

# BERÜHRUNGSLOSE DREHMOMENTENMESSUNG FÜR EXTREM KLEINE MOMENTE

A. HUBA, und A. HALMAI

Lehrstuhl für Feinmechanik Optik,  
Technische Universität, H-1521 Budapest

Received July 15, 1986

Presented by Prof. Dr. O. Petrik

## Abstract

A precision instrument for the measurement of extremely small torques is shown in this article. This apparatus works without loading the measured system, based on the principles of the electrodynamics.

Oft hat man in der Gerätetechnik die Aufgabe, verschiedene mechanische Größen ohne wesentliche Belastung des Meßobjektes genauestens zu ermitteln. Sollte diese Belastung ganz aufgehoben werden, dann denkt man automatisch an die berührungslosen Umformer. In der modernen Meßtechnik dient als Ausgangsgröße im überwiegenden Teil die analoge elektrische Spannung. Das ist tatsächlich der Fall, sofern es sich um mechanische Differenzkoordinaten handelt (Weg, Geschwindigkeit, Winkelgeschwindigkeit usw.). Es stehen sogar eine Reihe von handelsüblichen Meßumformern zur Verfügung. Anders sieht es aber aus, wenn man Durchflußkoordinaten zu messen hat, wie Kraft oder Drehmoment. Da es für die einfache Lösung der Messung extrem kleiner Momente, oder Kräfte keine direkten, — oder nur bedingt anwendbaren (optische Eigenschaften, Permeabilität u. ä.) physikalischen Beziehungen gibt, muß man von Fall zu Fall alle möglichen elektromechanischen Wandlungsprinzipien analysieren, um eine entsprechende Lösung zu finden. Man behilft sich im allgemeinen dadurch, daß man zuerst die elektrodynamischen und die elektrostatischen Grundgesetze analysiert. Im folgenden wollen wir ein berührungsloses Meßgerät für die Messung extrem kleiner Drehmomente beschreiben.

## Die zu lösende Meßaufgabe

Um die zahlreichen elektrischen, elektrodynamischen und mechanischen Parameter von einem weit verbreiteten elektrodynamischen Meßgerät ermitteln zu können, war es notwendig, für verschiedene Typen ein allgemein anwendbares Meßgerät für berührungslose Drehmomentenmessung zu ent-

wickeln. Der erforderliche Meßbereich ragt weit über den bei elektromechanischen Meßgeräten üblichen Bereich hinaus. Man soll ohne Meßprinzipwechsel von  $5 \cdot 10^{-6}$  Nm bis hinzu 5 Nmm ( $5 \cdot 10^{-3}$  Nm) messen können. Es sollte ferner nicht nur das jeweilige maximale Moment, die Durchflußkoordinate beim mechanischen Kurzschluß, sondern der vollständige Verlauf der Momentenfunktion in Abhängigkeit von der Drehzahl im Bereich von Null bis zum Drehzahl-Maximum mit einem Fehler von kleiner als 0,1 Prozent ermittelt werden. Das Gerät soll ermöglichen, daß man die Drehzahl stufenweise bis zu Null herabsetzend über den Stillstand hinweg in die entgegengesetzte Richtung die Messung fortsetzen kann. Das soll die Ermittlung des bekannten Momentensprunges ermöglichen. Wenn man so den Momentenverlauf im gefragten Drehzahlbereich ermitteln kann, dann wird die elektrodynamische Dämpfung der Drehscheibe des Meßobjektes auch stufenweise verändert. Damit entsteht als Ergebnis der Messungen eine Kurvenschar. Durch diese Messungen sollen als wichtigstes

- die Haftreibung der Lagerungen
- der Momentensprung
- das Antriebsmoment des Antriebssystems
- das Bremsmoment, produziert durch das spezielle Bremssystem
- die Drehzahl — Drehmoment Kurvenschar

erfaßbar sein

### Meßobjekt

Im wesentlichen sind 4 Hauptteile durch ein kompliziertes Aluminium-Gußstück zusammengefaßt:

- Antriebssystem
- Bremssystem
- Meßeinrichtung mit Zählwerk, geführt und gestützt mit Gleitlagern (Wirbelstrom-Drehscheibe). Da die Drehscheibe nach Wirbelstrom-Prinzip arbeitet, besteht sie aus geprüfter Aluminiumlegierung, die von ferromagnetischen Stoffen garantiert freigehalten wird.

