

(19)



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Économie

(11)

N° de publication :

LU503816

(12)

BREVET D'INVENTION

B1

(21)

N° de dépôt: LU503816

(51)

Int. Cl.:
G01R 15/20

(22)

Date de dépôt: 31/03/2023

(30)

Priorité:

(72)

Inventeur(s):
NOEBELT Tobias – Allemagne, REINHOLD Christian –
Allemagne, THÖRNER Carsten – Allemagne

(43)

Date de mise à disposition du public: 30/09/2024

(47)

Date de délivrance: 30/09/2024

(74)

Mandataire(s):
PHOENIX CONTACT GMBH & CO. KG –
32825 Blomberg (Allemagne)

(73)

Titulaire(s):
PHOENIX CONTACT GMBH & CO. KG – 32825
Blomberg (Allemagne)

(54)

Strommessvorrichtung mit einem bandförmigen, mechanisch flexiblen Träger sowie Verfahren unter Nutzung einer solchen.

(57)

Die Erfindung betrifft eine Strommessvorrichtung mit: - einem bandförmigen, um einen elektrischen Leiter anordenbaren, mechanisch flexiblen Träger, - einer Speichereinrichtung, in der vorgebbare, die Geometrie des Trägers betreffende Randparameter gespeichert sind, - einer ersten Mehrzahl an Magnetfeldsensoren und einer zweiten Mehrzahl an zweiten Sensoren, wobei jeder Magnetfeldsensor und jeder zweite Sensor entsprechend den Randparameter an definierten Stellen des Trägers befestigt sind, wobei jeder Magnetfeldsensor zum Messen eines Magnetfeldes, welches von einem durch einen elektrischen Leiter fließenden Strom hervorgerufen wird, ausgebildet ist und jeder zweite Sensor zur Ermittlung einer Orientierung des Trägers an der definierten Stelle, an welcher dieser zweite Sensor befestigt ist, zu einem Zeitpunkt t_i , und - einer mit den Magnetfeldsensoren und den zweiten Sensoren kommunikativ verbundenen Datenverarbeitungseinheit, ausgebildet, unter Berücksichtigung ermittelten Orientierungen und der Randparameter die Positionen und Orientierungen der mehreren Magnetfeldsensoren relativ zueinander zu berechnen. Die Erfindung betrifft ein Verfahren unter Nutzung der Strommessvorrichtung.

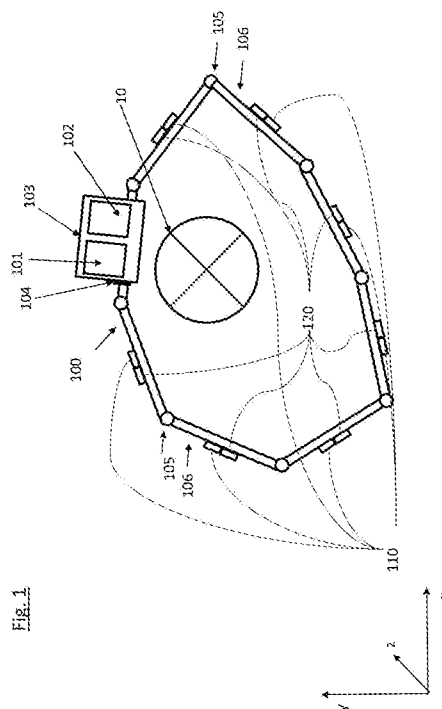


Fig. 1

**Strommessvorrichtung mit einem bandförmigen, mechanisch flexiblen Träger
sowie Verfahren unter Nutzung einer solchen**

Beschreibung

5

Die Erfindung betrifft eine Strommessvorrichtung mit einem bandförmigen, mechanisch flexiblen Träger sowie Verfahren unter Nutzung einer solchen.

10

Bekanntermaßen ist eine Vielzahl von verschiedenen Messverfahren bekannt, um den in einem Leiter fließenden Strom zu ermitteln. Beispielsweise kann der Spannungsabfall über einem Widerstand (Shunt-Widerstand) ermittelt werden und mit dem bekannten Widerstandswert gemäß dem Ohm'schen Gesetz auf den fließenden Strom geschlossen werden. Darüber hinaus sind Strommessanordnungen mit einem ferromagnetischen Kern bekannt, die nach dem Transformator-Prinzip arbeiten. Dabei wird der Leiter mit dem zu messenden Strom durch einen Kern hindurchgeführt, wobei der Leiter mit dem zu messenden Strom dabei den Primärleiter eines Transformators bildet. Über eine Sekundärwicklung, die auf den Kern gewickelt wird, kann durch Messung des durch einen an der Sekundärwicklung angeschlossenen Widerstand (Bürde) fließenden Sekundärstroms auf den Primärstrom geschlossen werden, da der Sekundärstrom proportional zu dem Primärstrom ist, wobei die Proportionalität über das Windungsverhältnis zwischen der Sekundärwicklung und der Primärwicklung gegeben ist.

15

20

25

Darüber hinaus ist es möglich, ein durch einen Strom verursachtes Magnetfeld zu messen, z.B. mittels Hall-Sensoren, und daraus auf den verursachenden Strom zu schließen. Auf diese Weise können Ströme, und insbesondere auch Gleichströme (DC-Ströme), kontaktlos gemessen werden.

30

In diesem Zusammenhang sind insbesondere auch Verfahren bekannt, die keinen ferromagnetischen Kern zur Bündelung des magnetischen Feldes erfordern. So wird z.B. in der EP 3 589 961 B1 wird eine Strommessvorrichtung vorgeschlagen, bei welcher zur Strommessung mindestens zwei Sensoren eines ersten Typs und mindestens zwei Sensoren eines zweiten Typs vorgesehen sind, insbesondere des Typs

Flux-Gate Feldsensoren und des Typs Hall-Sensoren, und die Sensoren des ersten Typs eine höhere Empfindlichkeit aufweisen als die Sensoren des zweiten Typs, wobei die ersten Sensoren radialsymmetrisch auf einer ersten Kreisbahn und die zweiten Sensoren radialsymmetrisch auf einer zweiten Kreisbahn angeordnet sind und jeweils ein Sensor des ersten Typs benachbart zu einem Sensor des zweiten Typs angeordnet ist. Um die Strommessvorrichtung auf einfache Weise um den elektrischen Leiter anzuordnen, hat es sich demnach ferner als vorteilhaft erwiesen, im kreisförmigen Aufbau der Strommessvorrichtung eine winkelförmige Öffnung vorzusehen, die umso kleiner sein kann, je flexibler die Strommessvorrichtung ist. Die Anordnung der zur Strommessung vorgesehenen Sensoren um den Leiter herum ist jedoch festvorgegeben, auch wenn die Strommessvorrichtung zur Anordnung um den Leiter zum Einführen des Leiters bzw. zum Umschließen des Leiters flexibel gestaltet ist.

Ist die Anordnung der zur Strommessung vorgesehenen Sensoren fest, hat dies zwar den Vorteil, dass die Positionen der Sensoren zueinander unveränderlich sind und damit bei der Berechnung des Stroms jederzeit als gegeben angenommen werden können.

Für den Fall, dass die Anordnung der zur Strommessung vorgesehenen Sensoren fest ist, jedoch die Positionierung eines Leiters, dessen Strom gemessen werden soll, in Bezug auf diese Anordnung bzw. den Erfassungsbereich der Sensoren nicht fest vorgegeben ist, schlägt z.B. die WO 2010/096344 A1 bei von Wechselstrom (AC-Strom) durchflossenen Leitern die Bereitstellung einer Strommessvorrichtung vor, bei welcher zusätzlich mehrere Positionserfassungsspulen verwendet werden, um die Position des Leiters relativ zu dem Erfassungsbereich zu erfassen. Der jeweilige Abstand zu den Positionserfassungsspulen und in Folge die Position eines Wechselstrom-führenden Leiters relativ zum Erfassungsbereich wird hierbei durch zumindest paarweisen Vergleich der in den Positionserfassungsspulen induzierten Ströme ermittelt.

Abgesehen davon, dass das letztgenannte Prinzip somit nur bei von Wechselstrom durchflossenen Leitern funktioniert, ergeben sich durch eine feste Anordnung der zur Strommessung vorgesehenen Sensoren weitere Nachteile, insbesondere im Handling. So wäre es beispielsweise von Vorteil, insbesondere auch für Retro-fit Anwendungen,

wenn die Strommessvorrichtung so beweglich ist, dass sie an einem im Wesentlichen beliebigen Ort einfach um einen elektrischen Leiter von im Wesentlichen beliebigen Querschnitt herum positioniert werden könnte.

- 5 Ferner ist für die kontaktlose Messung von AC-Strömen auch die Nutzung von Rogowski Spulen bekannt, die sich somit zwar insbesondere auch für Retro-fit Anwendungen eignen, da sie sich mechanisch flexibel um einen elektrischen Leiter herumführen und verschließen lassen. Allerdings basiert auch das Messprinzip der Rogowski Spule auf der Auswertung von induzierten Spannungen und eignet sich daher
10 nicht für DC Anwendungen.

- Eine Aufgabe der Erfindung ist eine Strommessvorrichtung sowie ein Verfahren unter Nutzung einer solchen Strommessvorrichtung aufzuzeigen, die eine kontaktlose Messung von AC- und DC-Strömen ermöglicht und dabei eine möglichst große
15 mechanische Flexibilität aufweist, so dass sie zweckmäßig -ähnlich wie bspw. eine Rogowski-Spule- an einem im Wesentlichen beliebigen Ort einfach um einen elektrischen Leiter von im Wesentlichen beliebigen Querschnitt herum angeordnet werden kann. Insbesondere soll hierbei die erreichbare Messgenauigkeit unabhängig davon sein, welche geometrische Form die Strommessvorrichtung in um den
20 elektrischen Leiter herum angeordneten Zustand einnimmt.

- Zur Lösung der Aufgabe ist gemäß der Erfindung eine Strommessvorrichtung mit den Merkmalen nach Anspruch 1 sowie ein Verfahren mit den Merkmalen nach Anspruch 8 vorgeschlagen. Zweckmäßig Ausgestaltungen und Weiterbildungen sind Gegenstand
25 der jeweiligen weiteren abhängigen Ansprüche.

- Demgemäß schlägt die Erfindung eine Strommessvorrichtung vor, mit einem bandförmigen, mechanisch flexiblen Träger, der um einen elektrischen Leiter angeordnet werden kann, einer Speichereinrichtung, in der vorgebbare Randparameter,
30 die die Geometrie des Trägers betreffen, gespeichert sind, einer ersten Mehrzahl an ersten Sensoren und einer zweiten Mehrzahl an zweiten Sensoren, und einer mit den ersten Sensoren und zweiten Sensoren kommunikativ verbundenen Datenverarbeitungseinheit. Hierbei ist jeder der ersten Sensoren und jeder der zweiten

Sensoren entsprechend den Randparameter an definierten Stellen des Trägers befestigt, wobei jeder zweite Sensor zur Ermittlung einer Orientierung, insbesondere zur Ermittlung einer Orientierung relativ zur Erdoberfläche, des Trägers an der definierten Stelle, an welcher dieser zweite Sensor befestigt ist, zu einem Zeitpunkt t_i ausgebildet ist und jeder erste Sensor als Magnetfeldsensor zum Messen eines Magnetfeldes, welches von einem durch einen elektrischen Leiter fließenden Strom hervorgerufen wird, ausgebildet ist. Die Datenverarbeitungseinheit ist dazu ausgebildet, unter Berücksichtigung der mittels der zweiten Sensoren ermittelten Orientierungen und unter Berücksichtigung der in der Speichereinrichtung gespeicherten Randparameter die Positionen und Orientierungen, der mehreren Magnetfeldsensoren relativ zueinander zu berechnen.

Hierauf basierend sieht die Erfindung ferner ein Verfahren vor, bei welchem eine solche Strommessvorrichtung derart angeordnet wird, dass der Träger eine veränderbare geometrische Figur bildet, die sich aus mehreren kurvenförmigen und/oder geradlinigen Abschnitten zusammensetzt und daraufhin durch jeden zweite Sensor, eine Orientierung des Trägers an der definierten Stelle, an welcher dieser zweite Sensor befestigt ist, zu einem Zeitpunkt t_i ermittelt wird sowie unter Berücksichtigung der gespeicherten, vorgebbaren Randparameter und unter Berücksichtigung der ermittelten Orientierungen die Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren relativ zueinander berechnet werden.

Der Erfindung bringt somit den Vorteil mit, dass zur Strommessung eines durch einen elektrischen Leiter fließenden Stroms einerseits das durch den zu messenden Strom des elektrischen Leiters erzeugte Magnetfeld mit Hilfe der ersten Mehrzahl der ersten Sensoren, d.h. der Magnetfeldsensoren gemessen werden kann, sodass sich die Erfindung nicht nur zur Messung von Wechselströmen, sondern auch von Gleichströmen eignet. Andererseits müssen die Magnetfeldsensoren, aufgrund der gemäß der Erfindung vorgeschlagenen messtechnischen Erfassung der Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren, nicht mehr mechanisch fixiert vorgegeben sein, sondern können auf einem äußerst flexibel um einen Leiter herum anordenbaren Trägers angeordnet sein. Ist als Träger für die Magnetfeldsensoren, wie erfindungsgemäß vorgeschlagen, somit ferner ein bandförmiger, mechanisch flexibler Träger vorgesehen,

der um einen elektrischen Leiter angeordnet werden kann, kann folglich eine im Wesentlichen beliebige geometrische Form in um den elektrischen Leiter herum angeordneten Zustand eingenommen werden und können sich in Folge die Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren relativ zu einander bei jeder Strommessung und/oder auch während einer Strommessung verändern, ohne die Messgenauigkeit negativ zu beeinflussen.

