



SCHWEIZERISCHE Eidgenossenschaft
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) **CH 710 156 A2**

(51) Int. Cl.: **G01R 33/032** (2006.01)
G01R 15/24 (2006.01)

Patentanmeldung für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) **PATENTANMELDUNG**

(21) Anmeldenummer: 01464/14

(71) Anmelder:
ETH Zürich ETH Transfer, HG E 47-49, Rämistrasse 101
8092 Zürich ETH-Zentrum (CH)

(22) Anmeldedatum: 26.09.2014

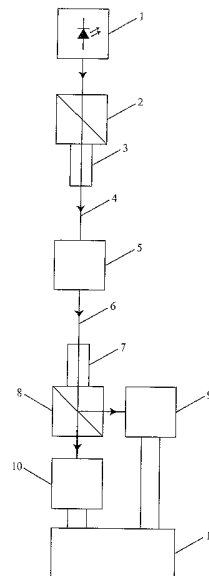
(72) Erfinder:
Dominic Andreas Gerber, 8913 Ottenbach (CH)
Jürgen Biela, 8004 Zürich (CH)

(43) Anmeldung veröffentlicht: 31.03.2016

(74) Vertreter:
Frei Patentanwaltsbüro, Postfach 1771
8032 Zürich (CH)

(54) **Faseroptischer Stromsensor.**

(57) Ein faseroptischer Stromsensor weist eine Polarisationsmessvorrichtung (9) zur Messung des Polarisationswinkels einer linear polarisierten elektromagnetischen Welle bezüglich eines Referenzwinkels auf, sowie mindestens eine weitere Polarisationsmessvorrichtung (10), welche zur Messung des Polarisationswinkels der genannten linear polarisierten elektromagnetischen Welle bezüglich eines weiteren Referenzwinkels vorliegt. Dabei sind die beiden Referenzwinkel voneinander verschieden.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der faseroptischen Stromsensoren und insbesondere auf einen faseroptischen Stromsensor gemäss dem Oberbegriff des Patentanspruches 1.

[0002] In modernen Teilchenbeschleunigern werden Modulatoren eingesetzt. Diese Modulatoren müssen Hochspannungspulse mit einer sehr guten Wiederholgenauigkeit erzeugen können. Eine Möglichkeit zur Messung der Genauigkeit besteht in der Messung eines Stromes an einer geeigneten Stelle. Aufgrund der hohen Spannungen und des schnellen Spannungsanstieges muss die Strommessung potentialfrei erfolgen.

[0003] Eine Möglichkeit der potentialfreien Strommessung ist eine Messung über den Faraday-Effekt. Wird in der Ausbreitungsrichtung einer linear polarisierten elektromagnetischen Welle ein Magnetfeld angelegt, bewirkt dies eine Drehung der Polarisationssebene. Die Stärke der Drehung wird bestimmt durch das Material, welche die elektromagnetische Welle durchquert, der Stärke des Magnetfeldes, sowie der Länge des optischen Pfades. Anhand der Drehung der Polarisationssebene kann bei einer bekannten Anordnung des Leiters und des Sensors auf den Strom, welcher den Leiter durchfließt, geschlossen werden.

[0004] Die Ausrichtung der Polarisationssebene kann mittels eines Polarisators gemessen werden. Hierbei durchquert die Welle den Polarisator. Die Intensität der Welle nach dem Polarisator hängt von der Intensität der Welle vor dem Polarisator sowie von der Ausrichtung der Polarisationssebene zur Polarisationsachse des Polarisators. Um eine Messung der Polarisationssebene unabhängig von der Intensität der Welle vor dem Polarisator zu erhalten, wird die Welle in zwei unterschiedlich polarisierte Wellen aufgeteilt, dessen Polarisationssebenen rechtwinklig zueinander sind. Dies kann zum Beispiel durch mittels eines polarisierenden Strahlteilers bewerkstelligt werden. Die Intensität der beiden Wellen kann nun zum Beispiel mittels einer Fotodiode gemessen werden.

