

Magnetische Drehmomentmessung mit Low-cost Sensor

H. Ruser, U. Tröltzsch, M. Horn, H.-R. Tränkler

Universität der Bundeswehr München
Institut für Meß- und Automatisierungstechnik
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg bei München
Tel. +49 (0) 89 6004-3878, Fax. -2557
heinrich.ruser@unibw-muenchen.de

Kurzfassung

Durch Ausnutzung des magnetoelastischen Effektes ferromagnetischer Materialien können Drehmomente berührungslos und ohne zusätzliche Bearbeitung der Meßwelle gemessen werden: Von außen angreifende Momente bewirken Änderungen der magnetischen Eigenschaften des Materials (Verformungen der Hystereseschleife, Permeabilitätsänderungen). Im Beitrag werden besonders kostengünstige Sensoren zur magnetischen Drehmomentmessung untersucht. Es werden der Aufbau des Meßsystems beschrieben sowie die magnetischen Eigenschaften verschiedener geeigneter Materialien und Behandlungsmethoden modelliert und meßtechnisch ermittelt. Das anliegende Drehmoment wird anhand verschiedener Kennwerte der gemessenen Hysteresen (Differenz zum unbelasteten Fall von Fläche, Steigung im Nulldurchgang, Sättigungsniveau, Steigung der Äste) bestimmt. Mit der Bestimmung der Steigung des auf- und absteigenden Astes der Hysteresen durch Polynomannäherung lassen sich derzeit Genauigkeiten von ca. 2% erzielen.

1 Einleitung

Drehmomentmessungen an rotierenden Wellen ermöglichen die gezielte Steuerung von Arbeitsvorgängen. Antreibende und angetriebene Systeme können so zur Optimierung des Betriebes auf bestimmte Leistungs- und Momentübertragungen geregelt werden. Zur Drehmomentmessung wurden vielfältige Meßverfahren vorgeschlagen:

Am gebräuchlichsten ist die Auswertung der durch Torsion bedingten elastischen Verformungen eines Meßkörpers mit Dehnungsmeßstreifen (DMS). Mit vergleichsweise geringem Aufwand werden Störgrößen wie Temperatureinflüsse kompensiert und hohe Genauigkeiten erreicht [1]. Das Sensorsignal wird über Schleifkontakte, induktive oder kapazitive Kopplungen oder telemetrisch übertragen. Optische Verfahren nutzen die drehwinkelproportionale Phasenverschiebung zwischen zwei von Marken an beiden Enden eines Torsionsstücks reflektierten Impulsen. Aufgrund der hohen Anforderungen an konstante Meßbedingungen und Abmessungen der Meßwelle und des Aufwands der Signalverarbeitung, verbunden mit dem direkten Eingriff in die Meßwelle, werden sie jedoch bisher kaum kommerziell eingesetzt [2]. Auch indirekte Messungen des Drehmoments aus der elektrischen Leistung und der Drehzahl sowie durch Reaktionsmeßaufnehmer sind Verfahren mit hoher Genauigkeit, jedoch großem konstruktivem und meßtechnischem Aufwand [3].

Durch Ausnutzung des magnetoelastischen Effektes ferromagnetischer Materialien können Drehmomente mit geringem Aufwand gemessen werden: Eine Längenänderung oder Dehnung durch von außen angreifende Momente wirkt sich in Form von Änderungen magnetischer Eigenschaften des Materials aus [4]: Diese Änderungen werden durch eine Spulenanordnung mit Primärspulen oder Dauermagneten („Einspeisung“) und Sekundärspulen (Detektor) erfaßt. Unter Einfluß eines Drehmomentes verringert sich die Permeabilität in Richtung der Materialstauchung und vergrößert sich in Dehnungsrichtung. Der dadurch bewirkte Magnetfluß induziert in der Sekundärspule eine zum Drehmoment proportionale Spannung. Das richtungsabhängige magnetische Verhalten wird durch geeignete Spulenanordnungen detektiert:

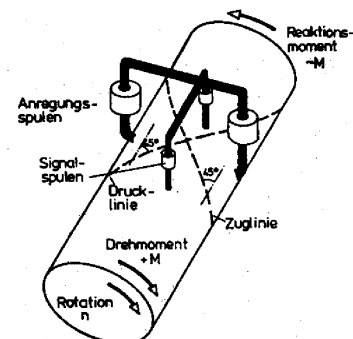


Bild 1: Vierpolsensor (Anisotropiewandler) mit Erregerspule und Induktionsspule [5]

In Zonen weitgehend homogener Materialbeanspruchung werden zwei Spulenwicklungen geeigneterweise senkrecht zueinander stehend angeordnet (zur Unterdrückung von Störeinflüssen über das Differenzprinzip), deren Achsen um 45° gegen die Hauptbelastungsrichtung geneigt sind, s. **Bild 1**.

Mit magnetoelastischen Meßverfahren lassen sich mittlere Genauigkeiten erzielen [2,6,7]. Nachteilig wirken sich Inhomogenitäten der Meßwelle und ungleichförmige mech. Restspannungen aus, die eine genaue Bestimmung des Arbeitspunktes verhindern, sowie der Abstand zwischen Welle und Spule (Luftspalt). Bessere Ergebnisse werden mit auf die Welle aufgetragenen Schichten amorpher Ferromagnetika erzielt [8].

Im Gegensatz dazu werden im folgenden Verfahren zur magnetischen Drehmomentmessung untersucht, bei denen die Meßwelle, die aus maschinenbauübliche hartmagnetischen Werkstoffen (Stahllegierungen) bestehen kann, unbearbeitet bleibt. Zur Realisierung gut definierter Arbeitspunkte wird eine vollständige Ummagnetisierung des Wellenmaterials vorgenommen.

2 Sensorprinzip

Es wird ein magnetischer Kreis aufgebaut, der aus dem aktiven Sensorelement (magnetoelastische Meßwelle, zur Vereinfachung der Durchmagnetisierung eine Hohlwelle) und Elementen zum Schluß des magn. Kreises besteht. Für eine Hohlwelle mit dem Außendurchmesser d_a und dem Innendurchmesser d_i besteht folgender Zusammenhang zwischen dem anliegenden Drehmoment M und der resultierenden Torsionsspannung τ an der Wellenoberfläche:

$$\tau = \frac{16 d_a}{\pi (d_a^4 - d_i^4)} \cdot M \quad (1)$$

In **Bild 2** sind die Kenngrößen einer magn. Hysteresekurve und beispielhaft der Einfluß mechanischer Spannungen auf ihre Form dargestellt.

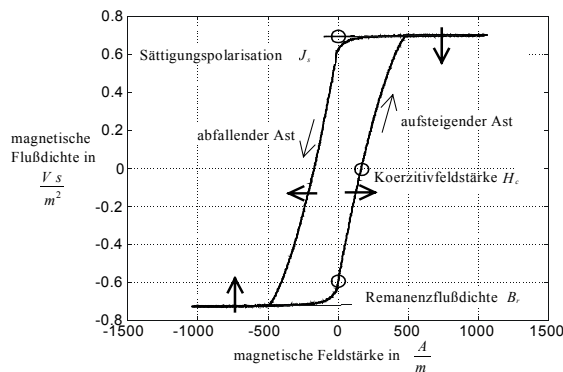


Bild 2: Hysteresekenngrößen und Einfluß mechanischer Spannungen

Herkömmliche Drehmomentsensoren, die auf dem magnetoelastischen Prinzip beruhen, messen eine Änderung der Permeabilität μ des magnetischen Kreises, d.h. die Hysteresekurve wird nur in einem kleinen Bereich um $H = 0$ herum angesteuert. Dies hat den Vorteil, daß geringe Leistungen zur Aussteuerung benötigt werden und hohe Meßfrequenzen realisiert werden können. Der wesentliche Nachteil liegt aber in der Abhängigkeit von der Vorgeschichte des Materials und bei radialen Prinzipien in der Abhängigkeit der effektiven Permeabilität μ_{eff} des magnetischen Kreises vom Luftspalt Δ :

$$\mu_{eff}(\Delta) \approx \frac{\mu_r}{1 + \mu_r \frac{\Delta}{l_{eff}}} \quad (2)$$