Gemäß einer ersten bevorzugten Ausführungsvariante ist vorgesehen, als Träger einen kettenartigen Träger vorzusehen, der mehrere beweglich miteinander verbundene, insbesondere mittels Gelenken beweglich miteinander verbundene, starre Kettenglieder aufweist und jeder Magnetfeldsensor und jeder zweite Sensor an einem solchem starren Kettenglied befestigt ist. Weisen die Kettenglieder hierbei bezüglich der länglichen Ausdehnung des Trägers zweckmäßig jeweils eine vorbestimmte Länge auf, die wiederum Randparameter der in der Speichereinrichtung gespeicherten vorgebbaren, Randparameter sind und ist die Datenverarbeitungseinheit ausgebildet, unter Berücksichtigung der mittels der zweiten Sensoren ermittelten Orientierungen die Innenwinkel zwischen jeweils zwei beweglich miteinander verbundenen starren benachbarten Kettengliedern zu berechnen und in Abhängigkeit von den berechneten Innenwinkeln und den vorbestimmten Längen der jeweiligen starren Kettenglieder die Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren relativ zueinander zu berechnen, kann der kettenartige Träger somit in äußerst flexibler und/oder variabler Weise insbesondere die Form eines im Wesentlichen beliebigen Polygonzug einnehmen,

Gemäß einer alternativen bevorzugten Ausführungsvariante ist vorgesehen, als Träger einen plattenartigen Träger, insbesondere eine Leiterplatte als Träger, vorzusehen, der mehrere, sich abwechselnde starre und flexible Bereiche aufweist. Hierbei weisen zweckmäßig die flexiblen und die starren Bereiche jeweils eine vorbestimmte Länge auf, welche Randparameter der in der Speichereinrichtung gespeicherten vorgebbaren Randparameter sind. Die Positionen der Magnetfeldsensoren werden hierbei zweckmäßig unter Anwendung eines Optimierungsalgorithmus und unter Verwendung einer geometrischen Modellierung der flexiblen Bereiche optimiert, wobei der Optimierungsalgorithmus vorzugsweise eine Gütefunktion verwendet, welche die Längen der flexiblen Bereiche berücksichtigt.

Vorzugsweise ist bei jeder der bevorzugten Ausführungsvariante jeder Magnetfeldsensor und jeder zweite Sensor jeweils an einem solchem starren Kettenglied bzw. an einem solchen starren Bereich befestigt, da dort eine sichere Befestigung
5 einfacher gewährleistet werden kann, als einem flexiblen oder Gelenkbereich.

In zweckmäßiger Weiterbildung der Ausführungsvarianten sind die Magnetfeldsensoren ferner jeweils dazu ausgebildet, die Magnetfeldstärke eines Magnetfeldes, welches von einem durch einen elektrischen Leiter fließenden Strom hervorgerufen wird, in
10 zumindest einer Raumrichtung zu messen, und/oder erfolgt das Ermitteln der Orientierungen der zweiten Sensoren und anschließende Berechnen der Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren relativ zueinander nicht nur zu einem Zeitpunkt t_i , sondern wird iterativ, d.h. zusätzlich noch zu wenigstens einem weiteren Zeitpunkt t_{i+1} durchgeführt.

15

Vorstehend bereits umrissene sowie weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung einiger bevorzugter Ausführungsformen anhand der beigefügten Zeichnung, in welcher zeigen:

20 Fig. 1 in stark vereinfachter Ansicht eine beispielhafte Ausführungsform einer Strommessvorrichtung gemäß der Erfindung mit einem bandförmigen, mechanisch flexiblen, kettenartigen Träger,

Fig. 2 in stark vereinfachter Ansicht eine beispielhafte Ausführungsform einer Strommessvorrichtung gemäß der Erfindung mit einem plattenartigen Träger als
25 bandförmigen, mechanisch flexiblen Träger,

Fig. 3 ein vereinfachtes Ablaufdiagramm betreffend die Berechnung der Magnetfeldsensorpositionen gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung und nachfolgend auch des Stroms,

Fig. 4 ein vereinfachtes Ablaufdiagramm betreffend die Berechnung der
30 Magnetfeldsensorpositionen mit Spline-Interpolation gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung und nachfolgend auch des Stroms,

Fig. 5 ein schematisches Blockdiagramm einer bevorzugten Ausführungsform einer Messkette zur Ermittlung des durch wenigstens einen Leiter fließenden

elektrischen Stroms bzw. dessen Stromstärke mittels einer der in den Figuren 1 und 2 dargestellten Strommessvorrichtung, und

Fig. 6 ein beispielhaftes schematisches Ablaufdiagramm von Schritten eines Verfahrens zur Ermittlung der Stromstärke eines durch wenigstens einen Leiter fließenden elektrischen Stroms.

Die Fig. 1 und 2 zeigen jeweils in stark vereinfachter Ansicht zwei bevorzugte, jedoch lediglich beispielhafte Ausführungsformen einer Strommessvorrichtung mit einem bandförmigen, mechanisch flexiblen Träger 100 (Fig. 1) bzw. 100' (Fig. 2) gemäß der Erfindung. Wie in den Fig. ersichtlich, kann der Träger 100 bzw. 100' jeweils um einen elektrischen Leiter 10 herum angeordnet werden. Auch wenn die Anordnung um den elektrischen Leiter 10 grundsätzlich derart sein kann, dass der bandförmige, mechanisch flexible Träger 100 (Fig. 1) bzw. 100', dann eine offene, d.h. nicht geschlossene Form einnimmt, ist bei bevorzugter, in sich geschlossener Form des angeordneten Trägers 100 bzw. 100' der messtechnische Aufwand deutlich verringert, wie aus der nachfolgenden Beschreibung noch ersichtlich. Um die Flexibilität zu erhöhen, ist der Träger 100 bzw. 100' jedoch zweckmäßig als mechanisch öffnen- und verschließbarer Träger ausgebildet, sodass dieser zur Anordnung um den Leiter auch einfach um diesen herumgeführt oder herumgelegt werden kann und der Leiter, dessen Strom gemessen werden soll, hierzu nicht zwingend durch den Träger hindurchgeführt oder hindurchgefädelt werden muss. Insofern erleichtert dies auch den Einsatz der Strommessvorrichtung, da diese in besonders einfacher Art und Weise um im Wesentlichen jeden beliebigen Stromleiter herumgeführt oder herumgelegt werden kann, ohne diesen Stromleiter hierzu von einem angeschlossenen elektronischen Gerät vorher trennen zu müssen.

25

Die in den Fig. 1 und 2 gezeigte Strommessvorrichtung besitzt ferner eine Speichereinrichtung 101, in welcher vorgebbare Randparameter gespeichert werden können oder bereits sind, die die Geometrie des Trägers betreffen, und eine Datenverarbeitungseinheit 102. Diese können auch, wie bei den Ausführungsformen skizziert, z.B. Teil einer gemeinsamen Auswertevorrichtung 103 sein und/oder direkt am Träger 100 bzw. 100' befestigbar sein. Ist der Träger als mechanisch öffnen- und verschließbarer Träger ausgebildet und ist die Speichereinrichtung 101, die Datenverarbeitungseinheit 102 oder eine gemeinsame Auswertevorrichtung 103 direkt

30

am Träger 100 bzw. 100' befestigt, so ist hieran zweckmäßig auch ein mechanischer Verschluss 104 zum Öffnen und anschließendes Wiederverschließen des Trägers vorgesehen. Datenverarbeitungseinheit 102 umfasst zweckmäßig einen Mikrocontroller zum Durchführen der nachfolgend noch detailliert beschriebenen Berechnung der Positionen und Orientierungen der mehreren Magnetfeldsensoren. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist der Mikrocontroller jedoch in den Fig. 1 und 2 nicht dargestellt. Je nach spezieller Ausgestaltung kann beispielsweise auch der in Fig. 5 dargestellte Mikrocontrollers 140 hierzu ergänzend vorgesehen bzw. ausgebildet sein. Statt eines Mikrocontrollers kann alternativ z.B. auch ein Mikroprozessor bzw. eine CPU (Central Processing Unit) umfasst sein.

Die in den Fig. 1 und 2 gezeigte Strommessvorrichtung besitzt ferner eine erste Mehrzahl an ersten, als Magnetfeldsensoren ausgebildeten Sensoren 110 und eine zweite Mehrzahl an zweiten Sensoren 120, wobei jeder Magnetfeldsensor 110 und jeder zweite Sensor 120 am Träger 100 bzw. 100' befestigt ist. Die Stellen, an denen die Magnetfeldsensoren 110 und die zweiten Sensoren 120 am Träger 100 bzw. 100' befestigt sind, sind Teil der vorgebbaren Randparameter bzw. sind über diese definiert, sodass die Magnetfeldsensoren 110 und die zweiten Sensoren 120 folglich entsprechend diesen vorgebbaren, gespeicherten Randparametern an definierten Stellen des Trägers 100 bzw. 100' befestigt sind. Auch eine, jedoch aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht weiter dargestellte Energieversorgungseinrichtung, die zur Energieversorgung der Speichereinrichtung 101, der Datenverarbeitungseinheit 102, der Magnetfeldsensoren 110 und/oder der zweiten Sensoren 120 ausgebildet ist, kann in zweckmäßiger Ausgestaltung von der Strommessvorrichtung mit umfasst sein.

Jeder zweite Sensor 120 dient dazu bzw. ist dazu ausgebildet, eine Orientierung des Trägers, d.h. insbesondere relativ zur Erdoberfläche, an der definierten Stellen, an welcher dieser zweite Sensor befestigt ist, zu einem Zeitpunkt t_i zu ermitteln (vgl. „B“ in Fig. 3 u. 4) und jeder Magnetfeldsensor 110 dient dazu bzw. ist dazu ausgebildet, ein Magnetfeld, welches von einem durch den elektrischen Leiter 20 fließenden Strom hervorgerufen wird, zu messen. Die Datenverarbeitungseinheit 102 ist mit den Magnetfeldsensoren 110 und den zweiten Sensoren 120 kommunikativ verbunden, welches jedoch aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht weiter dargestellt ist, und dazu

ausgebildet, d.h. vorzugsweise mittels einem hierzu von dieser umfassten Mikrocontroller oder Mikroprozessor, unter Berücksichtigung der mittels der zweiten Sensoren 120 ermittelten Orientierungen und unter Berücksichtigung der in der Speichereinrichtung 101 gespeicherten Randparameter die Positionen und

5 Orientierungen der Magnetfeldsensoren 110 relativ zueinander zu berechnen.

In besonders bevorzugter Ausbildung sind die Magnetfeldsensoren 110 und die zweiten Sensoren 120 jeweils paarweise derart angeordnet, dass die Orientierung, wie in den Fig. 1 und 2 zu erkennen, von jeweils einem zweiten Sensor 120 der Orientierung des

10 jeweils mit diesem zweiten Sensor als Paar angeordneten Magnetfeldsensors 110 entspricht. Hierauf basierend kann somit ferner insbesondere für die Berechnung der Orientierungen der Magnetfeldsensoren 110 relativ zueinander, die vereinfachte Annahme getroffen werden, dass die, hierbei von jedem zweiten Sensor 120 ermittelte Orientierung der relativen Orientierung des jeweils mit diesem zweiten Sensor 120 als

15 Paar angeordneten Magnetfeldsensors 110 entspricht. Ein Magnetfeldsensor 110 und ein zweiter Sensor 120 können auch jeweils Teil einer gemeinsamen Komponente sein.

Grundsätzlich muss aber die Mehrzahl der zweiten Sensoren 120 nicht mit der Mehrzahl der Magnetfeldsensoren 110 identisch sein. Die benötigte Anzahl an

20 Magnetfeldsensoren 110 richtet sich im Wesentlichen nach den zu berücksichtigenden Freiheitsgraden des elektrischen Leiters 10, um den herum die Strommessvorrichtung zur Strommessung angeordnet ist. Dies sind folglich insbesondere der zu messende Strom selbst, aber auch z.B. die Position des Leiters 10 in x-Richtung, die Position des Leiters 10 in y-Richtung, ein eventueller Kippwinkel des Leiters 10 und/oder ein

25 eventueller Dreh- oder Richtungswinkel des Leiters 10. Insbesondere, wenn die Magnetfeldsensoren 110 somit jeweils dazu ausgebildet sind, die Magnetfeldstärke eines Magnetfeldes, welches von einem durch einen elektrischen Leiter fließenden Strom hervorgerufen wird, in nur einer einzigen Raumrichtung zu messen, wird daher für jeden zu berücksichtigenden Freiheitsgrad in praktischer Ausbildung zumindest ein

30 Magnetfeldsensor 110 benötigt. Für die vorstehend fünf genannten Freiheitsgrade sollten also wenigstens 5 Magnetfeldsensoren 110 vorgesehen sein. Die Anzahl der benötigten zweiten Sensoren 120 hingegen ergibt sich aus den Freiheitsgraden des mechanisch flexiblen Träger 100 (Fig. 1) bzw. 100' (Fig. 2).

So ist bei Fig. 1 als erste Ausführungsvariante einer beispielhaften Ausführungsform einer Strommessvorrichtung gemäß der Erfindung der bandförmige, mechanisch flexible Träger ein kettenartiger Träger 100 der mehrere beweglich miteinander verbundene, insbesondere mittels Gelenken 105 beweglich miteinander verbundene, 5 starre Kettenglieder 106 aufweist. Hierbei ist in zweckmäßiger Weise jeder Magnetfeldsensor 110 und jeder zweite Sensor 120 an einem solchem starren Kettenglied 106 befestigt. Insbesondere ist an jedem dieser starren Kettenglieder 106 jeweils wenigstens ein Magnetfeldsensor 110 und an zumindest einigen der starren 10 Kettenglieder jeweils wenigstens einer der zweiten Sensoren 120 befestigt. Die Kettenglieder selbst weisen bezüglich der länglichen Ausdehnung des Trägers 100 jeweils eine vorbestimmte Länge auf, wobei diese vorbestimmten Längen der Kettenglieder 106 wiederum Randparameter der in der Speichereinrichtung gespeicherten vorgebbaren, Randparameter sind. Der kettenartige Träger 100 ist 15 folglich zu einem flexiblen/variablen im Wesentlichen beliebigen Polygonzug formbar.

