



(10) **DE 10 2018 009 834 A1** 2020.06.18

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2018 009 834.7**

(22) Anmeldetag: **14.12.2018**

(43) Offenlegungstag: **18.06.2020**

(51) Int Cl.: **G01L 3/10 (2006.01)**

G01D 5/12 (2006.01)

G01B 7/30 (2006.01)

(71) Anmelder:

**Karlsruher Institut für Technologie, 76131
Karlsruhe, DE**

(74) Vertreter:

**Müller-Boré & Partner Patentanwälte PartG mbB,
80639 München, DE**

(72) Erfinder:

**Seemann, Klaus, 76448 Durmersheim, DE; Leiste,
Harald, 76356 Weingarten, DE; Beirle, Stefan,
73340 Amstetten, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

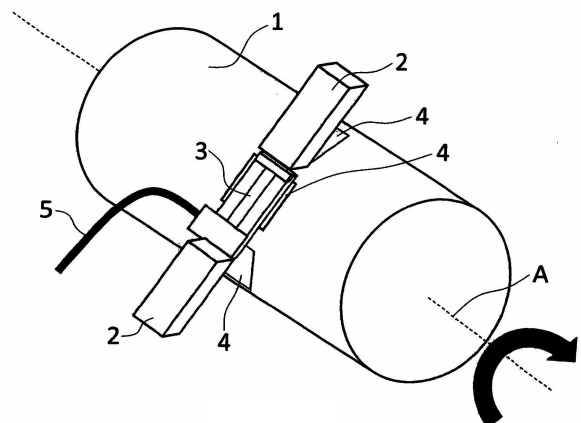
DE	10 2014 213 446	A1
DE	690 10 378	T2
DE	690 15 195	T2
US	2007 / 0 034 022	A1
EP	1 925 914	A2

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Sensorvorrichtung und Verfahren zur Bestimmung eines Drehmoments einer Drehmoment-Übertragungseinrichtung**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Sensorvorrichtung, umfassend mindestens ein ferromagnetisches Element, welches in einem Betriebszustand an einer Drehmoment-Übertragungseinrichtung anordenbar ist, und eine Messeinrichtung, umfassend mindestens ein Messelement, wobei jedes Messelement ausgelegt ist, eine ferromagnetische Resonanzfrequenz zumindest eines ferromagnetischen Elements zu messen, wobei die Messeinrichtung ausgelegt ist, ein Drehmoment der Drehmoment-Übertragungseinrichtung basierend auf einer Verschiebung der gemessenen ferromagnetischen Resonanzfrequenz zu bestimmen. Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zur Bestimmung eines Drehmoments einer Drehmoment-Übertragungseinrichtung.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Sensorvorrichtung und ein Verfahren zur Bestimmung eines Drehmomentes einer Drehmoment-Übertragungseinrichtung, insbesondere einer belasteten Welle.

[0002] Die Erfindung liegt auf dem Gebiet des Maschinenbaus (beispielsweise Fahrzeugtechnik, Luft- und Raumfahrttechnik), insbesondere auf dem Gebiet der Messtechnik zur Bestimmung von Drehmomenten. Insbesondere sind drehende Teile, welche einer Wechsellast unterworfen sind, schlecht oder nicht direkt elektrisch kontaktierbar, wodurch eine berührungslose Messung deren Drehmomente in Echtzeit erfolgen muss.

[0003] Berthold et al. („Non-contact strain measurements based on inverse magnetostriction“, Sensors and Actuators A 158 (2010) 224-230) beschreibt eine Messtechnik zu Messung magnetostrictiver Reaktionen basierend auf einem Frequenzmischungsverfahren. Hierzu wird ein Magnetfeld mit zwei Frequenzen verwendet, wobei ein Vorhandensein eines magnetischen Materials neue Spitzenwerte des FFT-Spektrums des Messsignals erzeugt, welche für die nicht-lineare Magnetisierungskurve spezifisch sind. Da die Magnetisierungskurve durch mechanische Spannung verändert werden kann, können die Amplituden der Spitzenwerte eine charakteristische Abhängigkeit von einem Maß der Spannung des Materials zeigen. Die Inhalte von Berthold et al. („Non-contact strain measurements based on inverse magnetostriction“, Sensors and Actuators A 158 (2010) 224-230) sind hiermit in vollständiger Form als Bestandteil der Beschreibung aufgenommen.

[0004] US 2014/159710 A1 beschreibt eine kontaktlose Erfassungsvorrichtung, umfassend einen ersten Magnetring, einen zweiten Magnetring, einen ersten Magnetsensor, einen zweiten Magnetsensor und eine Steuerung. Die zwei Magnetringe sind jeweils an zwei Enden einer Torsionswelle angebracht. Wenn sich die Torsionswelle dreht, erfasst die Steuerung die Magnetfelder der zwei Magnetringe durch die zwei Magnetsensoren. Die Steuerung berechnet basierend auf den erfassten Magnetfeldern gleichzeitig ein Verdrehungsdrehmoment, das auf die Torsionswelle ausgeübt wird, und einen Drehwinkel der Torsionswelle. Die Inhalte von US 2014/159710 A1 sind hiermit in vollständiger Form als Bestandteil der Beschreibung aufgenommen.

[0005] WO 2016/162028 A1 beschreibt eine Anordnung und ein Verfahren zum berührungslosen Messen eines Momentes an einem sich in einer Achse erstreckenden Maschinenelement unter Nutzung des invers-magnetostrictiven Effektes. Das Maschinenelement weist eine Permanentmagnetisierung auf, die zumindest innerhalb eines axialen Abschnittes

des Maschinenelementes ausgebildet ist und parallel zu einer radial ausgerichteten Geraden ausgerichtet ist. Die Permanentmagnetisierung besitzt bevorzugt genau zwei Pole, die bezogen auf die Achse diametral gegenüberliegend angeordnet sind. Die Anordnung umfasst weiterhin mindestens einen Magnetfeldsensor, welcher zumindest zur Messung einer axialen Richtungskomponente eines durch die Permanentmagnetisierung sowie durch das Moment bewirkten Magnetfeldes oder einer axialen Richtungskomponente einer durch die Permanentmagnetisierung sowie durch das Moment bewirkten Magnetfeldänderung ausgebildet ist. Die Inhalte von WO 2016/162028 A1 sind hiermit in vollständiger Form als Bestandteil der Beschreibung aufgenommen.

[0006] Es ist daher eine Aufgabe der Erfindung, eine Sensorvorrichtung und ein Verfahren zur Bestimmung eines Drehmomentes einer Drehmoment-Übertragungseinrichtung mit einer erhöhten Effizienz und einer verbesserten Zuverlässigkeit der gemessenen Werte bereitzustellen.

[0007] Die Aufgabe wird durch eine Sensorvorrichtung und ein Verfahren zur Bestimmung eines Drehmomentes einer Drehmoment-Übertragungseinrichtung gemäß jeweils den Ansprüchen 1 und 20 gelöst. Bevorzugte Ausführungsformen bilden den Gegenstand der abhängigen Ansprüche.

[0008] Ein Aspekt betrifft eine Sensorvorrichtung, umfassend mindestens ein ferromagnetisches Element, welches in einem Betriebszustand an einer Drehmoment-Übertragungseinrichtung, insbesondere einer Antriebswelle, anordenbar ist, und eine Messeinrichtung, umfassend mindestens ein Messelement, insbesondere mindestens ein Messkopf, wobei jedes Messelement ausgelegt ist, eine ferromagnetische Resonanzfrequenz zumindest eines ferromagnetischen Elements zu messen, wobei die Messeinrichtung ausgelegt ist, ein Drehmoment der Drehmoment-Übertragungseinrichtung basierend auf der gemessenen ferromagnetischen Resonanzfrequenz und/oder einer Verschiebung der gemessenen ferromagnetischen Resonanzfrequenz zu bestimmen.

[0009] Hierbei ist im Rahmen der Erfindung insbesondere erkannt worden, dass gerade basierend auf der gemessenen ferromagnetischen Resonanzfrequenz bzw. der Verschiebung der gemessenen Resonanzfrequenz ein besonders effizientes und kostengünstiges Verfahren zur Bestimmung des angelegten Drehmoments, welches mittels erzeugter Torsionskräfte ein magnetisches Anisotropiefeld des mindestens einen ferromagnetischen Elements verändert, möglich ist.

[0010] Der Betriebszustand ist im Rahmen dieser Beschreibung als der Zustand zu verstehen, in dem das mindestens eine ferromagnetische Element an der Drehmoment-Übertragungseinrichtung angeordnet ist und in dem das mindestens eine Messelement derart angeordnet ist, um die ferromagnetische Resonanzfrequenz zumindest eines ferromagnetischen Elements zu messen.

[0011] Das mindestens eine ferromagnetische Element kann hierbei insbesondere mindestens ein ferromagnetisches Material umfassen, wobei das mindestens eine ferromagnetische Element bevorzugt als mindestens ein weichmagnetisches ferromagnetisches Element ausgebildet ist. Weichmagnetisch ist in diesem Sinne derart zu verstehen, dass das mindestens eine weichmagnetische ferromagnetische Element eine Koerzitivfeldstärke von weniger als 1200 A/m, bevorzugt weniger 1000 A/m und/oder von mehr als 0 A/m, bevorzugt mehr als 300 A/m aufweist. Hierdurch können Hochfrequenzverluste basierend auf Präzessionsdämpfungen der magnetischen Momente minimiert werden, und somit eine zuverlässige Messung der ferromagnetischen Resonanzfrequenz gewährleistet werden.

[0012] Hierbei kann insbesondere ein weichmagnetisches ferromagnetisches Element mit einer Koerzitivfeldstärke, welche kleiner als eine Anisotropiefeldstärke bzw. eine uniaxiale Anisotropiefeldstärke des magnetischen Anisotropiefeldes ist, gewählt werden. Hierbei kann die Koerzitivfeldstärke einen Wert von vorzugsweise maximal 2/3 der Anisotropiefeldstärke, weiter bevorzugt maximal 1/3 der Anisotropiefeldstärke und/oder einen Wert von vorzugsweise mindestens 1/5 der Anisotropiefeldstärke, weiter bevorzugt mindestens 1/4 der Anisotropiefeldstärke aufweisen. Somit kann das mindestens eine weichmagnetische ferromagnetische Element bei einer Anisotropiefeldstärke von beispielsweise 3000 A/m mit einer Koerzitivfeldstärke von kleiner als 1000 A/m gewählt werden.

[0013] Das mindestens eine ferromagnetische Element kann insbesondere als mindestens ein ferromagnetisches magnetostriktives Element ausgebildet sein. Hierbei können magnetostriktive Materialien auf eine angelegte mechanische Spannung, insbesondere gemäß dem Villari-Effekt, durch eine Veränderung ihrer Magnetisierung reagieren.

[0014] Ferner können insbesondere mindestens ein Permanentmagnet und/oder mindestens ein Elektromagnet in das mindestens eine ferromagnetische Element integriert werden. Ferner können insbesondere mindestens ein Permanentmagnet und/oder mindestens ein Elektromagnet in die Drehmoment-Übertragungseinrichtung integriert werden. Insbesondere durch die Integration von mindestens einem Permanentmagnet in der Drehmoment-Über-

tragungseinrichtung kann eine Stromversorgungseinrichtung in der Drehmoment-Übertragungseinrichtung vermieden werden. Hierdurch kann eine Anisotropie des mindestens einen ferromagnetischen Elements stabilisiert und/oder eine Messfrequenz der Messeinrichtung variiert werden.

[0015] Das mindestens eine ferromagnetische Element kann hierbei ferner insbesondere derart an der Drehmoment-Übertragungseinrichtung angeordnet sein, dass eine Unwucht der Drehmoment-Übertragungseinrichtung vermieden wird. In anderen Worten kann das mindestens eine ferromagnetische Element derart an der Drehmoment-Übertragungseinrichtung angeordnet werden, dass eine Drehachse der Drehmoment-Übertragungseinrichtung vor der Anordnung des mindestens einen ferromagnetischen Elements an der Drehmoment-Übertragungseinrichtung im Wesentlichen einer Drehachse der Drehmoment-Übertragungseinrichtung nach der Anordnung des mindestens einen ferromagnetischen Elements an der Drehmoment-Übertragungseinrichtung entspricht. Ferner kann das mindestens eine ferromagnetische Element zumindest teilweise im Wesentlichen achsensymmetrisch bezüglich der Drehachse der Drehmoment-Übertragungseinrichtung angeordnet sein. Hierdurch wird eine stabile Lage einer Drehachse der Drehmoment-Übertragungseinrichtung ermöglicht.

[0016] Die Messeinrichtung umfasst mindestens ein Messelement, wobei jedes Messelement ausgelegt ist, eine ferromagnetische Resonanzfrequenz zumindest eines ferromagnetischen Elements zu messen, wobei die Messeinrichtung ausgelegt ist, ein Drehmoment der Drehmoment-Übertragungseinrichtung basierend auf einer Verschiebung der gemessenen ferromagnetischen Resonanzfrequenz zu bestimmen. Hierbei kann die Messeinrichtung und/oder das mindestens eine Messelement beispielsweise ausgelegt sein, Stripline-basierte ferromagnetische Resonanz (FMR) Messtechniken und/oder Vector Network Analyzer (VNA) FMR-Messtechniken und/oder gepulste induktive Mikrowellen-Magnetometrie („pulsed inductive microwave magnetometry“, PIMM) FMR-Messtechniken auszuführen.

[0017] Der theoretische Hintergrund bezüglich der Bestimmung des Drehmoments der Drehmoment-Übertragungseinrichtung basierend auf einer Verschiebung der gemessenen ferromagnetischen Resonanzfrequenz wird hierbei exemplarisch anhand eines quadratischen ferromagnetischen Elements erläutert, wobei das quadratische ferromagnetische Element an einer exemplarischen zylindrischen Welle angeordnet ist. Hierzu wird insbesondere auf **Fig. 8** verwiesen, welche die unten verwendeten Größen exemplarisch darstellt. Das quadratische ferromagnetische Element hat eine Seitenlänge a . Eine Rotation der Welle um deren Achse um einen Winkel φ be-

wirkt eine Deformation der Welle, wodurch das quadratische ferromagnetische Element um einen Scherwinkel γ gesichert wird. Hierdurch wird eine erste Diagonale d_1 des quadratischen ferromagnetischen Elements gestreckt, während eine zweite Diagonale d_2 gestaucht wird:

$$d_1 = a \sqrt{1 + \frac{1}{\cos^2(\gamma)} + 2 \tan(\gamma)} \quad (1)$$

$$d_2 = a \sqrt{1 + \frac{1}{\cos^2(\gamma)} - 2 \tan(\gamma)} \quad (2)$$

[0018] Hierdurch ergibt sich eine entsprechende Verformung:

$$\varepsilon_1 = \frac{d_1 - a\sqrt{2}}{a\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{\cos^2(\gamma)} + \tan(\gamma)} - 1 \quad (3)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{d_2 - a\sqrt{2}}{a\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{\cos^2(\gamma)} - \tan(\gamma)} - 1 \quad (4)$$

[0019] Ferner kann der Scherwinkel γ basierend auf dem Winkel φ , dem Radius der Welle r und der Länge der Welle L bestimmt werden:

$$\gamma = \frac{r}{L} \varphi \quad (5)$$

[0020] Der Winkel φ ergibt sich hierbei aus dem Drehmoment M_t , der Länge der Welle L , dem Schubmodul G und dem Trägheitsmoment J :

$$\varphi = \frac{M_t L}{GJ} \quad (6)$$

[0021] Hierbei kann das Trägheitsmoment J ausgedrückt werden durch:

$$J = \frac{1}{2} \pi r^4 \quad (7)$$

[0022] Setzt man Gleichungen (6) und (7) in Gleichung (5) ein, erhält man für den Scherwinkel γ :

$$\gamma = \frac{2M_t}{\pi G r^3} \quad (8)$$

[0023] Gemäß dem Hookeschen Gesetz und Gleichungen (3), (4) und (8) ergibt sich hierbei die fol-

gende Formel für die mechanische Spannung σ an der Oberfläche des quadratischen ferromagnetischen Elements entlang einer der Diagonalen d_i :

$$\sigma = E \varepsilon_i = E_r (1 - \nu^2) \varepsilon_i \quad (9)$$

[0024] Die Dynamik eines dünnen ferromagnetischen Films mit einer uniaxialen Anisotropie in der Ebene des Films, wobei der Film einem Hochfrequenzfeld ausgesetzt ist, wird durch die Landau-Lifschitz-Gilbert Formel beschrieben. Insbesondere ergibt sich hierbei die bekannte Kittel Formel für die ferromagnetische Resonanzfrequenz:

$$f_g = \frac{\tilde{\gamma}}{2\pi} \sqrt{(\mu_0 H_u)^2 + J_s \mu_0 H_u} \quad (10)$$

[0025] Hierbei ist $\tilde{\gamma}$ die gyromagnetische Konstante, μ_0 ist die magnetische Feldkonstante, J_s ist die Sättigungspolarisation und H_u ist der Betrag des uniaxialen Anisotropiefeldes in der Ebene des Films.

[0026] Unter Belastung des quadratischen ferromagnetischen Films, insbesondere durch eine Spannung, welche durch ein an die Welle angelegtes Drehmoment erzeugt wird, wird die ferromagnetische Resonanzfrequenz abhängig von der besagten Spannung. Hierbei ist insbesondere zusätzlich zu

dem uniaxialen Anisotropiefeld $\vec{H}_u$ in der Ebene des Films ein durch die Spannung erzeugtes effektives

magnetoelastisches Anisotropiefeld $\vec{H}_{me}$ zu berücksichtigen:

$$\vec{H}_{u,eff} = \vec{H}_u + \vec{H}_{me} = \begin{pmatrix} 0 \\ H_u \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{3\lambda_s}{J_s} \sigma \\ -\frac{3\lambda_s}{J_s} \sigma \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{3\lambda_s}{J_s} \sigma \\ H_u - \frac{3\lambda_s}{J_s} \sigma \\ 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

[0027] Hierbei ist $\vec{H}_{u,eff}$ das effektive bi-axiale Anisotropiefeld in der Ebene des Films und λ_s die Sättigungs-magnetostruktive Konstante. Somit ergibt sich basierend auf Gleichung (11):

$$H_{u,eff} = \sqrt{\left[\frac{3\lambda_s}{J_s} \sigma \right]^2 + \left[H_u - \frac{3\lambda_s}{J_s} \sigma \right]^2} \quad (12)$$

[0028] Setzt man nun $H_{u,eff}$ für H_u in Gleichung (10) ein, erhält man die Spannungs-abhängige ferromagnetische Resonanzfrequenz:

$$f_g = \frac{\tilde{\gamma}}{2\pi} \sqrt{(\mu_0 H_{u,eff})^2 + J_S \mu_0 H_{u,eff}} \quad (13)$$

[0029] Somit ist es möglich, das an die Welle bzw. die Drehmoment-Übertragungseinrichtung angelegte Drehmoment basierend auf einer Messung der ferromagnetischen Resonanzfrequenz bzw. auf einer Messung einer Verschiebung der ferromagnetischen Resonanzfrequenz zu bestimmen.

[0030] Insbesondere wird hierbei ermöglicht, das angelegte Drehmoment mit einer einzigen Signalleitung und in Echtzeit zu bestimmen. Hierbei kann insbesondere eine ausgeprägte ferromagnetische Resonanz (FMR), d.h. ein Resonanzpeak mit einer kleinen Halbwertsbreite Δf_{FMR} zwischen 1/5 und 1/10 der FMR ein besseres Auflösungsvermögen des Messsignals und damit ein günstigeres Signal-Rausch-Verhältnis ermöglichen. Eine Messfrequenz einer Ausleseelektronik der Sensorvorrichtung und/oder der Messeinrichtung und/oder des mindestens einen Messelements bzw. eine für eine Industrie (insbesondere gesetzlich) festgelegte Frequenz definieren die zu verwendende bzw. durch die Sensorvorrichtung und/oder das mindestens eine ferromagnetische Element individuell anzupassende ferromagnetische Resonanzfrequenz. Somit kann insbesondere die Sensorvorrichtung anwendungsabhängig angepasst werden.