Das Meßobjekt wird ohne Zählwerk getestet. Das obere Ende der Scheibenachse hat einen Durchmesser von 0,6 bis 0,8 mm. Die Antriebsmomente sind an einer Achsenlänge von etwa 10 mm, bei diesem Durchmesser zu ermitteln.

## Versuchsvarianten für die berührungslose Momentenmessung

Das Meßgerät ist zunächst in zwei Lösungsvarianten vorstellbar. Vom physikalischen Prinzip her sind beide Varianten gleichwertig, wenn man sich jedoch die einfache Handhabung vor Augen hält, bleibt zweifellos nur die verwirklichte technische Lösung denkbar. Bevor wir über diese Variante zu sprechen kommen, müssen wir der extrem hohen Anforderungen wegen alle reibungsbehafteten Konstruktionsvarianten ausschliessen. Ob das tatsächlich der Fall ist, wollen wir nun den Strukturgraphen eines Versuches betrachten: In einer Versuchsreihe wurden Mikromotoren verschiedener Typen an die Achse des Meßobjektes gekoppelt um das nötige Kompensationsmoment erzeugen zu können. Bei einer Speisung mit Konstantspannungsquelle hätte man nämlich durch den direkt meßbaren Strom und mittels Momentenkonstante, die gesuchten Momentenwerte. Zwei Probleme machen diese Lösung unbrauchbar. Der Strom bei dem maximalen Anhaltmoment hat extreme Wärmebelastungen (bei Langzeitbeanspruchung) zur Folge. Nicht weniger problematisch erwiesen sich die Reibungsschwellwerte der untersuchten

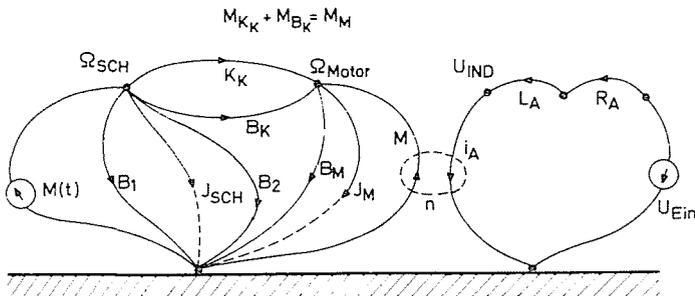


Abb. 1. Zeichenerklärung:

$M_m(t)$	das zu messende Drehmoment
$M = n \cdot i_A$	das vom Motor eingeprägte, kompensierende Drehmoment
$\Omega_{sch}$	Winkelgeschwindigkeit der Wirbelstromscheibe
$\Omega_{motor}$	Winkelgeschwindigkeit des Motors
$B_1, B_2$	Reibungsmittgänge der Lagerungen im Meßobjekt
$J_{sch}$	Trägheitsmoment der Wirbelstromscheibe
$K_K$	Federsteife der Kupplung
$B_K$	Reibungsmittgang der Kupplung
$B_M$	Reibungsmittgang des Motors
$J_M$	Trägheitsmoment des Motors
$n$	Motorkonstante
$L_A$	Induktion der Armature
$R_A$	Widerstand der Armature
$i_A$	Kompensierender Strom
$u_{ein}$	Klemmspannung des Motors

Motoren von Firmen in der Schweiz, BRD und DDR. Es war nach dem Graphenbild auch nicht anders zu erwarten, die Reibung der Motoren ( $B_M$ ) war nicht nur wesentlich größer als die resultierende Reibung der Lagerungen des Meßobjektes, sie hatte auch noch beträchtliche statistische Schwankungen.

Durch diese Motorversuche kamen wir auf die Idee, das kompensierende Moment mittels zweiphasen-asynchron Servomotor zu erzeugen. Es wurde ein extra dünnes, topfförmiges aus Aluminiumlegierung gefertigtes Drehteil an der Achsenspitze befestigt, und das rotierende magnetische Feld im Stator elektronisch gesteuert. Der Stator war an einem Torsionsfaden befestigt, und das ganze System hatte eine senkrechte Anordnung. Als gleich gut erwies sich eine andere Konstruktion, wobei das rotierende Feld nicht durch Elektromagnete, sondern mit dem Stator eines Gleichstrommotors erzeugt wurde. Der Stator mußte allerdings mit regelbarer Winkelgeschwindigkeit durch einen zweiten Motor angetrieben werden.