In diesem Fall ist die Datenverarbeitungseinheit 102 somit zweckmäßig dazu ausgebildet, unter Berücksichtigung der mittels der zweiten Sensoren ermittelten Orientierungen die Innenwinkel zwischen jeweils zwei beweglich miteinander 20 verbundenen starren benachbarten Kettenglieder 106 zu berechnen und in Abhängigkeit von den berechneten Innenwinkeln und den vorbestimmten Längen der jeweiligen starren Kettenglieder 106 die Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren relativ zueinander zu berechnen(vgl. „C“ in Fig. 3). In Bezug auf die zu berücksichtigenden Freiheitsgraden eines kettenartigen Trägers 100 ist hierbei somit 25 grundsätzlich die Anzahl von benötigten zweiten Sensoren 120 abhängig von der Anzahl der Kettenglieder 106. In Bezug auf die zu berücksichtigenden Freiheitsgrade eines kettenartigen Trägers 100 kann jedoch ein solches Polygon auch mit weniger zweiten Sensoren 120 als Kettengliedern schon eindeutig definiert sein. So kann bei einem geschlossenen Polygon mit beispielsweise einer Anzahl von bei 5 Kettengliedern 30 eine Anzahl von 2 zweiten Sensoren 120 bereits ausreichend sein. Ist, wie in den Fign, 1 und 2 skizziert, die Speichereinrichtung 101, die Datenverarbeitungseinheit 102 und/oder eine gemeinsame Auswertevorrichtung 103 direkt am Träger befestigt, ist es ferner zweckmäßig, diesen Bereich genauso wie die anderen starren Bereiche zu

berücksichtigen und je nach spezieller Ausgestaltung aus praktischen Gründen auch dort gleichzeitig einen Magnetfeldsensor und/oder einen zweiten Sensor vorzusehen.

Wenn der Träger somit ein kettenartiger Träger 100 aus mehreren beweglich
5 miteinander verbundenen, insbesondere mittels Gelenken 105 beweglich miteinander
verbundenen, starren Kettengliedern 106 ist, kann die Sensorgeometrie insgesamt, somit
als Polygon modelliert werden, dessen Seitenlängen bekannt sind. Sind die zweiten
Sensoren 120 in bevorzugter Ausbildung Lagesensoren, können aus den
Lageinformationen der zweiten Sensoren 120 dann die Innenwinkel des Polygons
10 bestimmt werden. Damit erhält man eine eindeutig definierte Figur, aus der alle
benötigten Abstände und Winkel abgeleitet bzw. berechnet werden können.
Im Falle einer Kette mit Gelenken als Trägervorrichtung können für die messtechnische
Erfassung der Sensorgeometrie auch zweite Sensoren eingesetzt werden, die die Winkel
in den Gelenken insbesondere direkt messen, z.B. auf Basis von Potentiometern oder
15 anderen Drehgebern arbeitende zweite Sensoren. Messtechnisch einfacher ist es jedoch
in der Regel, wenn für die Erfassung der Sensorgeometrie 3- Achs-Lagesensoren
eingesetzt werden, wobei dann für den Fall, dass die Orientierungen oder Winkel
jeweils relativ zur Erdoberfläche ermittelt werden, zumindest die durch alle diese
Lagesensoren gebildete Ebene nicht genau parallel zur Erdoberfläche verlaufen darf.
20 Für eine sich daran anschließende Strommessung ist es zweckmäßig, dann alle
Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren 110 in einem gemeinsamen
Bezugssystem/Koordinatensystem anzugeben. d.h. unter Verwendung des
Koordinatensystems mit definiertem Ursprung werden die relativen Positionen und
Orientierungen der Magnetfeldsensoren noch in absolute Positionen und Orientierungen
25 umgerechnet (vgl. „D“ in Fig. 3). Der definierte Ursprung kann hierbei willkürlich, z.B.
auch auf die Position eines Magnetfeldsensors gelegt werden. Die Berechnungen
müssen jedoch nicht zwingend in einem kartesischen Koordinatensystem erfolgen.
Auch kann anstelle eines kartesischen Koordinatensystems z.B. auch ein Polarsystem
verwendet werden

30

Ist, wie bei Fig. 2 als alternative Ausführungsvariante einer beispielhaften
Ausführungsform einer Strommessvorrichtung gemäß der Erfindung der bandförmige,
mechanisch flexible Träger ein plattenartiger Träger 100', insbesondere eine

Leiterplatte, der mehrere, sich abwechselnde starre 106' und flexible 105' Bereiche aufweist, so ist auch in diesem Fall in zweckmäßiger Weise jeder Magnetfeldsensor 110 und jeder zweite Sensor 120 an einem solchem starren 106' Bereich befestigt, insbesondere an jedem dieser starren Bereiche 106' wenigstens ein Magnetfeldsensor und einer der zweiten Sensoren befestigt. Ähnlich zu den Ausführungen zur Ausführungsvariante gemäß Fig. 1 weisen zweckmäßig auch im Fall gemäß Fig. 2 die flexiblen 105' und die starren 106' Bereiche jeweils eine vorbestimmte Länge auf, welche Randparameter der in der Speichereinrichtung gespeicherten vorgebbaren Randparameter sind. Da die Berechnung jedoch ersichtlich komplexer ist, ist die Datenverarbeitungseinheit 102 somit zweckmäßig ferner dazu ausgebildet, in der Speichereinrichtung gespeicherte Anweisungen auszuführen, die die Datenverarbeitungseinheit 102 veranlassen, die Berechnung der Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren relativ zueinander unter Berücksichtigung der mittels der zweiten Sensoren ermittelten Orientierungen und unter Berücksichtigung der in der Speichereinrichtung gespeicherten vorgebbaren Randparameter hierbei derart durchzuführen, und also insbesondere mittels einem von der Datenverarbeitungseinheit 102 umfassten Mikrocontroller, Mikroprozessor oder ähnlichen Einrichtung durchzuführen, dass die Positionen der Magnetfeldsensoren zweckmäßig unter Anwendung eines Optimierungsalgorithmus und unter Verwendung einer geometrischen Modellierung der flexiblen Bereiche 105' optimiert werden, wobei der Optimierungsalgorithmus vorzugsweise eine Gütefunktion verwendet, welche die Längen der flexiblen Bereiche berücksichtigt (vgl. „C“ in Fig. 4).

Auch hierbei werden folglich die Winkel zwischen den einzelnen Sensoren, zweite wie erste Sensoren, berücksichtigt, wobei sich die Winkel zwischen den Magnetfeldsensoren zweckmäßig aus der Differenz ihrer Winkel zur Erdoberfläche ergeben. Folglich können auch bei einer Ausführungsvariante wie bei Fig. 2 skizziert, als zweite Sensoren 120 zunächst bereits einfache, handelsübliche 3-Achs-Lagesensoren eingesetzt werden. Soweit die Orientierungen oder Winkel jeweils relativ zur Erdoberfläche ermittelt werden, ist jedoch auch hier zu beachten, dass dann zumindest die durch alle diese Lagesensoren gebildete Ebene nicht genau parallel zur Erdoberfläche verlaufen darf.

Ist, wie in den Fign, 1 und 2 skizziert, die Speichereinrichtung 101, die Datenverarbeitungseinheit 102 und/oder eine gemeinsame Auswertevorrichtung 103 direkt am Träger befestigt, ist es ferner auch hier zweckmäßig, diesen Bereich genauso wie die anderen starren Bereiche zu berücksichtigen und je nach spezieller

5 Ausgestaltung aus praktischen Gründen auch dort gleichzeitig einen Magnetfeldsensor und/oder einen zweiten Sensor vorzusehen. Es ist jedoch grundsätzlich auch möglich, die in Fig. 2 gezeigte Stelle der Auswertevorrichtung 103 und also die Verbindung zwischen den beidseitig der Auswertevorrichtung 103 anschließend an den zwei starren Bereichen 106' angeordneten Sensoren insbesondere durch 2 flexible Bereiche 105' und

10 einen starren Bereiche 106 zu modellieren. Aus praktischen Gründen sollte jedoch auch in einer wie bei Fig. 2 skizzierten Auswerteeinheit gleichzeitig auch ein Magnetfeldsensor und ein zweiter Sensor vorgesehen sein, damit dieser Bereich genauso wie die anderen starren Bereiche 106' berücksichtigt werden kann.

15 Da im Fall eines wie bei Fig. 2 gezeigten plattenartigen Träger 100', insbesondere einer Leiterplatte, die Berechnung jedoch komplexer ist und folglich zweckmäßig unter Anwendung eines Optimierungsalgorithmus und unter Verwendung einer geometrischen Modellierung durchgeführt wird, kann ein möglicher Ansatz für eine solche Modellierung die Nutzung kubischer Splines sein.

20 Bevorzugt veranlassen die in Speichereinrichtung gespeicherten Anweisungen somit die Datenverarbeitungseinheit 102, d.h. vorzugsweise einen von dieser umfassten Mikrocontroller oder Mikroprozessor, die Positionen der Magnetfeldsensoren iterativ zu variieren (vgl. „C1“ in Fig. 4) und in Abhängigkeit der variierten Positionen jeweils die

25 folgenden Schritte solange auszuführen, bis ein vorbestimmtes Abbruchkriterium erfüllt ist (vgl. „C4“ in Fig. 4). Ein solches Abbruchkriterium kann die Anzahl der iterativen Veränderungen und/oder eine vordefinierter bzw. vorgebbarer Schwellwert für die Gütefunktion sein. So ist vorgesehen, in einem ersten Schritt die flexiblen Bereiche 105' jeweils als kubische Splines unter Anwendung einer Spline-Interpolation zu

30 modellieren und die Längen der kubischen Splines zu berechnen (vgl. „C2“ in Fig. 4) und dann die jeweils berechneten Längen der kubischen Splines mit der vorbestimmten Länge des jeweiligen flexiblen Bereichs zu vergleichen (vgl. „C3“ in Fig. 4), um einen Gütewert für die Gütefunktion zu erhalten.

Ein kubischer Spline ist bekannter Weise eine zweidimensionale Kurve, die durch ein Polynom 3. Grades, d.h.

$$f_i(x) = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i$$

5 definiert wird.

Dabei ist $f_i(x)$ der Verlauf der Kurve in einer Dimension („y“) in Abhängigkeit der zweiten Dimension („x“) und wird durch die Parameter a_i, b_i, c_i, d_i bestimmt.

10 Zur Bestimmung der Parameter dient das Verfahren der Spline-Interpolation. Dabei werden die Splines derart parametrisiert, dass sie einen Pfad zwischen Anfangs- und Endpunkt mit möglichst geringer „Verbiegung“ darstellen.

Das Verfahren ist aus der Mathematik bekannt, kann allerdings nur angewendet werden, wenn die Randbedingungen an den Stützstellen bekannt sind. Für den Fall gemäß Fig. 2
15 bedeutet das, dass die Start- und Endpositionen der Splines sowie die Steigungen in diesen Positionen bekannt sein müssen.

Die Steigungen lassen sich direkt aus durch die zweiten Sensoren 120 gewonnenen Lageinformationen ableiten. Die Start- und Endpositionen sind jedoch für den Fall
20 gemäß Fig. 2 zunächst unbekannt. Denn eine jeweilige Stützstelle bzw. eine jeweilige Start- und auch Endposition eines Splines entspricht folglich einer jeweiligen Verbindungsstelle zwischen einem starren Bereich 106' und einem flexiblen Bereich 105 und stimmt somit in der Regel nicht mit der Position eines entsprechenden zweiten Sensors und auch Magnetfeldsensors überein. Um dies zu umgehen ist erfindungsgemäß
25 eben der Optimierungsalgorithmus vorgesehen

Dabei wird zweckmäßig eine initiale Vorgabe für die Positionen gemacht, bspw. gleichmäßig verteilt über eine Kreisbahn. Auf dieser Basis können die Splines zwischen den Positionen interpoliert werden und dann im Rahmen der Optimierung die
30 angenommenen Positionen Schritt für Schritt verändert werden, und anschließend die hierauf jeweils wieder „neu“ berechneten Längen der kubischen Splines mit der vorbestimmten Länge des jeweiligen flexiblen Bereichs vergleichen.

Für die Optimierung der Positionen wird somit eine Gütefunktion benötigt, die in einer Zahl ausdrückt wie gut die derzeitige Schätzung ist. Dazu kann als weitere Randbedingung ausgenutzt werden, dass die (Soll-)Längen der Splines bekannt sind, d.h. sie entsprechen z.B. den Längen der flexiblen Bereiche 105' des Trägers 100' gemäß Fig. 2.

Die Länge der interpolierten Splines ergibt sich damit aus den Parametern:

$$L_i = \int_{x_i}^{x_{i+1}} \sqrt{1 + (3a_i x^2 + 2b_i x + c_i)} dx$$

Dabei ist L_i die Länge des i-ten Splines, x_i und x_{i+1} sind die Stützstellen.

Je genauer die Länge der interpolierten Splines der Soll-Länge entspricht, desto besser ist die Schätzung der Magnetfeldsensorpositionen.

Die Optimierung wird so oft wiederholt, bis ein Abbruchkriterium erreicht ist. Das kann, wie vorstehend bereits aufgezeigt, z.B. die Anzahl der Optimierungsdurchläufe oder ein Schwellwert für die Gütefunktion sein.