[0031] Insbesondere kann bei kleinen Frequenzen f außerhalb der ferromagnetischen Resonanzfrequenz eine Verschiebung einer Anfangspermeabilität bzw. ursprünglichen Permeabilität des mindestens einen ferromagnetischen Elements zu höheren oder zu tieferen Werten gemessen werden

$\left(\mu(f \rightarrow 0) \approx 1 + \frac{J_S}{\mu_0 \cdot H_u} \right)$. Hierdurch kann insbesondere die Datenaufnahme effizienter und/oder flexibler gestaltet werden. Insbesondere ist auch bei kleiner Messfrequenz ($f \rightarrow 0$) der Streuparameter S_{11} ebenfalls abhängig von der effektiven uniaxialen Anisotropie, die wiederum eine Funktion der mechanischen Spannung ist. Hierdurch kann zusätzlich eine Bestimmung des Drehmomentes einer Drehmoment-Übertragungseinrichtung aus einer Messung der Anfangspermeabilität (Permeabilität bei ($f \rightarrow 0$)) bzw. des Streuparameters S_{11} für ($g \rightarrow 0$) erfolgen.

[0032] Insbesondere kann das mindestens eine Messelement ausgelegt sein, die ferromagnetische Resonanzfrequenz des mindestens einen ferromagnetischen Elements mittels eines Frequenzsweeps zu messen bzw. zu ermitteln. Hierbei kann insbesondere ein Parameterverlauf eines physikalischen Parameters, beispielsweise des Streuparameters S_{11} , über ein Frequenzintervall der Messfrequenz ermittelt werden, wobei die Messfrequenz zwischen einem unteren Schwellenwert des Frequenzintervalls

und einem oberen Schwellenwert des Frequenzintervalls variiert wird. Die ferromagnetische Resonanzfrequenz kann hierbei beispielsweise durch das Minimum des Parameterverlaufs des Streuparameters S_{11} bzw. durch einen Imaginärteil (Lorentz-kurvenförmigen Resonanzpeakverlauf) der frequenzabhängigen Permeabilität bestimmt werden, welche anhand der S_{11} Daten berechnet bzw. ausgewertet werden kann.

[0033] Insbesondere kann das mindestens eine ferromagnetische Element mindestens eine ferromagnetische Schicht aufweisen. Die ferromagnetische Schicht kann hierbei insbesondere in dem Betriebszustand parallel zu einer Oberfläche der Drehmoment-Übertragungseinrichtung ausgebildet sein. Alternativ oder zusätzlich kann die mindestens eine ferromagnetische Schicht im Wesentlichen eben ausgebildet sein. Im Wesentlichen ist im Rahmen dieser Beschreibung als umfassend geringer herstellungs- und umweltbedingter Abweichungen zu verstehen.

[0034] Insbesondere kann die mindestens eine ferromagnetische Schicht eine Dicke von maximal etwa 500 μm , bevorzugt maximal etwa 1 μm und/oder minimal etwa 50 nm, bevorzugt minimal etwa 150 nm aufweisen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass, insbesondere in Abhängigkeit von dem Material der mindestens einen ferromagnetischen Schicht, ein größerer Wert der Dicke der mindestens einen ferromagnetischen Schicht bzw. ein größeres Volumen der mindestens einen ferromagnetischen Schicht ein stärkeres Messsignal erzeugen und ein Signal-Rausch Verhältnis verbessern kann. Somit kann die Dicke der mindestens einen ferromagnetischen Schicht in Abhängigkeit von beispielsweise der Wirtschaftlichkeit der Anwendung der Sensorvorrichtung, der Messgenauigkeit der Messeinheit und/oder den magnetischen Eigenschaften der Drehmoment-Übertragungseinrichtung und/oder einem Umfeld der Drehmoment-Übertragungseinrichtung gewählt werden. Diese Auflistung von verschiedenen Parametern ist jedoch nicht als beschränkend zu interpretieren.

[0035] Insbesondere können die Dicke der mindestens einen ferromagnetischen Schicht und/oder eine Dicke des mindestens einen ferromagnetischen Elements im Wesentlichen konstant sein. Durch eine solche konstante Dicke kann ein zuverlässiges und reproduzierbares Messergebnis gewährleistet werden.

[0036] Insbesondere kann das mindestens eine ferromagnetische Element mindestens eine Pufferschicht bzw. mindestens eine Zwischenschicht aufweisen, welche in dem Betriebszustand zwischen der mindestens einen ferromagnetischen Schicht und der Drehmoment-Übertragungseinrichtung angeordnet ist. Hierbei ist die mindestens eine Zwischenschicht ausgelegt, um in dem Betriebszustand die mindestens eine ferromagnetische Schicht

und die Drehmoment-Übertragungseinrichtung magnetisch zu entkoppeln. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass in dem Betriebszustand die magnetischen Eigenschaften des mindestens einen ferromagnetischen Elements durch mögliche magnetische Eigenschaften der Drehmoment-Übertragungseinrichtung beeinflusst werden können. So kann eine aus einem ferromagnetischen Material ausgebildete Drehmoment-Übertragungseinrichtung die ferromagnetischen Eigenschaften, insbesondere beispielsweise eine Anisotropie des mindestens einen ferromagnetischen Elements beeinflussen und/oder ändern. Hierdurch können die Messungen der ferromagnetischen Resonanzfrequenz verfälscht oder unmöglich werden. Somit können durch die mindestens eine Zwischenschicht die Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messergebnisse der Messeinrichtung verbessert werden.

[0037] Insbesondere kann die mindestens eine Zwischenschicht eine Dicke von maximal etwa 500 µm, bevorzugt maximal etwa 5 µm und/oder minimal etwa 200 nm, bevorzugt minimal etwa 750 nm aufweisen. Die Dicke der mindestens einen Zwischenschicht ist hierbei jedoch nicht auf solche Werte beschränkt. Vielmehr kann die Dicke der mindestens einen Zwischenschicht beispielsweise den magnetischen Eigenschaften der Drehmoment-Übertragungseinrichtung angepasst werden. Insbesondere kann in einem Fall, in dem die Drehmoment-Übertragungseinrichtung ferromagnetische Eigenschaften aufweist, beispielsweise wenn die Drehmoment-Übertragungseinrichtung als eine aus ferritischem Stahl gefertigte Welle ausgebildet ist, die Dicke der mindestens einen Zwischenschicht falls notwendig auch über 500 µm gewählt werden, um in dem Betriebszustand die mindestens eine ferromagnetische Schicht und die Drehmoment-Übertragungseinrichtung magnetisch zu entkoppeln. Alternativ kann auch die Dicke der mindestens einen Zwischenschicht unter 200 nm implementiert werden.

[0038] Insbesondere kann das mindestens eine ferromagnetische Element mindestens eine Substratschicht bzw. mindestens ein Substrat aufweisen, welche in dem Betriebszustand zwischen der mindestens einen ferromagnetischen Schicht und der Drehmoment-Übertragungseinrichtung angeordnet ist. Das mindestens eine Substrat kann insbesondere ausgebildet sein, um das mindestens eine ferromagnetische Element vor Beschädigungen, beispielsweise vor einem Zerreißen zu schützen. Ferner kann das mindestens eine Substrat ausgebildet sein, um eine Verbindung des mindestens einen ferromagnetischen Elements mit der Drehmoment-Übertragungseinrichtung zu verstärken. Hierzu kann beispielsweise ein Material des mindestens einen Substrats derart gewählt werden, dass eine einfache Verbindung mit der Drehmoment-Übertragungseinrichtung ermöglicht wird. Somit kann durch ein Ab-

stimmen der Materialien des mindestens einen Substrats und der Drehmoment-Übertragungseinrichtung ein sicherer Sitz des mindestens einen ferromagnetischen Elements an der Drehmoment-Übertragungseinrichtung ermöglicht werden.

[0039] Alternativ oder zusätzlich kann das mindestens eine Substrat eine Oberflächenstrukturierung, beispielsweise eine Oberflächenaufräuhung und/oder eine Oberflächenmusterung aufweisen, um eine Gesamtfläche der Oberfläche des mindestens einen Substrats zu vergrößern. Eine solche Vergrößerung der Gesamtfläche der Oberfläche des mindestens einen Substrats kann auf einer im Betriebszustand der Drehmoment-Übertragungseinrichtung abgewandten Seite eine sichere Verbindung des mindestens einen Substrats mit der mindestens einen Zwischenschicht und/oder mit der mindestens einen ferromagnetischen Schicht ermöglichen. Ferner kann eine solche Vergrößerung der Gesamtfläche der Oberfläche des mindestens einen Substrats auf einer im Betriebszustand der Drehmoment-Übertragungseinrichtung zugewandten Seite eine sichere Verbindung des mindestens einen Substrats mit der Drehmoment-Übertragungseinrichtung ermöglichen.

[0040] Das mindestens eine Substrat kann ferner insbesondere als eine Trägerschicht und/oder als ein Trägerplättchen ausgebildet sein. Hierbei kann das mindestens eine Substrat insbesondere ausgebildet sein, um das mindestens eine ferromagnetische Element bzw. die mindestens eine ferromagnetische Schicht während dessen/deren Transport und/oder während einem Anordnungsverfahren des mindestens einen ferromagnetischen Elements an der Drehmoment-Übertragungseinrichtung vor Beschädigungen und/oder Verformungen zu schützen bzw. diese zu reduzieren. Das mindestens eine Substrat kann eine Dicke von vorzugsweise maximal etwa 1 mm, weiter bevorzugt maximal etwa 500 µm und/oder vorzugsweise minimal etwa 1 µm, weiter bevorzugt minimal etwa 10 µm aufweisen.

[0041] Die mindestens eine Zwischenschicht und/oder das mindestens eine Substrat können hierbei insbesondere ausgelegt sein, eine mechanische Spannung und/oder ein Drehmoment der Drehmoment-Übertragungseinrichtung, vorzugsweise im Wesentlichen vollständig, an die mindestens eine ferromagnetische Schicht zu übertragen.

[0042] Insbesondere kann das mindestens eine ferromagnetische Element in dem Betriebszustand durch Verkleben mit der Drehmoment-Übertragungseinrichtung verbindbar sein, um eine durch das Drehmoment bewirkte mechanische Spannung von der Drehmoment-Übertragungseinrichtung auf das mindestens eine ferromagnetische Element zu übertragen. Hierzu kann ein passender Klebstoff verwendet werden, beispielsweise ein Zweikomponentenkleb-

stoff. Ein passender Klebstoff ist in diesem Sinne als ein zum Verkleben des mindestens einen ferromagnetischen Elements, insbesondere eines Materials des mindestens einen ferromagnetischen Elements mit der Drehmoment-Übertragungseinrichtung, insbesondere eines Materials der Drehmoment-Übertragungseinrichtung geeigneter Klebstoff zu verstehen. Vorzugsweise ist der Klebstoff ausgebildet, um die magnetischen Eigenschaften des mindestens einen ferromagnetischen Elements, insbesondere um ein magnetisches Anisotropiefeld des mindestens einen ferromagnetischen Elements im Wesentlichen nicht zu beeinflussen bzw. zu ändern.

[0043] Insbesondere kann das mindestens eine ferromagnetische Element in dem Betriebszustand durch Verschweißen bzw. Materialschluss mit der Drehmoment-Übertragungseinrichtung verbindbar sein, um eine durch das Drehmoment bewirkte mechanische Spannung von der Drehmoment-Übertragungseinrichtung auf das mindestens eine ferromagnetische Element zu übertragen. Hierbei kann insbesondere das Verschweißen mit oder ohne Schweißzusatzwerkstoffe erfolgen. Beispielsweise kann das mindestens eine ferromagnetische Element in dem Betriebszustand durch Ultraschallschweißen mit der Drehmoment-Übertragungseinrichtung verbindbar sein. Das Verschweißen kann vorzugsweise in einem externen statischen Magnetfeld erfolgen, so dass ein uniaxiales magnetisches Anisotropiefeld in der Ebene des ferromagnetischen Elements entweder unverändert erhalten oder kontrolliert angepasst oder erzeugt werden kann.

[0044] Insbesondere kann das mindestens eine ferromagnetische Element in dem Betriebszustand durch Verpressen mit der Drehmoment-Übertragungseinrichtung verbindbar sein, um eine durch das Drehmoment bewirkte mechanische Spannung von der Drehmoment-Übertragungseinrichtung auf das mindestens eine ferromagnetische Element zu übertragen.

[0045] Insbesondere kann das mindestens eine ferromagnetische Element in dem Betriebszustand durch chemisches Reagieren bzw. durch eine chemische Reaktion mit der Drehmoment-Übertragungseinrichtung verbindbar sein, um eine durch das Drehmoment bewirkte mechanische Spannung von der Drehmoment-Übertragungseinrichtung auf das mindestens eine ferromagnetische Element zu übertragen. Hierbei kann insbesondere das mindestens eine ferromagnetische Element derart ausgelegt sein, dass eine in dem Betriebszustand an der Drehmoment-Übertragungseinrichtung angeordnete Seite des mindestens einen ferromagnetischen Elements chemisch mit der Drehmoment-Übertragungseinrichtung reagiert, beispielsweise durch Bildung von ionischen und/oder kovalenten Bindungen.

[0046] Insbesondere kann das mindestens eine ferromagnetische Element in dem Betriebszustand durch Verrasten bzw. Formschluss mit der Drehmoment-Übertragungseinrichtung verbindbar sein, um eine durch das Drehmoment bewirkte mechanische Spannung von der Drehmoment-Übertragungseinrichtung auf das mindestens eine ferromagnetische Element zu übertragen. Hierbei kann das mindestens eine ferromagnetische Element mindestens ein Verrastelement aufweisen, wobei das mindestens eine Verrastelement ausgelegt ist, in dem Betriebszustand mit mindestens einem korrespondierenden Verrastelement der Drehmoment-Übertragungseinrichtung in Eingriff zu gelangen bzw. zu verrasten.

[0047] Insbesondere kann die Messeinrichtung ausgelegt sein, das Drehmoment der Drehmoment-Übertragungseinrichtung basierend auf einer Verschiebung der gemessenen ferromagnetischen Resonanzfrequenz zu bestimmen, wobei eine nicht perfekte Übertragung einer durch das Drehmoment bewirkten mechanischen Spannung über die Verbindung der Drehmoment-Übertragungseinrichtung und des mindestens einen ferromagnetischen Elements berücksichtigt ist. Insbesondere kann die Verbindung der Drehmoment-Übertragungseinrichtung und des mindestens einen ferromagnetischen Elements die mechanische Spannung zumindest teilweise absorbieren und/oder zumindest teilweise umlenken. Vorzugsweise kann die Gleichung (12) um mindestens zwei Korrekturparameter erweitert werden:

$$H_{u,eff} = \sqrt{\left[\frac{3\lambda_S}{J_S} (\sigma + \alpha) \beta \right]^2 + \left[H_u - \frac{3\lambda_S}{J_S} (\sigma + \alpha) \beta \right]^2} \quad (14)$$

[0048] Der Parameter α repräsentiert eine durch die Verbindung bewirkte Vorspannung des mindestens einen ferromagnetischen Elements, und der Parameter β repräsentiert einen Absorptions- bzw. Dämpfungsfaktor. Eine solche Korrektur wird beispielhaft in Fig. 15 gezeigt.

[0049] Für den Fall, dass das mindestens eine ferromagnetische Element mindestens eine Zwischenschicht und/oder mindestens ein Substrat umfasst, können die Werte für die Vorspannung α und/oder den Dämpfungsfaktor β angepasst werden, um eine nicht perfekte Übertragung des Drehmoments durch die Verbindung zwischen dem mindestens einen Substrat und der mindestens einen Zwischenschicht und/oder der mindestens einen ferromagnetischen Schicht, und/oder zwischen der mindestens einen Zwischenschicht und der mindestens einen ferromagnetischen Schicht zu berücksichtigen.

[0050] Die Messeinrichtung kann ausgelegt sein, in mindestens einem Kalibrierungsschritt die nicht perfekte Übertragung der mechanischen Spannung

durch die Verbindung von der Drehmoment-Übertragungseinrichtung und des mindestens einen ferromagnetischen Elements zu bestimmen bzw. festzulegen. Insbesondere können die Werte für die Vorspannung α und/oder den Dämpfungsfaktor β von der Messeinrichtung vorgeschrieben sein und/oder anhand des mindestens einen Kalibrierungsschritts festgelegt sein und/oder durch einen Benutzer vorgegeben sein.

[0051] Insbesondere kann in dem Betriebszustand ein kleinster Abstand zwischen mindestens einem Messelement und mindestens einem ferromagnetischen Element einen Wert von maximal etwa 1500 μm , bevorzugt maximal etwa 500 μm , ferner bevorzugt maximal etwa 300 μm , am meisten bevorzugt maximal etwa 150 μm aufweisen.

[0052] Insbesondere kann während einer Messung der ferromagnetischen Resonanzfrequenz zumindest eines ferromagnetischen Elements ein Messwinkel zwischen einer Oberfläche des mindestens einen Messelements und des mindestens einen ferromagnetischen Elements einen Wert von mindestens etwa 0° , bevorzugt mindestens etwa 12° und maximal etwa 28° , bevorzugt maximal etwa 16° aufweisen. Hierbei kann sich zumindest ein Bereich des ferromagnetischen Elements bei einem angelegten Drehmoment an die Drehmoment-Übertragungseinrichtung stärker der Messeinrichtung bzw. einem HF-Messkopf (insbesondere Triplate-Stripline, wie unten ferner beschrieben) der Messeinrichtung nähern, wodurch eine leichtere Einkopplung von HF-Feldlinien in das mindestens eine ferromagnetische Element in diesem Messwinkelbereich ermöglicht wird. Dies kann vorzugsweise eine erhöhte Intensität eines Messsignals bewirken, da eine HF-Felddichte zum Messkopf hin (und damit ein absorbiertes bzw. reflektiertes Antwortsignal) mit geringer werdendem Abstand zwischen Messkopf und ferromagnetischen Element und günstigem Messwinkel folglich größer wird. Dies kann insbesondere bei Drehmomentmessungen an Drehmoment-Übertragungseinrichtungen, welche sich nicht kontinuierlich um eine Drehachse der Drehmoment-Übertragungseinrichtung drehen eine erhöhte Messsignalstärke bewirken.

[0053] Insbesondere kann die Drehmoment-Übertragungseinrichtung als eine Welle ausgebildet sein. Vorzugsweise kann die Drehmoment-Übertragungseinrichtung im Wesentlichen zylinderartig und/oder im Wesentlichen achsensymmetrisch bezüglich einer Drehachse der Drehmoment-Übertragungseinrichtung ausgebildet sein.

[0054] Insbesondere kann mindestens ein Messelement des mindestens einen Messelements als Hochfrequenz-Triplate-Stripline ausgebildet sein, wobei die Messung der ferromagnetischen Resonanzfre-

quenz insbesondere auf einer Verstimmung der Hochfrequenz-Triplate-Stripline basiert. Vorzugsweise kann mindestens ein Messelement des mindestens einen Messelements als Hochfrequenz-Triplate-Stripline ausgebildet sein und ein weiteres Messelement des mindestens einen Messelements als ein zu der Hochfrequenz-Triplate-Stripline verschiedenes Messelement ausgebildet sein. Vorzugsweise kann das mindestens eine Messelement zumindest zwei im Wesentlichen unterschiedliche Messelemente umfassen. Insbesondere kann die Hochfrequenz-Triplate-Stripline auf eine Impedanz von etwa 50 Ohm ausgelegt sein. Ferner kann die Hochfrequenz-Triplate-Stripline insbesondere in einem Reflexionsmodus einer definiert geführten elektromagnetischen Hochfrequenz-Welle betrieben werden. Hierbei wird die Verstimmung der Impedanz bzw. der Hochfrequenz-Triplate-Stripline durch die teilweise oder nahezu vollständige Absorption von vor der Hochfrequenz-Triplate-Stripline entstehenden und unterschiedlichen elektromagnetischen Wellenamplitudenverhältnissen verursacht. Insbesondere kann die Hochfrequenz-Triplate-Stripline ausgelegt sein, in dem Reflexionsmodus zur Messung der ferromagnetischen Resonanzfrequenz mindestens ein Reflexionssignal zu empfangen bzw. zu messen, wobei insbesondere das mindestens eine Reflexionssignal bei einer festen Messfrequenz ermittelt bzw. gemessen wird. Die feste Messfrequenz kann insbesondere nahe der ferromagnetischen Resonanzfrequenz liegen, beispielsweise bei mindestens einem 0.8fachen der ferromagnetischen Resonanzfrequenz, bevorzugt mindestens einem 0.9fachen der ferromagnetischen Resonanzfrequenz und/oder maximal bei einem 1.2fachen der ferromagnetischen Resonanzfrequenz, bevorzugt maximal bei einem 1.1fachen der ferromagnetischen Resonanzfrequenz. Die feste Messfrequenz kann insbesondere bei kleinen Frequenzen liegen, beispielsweise maximal bei einem 0.25fachen der ferromagnetischen Resonanzfrequenz, bevorzugt maximal bei einem 0.1fachen der ferromagnetischen Resonanzfrequenz, weiter bevorzugt maximal bei einem 0.05fachen der ferromagnetischen Resonanzfrequenz.