Von Anfang an war es klar, daß eine derartige Konstruktion unter Betriebsumständen nicht ohne weiteres brauchbar ist. Der dünnwandige Rotor (0,2 mm Wänddicke) und die Tatsache, daß der Rotor vom Stator im Wesentlichen eingeschlossen wird, macht die Montage und die Justiage fast unmöglich.

Wir haben also das physikalische Prinzip des Wirbelstrommotors beibehalten, und eine geeignete mechanische Konstruktion gesucht.

### Das Meßgerät

In der realisierten Konstruktion wählten wir eine dünne Scheibe als Rotor, und befestigten sie am oberen Ende der Achse. Das rotierende magnetische Feld wurde mit einer zweiten, robusten Drehscheibe erzeugt, woran in symmetrischer Anordnung zwei permanente Magnetkreise montiert waren. Das erzeugte Moment ist nun der Drehzahldifferenz der beiden Scheiben proportional. Die Differenz kann optoelektronisch relativ, oder durch Einzelmessung der beiden Drehzahlen mit anschließender Subtraktion gebildet werden. Das Gerät macht beide Varianten möglich. Der erwünschte Meßbereich ist in drei Stufen eingeteilt, diese Stufen überlappen einander gegenseitig. Ein Übergang in den nächsten Teilbereich erfordert einen Rotorwechsel, was aber ohne Schwierigkeiten durchführbar ist. Wie aus der Abb. 2 hervorgeht, hat man den Vorteil, daß die Lage der Rotorscheibe im Luftspalt der Magneten sichtbar ist. Die entsprechenden Justiermöglichkeiten sind dazu die Folgenden:

- $3\varphi$  für die Lage des Meßobjektes (Achse)
  - X—Y—Z Einstellmöglichkeiten für den Rotormechanismus,
- praktisch sind also alle Möglichkeiten damit erfaßt.