15 Nach Abschluss der Optimierung, ist es für eine sich daran anschließende Strommessung wiederum zweckmäßig, alle Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren 110 in einem gemeinsamen Bezugssystem/Koordinatensystem anzugeben, d.h. unter Verwendung des Koordinatensystems mit definiertem Ursprung werden die relativen Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren noch in 20 absolute Positionen und Orientierungen umgerechnet (vgl. „D“ in Fig. 4). Der definierte Ursprung kann auch hier willkürlich gewählt werden und die Berechnungen müssen nicht zwingend in einem kartesischen Koordinatensystem erfolgen. Um die Berechnungen zu vereinfachen, kann es sich empfehlen, anstelle eines kartesischen Koordinatensystems z.B. ein Polarsystem zu verwenden, sodass die Splines als 25 Abweichung von einer idealen Kreisbahn definiert werden können.

Unter vollumfänglicher Berücksichtigung vorstehender Beschreibung, insbesondere in Bezug auf die Fign. 1 und 2, wird nachfolgend insbesondere auf die Fign. 3 und 4 Bezug genommen, welche jeweils ein vereinfachtes Ablaufdiagramm betreffend die 30 Berechnung der Magnetfeldsensorpositionen gemäß zweier bevorzugter Ausführungsformen der Erfindung und nachfolgend auch des Stroms skizzieren.

So wird in einem ersten, in den Fign. 3 u. 4 mit A gekennzeichneten Schritt eine wie vorstehend in Bezug auf die Fign. 1 und 2 grundsätzlich gemeinsam beschriebene Strommessvorrichtung, d.h. die eine bandförmigen, mechanisch flexiblen Träger 100 bzw. 100', der um einen elektrischen Leiter angeordnet werden kann, besitzt, sowie eine Speichereinrichtung' 101 besitzt, in der vorgebbare Randparameter, die die Geometrie des Trägers betreffen, gespeichert sind, und eine erste Mehrzahl an ersten Sensoren 110 und eine zweite Mehrzahl an zweiten Sensoren 120 besitzt, die jeweils entsprechend den Randparameter an definierten Stellen des Trägers befestigt sind und jeder zweite Sensor zur Ermittlung einer Orientierung des Trägers an der definierten Stelle, an welcher dieser zweite Sensor befestigt ist, zu einem Zeitpunkt t_i ausgebildet ist sowie jeder erste Sensor als Magnetfeldsensor zum Messen eines Magnetfeldes, welches von einem durch einen elektrischen Leiter fließenden Strom hervorgerufen wird, ausgebildet ist, und ferner eine mit den Magnetfeldsensoren und den zweiten Sensoren kommunikativ verbundenen Datenverarbeitungseinheit 102 besitzt, die dazu ausgebildet ist, unter Berücksichtigung der mittels der zweiten Sensoren ermittelten Orientierungen und unter Berücksichtigung der in der Speichereinrichtung gespeicherten Randparameter die Positionen und Orientierungen der mehreren Magnetfeldsensoren relativ zueinander zu berechnen, derart angeordnet, dass der Träger 100, 100' eine veränderbare geometrische Figur bildet, die sich aus mehreren kurvenförmigen und/oder geradlinigen Abschnitten zusammensetzt.

Anschließend werden in einem nächsten, in den Fign. 3 u. 4 mit B gekennzeichneten Schritt, durch jeden der zweiten Sensoren eine Orientierung des Trägers an der definierten Stelle, an welcher der jeweilige zweite Sensor befestigt ist, zu einem Zeitpunkt t_i ; ermittelt. Daraufhin können, wie grundsätzlich bereits in Bezug auf die Fign. 1 und 2 vorstehend beschrieben, einem nächsten, in den Fign. 3 u. 4 mit C gekennzeichneten Schritt, unter Berücksichtigung der gespeicherten, vorgebbaren Randparameter und unter Berücksichtigung der ermittelten Orientierungen die Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren relativ zueinander berechnet werden.

Nach erfolgter Berechnung der Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren relativ zueinander können, wie in den Fig. 3 u. 4 mit dem mit D gekennzeichneten Schritt angedeutet, für eine sich daran anschließende Strommessung noch zweckmäßig alle Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren in einem gemeinsamen

5 Bezugssystem/Koordinatensystem angegeben bzw. umgerechnet und, wie in den Fig. 3 u. 4 mit dem mit E gekennzeichneten Schritt angedeutet, entsprechend abgespeichert werden.

Je nach spezifischer Ausgestaltung können ferner die in den Fig. 3 u. 4 mit B und/oder

10 C gekennzeichneten Schritte zu wenigstens einem weiteren Zeitpunkt t_{i+1} wiederholt werden, d.h. die erneute Ermittlung der Orientierungen durch die zweiten Sensoren sowie die Berechnung der relativen Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren kann z.B. auch im laufenden Betrieb einer sich daran anschließenden Strommessung durchgeführt werden. Damit kann sichergestellt werden,

15 dass die Messgenauigkeit der Strommessung auch bei einer sich ändernden geometrischen Form des um einen elektrischen Leiter herum angeordneten bandförmigen, mechanisch flexiblen Trägers nicht oder zumindest nur unwesentlich negativ beeinflusst wird.

20 Für eine sich daran anschließende Strommessung wird nach Anordnen der Strommessvorrichtung um einen elektrischen Leiter durch jeden Magnetfeldsensor eine Magnetfeldstärke des Magnetfeldes, welches von einem durch den elektrischen Leiter fließenden Strom hervorgerufen wird gemessen, wie in den Fig. 3 u. 4 mit dem mit F gekennzeichneten Schritt angedeutet, und die Stromstärke des durch den elektrischen

25 Leiter fließenden Stroms in Abhängigkeit von den ermittelten Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren und der von den Magnetfeldsensoren jeweils ermittelten Magnetfeldstärken berechnet, wie in den Fig. 3 u. 4 mit dem mit G gekennzeichneten Schritt angedeutet. Auch der berechnete Strom kann zweckmäßig, wie in den Fig. 3 u. 4 mit dem mit H gekennzeichneten Schritt angedeutet, wiederum

30 abgespeichert werden.

Werden die in den Fig. 3 u. 4 mit B und/oder C gekennzeichneten Schritte zu wenigstens einem weiteren Zeitpunkt t_{i+1} wiederholt, so werden zweckmäßig auch die

die in den Fig. 3 u. 4 mit D, E, F, G und H gekennzeichneten Schritte für den wenigstens einen weiteren Zeitpunkt t_{i+1} wiederholt.

5 Unter der Annahme, dass die Strommessvorrichtung einen kettenartigen Träger aufweist, wie vorstehend unter Bezugnahme auf die Fig. 1 grundsätzlich beschrieben, zeichnet sich der in Fig. 3 mit C gekennzeichnete Verfahrensschritt insbesondere dadurch aus, dass bei der Berechnung der Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren relativ zueinander unter Berücksichtigung der gespeicherten, vorgebbaren Randparameter und unter Berücksichtigung der ermittelten Orientierungen
10 hierzu ferner unter Berücksichtigung der von den zweiten Sensoren zu einem Zeitpunkt t_i ermittelten Orientierungen zunächst eine Berechnung der Innenwinkel zwischen jeweils zwei beweglich miteinander verbundenen starren benachbarten Kettenglieder erfolgt; und in Abhängigkeit von den berechneten Innenwinkeln und den vorbestimmten Längen der jeweiligen starren Kettenglieder dann die Positionen und Orientierungen der
15 Magnetfeldsensoren relativ zueinander berechnet werden. Die einzelnen für die Sensorgeometrie noch notwendigen Modellparameter können somit zu jedem Zeitpunkt t_i berechnet werden.

20 Mit anderen Worten, wird, wie vorstehend beschrieben, die Sensorgeometrie insgesamt, soweit möglich messtechnisch erfasst und die noch fehlenden Parameter werden modelliert. Folglich können die Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren auch im laufenden Betrieb einer Strommessung stets aktualisiert werden.

25 Unter der Annahme, dass die Strommessvorrichtung einen plattenartigen Träger, insbesondere eine Leiterplatte aufweist, wie vorstehend unter Bezugnahme auf die Fig. 2 grundsätzlich beschrieben, aufweist, zeichnet sich der in Fig. 4 mit C gekennzeichnete Verfahrensschritt insbesondere dadurch aus, dass bei der Berechnung der Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren relativ zueinander unter Berücksichtigung der gespeicherten, vorgebbaren Randparameter und unter Berücksichtigung der
30 ermittelten Orientierungen hierzu ferner jeweils berechnete Positionen der Magnetfeldsensoren unter Anwendung eines Optimierungsalgorithmus und unter Verwendung einer geometrischen Modellierung der flexiblen Bereiche optimiert

werden, wobei der Optimierungsalgorithmus eine Gütefunktion verwendet, welche die Längen der flexiblen Bereiche berücksichtigt.

- Insbesondere können hierbei wie vorstehend auch unter Bezugnahme auf die Fig. 2 im
5 Detail beschrieben, die Positionen der Magnetfeldsensoren iterativ variiert bzw.
verändert werden, wie in Fig. 4 mit dem mit C1 gekennzeichneten Schritt angedeutet,
und daraufhin in Abhängigkeit der jeweils variierten Positionen dann jeweils jeder der
flexiblen Bereiche als ein kubischer Spline unter Anwendung einer Spline-Interpolation
modelliert und die Längen der kubischen Splines berechnet werden, wie in Fig. 4 mit
10 dem mit C2 gekennzeichneten Schritt angedeutet, woraufhin anschließend die jeweils
berechneten Längen der kubischen Splines mit den vorbestimmten Längen der
jeweiligen flexiblen Bereiche verglichen, um einen Gütewert zu erhalten, wie in Fig. 4
mit dem mit C3 gekennzeichneten Schritt angedeutet. Dieses Vorgehen, d.h. das
Durchlaufen des Optimierungsalgorithmus kann solange wiederholt werden, bis ein
15 vorbestimmtes Abbruchkriterium erfüllt ist, welches bei Fig. 4 mit C4 gekennzeichnet
ist. Wie zuvor beschrieben, wird vor der ersten Positionsveränderung zweckmäßig eine
initiale Vorgabe für die Positionen gemacht, auf deren Basis in den
Optimierungsalgorithmus gestartet wird, wie in Fig. 4 mit C0 gekennzeichnet.
- 20 Folglich wird auch bei einer Vorgehensweise gemäß Ablaufdiagramm nach Fig. 4 die
Sensorgeometrie insgesamt, soweit möglich messtechnisch erfasst und die noch
fehlenden Parameter werden entsprechend modelliert, wobei die Positionen und
Orientierungen der Magnetfeldsensoren auch im laufenden Betrieb einer Strommessung
stets aktualisiert werden können.
- 25 Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass ausgehend von einer Ermittlung durch
jeden der zweiten Sensoren von einer Orientierung des Trägers an der definierten Stelle,
an welcher dieser zweite Sensor befestigt ist (vgl. der in den Fign. 3 u. 4 mit B
gekennzeichnete Schritt), und insbesondere bei einer Ermittlung dieser Orientierungen
relativ zur Erdoberfläche, die jeweilige Lage der Sensoren zweckmäßig durch
30 Richtungsvektoren abgebildet werden kann. Aus dem Vergleich der Richtungsvektoren
einzelner Sensoren kann dann in Folge auch auf die Ausrichtung bzw. Orientierung der
Sensoren auch relativ zu einander geschlossen werden. Wenn genug Lageinformationen

vorliegen, kann daraus mit Hilfe eines, z.B. wie vorstehend beschriebenen, mathematischen Modells des Trägers 100 und 100' die vollständige Sensorgeometrie rekonstruiert werden (vgl. der in den Fign. 3 u. 4 mit C gekennzeichnete Schritt). Wie viele zweite Sensoren notwendig sind, um die Sensorgeometrie eindeutig zu bestimmen ist abhängig von den Freiheitsgraden des Trägers. Es ist daher auch möglich, dass die
5 Zahl der zweiten Sensoren größer oder kleiner ist als die Zahl der Magnetfeldsensoren.

Um aus der vollständig bestimmten Sensorgeometrie die Sensorpositionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren in einem Format abzuleiten, das für den Einsatz
10 bei der Strommessung, d.h. für einen Algorithmus zur Messdatenauswertung der Magnetfeldsensoren vorteilhaft geeignet ist, sind die relativ zueinander bezogenen Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensor zweckmäßig noch in Bezug auf ein gemeinsames Bezugssystem/Koordinatensystem umzurechnen (vgl. der in den Fign. 3 u. 4 mit D gekennzeichnete Schritt), wobei z.B. im Fall eines kartesischen
15 Koordinatensystems, der Koordinatenursprung auch willkürlich auf die Position eines beliebigen Sensors gelegt werden kann.

Aus der erfassten Sensorgeometrie, d.h. insbesondere den gemäß vorstehender Beschreibung bestimmten Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren, und
20 den eigentlichen Magnetfeldmesswerten kann dann der zu messende Strom berechnet werden. Wie aufgezeigt, können die Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren auch im laufenden Betrieb einer Strommessung stets aktualisiert werden.

25 Ein bevorzugtes Verfahren zur Strommessung bzw. zur Ermittlung der Stromstärke eines durch wenigstens einen Leiter 10 fließenden elektrischen Stroms, der in einer wie vorbeschriebenen Strommessvorrichtung positioniert ist, wird unter vollständiger Bezugnahme auf die vorstehendende Beschreibung nachfolgend insbesondere anhand der in den Fign. 5 und 6 skizzierten Diagrammen detaillierter beschrieben.

