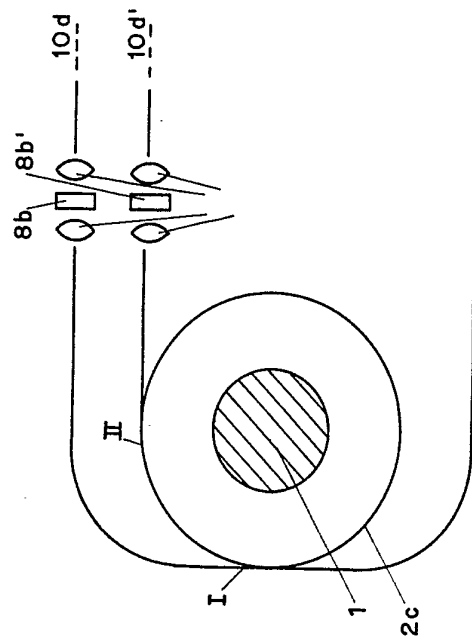


Fig. 2