[0005] Um ein Signal unabhängig von der anfänglichen Intensität der Welle zu erhalten, wird eine Differenz-über-Summe Normalisierung verwendet. Hierbei wird die Differenz der beiden Intensitäten durch die Summe der beiden Intensitäten geteilt. Da die Summe der beiden Intensitäten der anfänglichen Intensität der Welle entspricht, erhält man dabei ein normalisiertes Signal.

[0006] Die Messung der Ausrichtung der Polarisationsseben kann nur mit eingeschränkter Genauigkeit erfolgen, da die gemessenen Intensitäten rauschbehaftet sind. Die Messung wird, bedingt durch die Signal Verarbeitung, sehr rauschempfindlich wenn eine der beiden gemessenen Intensitäten gegen Null geht. Da die Ausrichtung der Polarisationssebene einen direkten Rückschluss auf den zu messenden Strom zulässt, wird die Auflösung der Messung durch das Rauschen nach der Signalverarbeitung bestimmt. Bestehende Sensoren nützen einen Winkelbereich von weniger als 90° aus (K. Bonert, Temperature and Vibration Insensitive Fibre-Optic Current Sensor, J. of Lightwave Technology, Vol. 20, No. 2, 2002). Dies stellt sehr hohe Anforderungen an die Signalverarbeitung wenn eine sehr hohe Auflösung erforderlich ist. Eine höhere Auflösung wird in der Regel auf Kosten der Dynamik erzielt.

[0007] Es ist deshalb Aufgabe der Erfindung, einen faseroptischen Stromsensor der eingangs genannten Art zu schaffen, welche die oben genannten Nachteile behebt.

[0008] Diese Aufgabe löst ein faseroptischer Stromsensor mit den Merkmalen des Patentanspruches 1.

[0009] Der faseroptische Stromsensor weist also auf: eine Polarisationsmessvorrichtung zur Messung des Polarisationswinkels einer linear polarisierten elektromagnetischen Welle bezüglich eines Referenzwinkels, und mindestens eine weitere Polarisationsmessvorrichtung, welche zur Messung des Polarisationswinkels der genannten linear polarisierten elektromagnetischen Welle bezüglich eines weiteren Referenzwinkels vorliegt. Dabei sind die Referenzwinkel voneinander verschieden.

[0010] Der Polarisationswinkel und die beiden Referenzwinkel werden typischerweise in einer Ebene betrachtet, die normal zur Ausbreitungsrichtung der elektromagnetischen Welle ist. Typischerweise ist die elektromagnetische Welle ein Lichtstrahl, insbesondere ein kollimierter Lichtstrahl. Der Lichtstrahl ist in einem Messabschnitt in einem als Polarisator wirkenden Medium geführt, beispielsweise einem faseroptischen Lichtleiter. Der Polarisator ist in einem Bereich des zu messenden Magnetfeldes angeordnet. Durch den Faraday-Effekt wird die Polarisationsrichtung der elektromagnetischen Welle gedreht. Vorzugsweise ist die elektromagnetische Welle linear polarisiert, liegt also in einer Polarisationssebene. Die Polarisationsrichtung ist dann die Orientierung der Polarisationssebene.

[0011] In einer Ausführungsform weist der faseroptische Stromsensor eine Signal Verarbeitungseinheit auf, welche dazu eingerichtet ist, anhand von Messsignalen eines Auswertungssystems der Polarisationsmessvorrichtung ein erstes Messsignal zu erzeugen, welches sich bei zunehmendem Polarisationswinkel periodisch ändert, und anhand von Messsignalen eines Auswertungssystems der mindestens einen weiteren Polarisationsmessvorrichtung mindestens ein weiteres Messsignal zu erzeugen, welches sich bei zunehmendem Polarisationswinkel periodisch ändert.

[0012] Bei zunehmender Stärke des Magnetfeldes und damit zunehmender Verdrehung des Polarisationswinkels ändern sich also die Messsignale periodisch. Sie sind dabei gegeneinander phasenverschoben, entsprechend der Verdrehung der Referenzwinkel zueinander.