30 Hierbei umfasst das Verfahren folgenden Schritte:

a) Messen, zu einem ersten Zeitpunkt, durch jeden der Magnetfeldsensoren 110, jeweils eines Wertes für die magnetische Flussdichte entlang wenigstens einer Raumrichtung am Ort des jeweiligen Magnetfeldsensors 110,

- b) Festlegen der Werte für eine Mehrzahl von Leiter-Variablen auf jeweilige Startwerte, wobei die Leiter-Variablen Variablen umfassen, welche die Lage und Orientierung des wenigstens einen stromdurchflossenen Leiters 10 relativ zur Strommessvorrichtung repräsentieren,
- 5 c) Berechnen von erwarteten Werten bezüglich der von den Magnetfeldsensoren 110 gemessenen Werte in Abhängigkeit der Werte der Mehrzahl von Leiter-Variablen,
- d) Ermitteln eines Wertes einer vorgebbaren ersten Gütefunktion in Abhängigkeit der in Schritt c) berechneten Werte und der in Schritt a) gemessenen Werte,
- e) solange ein vorgebbares erstes Abbruchkriterium noch nicht erfüllt ist, Variieren der
- 10 Werte der Mehrzahl von Leiter-Variablen in Abhängigkeit eines vorgebbaren ersten Optimierungs-Algorithmus und Wiederholen der Schritte c) und d),
- f) bei Erfüllen des ersten Abbruchkriteriums, Ermitteln eines Wertes für die Stromstärke des durch den wenigstens einen Leiter fließenden Stroms in Abhängigkeit der Werte der Leiter-Variablen.

15

- Bei dem Verfahren zur Messung der Stromstärke eines durch einen Leiter fließenden Stroms mittels einer Strommessvorrichtung gemäß der Erfindung wird folglich auch die Lage und Orientierung des Leiters relativ zur Strommessvorrichtung mit Hilfe eines Optimierungs-Algorithmus ermittelt, so dass der Leiter relativ zu der
- 20 Strommessvorrichtung innerhalb eines vorgegebenen Messbereiches beliebig positioniert und orientiert sein kann, wobei die Sensorgeometrie der Strommessvorrichtung bereits erfasst worden ist, d.h. insbesondere die gemäß vorstehender Beschreibung bestimmten Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren, oder auch im laufenden Betrieb der Strommessung stets
- 25 aktualisiert werden können.

- Das Verfahren ermöglicht somit vorteilhaft eine kontaktlose Messung von AC- und DC-Strömen mit Hilfe der Magnetfeldsensoren ohne Verwendung eines ferromagnetischen Kerns und ermöglicht so ferner ein Retrofit an bestehenden Leitungen und ist für
- 30 verschiedene Leiterquerschnitte nutzbar, ohne dass der Leiter an einer exakt bekannten Position fixiert werden muss. Es ist darüber hinaus nicht notwendig, die Magnetfeldsensoren so zu positionieren, dass sich ein geschlossener Messweg bildet, der den Leiter einschließt. Besonders vorteilhaft können die Magnetfeldsensoren daher

auch in einer Vielzahl möglicher Anordnungen eingesetzt werden, wobei vorzugsweise eine von der Anzahl der Leiter-Variablen abhängige Mindestanzahl von Magnetfeldsensoren vorgesehen ist. Zudem können bei dem Verfahren vorteilhaft kostengünstige Sensoren verwendet werden, die das Magnetfeld in nur einer einzigen Raumrichtung erfassen.

Fig. 5 zeigt ein schematisches Blockdiagramm einer Messkette für eine wie in den Fig. 1 und 2 skizzierten Strommessvorrichtung. Die analogen Ausgangssignale der ersten Mehrzahl von Magnetfeldsensoren 110, d.h. gemäß Fig. 4 auch mit MS1, MS2 ... MSn bezeichnet, können z.B. an einen Analog- zu Digitalumsetzer 130 angeschlossen und dort in einen digitalen Datenstrom umgesetzt werden. Der digitale Datenstrom repräsentiert dabei den zu diskreten Zeitschritten abgetasteten Magnetfeldsensordaten in digitaler Form. Der digitale Datenstrom wird an einen Mikrocontroller 140 geleitet. Der Prozessor des Mikrocontrollers 140 berechnet aus dem digitalen Datenstrom einen Wert für die Stromstärke des elektrischen Stroms, der in dem Leiter 10 fließt, wobei bei der Berechnung ein Optimierungs-Algorithmus eingesetzt wird, der nachfolgend noch im Detail beschrieben wird. Aus dem berechneten Wert für die Stromstärke wird ein Signal erzeugt, das mit Hilfe einer Ausgabeeinheit 150 ausgegeben. Die Ausgabeneinheit 150 gibt z.B. eine analoge Spannung im Bereich von 0-10V nach dem NAMUR-Standard aus, wobei der ausgegebene Spannungswert proportional zu dem ermittelten Wert der Stromstärke ist (z.B. 0V=0A, 10V=1000A). Es ist aber auch möglich, einen zum Strom im Leiter proportionalen Strom auszugeben, z.B. im Bereich von 0 bis 20mA. Die Ausgabeneinheit 150 kann den ermittelten Strom aber auch in digitaler Form, beispielsweise über einen Feldbus wie Modbus, Profinet etc. ausgeben.

Die Ausgabeneinheit 150 kann auch eine Auswertung des berechneten Wertes der Stromstärke durchführen und z.B. bei Erreichen eines Schwellwerts ein Warnsignal ausgeben. Es ist auch möglich, dass eine Analog- zu Digitalumsetzung und ein Magnetfeldsensor in einer Komponente integriert sind. In dem Fall werden von jedem Magnetfeldsensor mit integriertem Analog zu Digitalumsetzer jeweils ein digitaler Datenstrom an den Prozessor geleitet. Der Analog- zu Digitalumsetzer 130, der Mikrocontroller 140 und die Ausgabeneinheit können hierbei zweckmäßig auch Teil der

Datenverarbeitungseinheit 102 sein und/oder in der Auswertevorrichtung 103 enthalten sein.

5 Das durch den zu messenden Strom verursachte Magnetfeld wird somit mit Hilfe der ersten Mehrzahl von Magnetfeldsensoren 110 an unterschiedlichen Positionen und Raumrichtungen gemessen. Wie beschrieben, kann der Träger 100 bzw. 100' der Strommessvorrichtung jeweils um einen elektrischen Leiter 10 herum angeordnet werden, auch ohne einen Stromkreis aufzutrennen und ohne. Es ist dabei auch nicht notwendig, den Stromleiter 10 an einer bestimmten Position oder einer bestimmten

10 Orientierung zu fixieren, sondern es ist ausreichend, wenn sich der Leiter an irgendeiner Position in beliebiger Orientierung innerhalb des durch die Strommessvorrichtung definierten Messbereichs befindet, d.h. insbesondere innerhalb des gemäß vorstehender Beschreibung angeordneten bandförmigen, mechanisch flexiblen Trägers 100 (Fig. 1) bzw. 100' (Fig. 2).

15 Der Optimierungsalgorithmus für die Messdatenauswertung hat die Aufgabe, diejenige Kombination von Werten für Leiter-Variablen zu finden, die die vorhandenen Messwerte der Magnetfeldsensoren bestmöglich „erklärt“, wobei die Leiter-Variablen insbesondere die Position und Orientierung des Leiters im Messbereich und optional die

20 zu messende Stromstärke umfassen.

Auch dieser Optimierungsalgorithmus, wie generell Optimierungsalgorithmen, erfordert folglich eine Kosten- bzw. Gütefunktion, die die Güte eines Schätzwerts in einer Zahl ausdrückt. Der Schätzwert wird dann variiert, um denjenigen Wert zu finden, der die

25 höchste Güte bzw. die niedrigsten Kosten erreicht. Entsprechend zu vorstehend in Bezug auf die Fig. 4 beschriebenen Optimierungsalgorithmus kann auch der bei der Strommessung eingesetzte Optimierungsalgorithmus nach einer vorgegebenen Zahl von Optimierungsdurchläufen abgebrochen werden oder wenn das Gütekriterium ein Abbruchkriterium erfüllt, z.B. eine vordefinierte Grenze unterschreitet.

30 Bei dem vorliegend bei der Strommessung eingesetzten Optimierungs-Algorithmus besteht der Schätzwert aus der Kombination der Werte der Leiter-Variablen und stellt somit einen N-dimensionalen Vektor dar, wobei N durch die Anzahl der Leiter-

Variablen definiert ist. Als weitere Einflussfaktoren können die Querschnittsform des Leiters sowie Position, Ausrichtung und Stromstärke von gegebenenfalls vorhandenen benachbarten Stromleitern berücksichtigt werden. Die Position und Ausrichtung des Leiters sind dabei im Grunde nur Hilfsgrößen, die als Nebenprodukt des

- 5 Optimierungsalgorithmus anfallen, um die Genauigkeit der zu messenden Stromstärke zu erhöhen. Eine Ausgabe dieser Werte ist typischerweise nicht vorgesehen.

- Es sei angemerkt, dass der wenigstens eine Leiter vorteilhaft genau einen Leiter umfasst. Der wenigstens eine Leiter kann aber auch mehrere Leiter umfassen, die
- 10 jeweils unabhängig voneinander in beliebiger Lage und Orientierung in dem vorgegebenen Messbereich der Strommessvorrichtung positioniert sind. In diesem Fall erhöht sich dementsprechend die Anzahl der zu optimierenden Leiter-Variablen und damit gegebenenfalls auch die Anzahl erforderlicher Magnetfeldsensoren. Der wenigstens eine Leiter kann ferner auch mehrere Leiter umfassen, deren Lage und
- 15 Orientierung und gegebenenfalls Stromstärke durch Leiter-Variablen repräsentiert werden können, die bekannten Randbedingungen genügen, wenn zum Beispiel in einem Kabel mit mehreren Leitern bekannt ist, dass die Leiter die gleiche Orientierung und einen festen Abstand zueinander aufweisen und gegebenenfalls auch die gleiche Stromstärke aufweisen. Diese bekannten Randbedingungen können dann bei der
- 20 Ausführung des Verfahrens berücksichtigt werden. Ferner kann der wenigstens eine Leiter auch mehrere Leiter umfassen, die jedoch als ein einziger Leiter behandelt werden, zum Beispiel im Fall eines eine Mehrzahl Einzelleiter umfassenden Bündel-Leiters. Der Übersichtlichkeit und besseren Verständlichkeit halber ist in den Figuren 1 und 2 jeweils nur ein Leiter¹⁰ gezeigt.

25

- In Fig. 6 wird ein bevorzugter Strombestimmungsalgorithmus gemäß dem oben beschriebenen Verfahren in Form eines schematischen Ablaufdiagramms gezeigt. Zunächst werden in Schritt 300 die Messwerte der Magnetfeldsensoren 110 zu einem ersten Zeitschritt erfasst. Anschließend werden in Schritt 310 Parameter eines
- 30 Stromleiters, für den die Stromstärke bestimmt werden soll, initial vorgegeben, d.h. es werden Werte für eine Mehrzahl entsprechender Leiter-Variablen auf jeweilige Startwerte gesetzt. Die Leiter-Variablen umfassen Variablen, welche die Lage und Orientierung des wenigstens einen stromdurchflossenen Leiters 10 relativ zur

Strommessvorrichtung repräsentieren. In dem in den Figuren 1 und 2 dargestellten Ausführungsbeispiel sind als Leiter-Variablen, welche die Lage und Orientierung des Leiters repräsentieren, eine Durchtrittsposition in x-Richtung, d.h. x_s , eine Durchtrittsposition in y-Richtung, d.h. y_s , sowie ein Richtungswinkel α und ein Kippwinkel β vorgesehen. Optional kann vorteilhaft auch die zu ermittelnde Stromstärke als weitere Leiter-Variable berücksichtigt werden. Beispielsweise können als Startwerte die Durchtrittsposition $x_s=0$, $y_s=0$, die Stromstärke $I=100\text{A}$, der Richtungswinkel $\alpha=0^\circ$ und einen Kippwinkel gegenüber der Ebene $\beta=90^\circ$ initial vorgegeben werden.

10

Anschließend werden in Schritt 320 die mit den vorgegebenen Werten der Leiter-Variablen erwarteten Sensorwerte der Magnetfeldsensoren berechnet, wobei für diese Berechnung vorteilhaft das Gesetz von Biot-Savart angewendet wird. Vorteilhaft kann vereinfachend das Gesetz von Biot-Savart für einen unendlich langen geradlinigen

15

Leiter angewendet werden. Dieses lautet in Zylinderkoordinaten

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0 I}{2\pi\rho} \vec{e}_\varphi$$

20

Die Berechnung erfolgt zusätzlich zumindest in Abhängigkeit von den ermittelten Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren und der von den Magnetfeldsensoren jeweils ermittelten Magnetfeldstärken, wie in den Fign. 3 u. 4 mit dem mit G gekennzeichneten Schritt angedeutet. Zweckmäßig werden auch weitere Parameter für jeden Magnetfeldsensor Informationen berücksichtigt, wie z.B. bezüglich dem Gain, d.h. der Proportionalität zwischen vorliegender magnetischer Flussdichte und Sensorausgangswert, und dem Offset, d.h. einer Nullpunktabweichung. Auch diese Information können vorab bestimmt, vorteilhaft durch ein Kalibrierverfahren vorab bestimmt werden und in einem Speicher der Strommessvorrichtung, zum Beispiel auch in der Speichereinrichtung 101 oder in einem weiteren Speicher des Mikrocontrollers 140 abgelegt werden. Vorteilhaft können die bei der Berechnung berücksichtigten Parameter der Magnetfeldsensoren auch an die Umgebungsbedingungen angepasst werden, indem die jeweiligen Parameterwerte angepasst werden, um zum Beispiel eine

30

Temperaturkompensation und/oder eine Kompensation von Versorgungsspannungsschwankungen zu erzielen. In diesem Fall kann die Strommessvorrichtung vorteilhaft noch entsprechende Sensoren zur Temperaturmessung und/oder zur Spannungsmessung aufweisen. Das Bereitstellen der Parameter der Magnetfeldsensoren ist in Fig. 6 als

5 Schritt 330 dargestellt.

Daran anschließend wird in Schritt 340 ein Wert einer vorgebbaren ersten Güte- oder Kostenfunktion in Abhängigkeit der in Schritt 320 berechneten Werte und der in Schritt 300 gemessenen Werte ermittelt, wobei insbesondere die erfassten Sensorwerte mit den

10 berechneten Werten verglichen werden, um den Wert der Güte- bzw. Kostenfunktion zu bestimmen.