[0055] Im Gegensatz müssen in üblichen Striplines ferromagnetische Schichten direkt in die Stripline integriert werden, um HF-Eigenschaften der ferromagnetischen Schichten zu messen. Diese Messungen sind nicht berührungslos, da die ferromagnetische Schicht und ein Basissubstrat, auf dem die ferromagnetische Schicht angeordnet ist, zwischen einer Signalleitung und einer Masse der Stripline liegen müssen, um eine Messung frequenzabhängiger physikalischer Größen, z.B. einer frequenzabhängigen Permeabilität, durchzuführen.

[0056] Hierbei können das mindestens eine ferromagnetische Element und das mindestens eine Messelement derart ausgebildet sein, dass eine Eigen-

frequenz des mindestens einen Messelements oberhalb einer Resonanzfrequenz des mindestens einen ferromagnetischen Elements liegt. Die Eigenfrequenz mindestens eines Messelements ist hierbei insbesondere abhängig von der Größe bzw. Länge des mindestens einen Messelements. Hierdurch können insbesondere Geometrieeffekte des mindestens einen Messelements bzw. des mindestens einen Messkopfes bei der Bestimmung des Drehmoments der Drehmoment-Übertragungseinrichtung vermieden bzw. reduziert werden.

[0057] Insbesondere kann das mindestens eine Messelement im Betriebszustand im Wesentlichen entlang einer Messebene angeordnet sein, wobei die Messebene im Wesentlichen tangential zu einer Oberfläche der Drehmoment-Übertragungseinrichtung ausgebildet ist. Hierbei ist das mindestens eine Messelement jedoch nicht auf eine solche Form beschränkt, sondern kann andere Formen aufweisen. Beispielsweise kann das mindestens eine Messelement im Wesentlichen plattenartig und/oder im Wesentlichen U-förmig und/oder im Wesentlichen zumindest teilweise ringartig ausgebildet sein. Insbesondere kann das mindestens eine Messelement im Betriebszustand beispielsweise im Wesentlichen entlang einer umlaufenden Richtung bezüglich einer Drehachse der Drehmoment-Übertragungseinrichtung die Drehmoment-Übertragungseinrichtung zumindest teilweise, beispielsweise über einen Winkelbereich von mindestens 45° , vorzugsweise mindestens 90° und/oder von maximal 360° , vorzugsweise maximal 270° , umgeben. Alternativ kann das mindestens eine Messelement im Betriebszustand beispielsweise im Wesentlichen entlang einer umlaufenden Richtung bezüglich einer Drehachse der Drehmoment-Übertragungseinrichtung die Drehmoment-Übertragungseinrichtung vollständig, beispielsweise im Wesentlichen mantelartig umgeben.

[0058] Insbesondere kann das mindestens eine ferromagnetische Element als mindestens ein umlaufendes ferromagnetisches Element ausgebildet sein, wobei das mindestens eine umlaufende ferromagnetische Element in dem Betriebszustand die Drehmoment-Übertragungseinrichtung entlang einer umlaufenden Richtung bezüglich einer Drehachse der Drehmoment-Übertragungseinrichtung im Wesentlichen vollständig umgibt. Hierbei kann das mindestens eine umlaufende ferromagnetische Element und das mindestens eine Messelement derart angeordnet sein, dass bei einer Belastung der Drehmoment-Übertragungseinrichtung mit einem Drehmoment eine kontinuierliche Messung der ferromagnetischen Resonanzfrequenz des mindestens einen umlaufenden ferromagnetischen Elements ermöglicht ist.

[0059] Beispielsweise kann das mindestens eine ferromagnetische Element im Wesentlichen plattenartig und/oder im Wesentlichen U-förmig/V-förmig und/

oder im Wesentlichen zumindest teilweise ringartig und/oder im Wesentlichen hülsenartig ausgebildet sein.

[0060] Insbesondere kann das mindestens eine ferromagnetische Element mindestens zwei ferromagnetische Elemente umfassen, wobei die mindestens zwei ferromagnetischen Elemente in umlaufender Richtung bezüglich einer Drehachse der Drehmoment-Übertragungseinrichtung an der Drehmoment-Übertragungseinrichtung angeordnet sind. In anderen Worten kann das mindestens eine ferromagnetische Element vorzugsweise mindestens zwei ferromagnetische Elemente umfassen, wobei die mindestens zwei ferromagnetischen Elemente derart an der Drehmoment-Übertragungseinrichtung angeordnet sind, dass sich die mindestens zwei ferromagnetischen Elemente bei einer Drehbewegung der Drehmoment-Übertragungseinrichtung um deren Drehachse sequentiell bzw. nacheinander zwischen der Drehachse und dem mindestens einen Messelement hindurchbewegen bzw. hindurchdrehen.

[0061] Hierbei kann insbesondere mindestens eines der mindestens zwei ferromagnetischen Elemente im Wesentlichen planar bzw. eben ausgebildet sein und in dem Betriebszustand im Wesentlichen parallel zu einer tangentialen Ebene der Oberfläche der Drehmoment-Übertragungseinrichtung ausgerichtet sein. Das mindestens eine planare bzw. ebene ferromagnetische Element kann hierbei insbesondere in einer Aussparung der Drehmoment-Übertragungseinrichtung angeordnet sein. Das mindestens eine planare bzw. ebene ferromagnetische Element kann insbesondere zumindest teilweise einen Vorsprung an der Drehmoment-Übertragungseinrichtung bilden.

[0062] Insbesondere kann mindestens eines der mindestens zwei ferromagnetischen Elemente als ein teilweise umlaufendes ferromagnetisches Element ausgebildet sein und in dem Betriebszustand die Drehmoment-Übertragungseinrichtung entlang einer umlaufenden Richtung bezüglich einer Drehachse der Drehmoment-Übertragungseinrichtung zumindest teilweise umgeben. Beispielsweise kann mindestens eines der mindestens einen ferromagnetischen Elements im Wesentlichen zylinderschalenförmig und/oder teilringförmig und/oder halbringförmig ausgebildet sein.

[0063] Insbesondere können mindestens zwei des mindestens einen ferromagnetischen Elements als jeweils ein umlaufendes ferromagnetisches Element ausgebildet sein und in dem Betriebszustand die Drehmoment-Übertragungseinrichtung entlang einer umlaufenden Richtung bezüglich einer Drehachse der Drehmoment-Übertragungseinrichtung vollständig umgeben. Die mindestens zwei umlaufenden ferromagnetischen Elemente können hierbei parallel zueinander ausgebildet sein, wobei die mindestens

zwei parallelen umlaufenden ferromagnetischen Elemente insbesondere entlang einer axialen Richtung bezüglich einer Drehachse der Drehmoment-Übertragungsvorrichtung beabstandet sein können.

[0064] Insbesondere kann das mindestens eine ferromagnetische Element eine magnetische Anisotropie aufweisen. Die magnetische Anisotropie bzw. eine Vorzugsrichtung des mindestens einen ferromagnetischen Elements kann insbesondere durch ein Glühen bzw. ein Annealing des mindestens einen ferromagnetischen Elements in einem externen statischen Magnetfeld erzeugt worden sein. Das Glühen bzw. Annealing kann insbesondere eine thermische Behandlung des mindestens einen ferromagnetischen Elements, beispielsweise bei hohen Temperaturen und/oder nahe dem Schmelzpunkt eines Materials des mindestens einen ferromagnetischen Elements und/oder der mindestens einen ferromagnetischen Schicht umfassen.

[0065] Insbesondere kann die Messeinrichtung ferner mindestens ein Magnetfeldelement umfassen, wobei das mindestens eine Magnetfeldelement ausgelegt ist, in dem Betriebszustand ein Magnetfeld zu erzeugen, um in dem mindestens einen ferromagnetischen Element eine magnetische Anisotropie zu erzeugen oder zu beeinflussen. Hierbei kann das mindestens eine Magnetfeldelement mindestens einen Permanentmagneten und/oder mindestens einen Elektromagneten aufweisen. Insbesondere kann das mindestens eine Magnetfeldelement ausgelegt sein, die magnetische Anisotropie in einer Ebene des mindestens einen ferromagnetischen Elements, insbesondere während einer Messung der ferromagnetischen Resonanzfrequenz des mindestens einen ferromagnetischen Elements zu erzeugen. Das von dem mindestens einen Magnetfeldelement erzeugte Magnetfeld kann insbesondere eine magnetische Flussdichte von maximal 50 mT, bevorzugt maximal 10 mT, insbesondere bevorzugt maximal 5 mT aufweisen.

[0066] Ein Aspekt betrifft ein Verfahren zur Bestimmung eines Drehmoments einer Drehmoment-Übertragungseinrichtung, umfassend Anordnen von mindestens einem ferromagnetischen Element an der Drehmoment-Übertragungseinrichtung, Messen einer ferromagnetischen Resonanzfrequenz des zumindest einen ferromagnetischen Elements, und Bestimmen des Drehmoments der Drehmoment-Übertragungseinrichtung basierend auf einer Verschiebung der gemessenen ferromagnetischen Resonanzfrequenz.

[0067] Das Verfahren kann hierbei insbesondere Merkmale gemäß einer beliebigen Kombination der oben genannten Merkmale der Sensorvorrichtung aufweisen.

[0068] Insbesondere kann das Anordnen des mindestens einen ferromagnetischen Elements ein Verkleben, Verschweißen, Verpressen, chemisches Reagieren und/oder Verrasten des mindestens einen ferromagnetischen Elements mit der Drehmoment-Übertragungseinrichtung umfassen.

[0069] Insbesondere kann das Bestimmen des Drehmoments der Drehmoment-Übertragungseinrichtung ein Berücksichtigen einer nicht perfekten Übertragung von mechanischer Spannung durch eine Verbindung von der Drehmoment-Übertragungseinrichtung und des mindestens einen ferromagnetischen Elements umfassen. Das Verfahren kann ferner insbesondere ein Bestimmen der nicht perfekten Übertragung der mechanischen Spannung bzw. ein Bestimmen physikalischer Parameter der nicht perfekten Übertragung der mechanischen Spannung durch die Verbindung von der Drehmoment-Übertragungseinrichtung und des mindestens einen ferromagnetischen Elements umfassen. Die physikalischen Parameter können beispielsweise eine durch die Verbindung bewirkte Vorspannung α des mindestens einen ferromagnetischen Elements und einen Absorptions- bzw. Dämpfungsfaktor β , wie insbesondere in Gleichung (14) angeführt, umfassen.

[0070] Insbesondere kann das Verfahren ein Erzeugen mindestens einer ferromagnetischen Schicht umfassen. Insbesondere kann die mindestens eine ferromagnetische Schicht durch ein Ablagern eines Materials der mindestens einen ferromagnetischen Schicht, insbesondere durch Sputtern, bevorzugt durch Magnetronsputtern, erzeugt werden.

[0071] Insbesondere kann das Verfahren ferner ein Erzeugen eines Substrats, und ein Erzeugen einer Zwischenschicht auf dem Substrat umfassen, wobei eine ferromagnetische Schicht der mindestens einen ferromagnetischen Schicht en auf der Zwischenschicht erzeugt wird, wobei die Zwischenschicht ausgelegt ist, in einem Betriebszustand der Sensorvorrichtung die mindestens eine ferromagnetische Schicht und die Drehmoment-Übertragungseinrichtung magnetisch zu entkoppeln.

[0072] Insbesondere können die mindestens eine ferromagnetische Schicht und/oder eine Zwischenschicht und/oder ein Substrat direkt auf der Drehmoment-Übertragungseinrichtung aufgetragen werden.

[0073] Insbesondere kann das Verfahren ferner ein Glühen bzw. ein Annealing (siehe oben) des mindestens einen ferromagnetischen Elements in einem externen statischen Magnetfeld zur Erzeugung einer magnetischen Anisotropie des mindestens einen ferromagnetischen Elements umfassen. Insbesondere kann hierdurch durch Vorgeben des externen statischen Magnetfelds eine gewünschte magnetische

Anisotropie des mindestens einen ferromagnetischen Elements eingestellt werden.

[0074] Ferner werden zwei exemplarische ferromagnetische Elemente mit jeweils einem exemplarischen Herstellungsverfahren beschrieben.

Beispiel 1

[0075] Im Rahmen eines ersten Beispiels werden ein exemplarisches ferromagnetisches Element sowie ein exemplarisches Herstellungsverfahren des exemplarischen ferromagnetischen Elements beschrieben.

[0076] Hierzu wird insbesondere ein poliertes Wolframcarbid-Kobalt(WC-Co)-Hartmetall-Substrat bereitgestellt. Das WC-Co Substrat weist hierbei 10.5 Gew.% Kobalt und Ausmaße von 12.7 mm x 12.7 mm x 0.4 mm (Länge x Breite x Dicke) auf.

[0077] Eine Siliziumoxid Zwischenschicht wird auf dem WC-Co Substrat durch nicht-reaktives RF-Magnetronputtern in einer reinen Argon-Atmosphäre bei 0.2Pa aufgetragen. Das Auftragen der Siliziumoxid Zwischenschicht erfolgt unter Verwendung eines 6-Zoll SiO₂ Sputtertargets bei einer Leistung von 300W. Hierdurch wird eine Siliziumoxid Zwischenschicht mit einer Dicke von etwa 3 µm auf dem WC-Co Substrat aufgetragen, wobei die Siliziumoxid Zwischenschicht eine chemische Zusammensetzung von ungefähr 1:2 (Si:O) aufweist. Ungefähr bedeutet in diesem Sinne umfassend von Abweichung von bis zu 15%.

[0078] Eine weichmagnetische ferromagnetische Eisen-Kobalt-Hafnium-Stickstoff (Fe-Co-Hf-N) Schicht wird durch reaktives RF-Magnetronputtern auf der Zwischenschicht in einer Argon/Stickstoff (Ar/N₂) Atmosphäre bei 0.2Pa aufgetragen. Ein Gasfluss-Verhältnis von Ar/N₂ wird hierbei bei 100sccm/3sccm gehalten. Das Auftragen der Fe-Co-Hf-N Schicht erfolgt unter Verwendung eines 6-Zoll Fe₃₇Co₄₆Hf₁₇ Sputtertargets bei einer Leistung von 250W. Hierdurch wird eine Fe-Co-Hf-N Schicht mit einer Dicke von etwa 200 nm auf dem WC-Co Substrat aufgetragen, wobei die Fe-Co-Hf-N Schicht eine chemische Zusammensetzung von ungefähr 32:45:11:12 (Fe:Co:Hf:N) aufweist. Ungefähr bedeutet in diesem Sinne umfassend von Abweichungen von jeweils bis zu etwa 25%.

[0079] Nach Auftragen der Silizium Zwischenschicht und der Fe-Co-Hf-N Schicht wird das ferromagnetische Element bei 400°C in einem statischen Magnetfeld von 50 mT für 1 Stunde gegläht (siehe oben). Das Glühen erfolgt hierbei in einem Vakuum mit einem Druck von $p < 10^{-7}$ mbar, wobei das Glühen eine uniaxiale magnetische Anisotropie der ferromagnetischen Schicht erzeugt.

[0080] Das geglähte ferromagnetische Element kann ferner mit einer Drehmoment-Übertragungseinrichtung verbunden werden, z.B. mit einer Welle verklebt werden.

Beispiel 2

[0081] Im Rahmen eines zweiten Beispiels werden ein weiteres exemplarisches ferromagnetisches Element sowie ein weiteres exemplarisches Herstellungsverfahren des exemplarischen ferromagnetischen Elements beschrieben.

[0082] Hierzu wird insbesondere ein Silizium (Si (1 0 0)) Substrat bereitgestellt. Das Si-Substrat weist hierbei Ausmaße von 9.9 mm x 9.9 mm x 0.4 mm (Länge x Breite x Dicke) auf. Das Si-Substrat ist ferner thermisch oxidiert und weist eine 1 µm Zwischenschicht von thermisch oxidiertem Silizium auf.

[0083] Eine ferromagnetische Eisen-Kobalt-Zirkonium-Stickstoff (Fe-Co-Zr-N) Schicht wird durch reaktives RF-Magnetronputtern auf der Zwischenschicht in einer Argon/Stickstoff (Ar/N₂) Atmosphäre bei 0.2Pa aufgetragen. Ein Gasfluss-Verhältnis von Ar/N₂ wird hierbei bei 100sccm/3sccm gehalten. Das Auftragen der Fe-Co-Zr-N Schicht erfolgt unter Verwendung eines 6-Zoll Fe₃₇Co₄₆Zr₁₇ Sputtertargets bei einer Leistung von 250W. Hierdurch wird eine Fe-Co-Zr-N Schicht mit einer Dicke von etwa 788 nm auf der Zwischenschicht aufgetragen, wobei die Fe-Co-Hf-N Schicht eine chemische Zusammensetzung von ungefähr 40:37:11:12 (Fe:Co:Zr:N) aufweist. Ungefähr bedeutet in diesem Sinne umfassend von Abweichungen von jeweils bis zu etwa 25%.

[0084] Nach Auftragen der Fe-Co-Zr-N Schicht wird das ferromagnetische Element bei 400°C in einem statischen Magnetfeld von 50 mT für 1 Stunde gegläht. Das Glühen erfolgt hierbei in einem Vakuum mit einem Druck von $p < 10^{-7}$ mbar, wobei das Glühen eine uniaxiale magnetische Anisotropie der ferromagnetischen Schicht erzeugt.

[0085] Das geglähte ferromagnetische Element kann ferner mit einer Drehmoment-Übertragungseinrichtung verbunden werden, z.B. mit einer Welle verklebt werden.

[0086] Die Erfindung wird nachfolgend anhand von in Figuren illustrativ dargestellten exemplarischen Ausführungsformen ferner beschrieben. Die exemplarischen Ausführungsformen sind hierbei nicht als beschränkend zu interpretieren. Es zeigen:

Fig. 1: Eine perspektivische Ansicht einer ersten exemplarischen Sensorvorrichtung im Betriebszustand;

Fig. 2: Eine Querschnittsansicht der Sensorvorrichtung aus Fig. 1;

Fig. 3 Eine perspektivische Ansicht einer zweiten exemplarischen Sensorvorrichtung im Betriebszustand;

Fig. 4: Eine Querschnittsansicht der Sensorvorrichtung aus **Fig. 3**;

Fig. 5: Eine Querschnittsansicht einer dritten exemplarischen Sensorvorrichtung im Betriebszustand;

Fig. 6: Eine Seitenansicht der Sensorvorrichtung aus **Fig. 5**;

Fig. 7: Eine perspektivische Querschnittsansicht eines exemplarischen ferromagnetischen Elements;

Fig. 8: Eine schematische Darstellung eines Verspannens einer Drehmoment-Übertragungseinrichtung und eines daran angeordneten ferromagnetischen Elements;

Fig. 9: Sechs Messreihen der ferromagnetischen Resonanzfrequenz für das in Beispiel 2 hergestellte ferromagnetische Element;

Fig. 10: Eine graphische Darstellung einer ferromagnetischen cut-off Resonanzfrequenz der in **Fig. 9** gezeigten Messreihen;

Fig. 11: Eine graphische Darstellung eine Vielzahl von Messreihen der ferromagnetischen Resonanzfrequenz in Abhängigkeit von der Distanz zwischen einem Messelement und einem ferromagnetischen Element in der Messposition;

Fig. 12: Eine graphische Darstellung eine Vielzahl von Messreihen der ferromagnetischen Resonanzfrequenz in Abhängigkeit von dem Messwinkel zwischen einem Messelement und einem ferromagnetischen Element in der Messposition;

Fig. 13A und Eine beispielhafte experimentale Messeinrichtung zur 13B: Bestimmung einer ferromagnetischen Resonanzfrequenz und eine Nahansicht einer beispielhaften Sensorvorrichtung;

Fig. 14A und Einen Vergleich von Messreihen der ferromagnetischen 14B: Resonanzfrequenz eines wie in Beispiel 1 hergestellten ferromagnetischen Elements und eines wie in Beispiel 2 hergestellten ferromagnetischen Elements;

Fig. 15: Einen Vergleich der theoretischen Werte der ferromagnetischen Resonanzfrequenz auf Basis von Gleichung 13 mit Gleichung 12 und von Gleichung 13 mit Gleichung 14;

Fig. 16: Eine schematische Darstellung einer beispielhaften

Sensorvorrichtung an einer Welle;

Fig. 17: Einen Screenshot einer Messreihe der ferromagnetischen Resonanzfrequenz gemäß der in **Fig. 16** gezeigten beispielhaften Sensorvorrichtung.