[0013] In einer Ausführungsform ist die Signalverarbeitungseinheit dazu eingerichtet, eine Anzahl von Perioden zu zählen, welche mindestens eines der Messsignale bei variierendem Polarisationswinkel durchläuft.

[0014] In einer Ausführungsform liegt neben einer zweiten Polarisationsmessvorrichtung eine dritte oder vierte etc. Polarisationsmessvorrichtung vor, jeweils mit einem zugeordneten Auswertungssystem und entsprechenden Messsignalen. Damit ist eine weitere Verbesserung der Qualität der Messung möglich.

[0015] In einer Ausführungsform ist die Signalverarbeitungseinheit dazu eingerichtet, einen Winkelwert zu bestimmen als Summe

- eines Grobmesswerts entsprechend der Anzahl Perioden durchlaufener Perioden, und
- eines Feinmesswerts nach Massgabe der gemessenen Polarisationswinkel

[0016] Der Messbereich für den Winkelwert umfasst also nicht wie bei herkömmlichen Systemen nur eine Phasendrehung zwischen 0° und 90° , in welchem einem Messwert eindeutig ein Polarisationswinkel zugeordnet ist, sondern einen grösseren Bereich. Dieser kann eine Phasendrehung um 180° oder um eine ganze Periode von 360° oder um mehrere Perioden umfassen. Durch die Kombination des Zählens von Perioden mit dem Feinmesswert wird eine extrem hohe Genauigkeit bei gleichzeitig grossem Messbereich erreicht.

[0017] In einer Ausführungsform ist die Signalverarbeitungseinheit dazu eingerichtet, in einer Bestimmung des Feinmesswerts denjenigen Polarisationswinkel schwächer zu gewichten oder gar nicht zu berücksichtigen, der den grösseren Absolutwert aufweist.

[0018] Bei Feinmesswerten mit grösserem Absolutwert, und insbesondere mit einem Absolutwert in der Nähe von Eins, sind die Einflüsse von systembedingtem Messrauschen besonders gross. Durch die geringere Gewichtung dieser Feinmesswerte wird die Genauigkeit des Gesamtsystems verbessert.

[0019] In einer Ausführungsform beträgt ein Verdrehwinkel zwischen den beiden Referenzwinkeln, modulo 90° , zwischen 10° und 80° .

[0020] In einer Ausführungsform beträgt der Verdrehwinkel, modulo 90° , mindestens annähernd 45° .

[0021] Indem zwei gegeneinander verdrehte Polarisationsmessvorrichtungen vorliegen, kann bestimmt werden, ob der Polarisationswinkel respektive die Stärke des Magnetfelds zu- oder abnimmt.

[0022] Es ist grundsätzlich möglich, die Auswertung in der Signal Verarbeitungseinheit bezüglich des Ergebnisses in mathematisch gleicher Weise zu realisieren, ohne die Messsignale explizit zu bestimmen.

[0023] Die Erfindung ist mit Bezug auf einen faseroptischen Stromsensor erläutert, lässt sich aber auch mit einem optischen Stromsensor im allgemeinen Sinn realisieren, also einem, in dem die Verdrehung der Polarisationsrichtung nicht in einer Faser als Lichtleiter stattfindet.

[0024] Weitere bevorzugte Ausführungsformen gehen aus den abhängigen Patentansprüchen hervor.

[0025] Im Folgenden wird der Erfindungsgegenstand anhand eines bevorzugten Ausführungsbeispiels, welches in den beiliegenden Zeichnungen dargestellt ist, näher erläutert. Es zeigen jeweils schematisch:

Fig. 1 einen Aufbau eines optisches Strommesssystems mit zwei Polarisationsmessvorrichtungen;

Fig. 2 den Aufbau eines Auswertungssystems der Polarisationsmessvorrichtungen; und

Fig. 3 einen Verlauf von Messsignalen der beiden Polarisationsmessvorrichtungen.