Es sind verschiedene Kostenfunktionen denkbar. Eine bevorzugte Möglichkeit besteht darin, zu berechnen, welches Magnetfeld sich bei Vorliegen der geschätzten Leiter-

15 Variablen an den Positionen der einzelnen Magnetfeldsensoren einstellen würde, insbesondere unter Anwendung des Biot-Savart-Gesetzes, wobei sich in diesem Fall die Kosten aus den Differenzen zwischen den berechneten und den tatsächlich gemessenen Feldstärken ergeben, wobei zum Beispiel eine Standardabweichung oder eine Differenz zwischen Minimum und Maximum berechnet werden kann. In dieser Variante wird die

20 zu messende Stromstärke als eine der Leiter-Variablen berücksichtigt. Bei dem in Fig. 6 beispielhaft dargestellten Ablaufdiagramm wird eine solche Kostenfunktion eingesetzt und dementsprechend die zu messende Stromstärke als eine der Leiter-Variablen berücksichtigt.

25 Eine andere Möglichkeit zur Bestimmung der Stromstärke besteht darin, aus der geschätzten geometrischen Anordnung des wenigstens einen Leiters 10, d.h. aus den jeweils aktuellen Schätzwerten der Leiter-Variablen für jeden der Magnetfeldsensoren 110 einen Verstärkungsfaktor zu bestimmen, mit dessen Hilfe aus der tatsächlich gemessenen Feldstärke eine geschätzte Stromstärke berechnet wird. Wenn die

30 geschätzte Anordnung des wenigstens einen Leiters 10 der Realität entspricht, ergibt sich auf diese Weise aus jedem Messwert die gleiche Stromstärke. Dementsprechend können die Abweichungen der geschätzten Werte für die Stromstärke als Kostenfunktion genutzt werden. Der jeweilige Verstärkungsfaktor wird dabei wiederum

vorteilhaft unter Anwendung des Gesetzes von Biot-Savart berechnet, wobei die Berechnung der Verstärkungsfaktoren auf Basis normierter Magnetfeldmesswerte erfolgt, wobei die Normierung beispielsweise vorsehen kann, die Messwerte jeweils durch den größten der Messwerte zu teilen, wobei dann die normierten Werte

5 unabhängig von der Stromstärke sind und nur noch Informationen über die Lage und Orientierung des Leiters enthalten, so dass die die zu messende Stromstärke in diesem Fall nicht als eine der Leiter-Variablen berücksichtigt werden muss.

Anschließend wird in Schritt 350 analysiert, ob ein Abbruchkriterium erreicht ist. Als

10 Abbruchkriterium kann der Betrag der von der Kostenfunktion berechneten Kosten analysiert werden, wobei als Abbruchkriterium zum Beispiel das Über- oder Unterschreiten eines Schwellwertes vorgesehen sein kann. Ein anderes Abbruchkriterium kann die Anzahl an vorhergehenden Optimierungsdurchläufen sein. Wird eine Grenze erreicht, wird das Bestimmungsverfahren abgebrochen und der

15 ermittelte Wert der zu messenden Stromstärke in Schritt 370 abgespeichert.

Wird das Abbruchkriterium nicht erreicht, werden die Stromleiterparameter, d.h. die Leiter-Variablen, in Schritt 360 mit Hilfe eines vorgebbaren ersten Optimierungs-Algorithmus optimiert, d.h. es werden die Werte der Mehrzahl von Leiter-Variablen in

20 Abhängigkeit des vorgebbaren ersten Optimierungs-Algorithmus variiert, wobei insbesondere der Wert wenigstens einer der Leiter-Variablen geändert wird. Für die Optimierung können verschiedene, aus der Literatur bekannte Optimierungs-Algorithmen, zum Beispiel das Simplex-Verfahren nach Nelder und Mead, die Partikel-Swarm-Optimierung, das Trust-Region Verfahren, das Powell-Verfahren, u.v.m.,

25 eingesetzt werden.

Bei der beispielhaft beschriebenen Verwendung von insgesamt 5 Leiter-Variablen, die Stromstärke, Durchtrittsposition x , Durchtrittsposition y , Richtungswinkel α und Kippwinkel β repräsentieren, ist eine Mindestanzahl von 5 Messwerten der

30 magnetischen Flussdichte für eine Optimierung erforderlich. Werden zum Beispiel Magnetfeldsensoren vorgesehen, die jeweils nur eine Komponente der magnetischen Flussdichte erfassen, sind dementsprechend vorteilhaft mindestens 5 Magnetfeldsensoren vorgesehen. Eine Erhöhung der Anzahl an Magnetfeldsensoren

führt zu einer Verbesserung der Genauigkeit, da das Bestimmungsverfahren dann überbestimmt ist und Störeinflüsse wie beispielsweise Sensor-Rauschen, Störfelder durch benachbarte Leiter und ähnliches einen geringeren Einfluss auf die Genauigkeit der zu ermittelnden Stromstärke hat.

5

Als Leiter-Variablen können vorteilhaft weitere Einflussfaktoren mitgeschätzt werden, wie zum Beispiel die Lage, Orientierung und Stromstärke eines benachbarten stromführenden Leiters. Dementsprechend kann das Verfahren vorteilhaft vorsehen, dass die Mehrzahl von Leiter-Variablen zum Beispiel Variablen umfasst, welche die Stromstärke und/oder die Lage und Orientierung wenigstens eines außerhalb des vorgegebenen Messbereiches angeordneten Leiters repräsentieren. Dadurch erhöht sich die Anzahl der zu optimierenden Leiter-Variablen.

10

Abhängig von der jeweiligen geometrischen Anordnung der Magnetfeldsensoren könnte sich ein nicht-konvexes Optimierungsproblem, das durch eine Kostenfunktion mit mehreren lokalen Minima charakterisiert ist, einstellen, bei denen die Gefahr besteht, dass ein Optimierungsverfahren ein lokales Optimum anstrebt und dabei das globale Optimum verfehlt, sodass ein Fehler in der zu bestimmenden Stromstärke verbliebe. Dies kann vorteilhaft durch den Einsatz komplexerer Optimierungsalgorithmen, die robust gegenüber nicht konvexen Kostenfunktionen sind, vermieden werden, beispielsweise durch den Einsatz genetischer Algorithmen oder stochastischer Verfahren. Da ein solches Problem jedoch schon während der Entwicklung ersichtlich ist, kann auch vorteilhaft die Anzahl der Magnetfeldsensoren, die Form des mechanisch flexiblen Trägers nach dessen Anordnung, die zu berücksichtigenden Leiter-Variablen und/oder der zu verwendende Optimierungs-Algorithmus jeweils so gewählt werden, dass sich ein konvexes Optimierungsproblem ergibt.

15

20

25

30

Denkbar ist auch eine Schätzung der Leiter-Variablen, d.h. zum Beispiel der Stromstärke des durch den wenigstens einen Leiter fließenden elektrischen Stroms, sowie der Leiterposition und Orientierung, mit Hilfe von künstlicher Intelligenz mittels neuronaler Netze. Ein neuronales Netz kann zu diesem Zweck zum Beispiel mit Hilfe synthetisch erzeugter, d.h. simulierter, oder realer Messdaten trainiert werden. Als

Bewertungskriterium kann ein in der Simulation oder Messung eingprägter Strom als Label verwendet werden.

Wieder beziehnehmend auf Fig. 6, werden die mit dem Optimierungsverfahren
5 angepassten Leiter-Variablen anschließend in Schritt 320 genutzt, um die sich nun neu
ergebenden Magnetfeldsensorwerte zu berechnen und die bereits zuvor beschriebenen
daran anschließenden Schritte auszuführen. Nachdem das Abbruchkriterium erreicht
und die geschätzte Stromstärke abgespeichert wurde, wird ein Warteschritt 380
10 ausgeführt, in dem der Schätzalgorithmus verharrt, bis Sensorwerte des nächsten
Zeitschritts vorliegen. Wenn die Stromstärke nicht Bestandteil der Leitervariablen ist,
wird die Stromstärke vor dem Abspeichern zunächst durch eine „Entnormierung“
berechnet, wobei dies durch Multiplikation der Sensorwerte mit dem Kehrwert des
Normierungswertes erfolgt. Nachdem die in Schritt 390 zum nächsten Zeitschritt
15 erfassten Magnetfeldsensorwerte vorliegen, wird in Schritt 340 wiederum ein Wert der
vorgebbaren ersten Güte- oder Kostenfunktion in Abhängigkeit der in Schritt 390
gemessenen Sensorwerte und der zuletzt in Schritt 320 berechneten Werte ermittelt,
wobei wiederum insbesondere die erfassten Sensorwerte mit den berechneten Werten
verglichen werden, um den Wert der Güte- bzw. Kostenfunktion zu bestimmen. Sind
20 die gemessenen und berechneten Sensorwerte in guter Übereinstimmung, wird das
Abbruchkriterium erfüllt und die geschätzte Stromstärke abgespeichert. Dies ist
insbesondere dann der Fall, wenn sich die realen Leiterparameter, welche durch die
Leiter-Variablen repräsentiert werden, im Vergleich zum vorherigen Zeitschritt nicht
bzw. nur geringfügig geändert haben. Wird das Abbruchkriterium nicht erfüllt, wird wie
oben beschrieben die Optimierung der Leiter-Variablen fortgeführt.

25 Die Optimierung, und damit die Schätzung der Leiter-Variablen, wird also im laufenden
Messbetrieb dauerhaft durchgeführt. Als Startwert kann dabei jeweils vorteilhaft das
letzte Optimierungsergebnis aus dem vorhergehenden Zeitschritt genutzt werden. Aus
diesem Grund sind vorteilhaft keine großen Konvergenzgeschwindigkeiten notwendig
30 und in der Regel wenige Iterationsschritte pro Zeitschritt ausreichend.

Das Verfahren kann vorteilhaft vorsehen, zu einem zweiten Zeitpunkt durch jeden der
Magnetfeldsensoren jeweils einen Wert für die magnetische Flussdichte entlang

wenigstens einer Raumrichtung am Ort des jeweiligen Magnetfeldsensors zu messen, und einen jeweiligen Prognosewert für den Wert der Stromstärke des durch den wenigstens einen Leiter fließenden Stroms für den zweiten Zeitpunkt aus dem jeweiligen für den ersten Zeitpunkt ermittelten Wert der Stromstärke und den zum
5 ersten und zweiten Zeitpunkt durch die Magnetfeldsensoren ermittelten Messwerte zu ermitteln.

Das Ermitteln eines solchen Prognosewertes stellt eine nebenläufige Schätzung der Stromstärke für den Fall dar, dass die zur Verfügung stehende Zeit zwischen zwei
10 Abtastschritten nicht ausreicht, um eine Schätzung der Leiter-Variablen durchzuführen, d.h. das erste Abbruchkriterium zu erfüllen bzw. die Optimierung der Leiter-Variablen abzuschließen.

Die Strommessung kann somit über den vorstehend beschriebenen Algorithmus
15 erfolgen, es sind aber auch andere Berechnungsvorschriften denkbar. Beispielsweise könnte ein neuronales Netz so trainiert werden, dass es aus den Positionsdaten und den Messwerten den Strom modelliert.

Patentansprüche

1. Strommessvorrichtung mit:
einem bandförmigen, mechanisch flexiblen Träger (100, 100'), der um einen
5 elektrischen Leiter (10) angeordnet werden kann,
einer Speichereinrichtung (101), in der vorgebbare Randparameter, die die
Geometrie des Trägers betreffen, gespeichert sind,
einer ersten Mehrzahl an ersten Sensoren (110) und einer zweiten Mehrzahl an
zweiten Sensoren (120), wobei jeder der ersten Sensoren und jeder der zweiten
10 Sensoren entsprechend den Randparameter an definierten Stellen des Trägers
befestigt sind, wobei jeder zweite Sensor (120) zur Ermittlung einer
Orientierung des Trägers an der definierten Stelle, an welcher dieser zweite
Sensor befestigt ist, zu einem Zeitpunkt t_i ausgebildet ist,
wobei jeder erste Sensor als ein Magnetfeldsensor (110) zum Messen eines
15 Magnetfeldes, welches von einem durch einen elektrischen Leiter (10)
fließenden Strom hervorgerufen wird, ausgebildet ist,
und
einer mit den Magnetfeldsensoren (110) und den zweiten Sensoren (120)
kommunikativ verbundenen Datenverarbeitungseinheit (102), die dazu
20 ausgebildet ist, unter Berücksichtigung der mittels der zweiten Sensoren
ermittelten Orientierungen und unter Berücksichtigung der in der
Speichereinrichtung gespeicherten Randparameter die Positionen und
Orientierungen der mehreren Magnetfeldsensoren relativ zueinander zu
berechnen.
25
2. Strommessvorrichtung nach Anspruch 1, wobei
der Träger ein kettenartiger Träger (100) ist, der mehrere, beweglich miteinander
verbundene, starre Kettenglieder (106) aufweist und jeder Magnetfeldsensor
(110) und jeder zweite Sensor (120) an einem solchem starren Kettenglied (106)
30 befestigt ist, insbesondere an jedem dieser starren Kettenglieder jeweils
wenigstens ein Magnetfeldsensor und an zumindest einigen der starren
Kettenglieder jeweils wenigstens einer der zweiten Sensoren befestigt ist, wobei
die Kettenglieder bezüglich der länglichen Ausdehnung des Trägers jeweils eine