[0087] **Fig. 1** zeigt eine perspektivische Ansicht einer ersten exemplarischen Sensorvorrichtung im Betriebszustand.

[0088] Hierbei ist eine Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** als eine zylinderförmige Welle ausgebildet, wobei sich die Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** um eine Drehachse **A** drehen kann, um ein Drehmoment zu übertragen.

[0089] An der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** sind sechs ferromagnetische Elemente **4** angeordnet, von denen drei ferromagnetische Elemente **4** aufgrund der perspektivischen Ansicht von der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** verdeckt sind. Die sechs ferromagnetischen Elemente **4** sind paarweise angeordnet, wobei die paarweise angeordneten ferromagnetischen Elemente **4** jeweils gegenüberliegend bezüglich der Drehachse **A** der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** angeordnet sind. Die ferromagnetischen Elemente **4** sind insbesondere in umlaufender Richtung um die Drehachse **A** in gleichen Abständen voneinander angeordnet. Hierdurch kann die Bildung einer Unwucht der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** bezüglich einer Drehbewegung um die Drehachse **A** vermieden werden.

[0090] Die sechs ferromagnetischen Elemente **4** umfassen vorzugsweise jeweils mindestens ein ferromagnetisches, insbesondere ein weichmagnetisches ferromagnetisches Material.

[0091] Die ferromagnetischen Elemente **4** sind jeweils im Wesentlichen quadratisch ausgebildet bzw. die ferromagnetischen Elemente **4** weisen insbesondere in einer jeweiligen Ebene senkrecht zu einer radialen Richtung bezüglich der Drehachse **A** eine im Wesentlichen quadratische Querschnittsfläche auf. Die ferromagnetischen Elemente **4** können jeweils im Wesentlichen eben bzw. planar bzw. plattenartig ausgebildet sein. Insbesondere weist die Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** korrespondierende Aussparungen auf einer umlaufenden Oberfläche der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** auf, wobei jeweils ein ferromagnetisches Element **4** in jeweils einer der korrespondierenden Aussparungen aufgenommen ist.

[0092] Durch ein Anlegen eines Drehmoments an die Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** erfahren die ferromagnetischen Elemente **4** eine mechanische Spannung bzw. eine Scherkraft. In anderen Worten werden die ferromagnetischen Elemente **4** durch das Anlegen des Drehmoments an Drehmo-

ment-Übertragungseinrichtung **1** vorgespannt. Hierdurch wird eine magnetische Anisotropie bzw. ein magnetisches Anisotropiefeld entlang einer Ebene der ferromagnetischen Elemente **4** gestört bzw. verändert, wodurch die ferromagnetische Resonanzfrequenz der ferromagnetischen Elemente **4** verschoben wird.

[0093] Diese Verschiebung der ferromagnetischen Resonanzfrequenz der ferromagnetischen Elemente **4** wird durch ein Messelement **3** einer Messeinrichtung gemessen. Insbesondere ist das Messelement **3** derart über der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** angeordnet, dass sich die ferromagnetischen Elemente **4** bei einer Drehbewegung der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** zwischen der Drehachse **A** und dem Messelement **3** hindurchdrehen bzw. in umlaufender Richtung um die Drehachse **A** hindurchbewegen.

[0094] Das Messelement **3** kann insbesondere als Hochfrequenz-Triplate-Stripline ausgebildet sein.

[0095] Das Messelement **3** der Messeinrichtung kann entweder direkt basierend auf der gemessenen Verschiebung der ferromagnetischen Resonanzfrequenz bzw. auf der gemessenen ferromagnetischen Resonanzfrequenz ein an die Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** angelegtes Drehmoment bestimmen, oder gemessene Daten der Verschiebung der ferromagnetischen Resonanzfrequenz bzw. der ferromagnetischen Resonanzfrequenz weiterleiten. Hierbei kann insbesondere das Messelement **3** mit einem Verbindungselement **5** verbunden sein. Das Verbindungselement **5** kann insbesondere ausgelegt sein, Daten und/oder Strom zu übertragen. Ferner können Steuersignale an das Messelement **3** bzw. die Messeinrichtung und/oder das Magnetfeldelement **2** durch das Verbindungselement **5** übermittelt werden.

[0096] Fig. 1 zeigt ferner ein Magnetfeldelement **2**, wobei das Magnetfeldelement **2** ausgelegt ist, in dem Betriebszustand ein Magnetfeld insbesondere zwischen dem Messelement **3** und der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** zu erzeugen. Während einer Drehbewegung der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** rotieren die ferromagnetischen Elemente **4** nacheinander insbesondere in eine Messposition zwischen dem Messelement **3** und der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1**, wobei das Magnetfeldelement **2** insbesondere ausgelegt ist, in einem ferromagnetischen Element **4** in der Messposition eine magnetische Anisotropie zu erzeugen oder zu beeinflussen. Hierdurch kann das Magnetfeldelement **2** insbesondere die magnetische Anisotropie in einer Ebene des jeweiligen ferromagnetischen Elements **4** erzeugen bzw. beeinflussen, insbesondere während einer Messung der ferromagnetischen Resonanzfrequenz des jeweiligen ferromagnetischen Elements **4**.

[0097] In Fig. 1 ist das Magnetfeldelement **2** nur teilweise gezeigt, um auch das Messelement **3** zu zeigen. Eine Querschnittsansicht des Magnetfeldelements **2** wird insbesondere in Fig. 2 gezeigt. Hierbei ist das Magnetfeldelement **2** beispielhaft als ein Elektromagnet ausgebildet, wobei der Elektromagnet einen im Wesentlichen U-förmigen Magnetkern und eine an dem Magnetkern angeordnete Spule aufweist. Der Elektromagnet ist jedoch nicht auf eine solche Ausbildung beschränkt. Alternativ kann das Magnetelement **2** beispielsweise als ein Permanentmagnet ausgebildet sein.

[0098] Fig. 2 zeigt eine Querschnittsansicht der in Fig. 1 gezeigten exemplarischen Sensorvorrichtung entlang einer Schnittebene senkrecht zu der Drehachse **A** durch das Messelement **3**, das Magnetfeldelement **2**, die ferromagnetischen Elemente **4** und die Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1**. Hierbei wird die paarweise Anordnung der ferromagnetischen Elemente **4** und eine Ausbildung des Magnetfeldelements **2**, wie bereits für Fig. 1 oben beschrieben, deutlicher gezeigt. Insbesondere wird ein ferromagnetisches Element **4** in der Messposition gezeigt.

[0099] Fig. 3 zeigt eine perspektivische Ansicht einer zweiten exemplarischen Ausführungsform einer Sensorvorrichtung. Hierbei entsprechen das Magnetfeldelement **2**, das Verbindungselement **5**, das Messelement **3** und die Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** mit der Drehachse **A** im Wesentlichen den mit den gleichen Bezugszeichen gekennzeichneten Elementen in Fig. 1 und Fig. 2.

[0100] Ein umlaufendes ferromagnetisches Element **4** ist an der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** angeordnet, welches die Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** entlang einer umlaufenden Richtung bezüglich der Drehachse **A** vollständig umgibt. Hierdurch kann die Bildung einer Unwucht der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** bezüglich einer Drehbewegung um die Drehachse **A** vermieden werden. Ferner umfasst das umlaufende ferromagnetische Element **4** insbesondere mindestens ein ferromagnetisches, insbesondere ein weichmagnetisches ferromagnetisches Material.

[0101] Das umlaufende ferromagnetische Element **4** weist einen im Wesentlichen konstanten Durchmesser entlang einer Richtung parallel zu der Drehachse **A** auf. Insbesondere kann die Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** eine korrespondierende Aussparung auf einer umlaufenden Oberfläche der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** aufweisen, wobei das umlaufende ferromagnetische Element **4** in der korrespondierenden Aussparung aufgenommen ist.

[0102] Durch ein Anlegen eines Drehmoments an die Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** erfährt

das umlaufende ferromagnetische Element **4** eine mechanische Spannung. Hierdurch wird eine magnetische Anisotropie bzw. ein magnetisches Anisotropiefeld in einem Abschnitt des umlaufenden ferromagnetischen Elements **4** entlang einer bezüglich der Drehachse **A** umlaufenden Fläche des ferromagnetischen Elements **4** gestört bzw. verändert, wodurch die ferromagnetische Resonanzfrequenz des umlaufenden ferromagnetischen Elements **4** verschoben wird.

[0103] Das Magnetfeldelement **2** ist vorzugsweise ausgelegt, in dem Betriebszustand ein Magnetfeld insbesondere zwischen dem Messelement **3** und der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** zu erzeugen. Während einer Drehbewegung der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** rotieren Abschnitte des umlaufenden ferromagnetischen Elements **4** zumindest teilweise durch eine Messposition zwischen dem Messelement **3** und der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1**, wobei das Magnetfeldelement **2** ausgelegt ist, in einem in der Messposition befindlichen jeweiligen Abschnitt des umlaufenden ferromagnetischen Elements **4** eine magnetische Anisotropie zu erzeugen oder zu beeinflussen. Hierdurch kann das Magnetfeldelement **2** die magnetische Anisotropie eines jeweiligen Abschnitts des umlaufenden ferromagnetischen Elements **4**, insbesondere während einer Messung der ferromagnetischen Resonanzfrequenz des umlaufenden ferromagnetischen Elements **4** erzeugen bzw. beeinflussen.

[0104] Wie auch in **Fig. 1** wird in **Fig. 3** das Magnetfeldelement **2** nur teilweise gezeigt, um auch das Messelement **3** zu zeigen. Eine Querschnittsansicht des Magnetfeldelements **2** wird in **Fig. 4** gezeigt. Hierbei ist das Magnetfeldelement **2** beispielhaft als ein Elektromagnet ausgebildet, wobei der Elektromagnet einen im Wesentlichen U-förmigen Magnetkern und eine an dem Magnetkern angeordnete Spule aufweist. Der Elektromagnet ist jedoch nicht auf eine solche Ausbildung beschränkt. Alternativ kann das Magnetelement **2** beispielsweise als ein Permanentmagnet ausgebildet sein.

[0105] **Fig. 4** zeigt eine Querschnittsansicht der in **Fig. 3** gezeigten exemplarischen Sensorvorrichtung entlang einer Schnittebene senkrecht zu der Drehachse **A** durch das Messelement **3**, das Magnetfeldelement **2**, das umlaufende ferromagnetische Element **4** und die Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1**. Hierbei wird die umlaufende Anordnung des umlaufenden ferromagnetischen Elements **4** und eine Ausbildung des Magnetfeldelements **2**, wie bereits für **Fig. 3** oben beschrieben, deutlicher gezeigt. Insbesondere wird gezeigt, dass bei jeder Drehbewegung der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** um die Drehachse **A** ein Abschnitt des umlaufenden ferromagnetischen Elements **4** in der Messposition angeordnet ist.

[0106] **Fig. 5** zeigt eine Querschnittsansicht einer dritten exemplarischen Ausführungsform einer Sensorvorrichtung. Hierbei entsprechen die Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** mit der Drehachse **A**, das umlaufende ferromagnetische Element **4** und das Verbindungselement **5** im Wesentlichen den mit den gleichen Bezugszeichen gekennzeichneten Elementen in **Fig. 3** und **Fig. 4**.

[0107] Durch ein Anlegen eines Drehmoments an die Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** erfährt das umlaufende ferromagnetische Element **4** eine mechanische Spannung. Hierdurch wird eine magnetische Anisotropie bzw. ein magnetisches Anisotropiefeld in einem Abschnitt des umlaufenden ferromagnetischen Elements **4** entlang einer bezüglich der Drehachse **A** umlaufenden Fläche des ferromagnetischen Elements **4** gestört bzw. verändert, wodurch die ferromagnetische Resonanzfrequenz des umlaufenden ferromagnetischen Elements **4** verschoben wird.

[0108] Diese Verschiebung der ferromagnetischen Resonanzfrequenz des umlaufenden ferromagnetischen Elements **4** wird durch ein Messelement **3** einer Messeinrichtung gemessen. Das Messelement **3** ist vorzugsweise derart über der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** angeordnet, dass sich Abschnitte des umlaufenden ferromagnetischen Elements **4** bei einer Drehbewegung der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** zumindest teilweise zwischen der Drehachse **A** und dem Messelement **3** hindurchdrehen bzw. in umlaufender Richtung um die Drehachse **A** hindurchbewegen.

[0109] Ferner ist das Messelement **3** als ein umlaufendes Messelement **3** ausgebildet und ausgelegt, die Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** zumindest teilweise entlang einer bezüglich der Drehachse **A** umlaufenden Richtung zu umgeben. Insbesondere umgibt das umlaufende Messelement **3** die Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** entlang der umlaufenden Richtung zu im Wesentlichen etwa 50%. Das umlaufende Messelement **3** ist jedoch nicht auf die etwa 50% beschränkt, sondern kann die Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** entlang der umlaufenden Richtung zu im Wesentlichen weniger oder mehr als 50% umgeben. Ferner ist das umlaufende Messelement **3** derart ausgebildet, dass in dem Betriebszustand ein bezüglich der Drehachse **A** radialer Abstand zwischen dem umlaufenden Messelement **3** und dem umlaufenden ferromagnetischen Element **4** im Wesentlichen konstant ist.

[0110] Das umlaufende Messelement **3** ist kann beispielsweise als Hochfrequenz-Triplate-Stripline, insbesondere als gekrümmte Hochfrequenz-Triplate-Stripline ausgebildet sein.

[0111] Das umlaufende Messelement **3** der Messeinrichtung kann entweder direkt basierend auf der gemessenen Verschiebung der ferromagnetischen Resonanzfrequenz bzw. auf der gemessenen ferromagnetischen Resonanzfrequenz ein an die Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** angelegtes Drehmoment bestimmen, oder gemessene Daten der Verschiebung der ferromagnetischen Resonanzfrequenz bzw. der ferromagnetischen Resonanzfrequenz weiterleiten. Hierbei kann das Messelement **3** mit dem Verbindungselement **5** verbunden sein. Das Verbindungselement **5** kann vorzugsweise ausgelegt sein, Daten und/oder Strom zu übertragen. Ferner können Steuersignale an das Messelement **3** bzw. die Messeinrichtung durch das Verbindungselement **5** übermittelt werden.

[0112] Aufgrund der Ausbildung des Messelements **3** als umlaufendes Messelement **3** ist eine Erzeugung eines externen Magnetfeldes mittels eines Magnetfeldelements **2** nicht oder nur schwer möglich. Eine Messung der Verschiebung der ferromagnetischen Resonanzfrequenz bzw. der ferromagnetischen Resonanzfrequenz kann durch das umlaufende Messelement **3** beispielsweise basierend auf einer durch das angelegte Drehmoment erzeugten Formanisotropie in dem umlaufenden ferromagnetischen Element **4** erfolgen. Das umlaufende ferromagnetische Element **4** kann vorzugsweise eine geringe Breite, gemessen entlang einer Richtung parallel zu der Drehachse **A** aufweisen. Insbesondere kann die Breite des umlaufenden ferromagnetischen Elements **4** einen kleineren Wert als eine Breite des umlaufenden Messelements **3**, gemessen entlang einer Richtung parallel zu der Drehachse **A** aufweisen. Beispielsweise kann die Breite des umlaufenden ferromagnetischen Elements **4** einen Wert von maximal 90%, bevorzugt maximal 80%, weiter bevorzugt maximal 50% und/oder mindestens 10%, bevorzugt mindestens 20% des Wertes der Breite des umlaufenden Messelements **3** aufweisen.

[0113] Fig. 6 zeigt eine Seitenansicht der in Fig. 5 gezeigten exemplarischen Ausführungsform, wobei insbesondere eine relative Ausbildung des umlaufenden ferromagnetischen Elements **4** und des umlaufenden Messelements **3**, wie für Fig. 5 oben beschrieben, dargestellt ist.

[0114] Fig. 7 zeigt eine perspektivische Querschnittsansicht eines exemplarischen ferromagnetischen Elements **4**. Das ferromagnetische Element **4** ist als im Wesentlichen planar bzw. eben dargestellt, wobei diese Geometrie nicht beschränkend ist. Vielmehr kann das ferromagnetische Element **4** eine andere Form, beispielsweise eine gekrümmte Form aufweisen.

[0115] Das ferromagnetische Element **4** ist insbesondere quaderförmig mit einer quadratischen Grundfläche dargestellt.

[0116] Das ferromagnetische Element **4** weist eine ferromagnetische Schicht **4A** auf. Die ferromagnetische Schicht **4A** weist eine magnetische Anisotropie bzw. ein magnetisches Anisotropiefeld in bzw. parallel zu der Ebene des ferromagnetischen Elements **4** auf. Die Ebene des ferromagnetischen Elements **4** ist hierbei eine Ebene, welche parallel zu zumindest der ferromagnetischen Schicht **4A** ist. Alternativ oder zusätzlich kann die ferromagnetische Schicht **4A** derart ausgebildet sein, dass eine magnetische Anisotropie bzw. ein magnetisches Anisotropiefeld in bzw. parallel zu der Ebene des ferromagnetischen Elements **4** durch ein externes Magnetfeld erzeugt werden kann.

[0117] Die ferromagnetische Schicht **4A** umfasst mindestens ein ferromagnetisches Material, vorzugsweise mindestens ein weichmagnetisches ferromagnetisches Material. Das mindestens eine ferromagnetische Material kann insbesondere auf Fe-Co-Hf-N, Fe-Co-Zr-N, Fe-Co-Ta-N, Fe-Co-B und/oder Fe-Co-B-Si basierende Materialien umfassen. Ferner können hochmagnetostruktive Seltene-Erd-Elemente (z.B. Tb, Dy, Sm) als Legierungszusatz eine Dämpfung der ferromagnetischen Resonanz der ferromagnetischen Schicht **4A** bzw. des mindestens einen ferromagnetischen Elements **4** erhöhen.

[0118] Das ferromagnetische Element **4** weist ferner eine Zwischenschicht **4B** auf, welche zwischen der ferromagnetischen Schicht **4A** und einem Substrat **4C** und/oder der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** angeordnet ist. Die Zwischenschicht **4B** ist ausgelegt, die ferromagnetische Schicht **4A** von dem Substrat **4C** und/oder der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** zu isolieren und/oder magnetisch zu entkoppeln. Vorzugsweise weist die Zwischenschicht **4B** entlang der Ebene des ferromagnetischen Elements **4** im Wesentlichen die gleichen Dimensionen bzw. Ausmaße wie die ferromagnetische Schicht **4A** auf, wodurch eine gleichmäßige magnetische Entkopplung ermöglicht wird. Die Zwischenschicht **4B** ist jedoch nicht auf solche Ausmaße beschränkt, sondern kann beispielsweise zumindest teilweise größere Ausmaße als die ferromagnetische Schicht **4A** aufweisen, wodurch magnetische Randeffekte entlang eines Randes der ferromagnetischen Schicht **4A** vermieden bzw. reduziert werden können.

[0119] Ferner kann die Zwischenschicht **4B** ausgebildet sein, um die ferromagnetische Schicht **4A** chemisch und/oder physikalisch von dem Substrat **4C** und/oder der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** zu isolieren. Hierdurch können beispielsweise chemische Reaktionen und/oder Diffusionsvorgänge zwischen der ferromagnetischen Schicht **4A** und dem Substrat **4C** und/oder der Drehmoment-

Übertragungseinrichtung **1** vermieden bzw. reduziert werden. Ferner kann die Zwischenschicht **4B** insbesondere ausgebildet sein, um als Haftvermittler zwischen der ferromagnetischen Schicht **4A** und dem Substrat **4C** zu wirken. Die Zwischenschicht **4B** kann hierbei insbesondere Si_3N_4 und/oder AlN und/oder Schichtmaterialien mit einem hohen spezifischen Widerstand (z.B. TiN und/oder Ti-Al-N und/oder TaN) umfassen.

[0120] Das ferromagnetische Element **4** weist ferner ein Substrat **4C** auf, welches zwischen der ferromagnetischen Schicht **4A** und der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1**, insbesondere zwischen der Zwischenschicht **4B** und der Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** angeordnet ist. Das Substrat **4C** kann hierbei insbesondere, wie oben beschrieben, als Trägerplättchen ausgebildet sein. Das Substrat **4C** kann insbesondere Glas bzw. Siliziumoxid, Silizium, Metalle, Kunststoffe und/oder Kompositmaterialien umfassen.