Der Einfluß des Luftspaltes kann zwar durch Verwendung von zwei oder mehreren Sensoren (z.B. gegenüber angeordnet) und/oder durch ein differentielles Meßprinzip (Meßbrücke) verringert werden, jedoch verdoppeln sich die Kosten und der Platzbedarf. Darüberhinaus hängen der Magnetisierungszustand und damit der Arbeitspunkt auf der Hysteresekurve stark von der i.A. nur unzureichend bekannten magnetischen, thermischen und mechanischen Vorgeschichte des Wellenmaterials ab. Die Messung von magnetischen Kenngrößen bei vollständiger *Ummagnetisierung* bietet hingegen den entscheidenden Vorteil, daß der Magnetisierungszustand frei gewählt werden kann. Für gesicherte Arbeitspunkte muß dazu durch entsprechende *Vormagnetisierung* mit Elektromagneten die Hysteresekurve bis in den Sättigungsbereich angesteuert werden.

Die Messung der *Sättigungspolarisation* nach der in **Bild 3** schematisch dargestellten Anordnung bietet vor allem den Vorteil der Unabhängigkeit von der Vorgeschichte und der Luftspaltgeometrie. Das Wellenmaterial wird unter $\pm 45^\circ$ zur Achse periodisch vollständig bis in die Sättigung durchmagnetisiert. Das Drehmoment wird dann beispielsweise aus der Änderung der magnetischen Sättigungsfeldstärke $H_{sätt}$ oder aus dem auf $H_{sätt}$ bezogenen Anstieg der Hysteresekurve bei einem definierten Wert B_M der magn. Induktion berechnet.

Darüberhinaus ist die Änderung der Form der Hysteresekurve mit dem Drehmoment korreliert. Diese Korrelation wird in weiteren Ausführungen zur Berechnung des Drehmomentes benutzt.

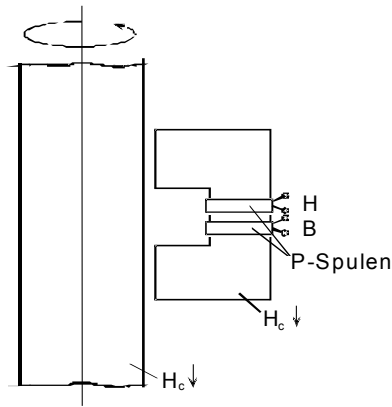


Bild 3: Schematische Darstellung der Kenngrößenmessung bei Ummagnetisierung mit Elektromagneten

3 Meßaufbau

Messungen wurden zunächst nur an feststehenden Wellen durchgeführt. Der mechanische Aufbau des Versuchsstandes ist schematisch in **Bild 4** dargestellt. Die Welle ist an einem Ende starr befestigt. Das Drehmoment wird durch ein Gewicht an einem belasteten Hebelarm aufgebracht. Das maximale angelegte Drehmoment betrug 23 Nm bei einer Hebellänge von 50 cm.