- vorbestimmte Länge aufweisen, wobei die vorbestimmten Längen der Kettenglieder Randparameter der in der Speichereinrichtung gespeicherten vorgebbaren, Randparameter sind, und wobei die Datenverarbeitungseinheit (102) dazu ausgebildet ist, unter Berücksichtigung der mittels der zweiten Sensoren ermittelten Orientierungen die Innenwinkel zwischen jeweils zwei beweglich miteinander verbundenen starren benachbarten Kettenglieder zu berechnen und in Abhängigkeit von den berechneten Innenwinkeln und den vorbestimmten Längen der jeweiligen starren Kettenglieder die Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren relativ zueinander zu berechnen.
- 5
- 10
3. Strommessvorrichtung nach Anspruch 1, wobei der Träger ein plattenartiger Träger (100'), insbesondere eine Leiterplatte, ist, der mehrere, sich abwechselnde starre (106') und flexible Bereiche (105') aufweist, wobei jeder Magnetfeldsensor (110) und jeder zweite Sensor (120) an einem solchem starren Bereich (106') befestigt ist, insbesondere an jedem dieser starren Bereiche wenigstens ein Magnetfeldsensor und einer der zweiten Sensoren befestigt ist, und wobei die flexiblen (105') und starren (106') Bereiche jeweils eine vorbestimmte Länge aufweisen, wobei die vorbestimmten Längen der flexiblen und starren Bereiche Randparameter der in der Speichereinrichtung gespeicherten vorgebbaren Randparameter sind, wobei die Datenverarbeitungseinheit (102) dazu ausgebildet ist, in der Speichereinrichtung gespeicherte Anweisungen auszuführen, die die Datenverarbeitungseinheit veranlassen, unter Berücksichtigung der mittels der zweiten Sensoren ermittelten Orientierungen und unter Berücksichtigung der in der Speichereinrichtung gespeicherten vorgebbaren Randparameter die Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren (110) relativ zueinander zu berechnen, wobei die Positionen der Magnetfeldsensoren unter Anwendung eines Optimierungsalgorithmus und unter Verwendung einer geometrischen Modellierung der flexiblen Bereiche optimiert werden, wobei der Optimierungsalgorithmus eine Gütefunktion verwendet, welche die Längen der flexiblen Bereiche berücksichtigt.
- 15
- 20
- 25
- 30

4. Strommessvorrichtung nach Anspruch 3, wobei
die Datenverarbeitungseinheit dazu ausgebildet ist, die in Speichereinrichtung
gespeicherte Anweisungen auszuführen, die die Datenverarbeitungseinheit
5 veranlassen, iterativ (C1) die Positionen der Magnetfeldsensoren zu variieren
und in Abhängigkeit der variierten Positionen jeweils die folgenden Schritte
solange auszuführen, bis ein vorbestimmtes Abbruchkriterium (C4) erfüllt ist:
a) die flexiblen Bereiche jeweils als kubischen Spline unter Anwendung einer
Spline-Interpolation zu modellieren und die Längen der kubischen Splines zu
10 berechnen (C2), und
b) die berechneten Längen der kubischen Splines mit der vorbestimmten Länge
des jeweiligen flexiblen Bereichs zu vergleichen (C3), um einen Gütewert zu
erhalten.
- 15 5. Strommessvorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei
die Magnetfeldsensoren und zweiten Sensoren jeweils paarweise derart
angeordnet sind, dass die von jedem zweiten Sensor ermittelte Orientierung die
relative Orientierung des jeweils mit diesem zweiten Sensor als Paar
angeordneten Magnetfeldsensors entspricht.
- 20 6. Strommessvorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche,
- wobei der Träger als mechanisch öffnen- und verschließbarer Träger ausgebildet
ist;
und/oder
25 - wobei die Datenverarbeitungseinheit und die Speichereinrichtung am Träger
befestigbar sind;
und/oder
wobei die Strommessvorrichtung eine Energieversorgungseinrichtung aufweist,
die zur Energieversorgung der Datenverarbeitungseinheit und/oder der
30 Magnetfeldsensoren und/oder der zweiten Sensoren ausgebildet ist.
7. Strommessvorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei
die Magnetfeldsensoren (110) jeweils dazu ausgebildet sind, die

Magnetfeldstärke eines Magnetfeldes, welches von einem durch einen elektrischen Leiter fließenden Strom hervorgerufen wird, in zumindest einer Raumrichtung zu messen.

- 5 8. Verfahren mit folgenden Verfahrensschritten:
- a) Anordnen einer Strommessvorrichtung gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, wobei der Träger eine veränderbare geometrische Figur bildet, die sich aus mehreren kurvenförmigen und/oder geradlinigen Abschnitten zusammensetzt (A);
- 10 b) Ermitteln, durch jeden der zweiten Sensoren, einer Orientierung des Trägers an der definierten Stellen, an welcher dieser zweite Sensor befestigt ist, zu einem Zeitpunkt t_i (B);
- c) Berechnen unter Berücksichtigung der gespeicherten, vorgebbaren Randparameter und unter Berücksichtigung der ermittelten Orientierungen die
- 15 Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren relativ zueinander (C).
9. Verfahren nach Anspruch 8, wobei
- die Schritte b) und/oder c) zu wenigstens einem weiteren Zeitpunkt t_{i+1} wiederholt werden.
- 20 10. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, wobei
- unter der Bedingung, dass die Strommessvorrichtung einen kettenartiger Träger gemäß Anspruch 2 aufweist, das Verfahren folgende Verfahrensschritte umfasst:
- 25 Berechnen unter Berücksichtigung der von den zweiten Sensoren zum Zeitpunkt t_i ermittelten Orientierungen der Innenwinkel zwischen jeweils zwei beweglich miteinander verbundenen starren benachbarten Kettenglieder; und
- Berechnen in Abhängigkeit von den berechneten Innenwinkeln und den vorbestimmten Längen der jeweiligen starren Kettenglieder die Positionen und Orientierungen der Magnetfeldsensoren relativ zueinander.
- 30 11. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, wobei
- unter der Bedingung, dass die Strommessvorrichtung als Träger einen plattenartiger Träger gemäß Anspruch 3 aufweist, insbesondere eine Leiterplatte,

das Verfahren folgende Verfahrensschritte aufweist:

, wobei

Optimieren der Positionen der Magnetfeldsensoren unter Anwendung eines

Optimierungsalgorithmus und unter Verwendung einer geometrischen

5 Modellierung der flexiblen Bereiche werden, wobei der

Optimierungsalgorithmus eine Gütefunktion verwendet, welche die Längen der flexiblen Bereiche berücksichtigt.

12. Verfahren nach Anspruch 11, wobei

10 die Positionen der Magnetfeldsensoren zur Optimierung iterativ variiert (C1) werden und in Abhängigkeit der variierten Positionen jeweils die folgenden Schritte solange ausgeführt werden, bis ein vorbestimmtes Abbruchkriterium erfüllt ist (C4):

a) Modellieren jedes der flexiblen Bereiche als ein kubischer Spline unter

15 Anwendung einer Spline-Interpolation und Berechnen der Längen der kubischen Splines (C2), und

c) Vergleichen der berechneten Längen der kubischen Splines mit der vorbestimmten Länge des jeweiligen flexiblen Bereichs, um einen Gütewert zu erhalten(C3).

20

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 12, umfassend die folgenden Verfahrensschritte:

nach Anordnen der Strommessvorrichtung um einen elektrischen Leiter;

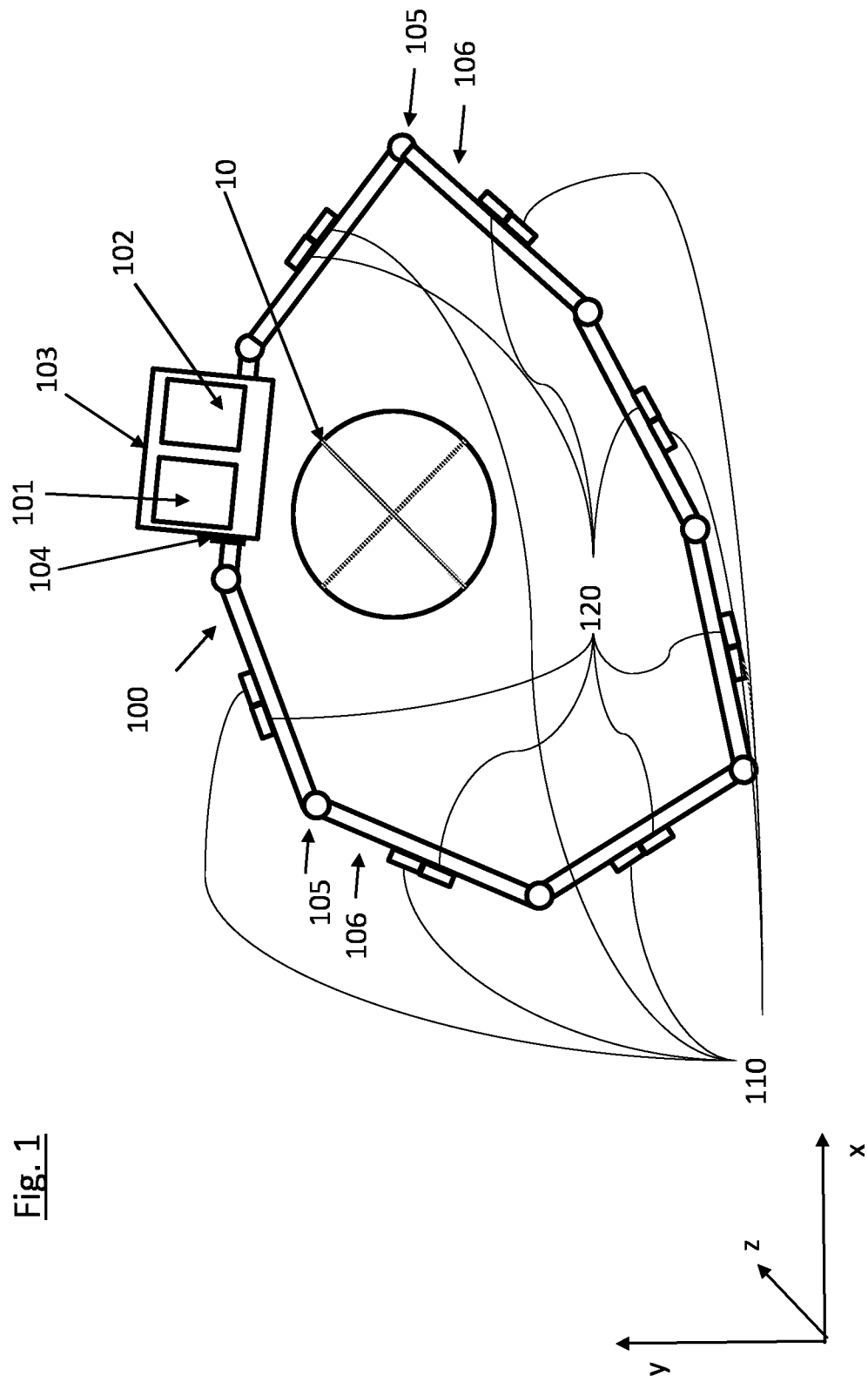
25 Messen (F) durch jeden Magnetfeldsensoren (110) einer Magnetfeldstärke eines Magnetfeldes, welches von einem durch den elektrischen Leiter fließenden Strom hervorgerufen wird; und

Berechnen (G) der Stromstärke des durch den elektrischen Leiter fließenden

Stroms in Abhängigkeit von den ermittelten Positionen und Orientierungen der

30 Magnetfeldsensoren (110) und der von den Magnetfeldsensoren (110) jeweils ermittelten Magnetfeldstärken.

14. Verfahren nach Anspruch 13
welches ferner die Schritte umfasst:
- 5 a) Messen, zu einem ersten Zeitpunkt, durch jeden der Magnetfeldsensoren (110),
jeweils eines Wertes für die magnetische Flussdichte entlang wenigstens einer
Raumrichtung am Ort des jeweiligen Magnetfeldsensors,
- b) Festlegen der Werte für eine Mehrzahl von Leiter-Variablen auf jeweilige
Startwerte, wobei die Leiter-Variablen Variablen umfassen, welche die Lage und
Orientierung des wenigstens einen stromdurchflossenen Leiters relativ zur
Strommessvorrichtung repräsentieren,
- 10 c) Berechnen von erwarteten Werten bezüglich der von den Magnetfeldsensoren
gemessenen Werte in Abhängigkeit der Werte der Mehrzahl von Leiter-Variablen,
d) Ermitteln eines Wertes einer vorgebbaren ersten Gütefunktion in Abhängigkeit
der in Schritt c) berechneten Werte und der in Schritt a) gemessenen Werte,
e) solange ein vorgebbares erstes Abbruchkriterium noch nicht erfüllt ist,
- 15 Variieren der Werte der Mehrzahl von Leiter-Variablen in Abhängigkeit eines
vorgebbaren ersten Optimierungs-Algorithmus und Wiederholen der Schritte c)
und d),
- f) bei Erfüllen des ersten Abbruchkriteriums, Ermitteln eines Wertes für die
Stromstärke des durch den wenigstens einen Leiter fließenden Stroms in
- 20 Abhängigkeit der Werte der Leiter-Variablen.