[0121] Das Substrat **4C** kann hierbei als eine Grundlage des ferromagnetischen Elements **4** während dessen Herstellungsprozesses ausgebildet sein, wobei eine Zwischenschicht **4B**, falls diese benötigt wird, und/oder die ferromagnetische Schicht **4A** auf dem Substrat **4C** aufgetragen werden.

[0122] Das Substrat **4C** kann ferner an einer der ferromagnetischen Schicht **4A** zugewandten Seite eine andere chemische Zusammensetzung aufweisen als an einer der ferromagnetischen Schicht **4A** abgewandten Seite. Beispielsweise kann das Substrat **4C** aus Silizium ausgebildet sein, wobei die der ferromagnetischen Schicht **4A** zugewandte Seite eine Siliziumoxidschicht aufweist. Die Siliziumoxidschicht kann vorzugsweise durch thermische Oxidation des Substrats **4C** erzeugt werden, wobei die Siliziumoxidschicht eine gleiche Funktion als die Zwischenschicht **4B** erfüllen kann. Daher kann in Abhängigkeit von dem verwendeten Substrat **4C** von der Verwendung bzw. von dem Vorsehen einer separaten Zwischenschicht **4B** abgesehen werden.

[0123] Fig. 8 zeigt eine schematische Darstellung eines Verspannens einer Drehmoment-Übertragungseinrichtung und eines daran angeordneten ferromagnetischen Elements. Hierbei wird insbesondere auf die obige Beschreibung verwiesen, insbesondere bezüglich Gleichungen (1) bis (12), worin der theoretische Hintergrund des Verspannens näher erläutert wird.

[0124] Fig. 9 zeigt sechs Messreihen der ferromagnetischen Resonanzfrequenz für das in Beispiel 2 hergestellte ferromagnetische Element, wobei die Ermittlung jeder Messreihe bei einem anderen angelegten Drehmoment an die Drehmoment-Übertragungseinrichtung erfolgt ist. Die ferromagnetische Reso-

nanzfrequenz kann hierbei durch den S_{11} Parameterverlauf (Minimum von S_{11}) der Messeinrichtung bzw. durch einen Imaginärteil (Lorentz-kurvenförmigen Resonanzpeakverlauf) der frequenzabhängigen Permeabilität bestimmt werden, welche anhand der S_{11} Daten berechnet bzw. ausgewertet werden kann. Insbesondere ist zu erkennen, dass mit steigendem angelegten Drehmoment eine Verschiebung der ferromagnetischen Referenzfrequenz bewirkt wird.

[0125] Fig. 10 zeigt eine graphische Darstellung einer ferromagnetischen cut-off Resonanzfrequenz der in Fig. 9 gezeigten Messreihen. Hierbei ist zu erkennen, dass ab einem angelegten Drehmoment von ungefähr 20Nm die ferromagnetische cut-off Resonanzfrequenz im Wesentlichen linear mit steigendem angelegten Drehmoment ansteigt.

[0126] Fig. 11 zeigt eine graphische Darstellung einer Vielzahl von Messreihen des Streuungsparameters S_{11} in Abhängigkeit von der Distanz zwischen einem Messelement und einem ferromagnetischen Element in der Messposition. Hierbei nimmt eine Signalstärke der gemessenen ferromagnetischen Resonanzfrequenz mit abnehmender Distanz zu.

[0127] Fig. 12 zeigt eine graphische Darstellung einer Vielzahl von Messreihen der ferromagnetischen Resonanzfrequenz in Abhängigkeit von dem Messwinkel zwischen einem Messelement und einem ferromagnetischen Element in der Messposition. Hierbei ist insbesondere zu erkennen, dass eine maximale bzw. optimale Signalstärke der gemessenen ferromagnetischen Resonanz bei einem Messwinkel zwischen 12° und 16° erreicht wird.

[0128] Fig. 13A und Fig. 13B zeigen eine beispielhafte experimentale Messeinrichtung zur Bestimmung einer ferromagnetischen Resonanzfrequenz, sowie eine Nahansicht der beispielhaften Sensorvorrichtung. Die Drehmoment-Übertragungseinrichtung **1** bzw. die Welle mit einer beispielhaften Sensorvorrichtung wird an einem Ende der Welle mittels Klemmbacken fixiert, während das andere Ende der Welle drehbar an einem Endstück gelagert wird. Mittels eines Hebels wird ein Drehmoment an die Welle angelegt, wobei das angelegte Drehmoment eine Verspannung des ferromagnetischen Elements **4** bewirkt. Über ein Messelement **3**, hierbei eine Hochfrequenz-Triplate-Stripline (siehe Fig. 13B) wird die ferromagnetische Resonanzfrequenz bzw. die Verschiebung der ferromagnetischen Resonanzfrequenz mithilfe eines VNA (Vector Network Analyser) gemessen bzw. ermittelt. Das in Fig. 13B gezeigte Messelement **3** kann insbesondere in einem Frequenzbereich von 50MHz bis 5GHz verwendet werden. Die Geometriemaße des Messelements **3**, beispielsweise der in Fig. 13B gezeigten Hochfrequenz-Triplate-Stripline, richten sich insbesondere nach dessen Impedanz. Diese wurde für die Hoch-

frequenz-Triplate-Stripline aus **Fig. 13B** insbesondere auf 50 Ohm eingestellt. Hieraus ergibt sich ein Abstand zwischen Ground-Platte und Signalleitung der Hochfrequenz-Triplate-Stripline von 0.7 mm bei einer Länge der Hochfrequenz-Triplate-Stripline von 10 mm.

[0129] Fig. 14 zeigt einen Vergleich von Messreihen der ferromagnetischen Resonanzfrequenz. In **Fig. 14A** sind Messreihen bei einem angelegten Drehmoment von jeweils 0Nm, 20Nm, 40Nm, 60 Nm, 80Nm und 100Nm eines wie in Beispiel 1 hergestellten ferromagnetischen Elements dargestellt. In **Fig. 14B** sind Messreihen bei einem angelegten Drehmoment von jeweils 0Nm, 20Nm, 40Nm, 60Nm, 80Nm und 100Nm eines wie in Beispiel 2 hergestellten ferromagnetischen Elements dargestellt. Die Messreihen des in Beispiel 2 hergestellten ferromagnetischen Elements sind erkennbar glatter bzw. weisen ein besseres Signal-Rausch Verhältnis auf und zeigen eine erhöhte Signalstärke im Vergleich zu den in **Fig. 14A** gezeigten Messreihen. Dies ist insbesondere auf die größere Dicke des in Beispiel 2 hergestellten ferromagnetischen Elements, und daher auf dessen größeres magnetisches Volumen zurückzuführen.

[0130] Fig. 15 zeigt einen Vergleich der theoretischen Werte der ferromagnetischen Resonanzfrequenz auf Basis von Gleichung 13 mit Gleichung 12 (ferromagnetische Resonanzfrequenz ohne Berücksichtigung einer imperfekten Übertragung des Drehmoments durch die Verbindung zwischen dem ferromagnetischen Element und der Drehmoment-Übertragungseinrichtung) und von Gleichung 13 mit Gleichung 14 (ferromagnetische Resonanzfrequenz mit Berücksichtigung einer imperfekten Übertragung des Drehmoments durch die Verbindung zwischen dem ferromagnetischen Element und der Drehmoment-Übertragungseinrichtung). Ein Vergleich mit gemessenen Werten der ferromagnetischen Resonanzfrequenz der in Beispielen 1 und 2 hergestellten ferromagnetischen Elemente zeigt, dass eine theoretische ferromagnetische Resonanzfrequenz gemäß Gleichung (13) mit Gleichung (14) die gemessenen Werte besser wiedergibt als eine theoretische ferromagnetische Resonanzfrequenz gemäß Gleichung (13) mit Gleichung (12).

[0131] Fig. 16 zeigt eine schematische Darstellung einer beispielhaften Sensorvorrichtung an einer Welle. **Fig. 16** zeigt hierbei insbesondere eine Vielzahl von ferromagnetischen Elementen **4**, welche linear parallel zu der Drehachse **A** der Welle angeordnet sind. Die ferromagnetischen Elemente **4** können hierbei in gleichen oder unterschiedlichen Abständen zueinander angeordnet sein. Hierdurch kann beispielsweise die Sensorvorrichtung entlang der Welle verschoben werden, um die Messung der ferromagnetischen Resonanzfrequenz an einer Vielzahl

von ferromagnetischen Elementen **4** zu ermöglichen. Insbesondere können hierdurch zusätzlich oder alternativ eine Vielzahl von Sensorvorrichtungen an der Welle angeordnet werden, um die ferromagnetische Resonanzfrequenz in einer Vielzahl der ferromagnetischen Elemente **4** zu ermitteln bzw. zu messen. Hierdurch kann beispielsweise mittels eines Vergleichs der gemessenen Werte eine Zuverlässigkeit des ermittelten Drehmoments erhöht werden, und/oder möglicherweise fehlerhafte ferromagnetische Elemente **4** und/oder möglicherweise fehlerhafte Messelemente **3** festzustellen und/oder zu identifizieren.

[0132] Fig. 17 zeigt einen Screenshot einer Messreihe der ferromagnetischen Resonanzfrequenz gemäß der in **Fig. 16** gezeigten beispielhaften Sensorvorrichtung.

[0133] Die in der Beschreibung und in den Figuren erläuterten und dargestellten exemplarischen Ausführungsformen sind nicht als beschränkend zu interpretieren. Vielmehr kann eine Sensorvorrichtung und/oder ein Verfahren eine beliebige Kombination aus den in der Beschreibung genannten und den in den Figuren gezeigten Merkmalen aufweisen.

Bezugszeichenliste

1	Drehmoment-Übertragungseinrichtung
2	Magnetfeldelement
3	Messelement
4	Ferromagnetisches Element
4A	Ferromagnetische Schicht
4B	Zwischenschicht
4C	Substrat
5	Verbindungselement
A	Drehachse einer Drehmoment-Übertragungseinrichtung

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- US 2014159710 A1 [0004]
- WO 2016/162028 A1 [0005]

Patentansprüche**1. Sensorvorrichtung, umfassend:**

mindestens ein ferromagnetisches Element (4), welches in einem Betriebszustand an einer Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) anordenbar ist; und

eine Messeinrichtung, umfassend mindestens ein Messelement (3), wobei jedes Messelement (3) ausgelegt ist, eine ferromagnetische Resonanzfrequenz zumindest eines ferromagnetischen Elements (4) zu messen,

wobei die Messeinrichtung ausgelegt ist, ein Drehmoment der Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) basierend auf einer Verschiebung der gemessenen ferromagnetischen Resonanzfrequenz zu bestimmen.

2. Sensorvorrichtung nach Anspruch 1, wobei das mindestens eine ferromagnetische Element (4) mindestens eine ferromagnetische Schicht (4A) aufweist.

3. Sensorvorrichtung nach Anspruch 2, wobei die mindestens eine ferromagnetische Schicht (4A) eine Dicke von maximal etwa 500 µm, bevorzugt maximal etwa 1 µm und/oder minimal etwa 50 nm, bevorzugt minimal etwa 150 nm aufweist; und/oder wobei die Dicke der mindestens einen ferromagnetischen Schicht (4A) und/oder eine Dicke des mindestens einen ferromagnetischen Elements (4) im Wesentlichen konstant sind.

4. Sensorvorrichtung nach einem der Ansprüche 2 oder 3, wobei das mindestens eine ferromagnetische Element (4) mindestens eine Zwischenschicht (4B) aufweist, welche in dem Betriebszustand zwischen der mindestens einen ferromagnetischen Schicht (4A) und der Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) angeordnet ist, wobei die mindestens eine Zwischenschicht (4B) ausgelegt ist, um in dem Betriebszustand die mindestens eine ferromagnetische Schicht (4A) und die Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) magnetisch zu entkoppeln.

5. Sensorvorrichtung nach Anspruch 4, wobei die mindestens eine Zwischenschicht (4B) eine Dicke von maximal etwa 500 µm, bevorzugt maximal etwa 5 µm und/oder minimal etwa 200 nm, bevorzugt minimal etwa 750 nm aufweist.

6. Sensorvorrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 5, wobei das mindestens eine ferromagnetische Element (4) mindestens ein Substrat (4C) aufweist, welches in dem Betriebszustand zwischen der mindestens einen ferromagnetischen Schicht (4A) und der Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) angeordnet ist.

7. Sensorvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei das mindestens eine ferromagnetische

Element (4) in dem Betriebszustand durch Verkleben, Verschweißen, Verpressen, chemisches Reagieren und/oder Verrasten mit der Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) verbindbar ist, um eine durch das Drehmoment bewirkte mechanische Spannung von der Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) auf das mindestens eine ferromagnetische Element (4) zu übertragen.

8. Sensorvorrichtung nach Anspruch 7, wobei die Messeinrichtung ausgelegt ist, das Drehmoment der Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) basierend auf einer Verschiebung der gemessenen ferromagnetischen Resonanzfrequenz zu bestimmen, wobei eine nicht perfekte Übertragung der mechanischen Spannung durch die Verbindung von der Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) und des mindestens einen ferromagnetischen Elements (4) berücksichtigt ist.

9. Sensorvorrichtung nach Anspruch 8, wobei die Messeinrichtung ausgelegt ist, in einem Kalibrierungsschritt die nicht perfekte Übertragung der mechanischen Spannung durch die Verbindung von der Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) und des mindestens einen ferromagnetischen Elements (4) zu bestimmen.

10. Sensorvorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei das mindestens eine Messelement (3) ausgelegt ist, die ferromagnetische Resonanzfrequenz des mindestens einen ferromagnetischen Elements (4) mittels eines Frequenzsweeps zu messen bzw. zu ermitteln.

11. Sensorvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei in dem Betriebszustand ein kleinster Abstand zwischen mindestens einem Messelement (3) und mindestens einem ferromagnetischen Element (4) einen Wert von maximal etwa 1500 µm, bevorzugt maximal etwa 500 µm, ferner bevorzugt maximal etwa 300 µm, am meisten bevorzugt maximal etwa 150 µm aufweist.

12. Sensorvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 11, wobei während einer Messung der ferromagnetischen Resonanzfrequenz zumindest eines ferromagnetischen Elements (4) ein Messwinkel zwischen einer Oberfläche des mindestens einen Messelements (3) und des mindestens einen ferromagnetischen Elements (4) einen Wert von mindestens etwa 0°, bevorzugt mindestens etwa 12° und maximal etwa 28°, bevorzugt maximal etwa 16° aufweist.

13. Sensorvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 12, wobei die Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) als eine Welle ausgebildet ist.

14. Sensorvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13, wobei mindestens ein Messelement (3)

der mindestens einen Messelemente (3) als Hochfrequenz-Triplate-Stripline ausgebildet ist, und, optional, .

wobei die Hochfrequenz-Triplate-Stripline ausgelegt ist, in einem Reflexionsmodus einer definiert geführten elektromagnetischen Hochfrequenz-Welle betrieben zu werden, und, optional,

wobei die Hochfrequenz-Triplate-Stripline ausgelegt ist, in dem Reflexionsmodus zur Messung der ferromagnetischen Resonanzfrequenz mindestens ein Reflexionssignal zu empfangen bzw. zu messen, wobei das mindestens eine Reflexionssignal bei einer festen Messfrequenz ermittelbar bzw. messbar ist.

15. Sensorvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 14, wobei das mindestens eine Messelement (3) im Betriebszustand im Wesentlichen entlang einer Messebene angeordnet ist, wobei die Messebene im Wesentlichen tangential zu einer Oberfläche der Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) ausgebildet ist; oder wobei das mindestens eine Messelement (3) im Betriebszustand im Wesentlichen entlang einer umlaufenden Richtung bezüglich einer Drehachse der Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) die Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) zumindest teilweise umgibt.

16. Sensorvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 15, wobei das mindestens eine ferromagnetische Element (4) als mindestens ein umlaufendes ferromagnetisches Element (4) ausgebildet ist, wobei das mindestens eine umlaufende ferromagnetische Element (4) in dem Betriebszustand die Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) entlang einer umlaufenden Richtung bezüglich einer Drehachse der Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) im Wesentlichen vollständig umgibt.

17. Sensorvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 15, wobei das mindestens eine ferromagnetische Element (4) mindestens zwei ferromagnetische Elemente (4) umfasst, wobei die mindestens zwei ferromagnetischen Elemente (4) in umlaufender Richtung bezüglich einer Drehachse der Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) an der Drehmoment-Übertragungseinrichtung angeordnet sind, wobei:

- mindestens eines der mindestens zwei ferromagnetischen Elemente (4) im Wesentlichen planar ausgebildet ist und in dem Betriebszustand im Wesentlichen parallel zu einer tangentialen Ebene der Oberfläche der Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) ausgerichtet ist; und/oder

- mindestens eines der mindestens zwei ferromagnetischen Elemente (4) als ein teilweise umlaufendes ferromagnetisches Element (4) ausgebildet ist und in dem Betriebszustand die Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) entlang einer umlaufenden Richtung bezüglich einer Drehachse der Drehmo-

ment-Übertragungseinrichtung (1) zumindest teilweise umgibt

18. Sensorvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 17, wobei das mindestens eine ferromagnetische Element (4) eine magnetische Anisotropie aufweist.

19. Sensorvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 18, wobei die Messeinrichtung ferner mindestens ein Magnetfeldelement (2) umfasst, wobei das mindestens eine Magnetfeldelement (2) ausgelegt ist, in dem Betriebszustand ein Magnetfeld zu erzeugen, um in dem mindestens einen ferromagnetischen Element (4) eine magnetische Anisotropie zu erzeugen oder zu beeinflussen.

20. Verfahren zur Bestimmung eines Drehmoments einer Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1), umfassend:

Anordnen von mindestens einem ferromagnetischen Element (4) an der Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1);

Messen einer ferromagnetischen Resonanzfrequenz des zumindest einen ferromagnetischen Elements (4); und

Bestimmen des Drehmoments der Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) basierend auf einer Verschiebung der gemessenen ferromagnetischen Resonanzfrequenz.

21. Verfahren nach Anspruch 20, wobei das Anordnen des mindestens einen ferromagnetischen Elements (4) ein Verkleben, Verschweißen, Verpressen, chemisches Reagieren und/oder Verrasten des mindestens einen ferromagnetischen Elements (4) mit der Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) umfasst.

22. Verfahren nach Anspruch 21, wobei das Bestimmen des Drehmoments der Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) ein Berücksichtigen einer nicht perfekten Übertragung von mechanischer Spannung durch eine Verbindung von der Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) und des mindestens einen ferromagnetischen Elements (4) umfasst, und, optional,

wobei das Verfahren ferner ein Bestimmen der nicht perfekten Übertragung der mechanischen Spannung durch die Verbindung von der Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) und des mindestens einen ferromagnetischen Elements (4) umfasst.

23. Verfahren nach einem der Ansprüche 20 bis 22, wobei das Verfahren ein Erzeugen mindestens einer ferromagnetischen Schicht (4A) umfasst.