[0026] Die in den Zeichnungen verwendeten Bezugszeichen und deren Bedeutung sind in der Bezugszeichenliste zusammengefasst aufgelistet. Grundsätzlich sind in den Figuren gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen versehen.

[0027] Fig. 1 zeigt einen Aufbau eines optischen Strommesssystems mit zwei Polarisationsmessvorrichtungen. Das optische Strommesssystem weist eine Lichtquelle 1 auf, welche einen Strahl erzeugt. Der Strahl wird mittels eines Polarisators 2 polarisiert. Der Strahl wird mit einem Kollimator 3 in eine optische Faser 4 eingekoppelt, welche in einem Messabschnitt als Sensor 5 angeordnet ist. Das aus dem Sensor 5 austretende Licht wird über eine optische Faser 6 und einem Kollimator 7 durch einen oder mehrere Strahlteiler 8 geführt, welcher den Strahl in mehrere Strahlen aufteilt. Jeder Strahl wird in ein Auswertungssystem 9, 10 geführt. Die Auswertungssysteme sind mit einer Signalverarbeitungseinheit 11 verbunden. Jeweils ein Auswertungssystem 9, 10, zusammen mit einer in der Signal Verarbeitungseinheit 11 implementierten Signalverarbeitung, bildet eine Polarisationsmessvorrichtung und erlaubt es, die Polarisationsrichtung des jeweiligen Strahles zu bestimmen.

[0028] Fig. 2 zeigt den Aufbau eines einzelnen der beiden Auswertungssysteme. Die Auswertungssysteme weisen jeweils einen polarisierenden Strahlteiler oder ein entsprechendes Prisma 12 auf. Der Lichtstrahl wird durch dieses in zwei zueinander rechtwinklig polarisierte Strahlen aufgeteilt. Die Intensität dieser Strahlen wird über zwei Detektoren 13, 14 gemessen. Die Signale aus diesen Detektoren werden von der Signalverarbeitungseinheit erfasst. Jedes Auswertungssystem 9,

10 weist eine eigene Polarisationsachse auf. Diese definiert einen Referenzwinkel, bezüglich dessen das Auswertungssystem 9, 10 zusammen mit der Signalverarbeitungseinheit die Polarisationsrichtung des Strahles bestimmt.

[0029] Die Polarisationsachsen der Auswertungssysteme sind in einem geeigneten Winkel $\langle l \rangle$ (hier auch Verdrehwinkel genannt) zueinander ausgerichtet.

[0030] Fig. 3 zeigt einen Verlauf von Messsignalen der beiden Polarisationsmessvorrichtungen. Das Strommesssystem misst über einen Winkelbereich, der grösser ist als 90° . Eine eindeutige Rekonstruktion des Winkels ist rein aufgrund des aktuellen Wertes der Signale nicht mehr möglich. Daher kann der zeitliche Verlauf des Stromes berücksichtigt werden und die Vielfachen des 90° Messbereiches mitgezählt werden. Durch das Mitzählen ist ein geringeres Signal-zu-Rausch Verhältnis notwendig um eine bestimmte Sensorauflösung zu erhalten. Durch dieses Verfahren wird die Sensorauflösung verbessert ohne dabei die Bandbreite zu reduzieren.

[0031] Die Signalverarbeitungseinheit misst über eine Differenz-über-Summe Normalisierung die Polarisations Ebenen der einzelnen Auswertungssysteme (Fig. 3). Der gemessene Winkel eines einzelnen Auswertungssystems kann nur über einen Winkelbereich von 90° eindeutig bestimmt werden. Die Vielfachen des 90° Messbereiches werden aufgrund der gemessenen Signale der Auswertungssysteme mitgezählt. Die Feinauflösung innerhalb eines solchen 90° Bereichs erfolgt immer über das Auswertungssystem mit dem besten Signal-zu-Rausch Verhältnis.