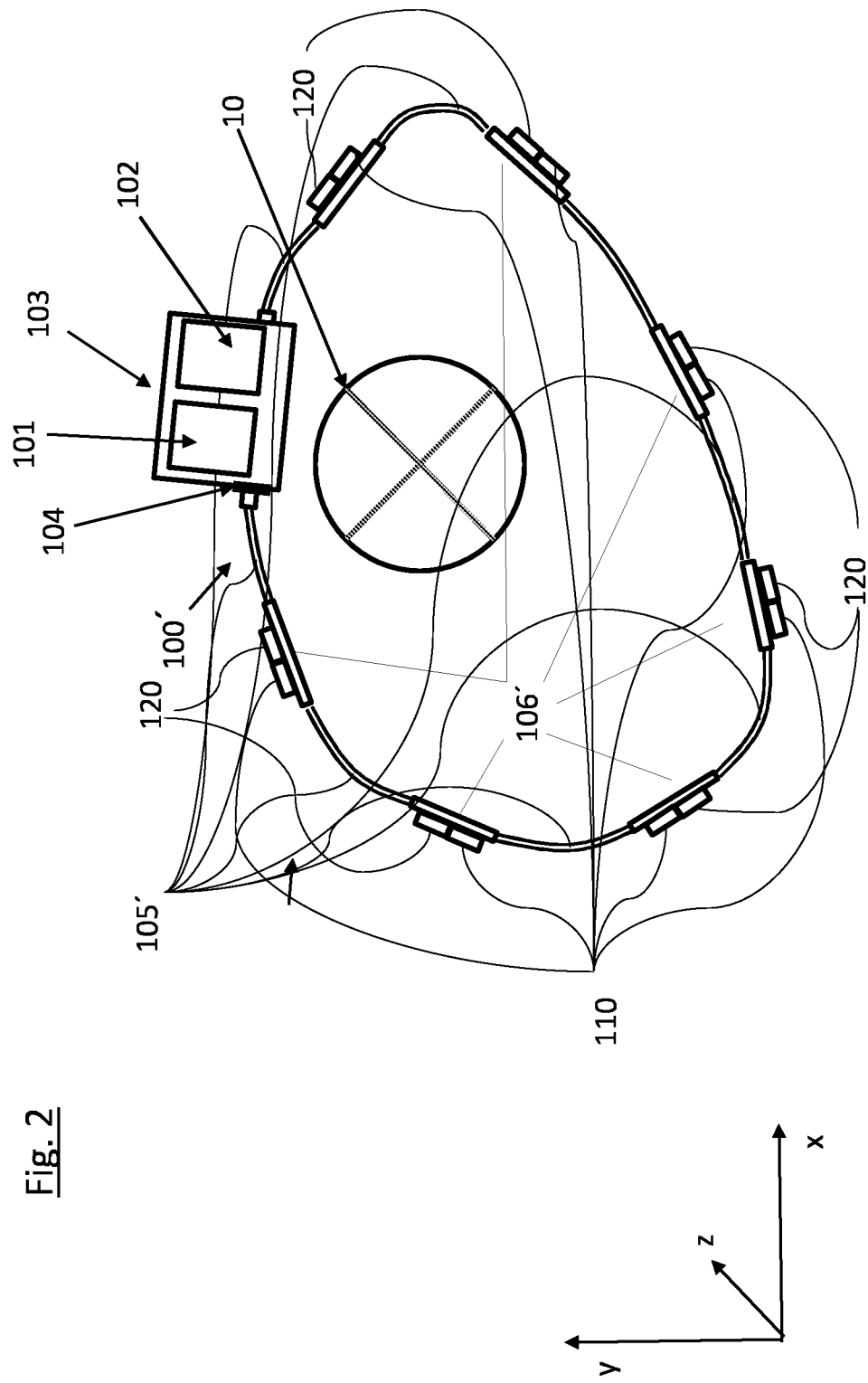
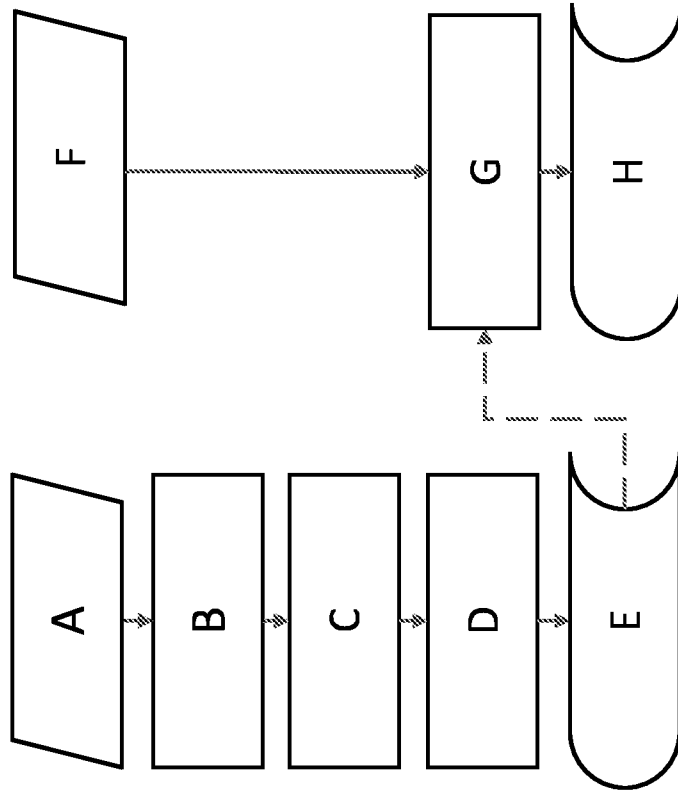


Fig. 2

Fig. 3



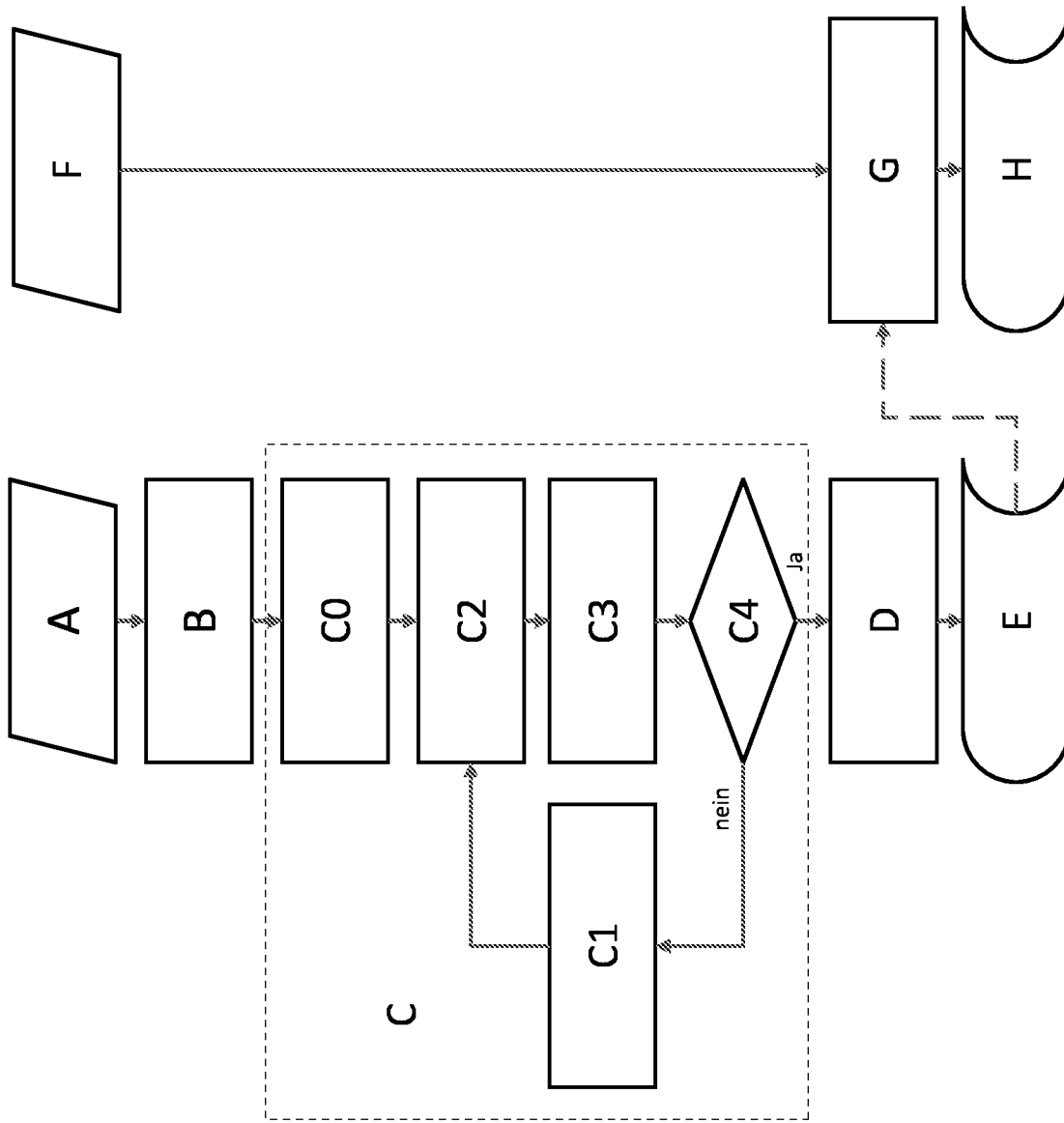


Fig. 4

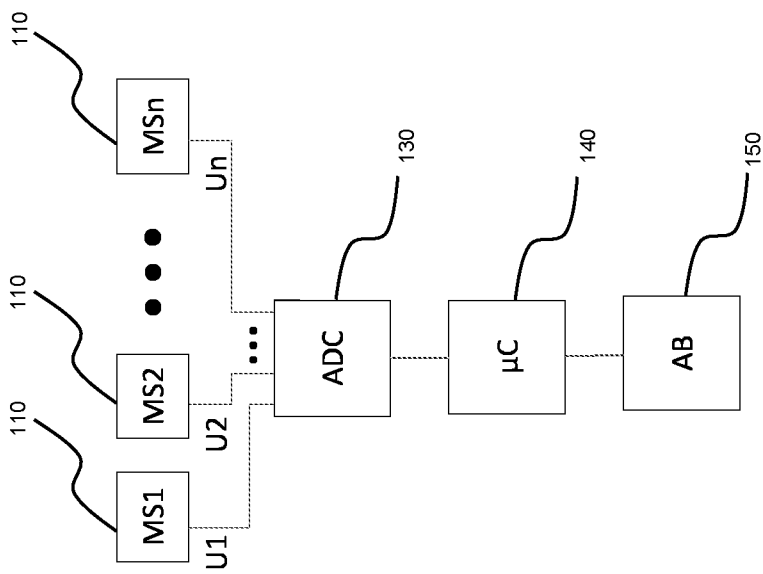


Fig. 5

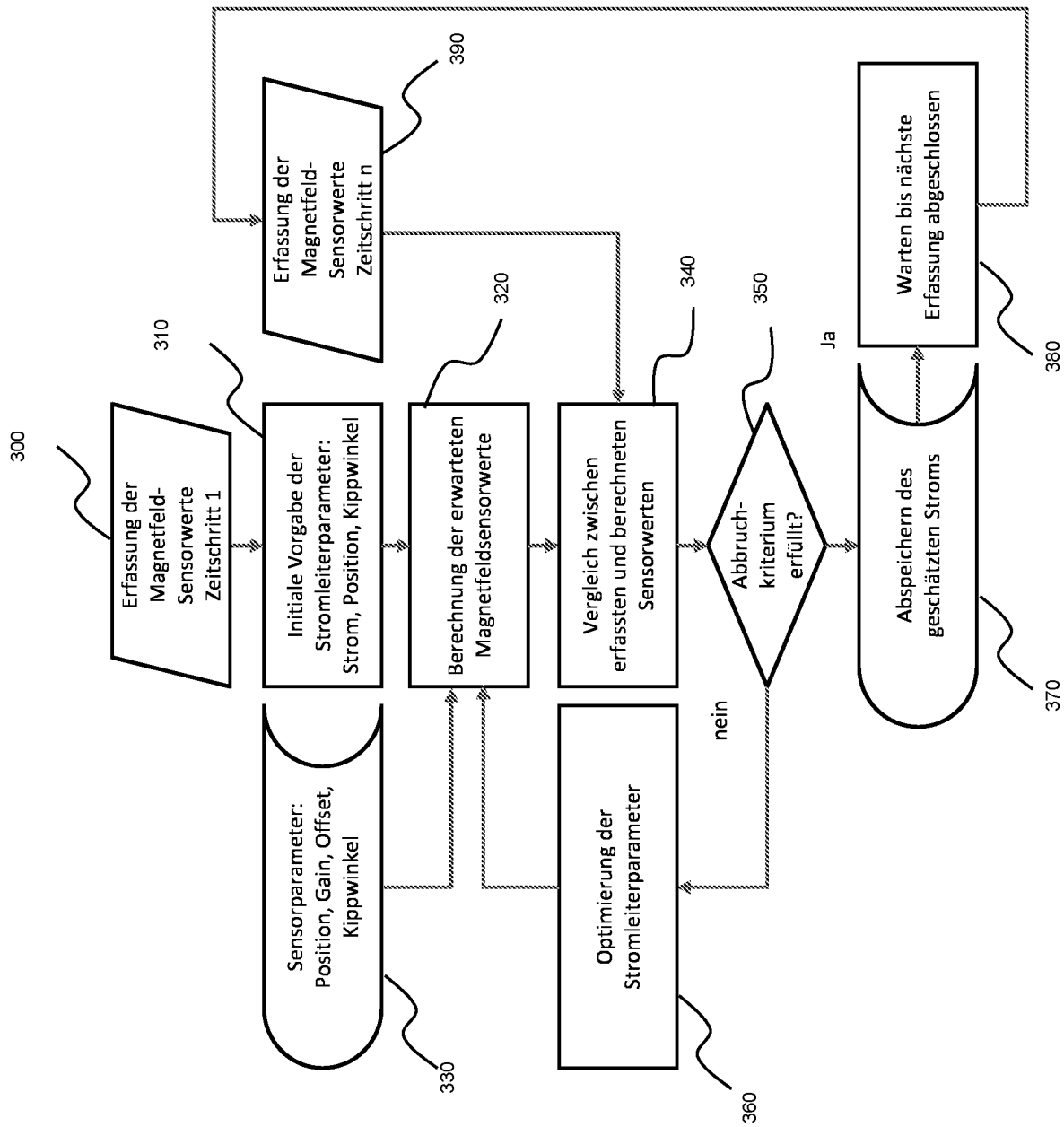


Fig. 6