24. Verfahren nach Anspruch 23, wobei Verfahren ferner umfasst:

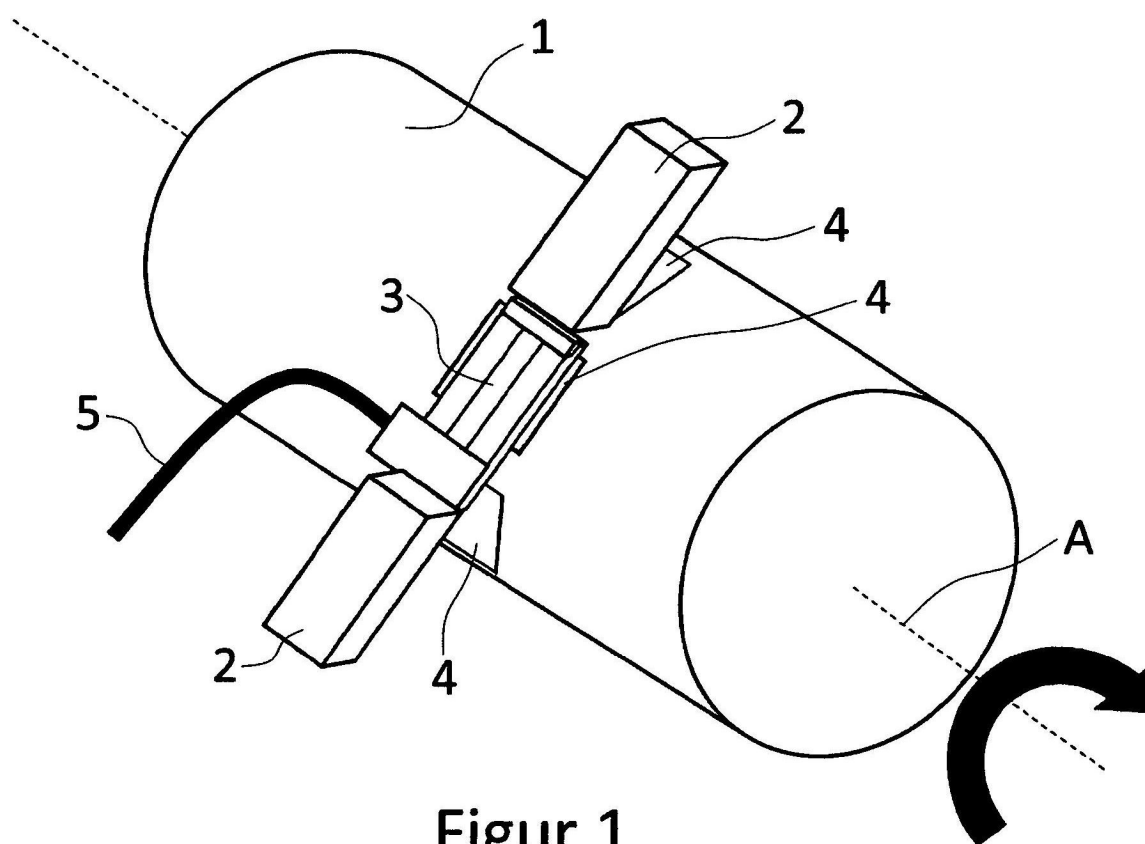
Erzeugen eines Substrats (4C);

Erzeugen einer Zwischenschicht (4B) auf dem Substrat (4C), wobei eine ferromagnetische Schicht (4A) der mindestens einen ferromagnetischen Schicht (4A) auf der Zwischenschicht (4B) erzeugt wird, wobei die Zwischenschicht (4B) ausgelegt ist, in einem Betriebszustand der Sensorvorrichtung die mindestens eine ferromagnetische Schicht (4A) und die Drehmoment-Übertragungseinrichtung (1) magnetisch zu entkoppeln.

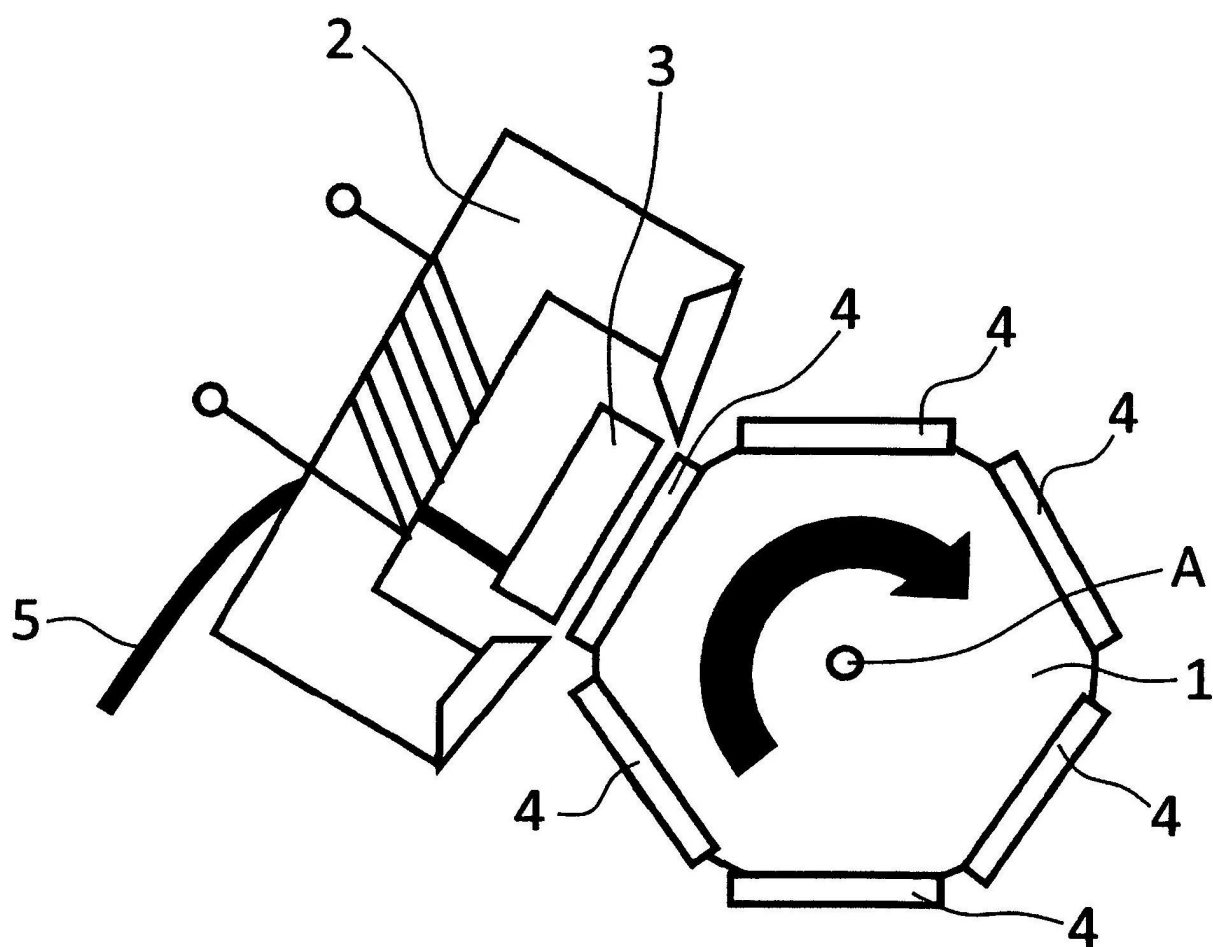
25. Verfahren nach einem der Ansprüche 20 bis 24, wobei das Verfahren ferner umfasst:
Glühen des mindestens einen ferromagnetischen Elements (4) in einem externen statischen Magnetfeld zur Erzeugung einer magnetischen Anisotropie des mindestens einen ferromagnetischen Elements (4).