Patentansprüche

1. Faseroptischer Stromsensor mit einer Polarisationsmessvorrichtung (9, 11) zur Messung des Polarisationswinkels einer linear polarisierten elektromagnetischen Welle bezüglich eines Referenzwinkels, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine weitere Polarisationsmessvorrichtung (10, 11) vorliegt, welche zur Messung des Polarisationswinkels der genannten linear polarisierten elektromagnetischen Welle bezüglich eines weiteren Referenzwinkels vorliegt, und die beiden Referenzwinkel voneinander verschieden sind.
2. Faseroptischer Stromsensor gemäss Anspruch 1, aufweisend eine Signal Verarbeitungseinheit (11), welche dazu eingerichtet ist, anhand von Messsignalen eines Auswertungssystems (9) der Polarisationsmessvorrichtung ein erstes Messsignal zu erzeugen, welches sich bei zunehmendem Polarisationswinkel periodisch ändert, und anhand von Messsignalen eines Auswertungssystems (10) der mindestens einen weiteren Polarisationsmessvorrichtung mindestens ein weiteres Messsignal zu erzeugen, welches sich bei zunehmendem Polarisationswinkel periodisch ändert.
3. Faseroptischer Stromsensor gemäss Anspruch 2, wobei die Signalverarbeitungseinheit (11) dazu eingerichtet ist, eine Anzahl von Perioden zu zählen, welche mindestens eines der Messsignale bei variierendem Polarisationswinkel durchläuft.
4. Faseroptischer Stromsensor gemäss Anspruch 3, wobei die Signalverarbeitungseinheit (11) dazu eingerichtet ist, einen Winkelwert zu bestimmen als Summe
 - eines Grobmesswerts entsprechend der Anzahl Perioden durchlaufener Perioden, und
 - eines Feinmesswerts nach Massgabe der gemessenen Polarisationswinkel.
5. Faseroptischer Stromsensor gemäss Anspruch 4, wobei die Signalverarbeitungseinheit (11) dazu eingerichtet ist, in einer Bestimmung des Feinmesswerts denjenigen Polarisationswinkel schwächer zu gewichten oder gar nicht zu berücksichtigen, der den grösseren Absolutwert aufweist.
6. Faseroptischer Stromsensor gemäss einem der vorangehenden Ansprüche, wobei ein Verdrehwinkel zwischen den beiden Referenzwinkeln, modulo 90° , zwischen 10° und 80° beträgt.
7. Faseroptischer Stromsensor gemäss Anspruch 6, wobei der Verdrehwinkel, modulo 90° , mindestens annähernd 45° beträgt.