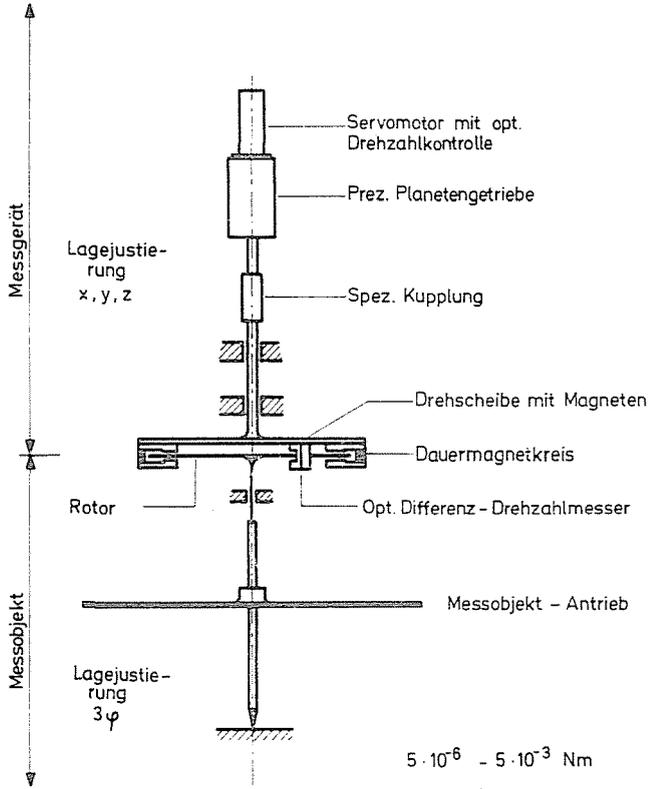


Abb. 2

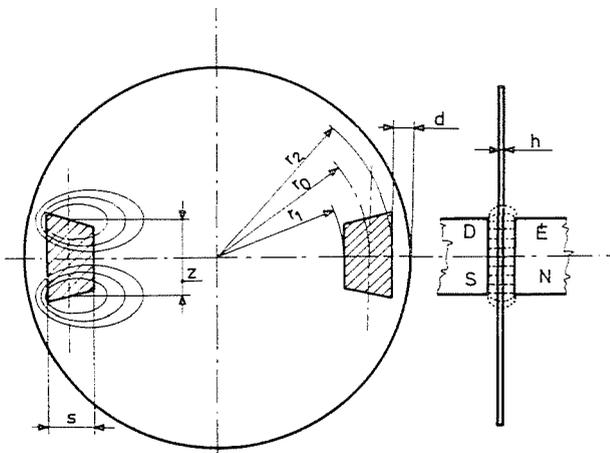


Abb. 3

Es ist bekannt, daß der Verlauf der Wirbelstrombahnen und das genaue Magnetfeld im Luftspalt nicht ohne weiteres bestimmbar sind. Die für das Meßgerät notwendigen Rechnungen haben wir deshalb mit Näherungen und statistischen Werten durchgeführt. Der Inhalt der Gerätekonstante läßt sich aus den physikalischen Beziehungen herleiten, die genaue Wertbestimmung haben wir der nachträglichen Eichung überlassen. Es zeigte sich, daß es sich tatsächlich um eine Konstante handelt.

In Abbildung 3 sieht man die Rotorscheibe mit ihrer Geometrie und mit dem prinzipiellen Verlauf der Wirbelstromlinien und mit dem Bild des magnetischen Feldes. Durch die Bewegung des Magnetfeldes mit der konstanten Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$  wird eine Spannung in der Platte induziert, die in allgemeiner Form, wie folgt, bekannt ist:

$$u_i = \int_s \vec{E} \cdot d\vec{s} = \int_{r_1}^{r_2} [(\vec{r} \times \Omega) \times \vec{B}] d\vec{r}$$

Für unseren Fall ergibt sich für  $u_i$ :

$$u_i = \Omega B \int_{r_1}^{r_2} r dr = \Omega B \frac{r_2^2 - r_1^2}{2}$$

Diese Spannung treibt am effektiven Plattenwiderstand Wirbelströme durch.

Für diese Plattenwiderstände hat man Erfahrungswerte, die mit einer Konstante  $k$  bei Radius  $r_0$  berücksichtigt werden können.

$$R_{\text{ges}} = k \cdot \rho \cdot \frac{s}{A} \quad z \cdot h = A \text{ (Querschnitt im Luftspalt)}$$

In unserem Fall ändert sich der Abstand zwischen der Achse und den Magnetkreisen nicht. Wir schreiben also  $k(r=r_0) = \text{konst}$  bei der Berechnung von  $R_{\text{ges}}$ .

Die eingespeiste mechanische Leistung wird in der Platte in elektrische umgesetzt:

$$P_{\text{mech}} = \Omega M = P_{\text{elektr}} = \frac{u_i^2}{R_{\text{ges}}}$$

$$M = \frac{P}{\Omega} = \frac{1}{R_{\text{ges}}} \frac{u_i^2}{\Omega}$$

Mit der induzierten Spannung ergibt sich das mechanische Moment zu

$$M = \frac{1}{R_{\text{ges}}} B^2 \frac{(r_2^2 - r_1^2)^2}{4} \Omega = \frac{B^2 (r_2^2 - r_1^2)^2 z}{4k(r_0) \cdot \rho \cdot s} \cdot h \cdot \Omega$$

$$M = K_G \cdot \Omega$$

Man sieht, daß von allen Größen in der Gerätekonstante im gegebenen Fall sinnvoll nur die Rotordicke „ $h$ “ als variable Größe zur Sicherung der drei Stufen des Meßbereiches vorstellbar ist. Um die drei Stufen zu gewährleisten, haben wir drei Schichtdicken mit der Abstufung 1 zu 10 gewählt: 10  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$  und 1 mm. Die dritte Rotorscheibe ist selbsttragend, die ersten beiden sind mit Glasfaser verstärkte Kunststoffscheiben mit Aluminium Leiterschicht.