Es folgen 18 Seiten Zeichnungen

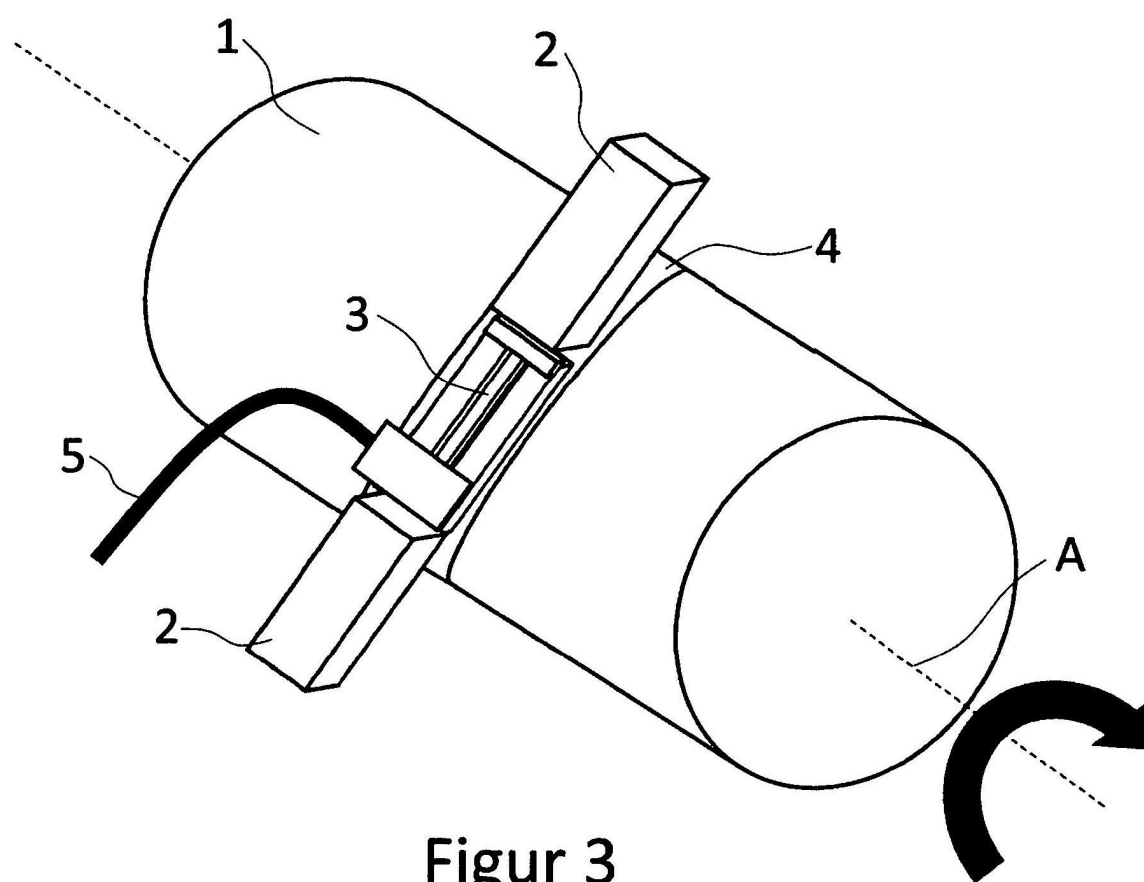
Anhängende Zeichnungen



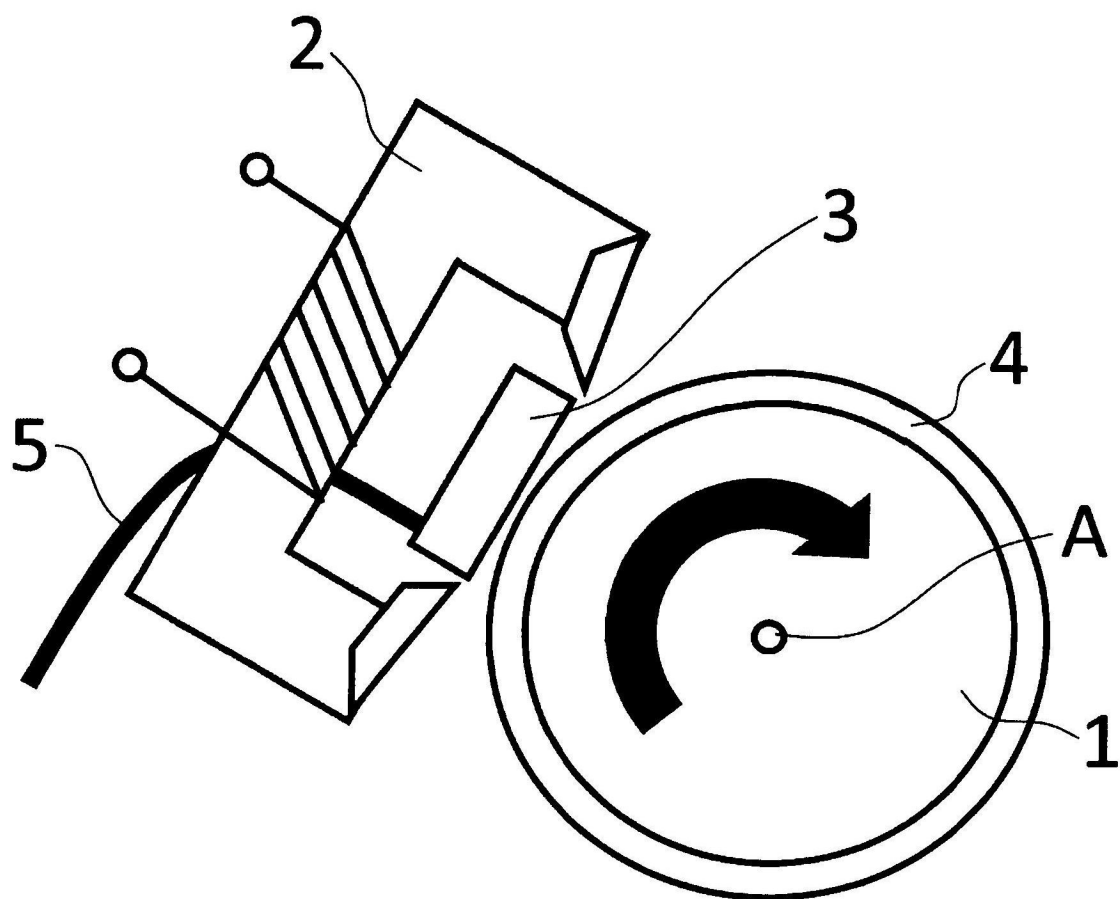
Figur 1



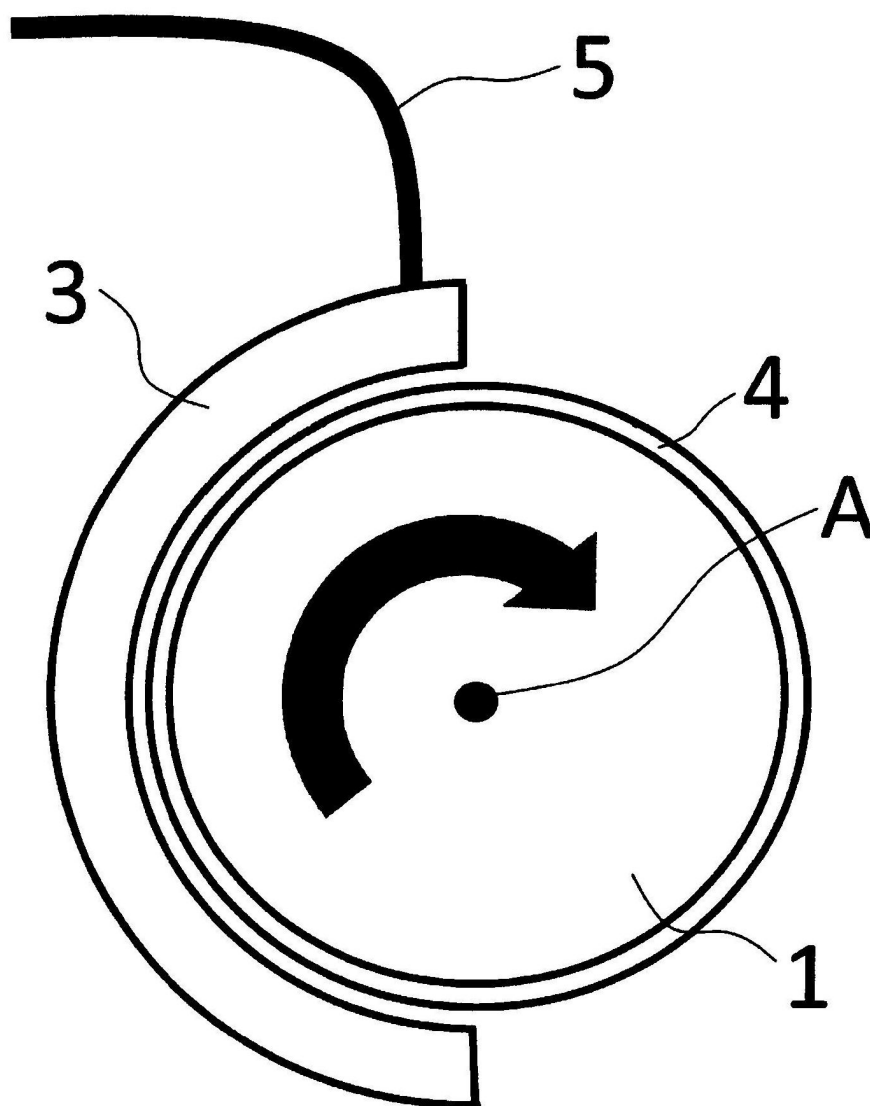
Figur 2



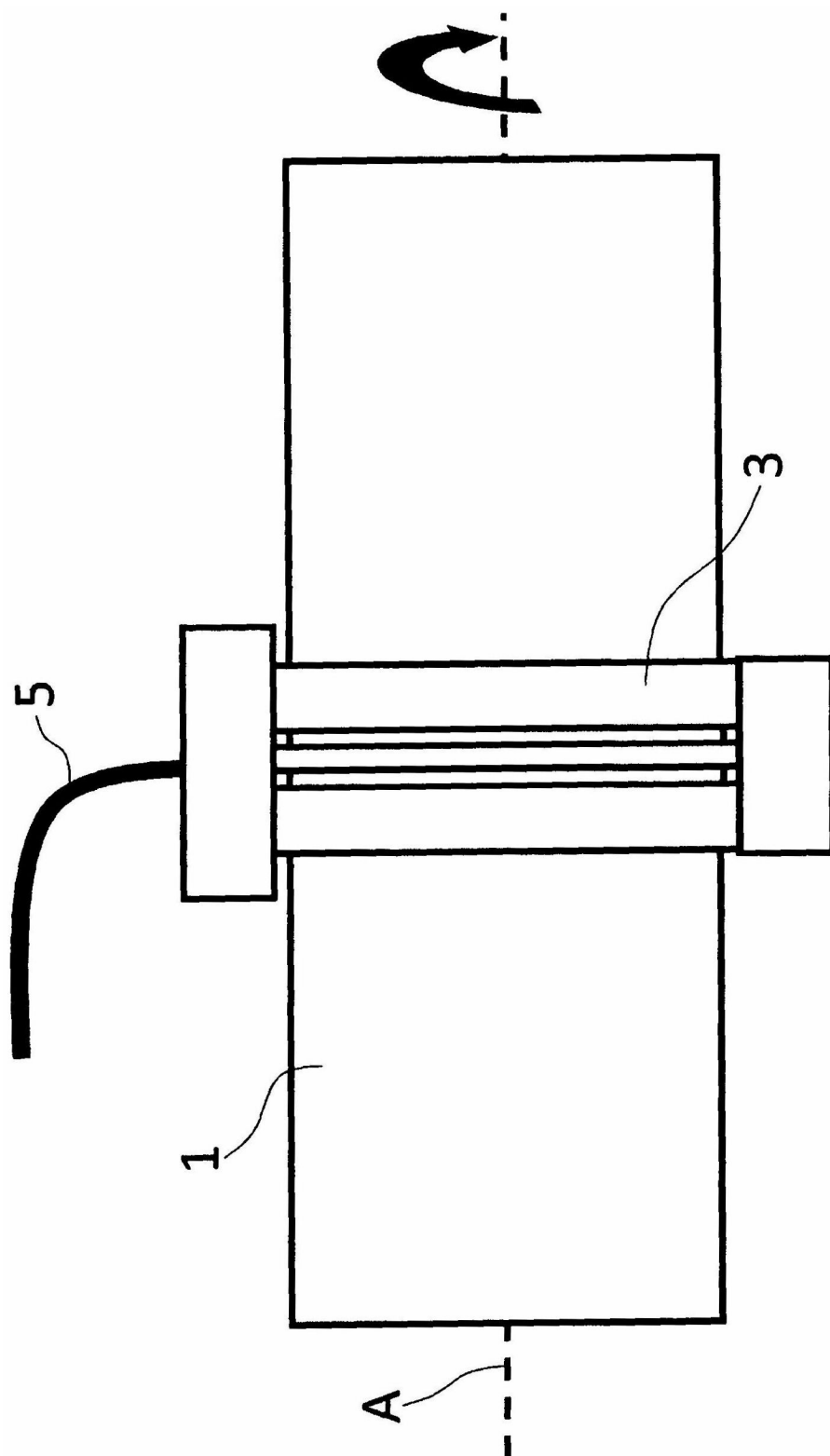
Figur 3



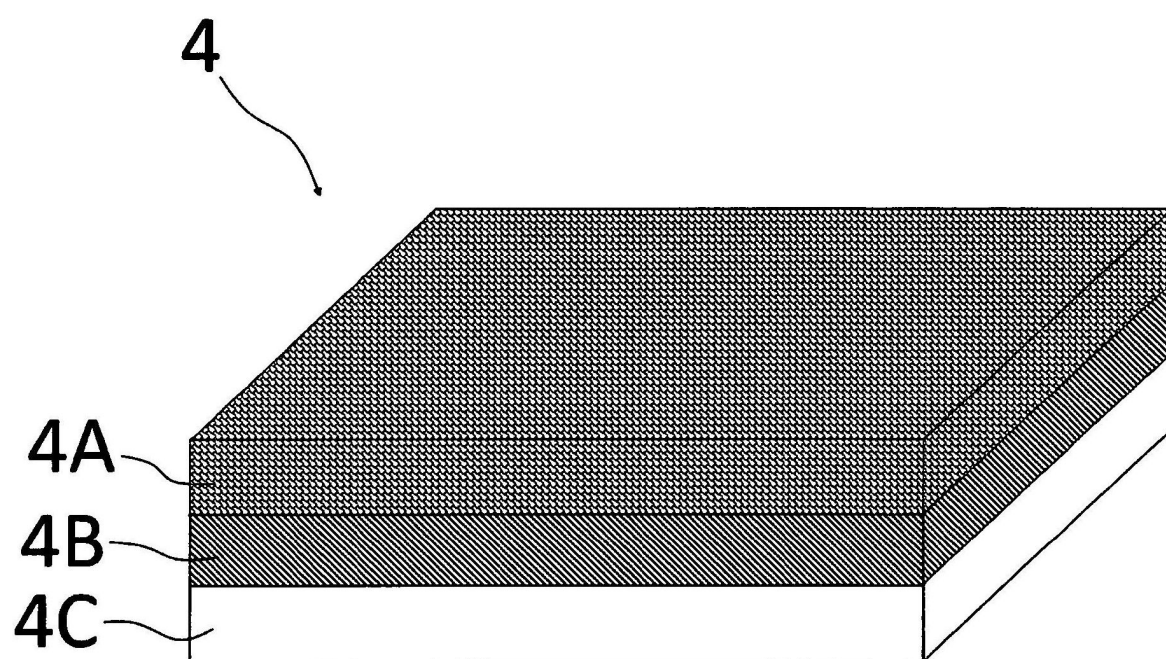
Figur 4



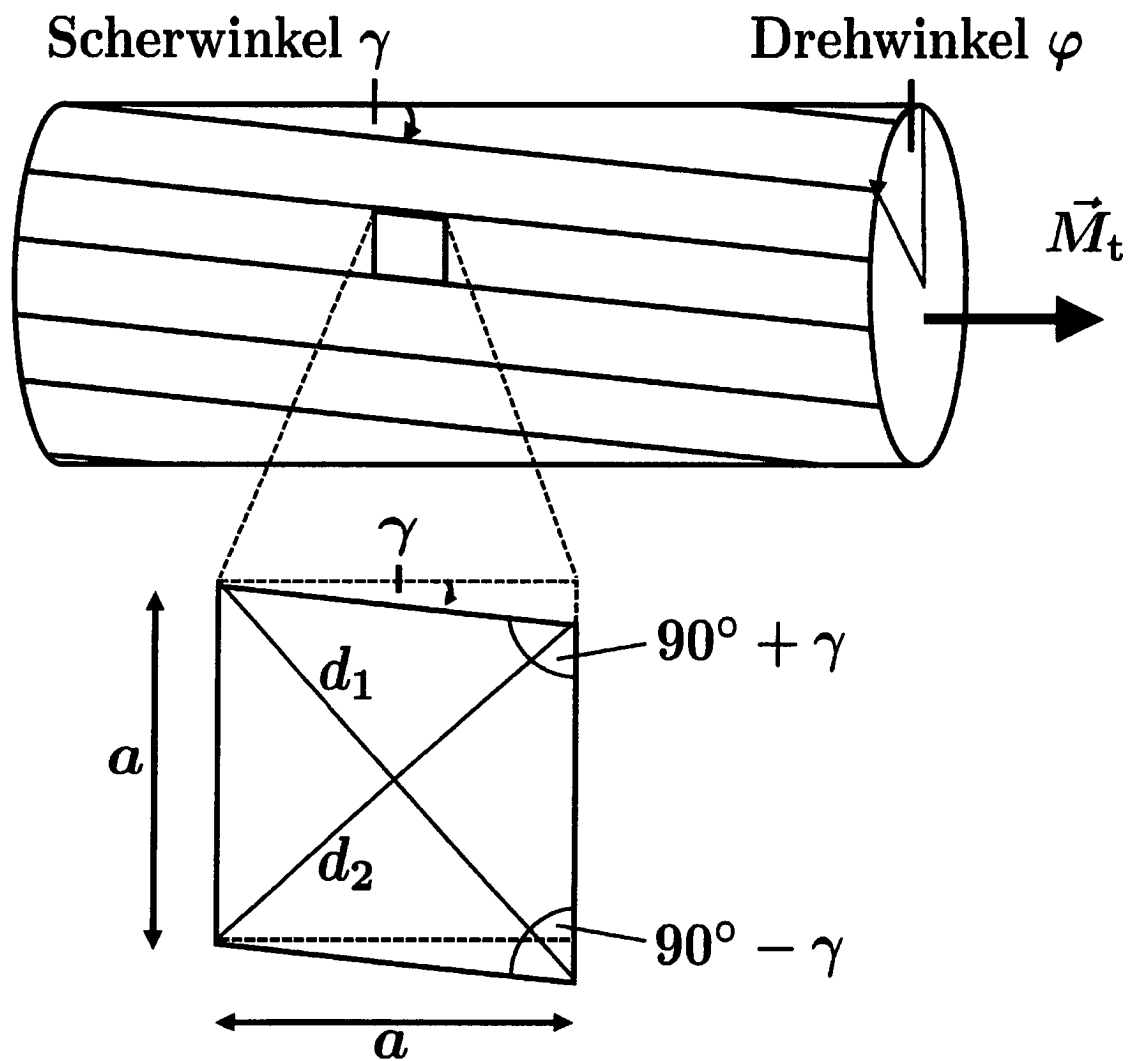
Figur 5



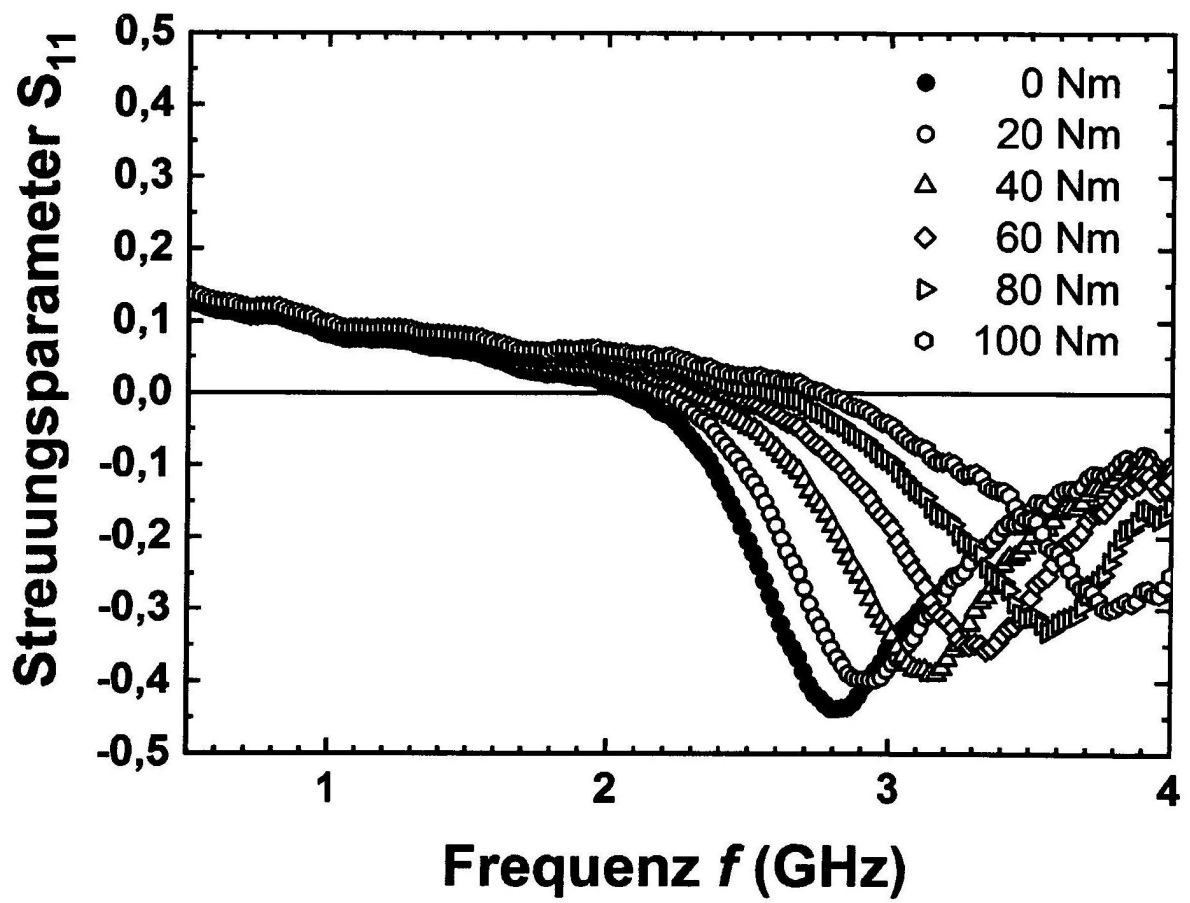
Figur 6



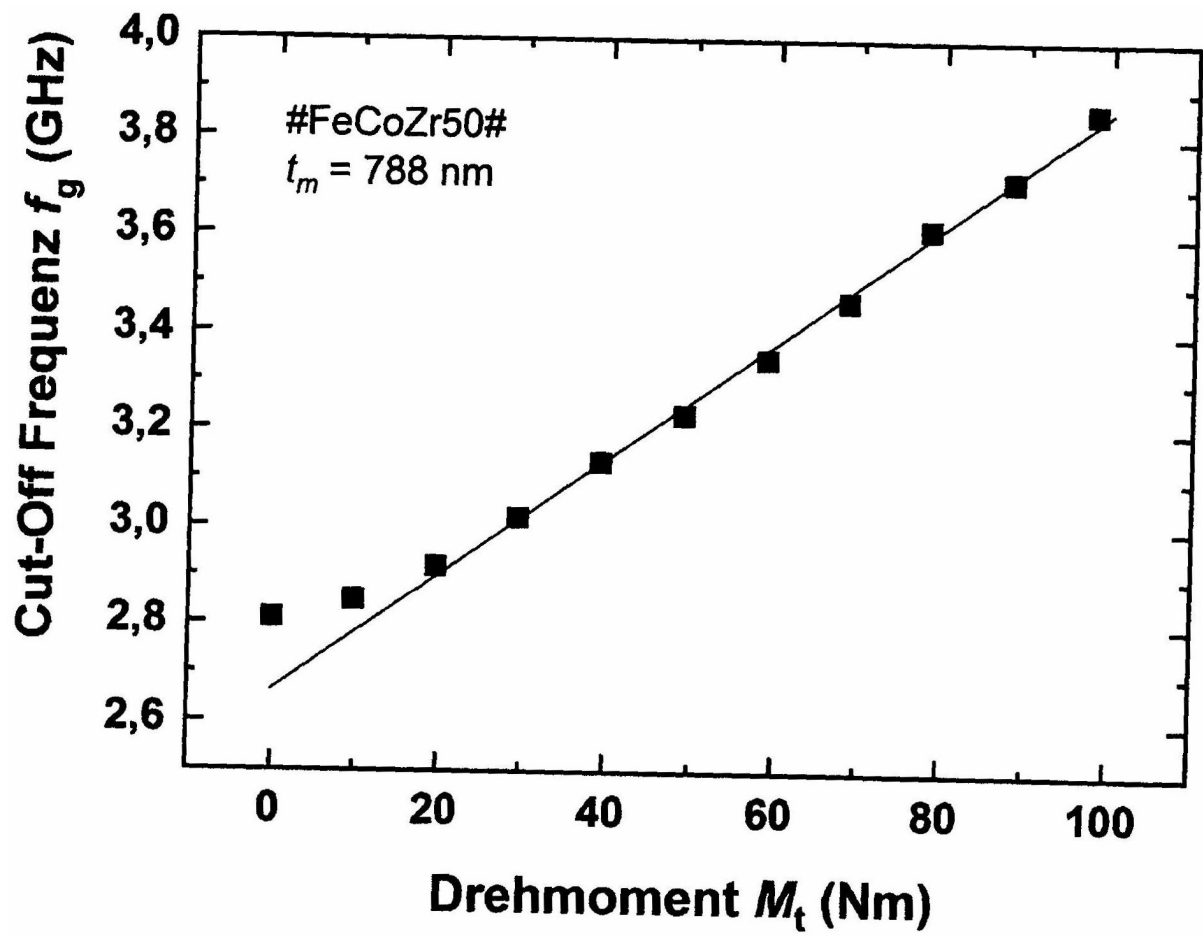
Figur 7



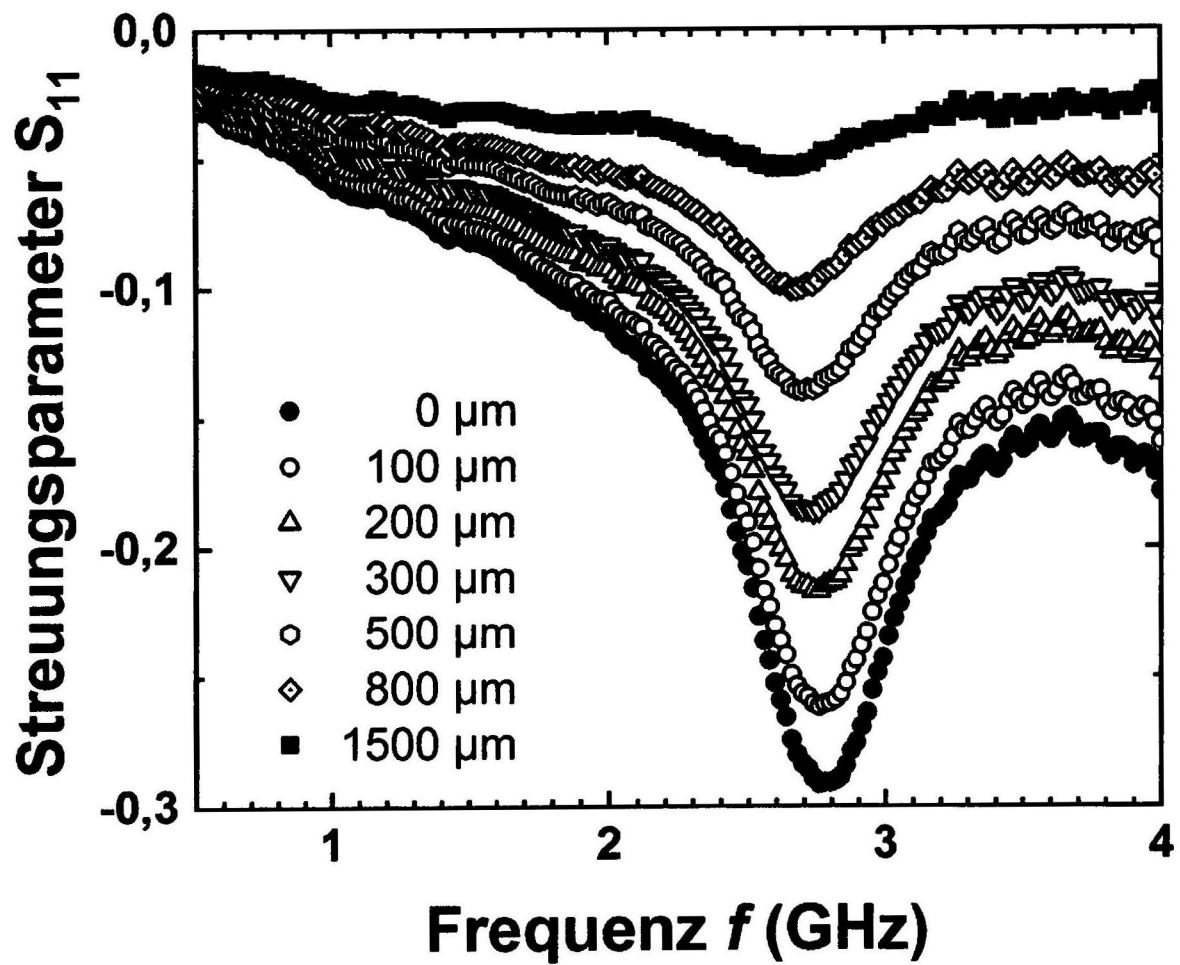