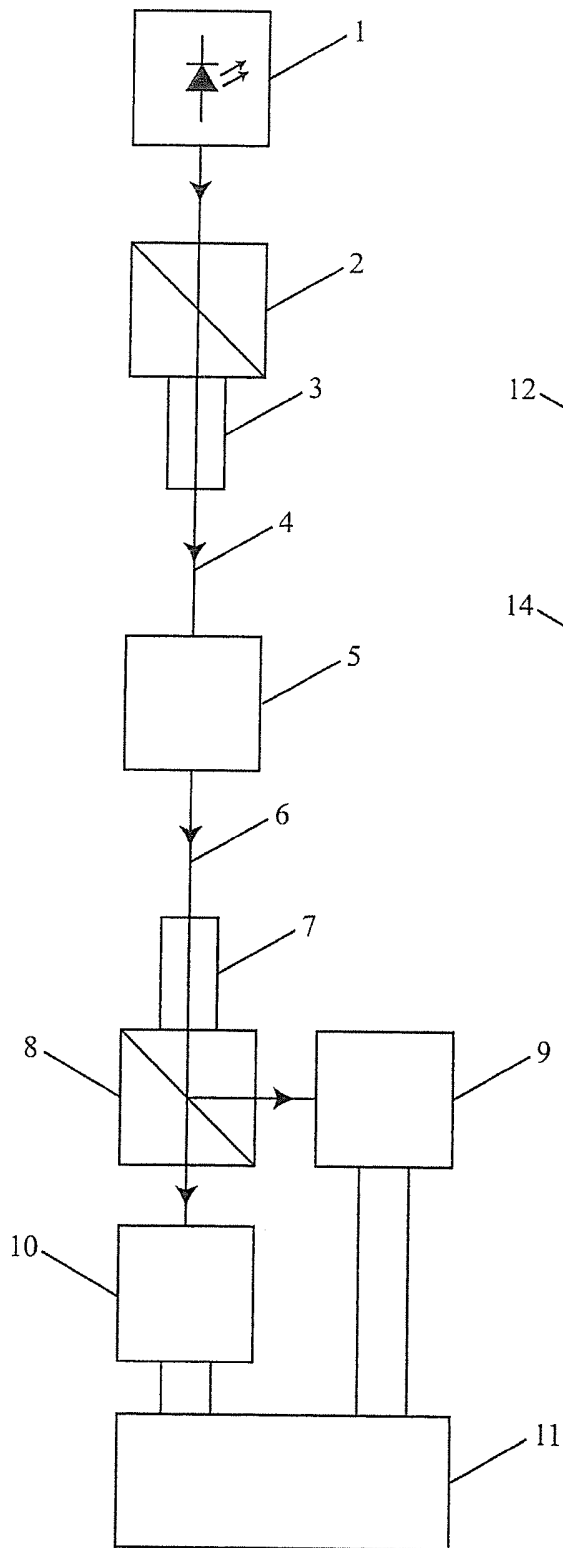


Fig. 1

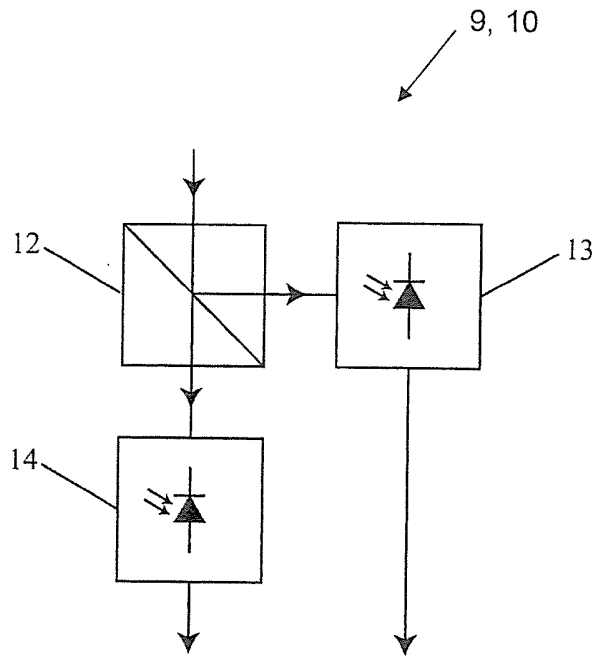
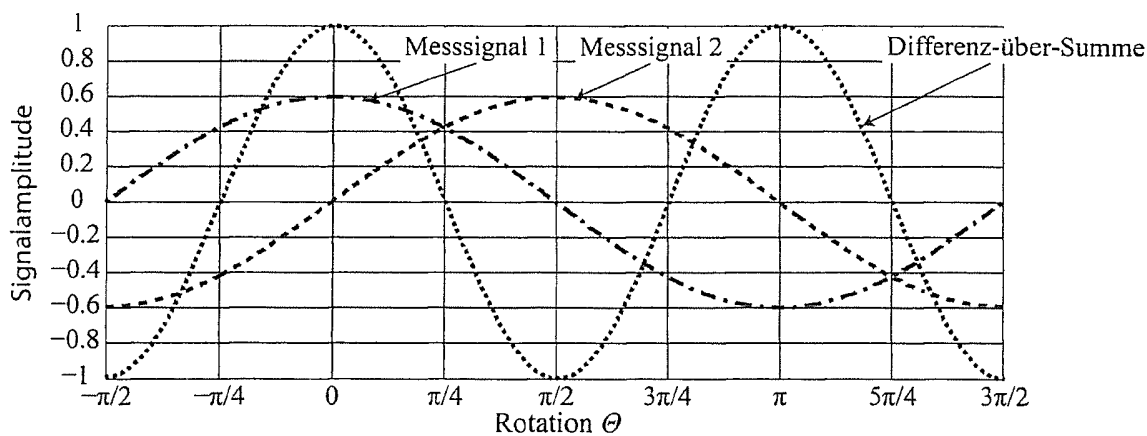
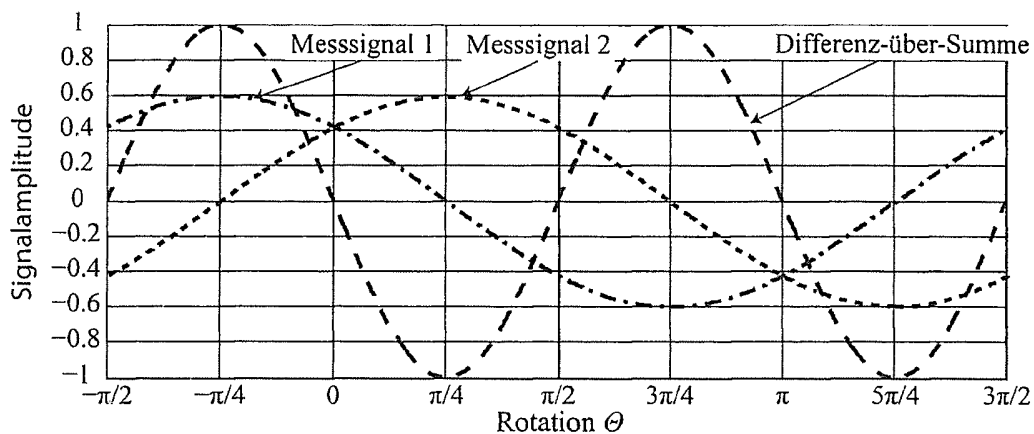