Die magnetische Feldstärke in dem Luftspalt wurde mittels Hall-Sonde gemessen, und die Induktion bis auf 1% Unterschied an beiden Seiten abgestimmt, unter Verwendung von magnetischen Shuntkreisen.

Die Gerätekonstante  $K_G$  wurde für die drei Scheibendicken bei der Kalibrierung bestimmt.

Die Winkelgeschwindigkeit in der Gleichung soll als Differenzkoordinate zwischen den zwei rotierenden Teilen gedeutet werden:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \Omega_1 - \Omega_2$$

Schließlich wollen wir in Abb. 4 das systemtechnische Modell der Meßanordnung zeigen. Man erkennt, daß Meßgerät und Meßobjekt nicht über verlustbehaftete, passive Elemente, sondern durch eine physikalische Konstante verbunden sind. Das Meßprinzip ist wortwörtlich berührungsfrei.

Die Elektronik des Gerätes hat die Aufgabe den Gleichstrommotor, der die magnetkreis tragende Drehscheibe über ein mehrstufiges Planetengetriebe bewegt, zu speisen. Es müssen alle möglichen Drehzahlwerte in beiden Umlaufrichtungen gesichert werden. Ein fehlerloser Mitlauf der Achse des Meßobjektes mit der Magnet-Drehscheibe bedeutet, daß die Winkelgeschwin-

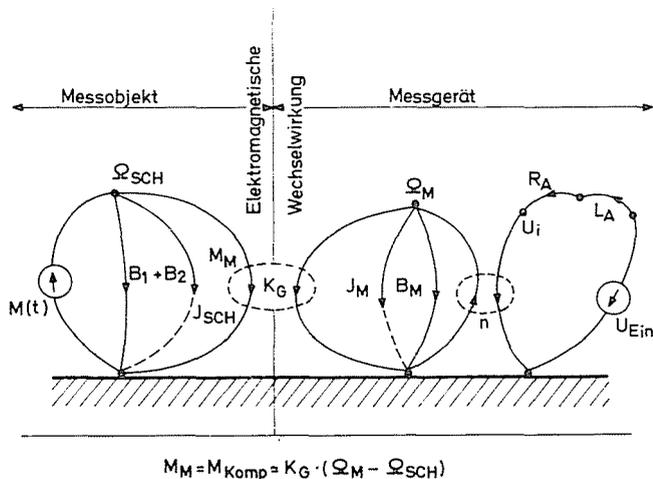


Abb. 4

digkeitsdifferenz zu Null wurde, und bei diesem mechanischen Leerlauf kein Moment aus dem Meßobjekt zu entnehmen ist. Wird nun die Drehzahl der Drehscheibe allmählig zurückgenommen, vermindert sich auch die Drehzahl der Achse des Meßobjektes und das dem Meßobjekt abgegebene Moment ist der Drehzahldifferenz proportional. Das maximale Moment kann bei vollkommenem Stillstand der Achse gemessen werden. In diesem Fall rotiert nun die Drehscheibe mit den Magneten voll in entgegengesetzter Richtung, in der sich die Achse rotieren würde, angetrieben im Meßobjekt.

Sowohl die Frequenz als auch die Periodendauer beider rotierenden Teile werden optoelektronisch gemessen, wobei die Torsignale einem Quarz-Oszillator entnommen werden. Bei der Weiterentwicklung des Meßgerätes sollen weitere elektronische Ergänzungen, wie z. B. eine Arithmetik für die statistische Meßwerterfassung hinzukommen.

### Zusammenfassung

Es wurde ein elektrodynamisches Meßgerät für die berührungslose Messung extrem kleiner Drehmomente entwickelt. Der Meßbereich liegt zwischen  $5 \cdot 10^{-6}$  Nm und  $5 \cdot 10^{-3}$  Nm. Der Drehzahlunterschied der Antriebsscheibe zu der zu messenden Drehscheibe ist dem Antriebsmoment des elektrodynamischen Systems direkt proportional.

### Literatur

SIMONYI, K.: Villamosságtan Akadémiai Kiadó Budapest, 1962.

PETRIK, O.: Finommechanika Műszaki Könyvkiadó Budapest, 1974.

Dr. Antal HUBA }  
Dr. Attila HALMAI } H-1521 Budapest