Figur 8



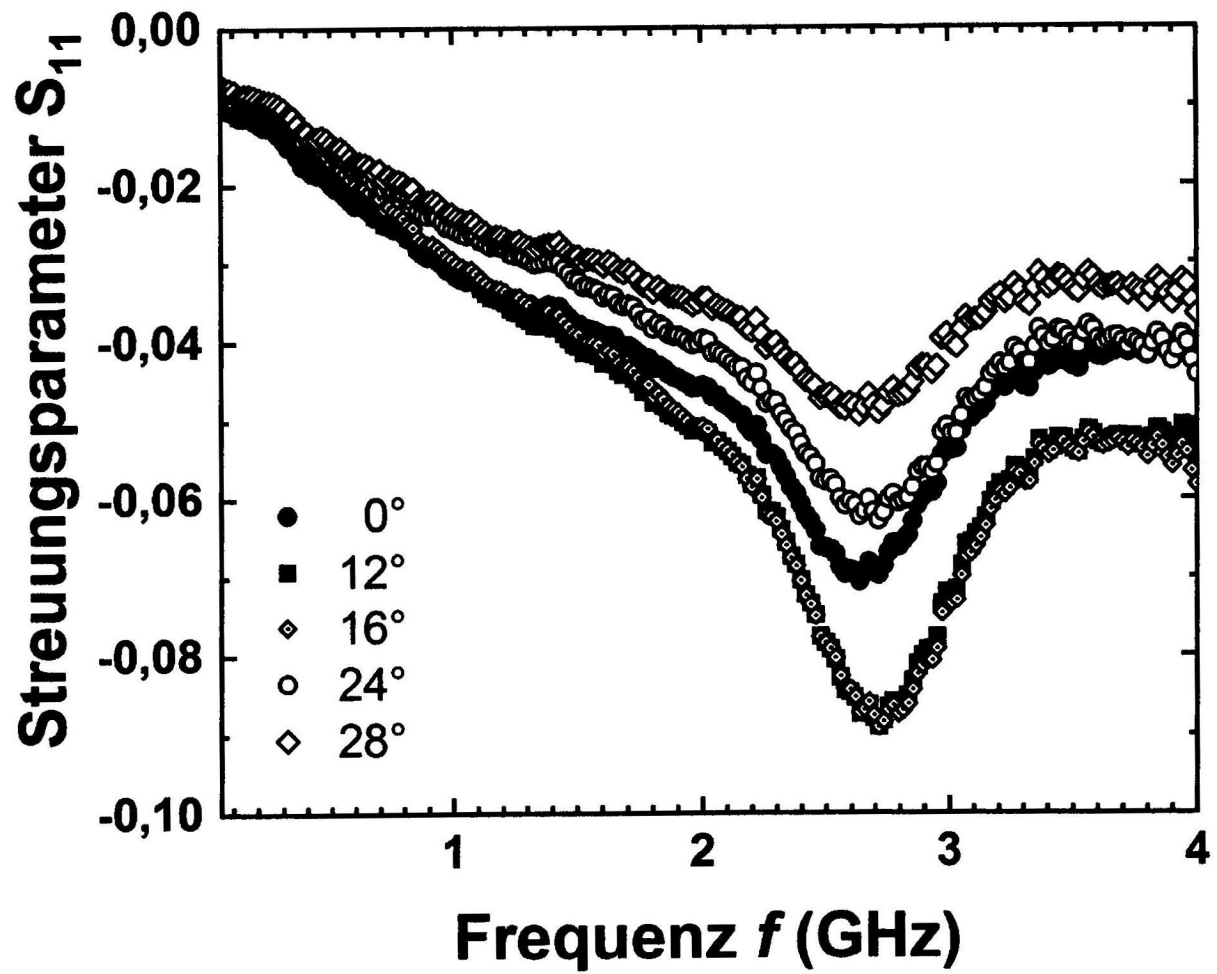
Figur 9



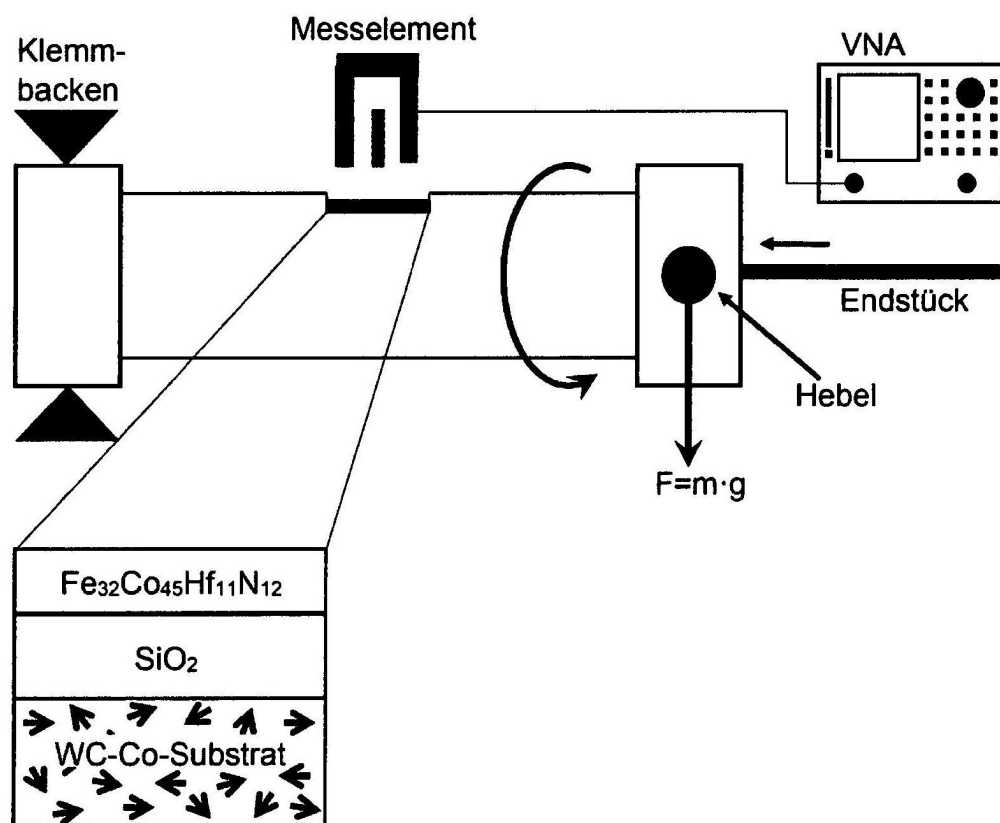
Figur 10



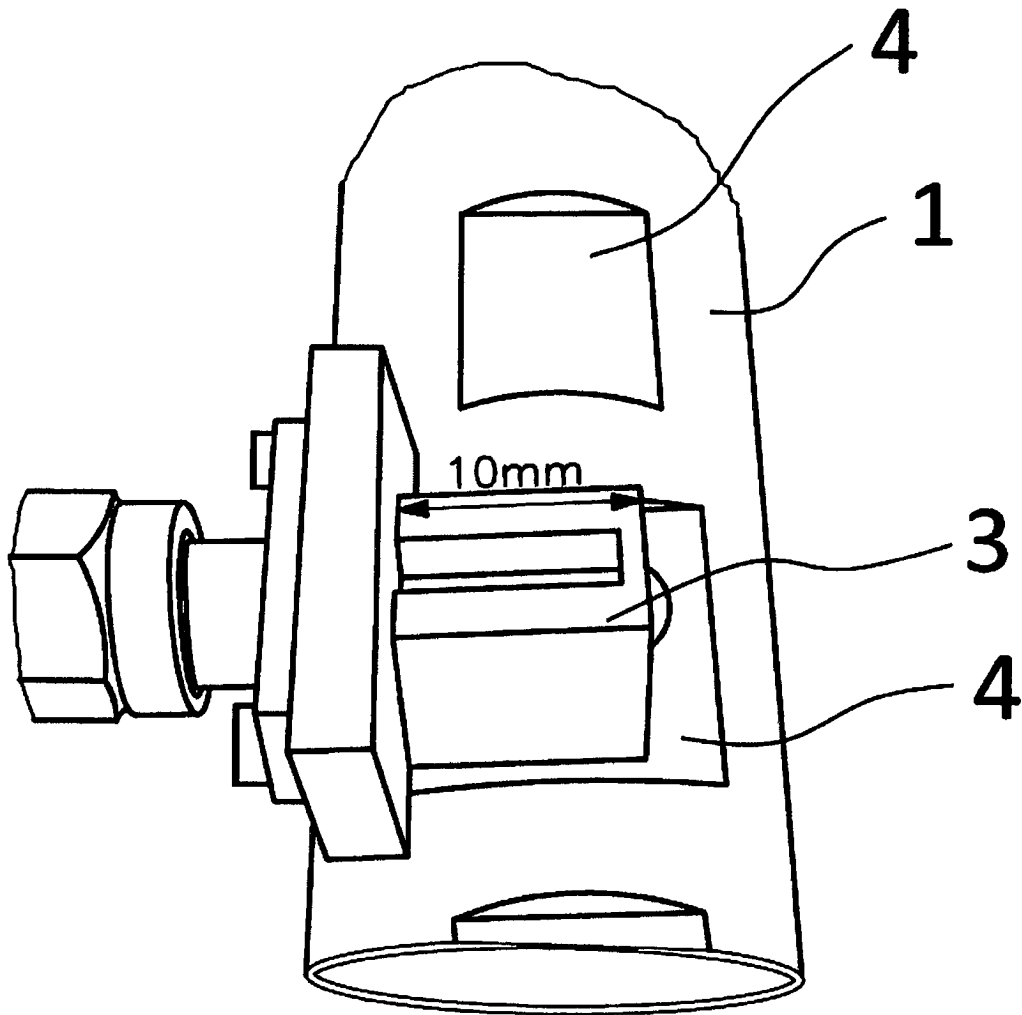
Figur 11



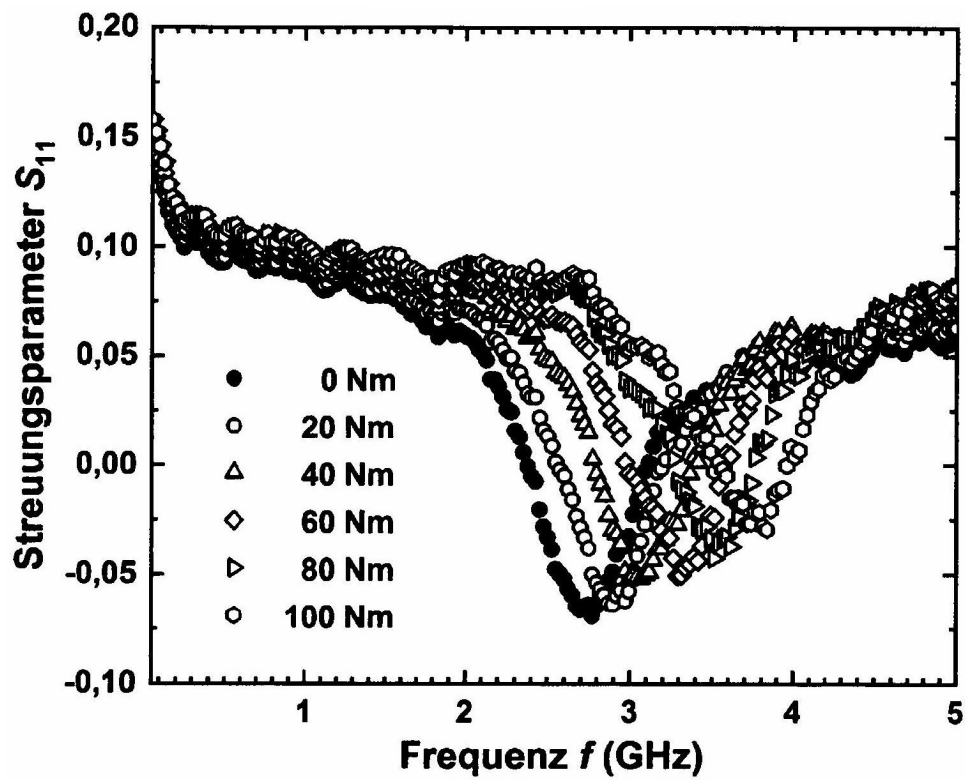
Figur 12



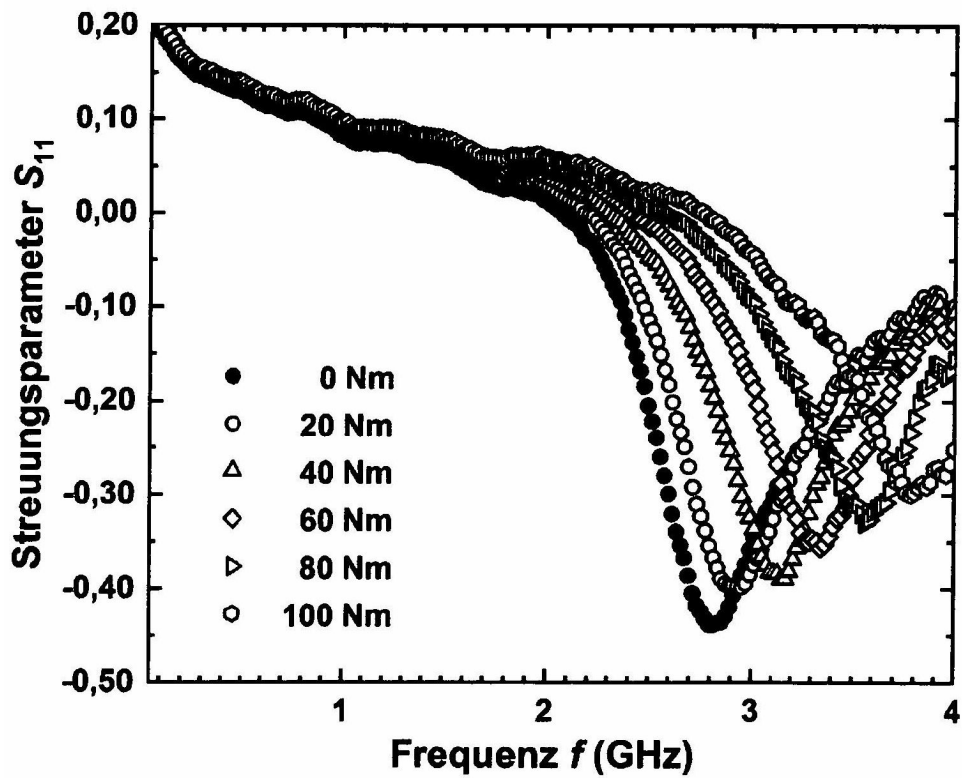
Figur 13A



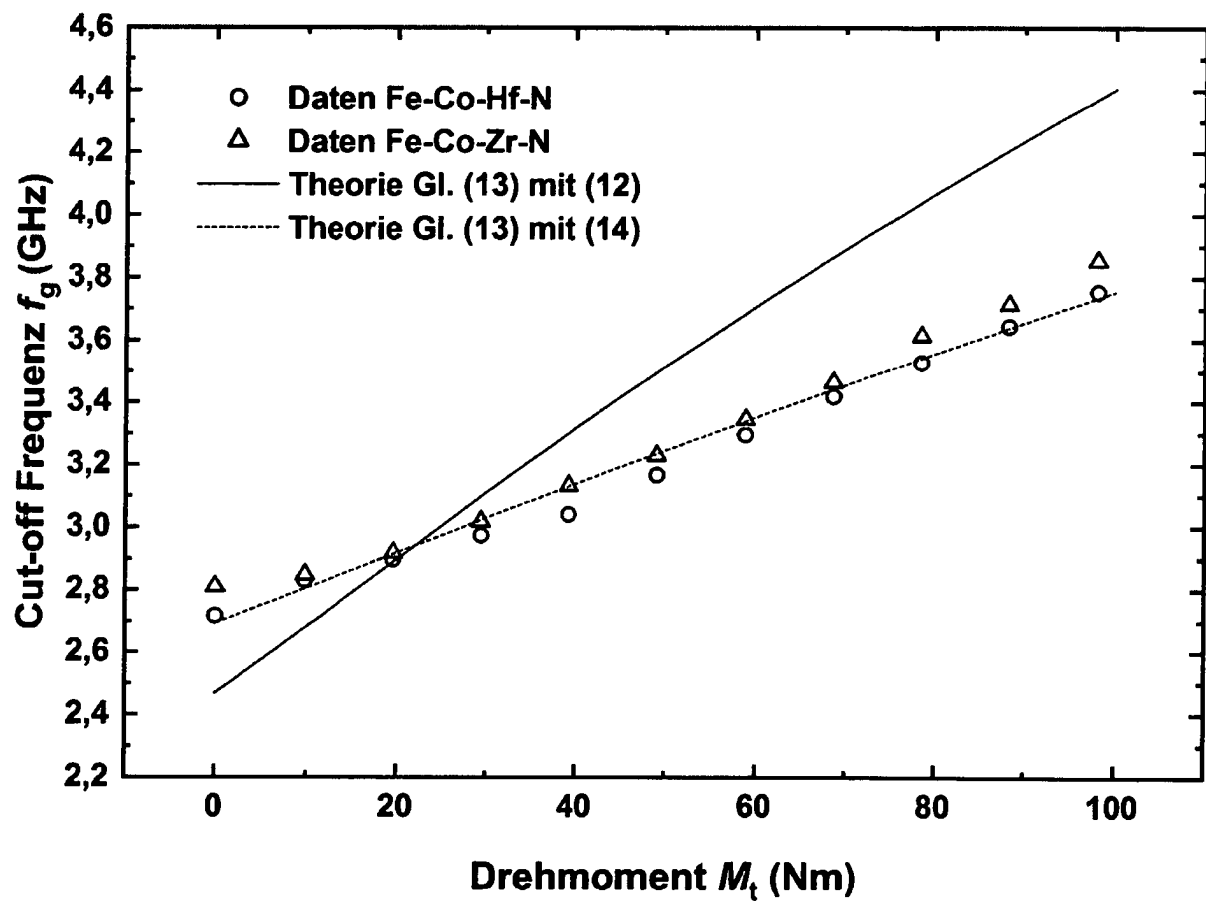
Figur 13B



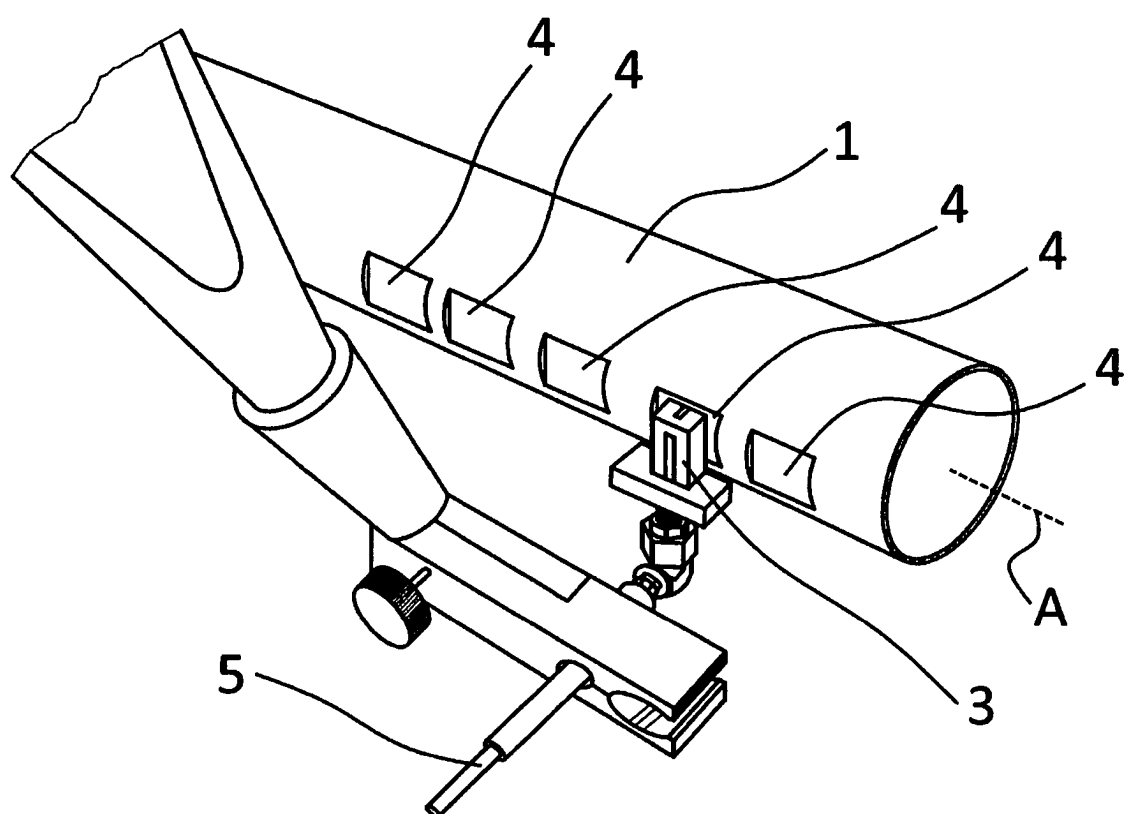
Figur 14A



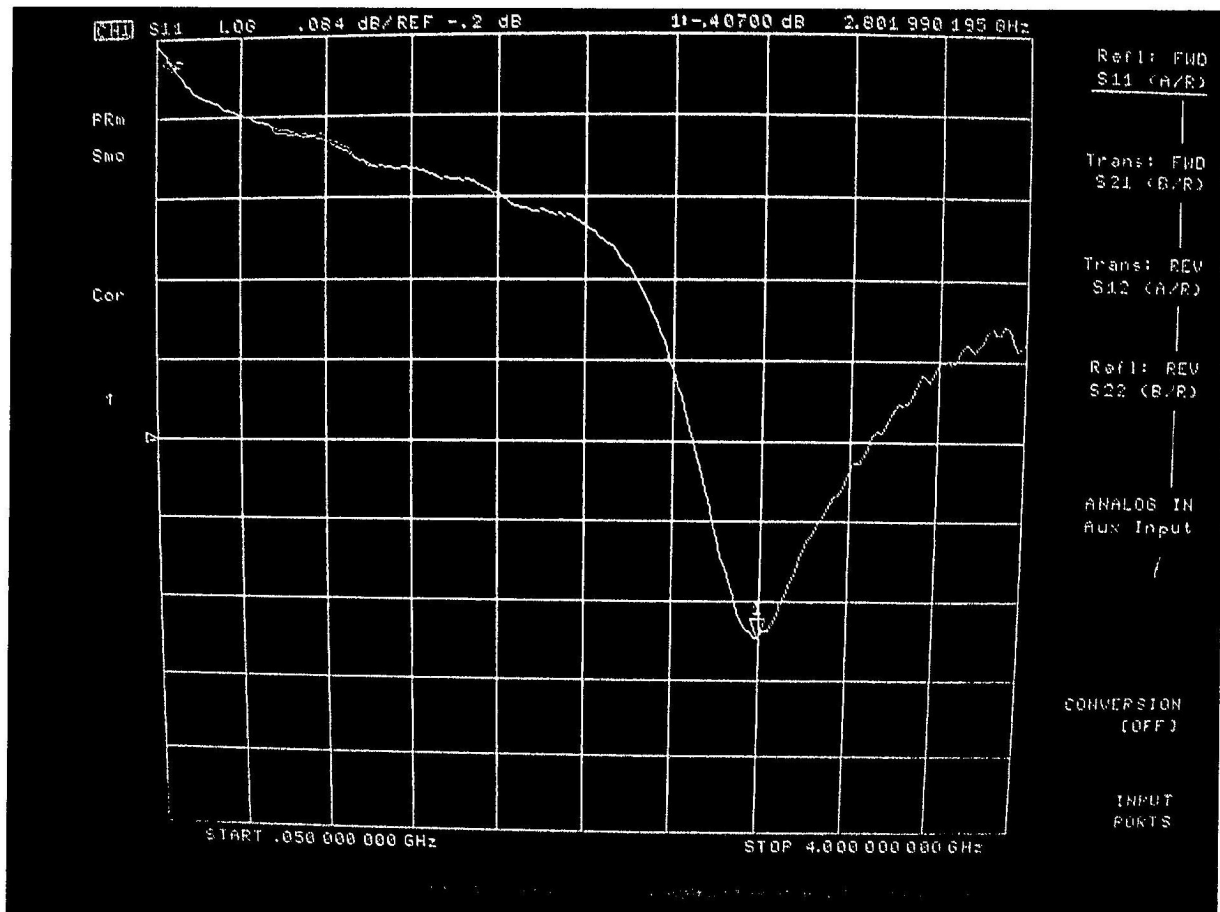
Figur 14B



Figur 15



Figur 16



Figur 17