Fig. 2

Auswertungssystem 1



Auswertungssystem 2



Differenz-über-Summe Signale

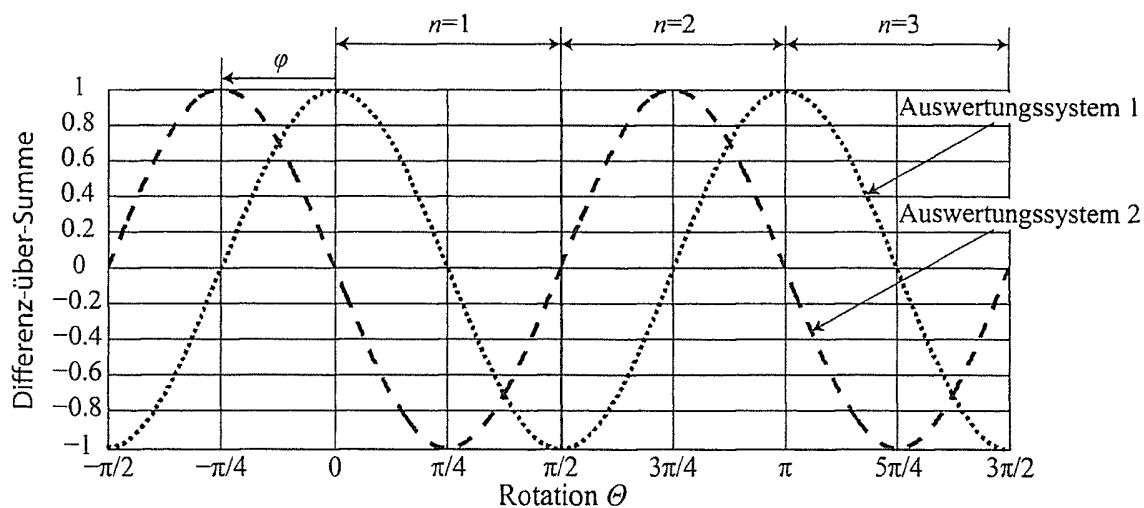


Fig. 3