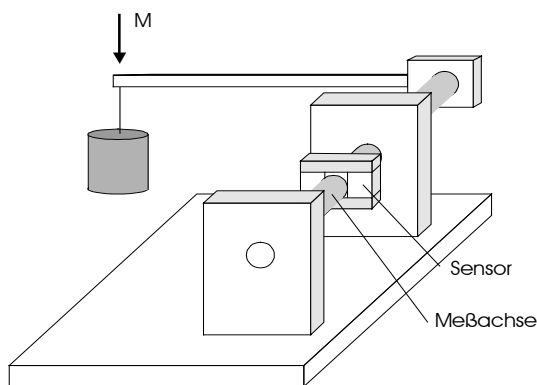


Bild 4: Versuchsstand

Der Aufbau des verwendeten Sensors ist in **Bild 5** mit den Hauptrichtungen des magn. Flusses dargestellt. Die magn. Spannung wird von 2 Spulen w_{11} und w_{12} mit je 1000 Windungen erzeugt, die um den Kern angeordnet sind. Die Messung des magn. Flusses erfolgt mit einer Spule w_2 , die ebenfalls um den Kern einer Erregerspule angeordnet ist. Zur Verbesserung der magn. Eigenschaften wurden alle Elemente einer Wärmebehandlung (Schlußglühung unter Argon) unterzogen.

Die Elemente zum Schluß des magnetischen Kreises werden aus Materialien mit großen Permeabilitäten (z.B. Mu-Metall® [9]) gefertigt, um den zu μ_r umge-

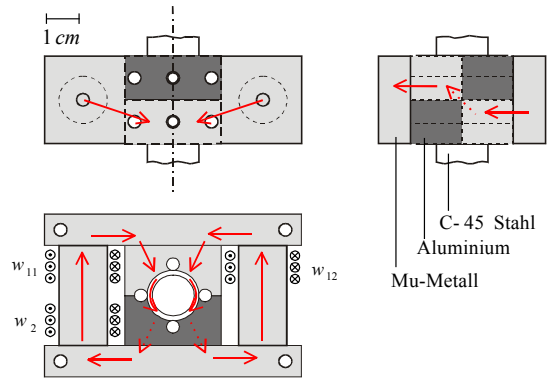


Bild 5: Sensoraufbau mit Hauptrichtungen des magn. Flusses

kehrt proportionalen magnetischen Widerstand im Magnetkreis möglichst gering zu halten.

Den gesamten Meßaufbau zur Bestimmung der Hysterese zeigt schematisch **Bild 6**. Mit dem Funktionsgenerator und dem Verstärker werden der Primärspule Spannungen bis 30 V eingeprägt. Es wurde mit verschiedenen Ummagnetisierungsfrequenzen von 0.5 Hz bis ca. 5 Hz gearbeitet. Aus dem Strom I durch die Primärwicklung läßt sich die magn. Spannung berechnen und daraus, bei bekannter Geometrie, die Magnetfeldstärke H . Integriert man die in der Sekundärwicklung induzierte Spannung U_{ind} über die Zeit, erhält man ein Maß für den magn. Flußstärke B , der die Spule durchdringt.

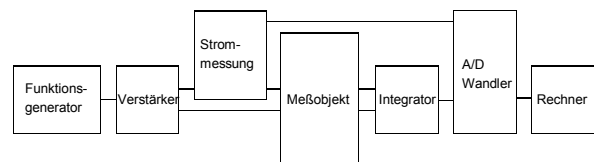


Bild 6: Meßaufbau

4 Messungen

In **Bild 7** ist eine aufgenommene Hysteresekurve bei unbelasteter Welle und ihre Veränderung bei Einwirkung des maximalen Drehmomentes von 23 Nm dargestellt. Für die Auswertung wurden verschiedene Hystereseigenschaften untersucht:

- Fläche der Hysterese
- Steigung im Nulldurchgang
- Anpassung des auf- und absteigenden Astes durch Sigmoidfunktion
- Anpassung des auf- und absteigenden Astes durch Polynom-Funktionen

Die Fläche der Hysterese ist ein Maß für die Energie, die bei Durchlaufen der Hysterese benötigt wird. Eine deutliche Abhängigkeit vom Drehmoment ist jedoch nicht gegeben. Dasselbe gilt für die Steigung der Hysterese im Nulldurchgang.

5 Zusammenfassung

Es wurde ein neues Sensorsystem zur Messung von Drehmomenten vorgestellt. Der entwickelte Drehmomentsensor arbeitet berührungslos, erfordert keine Auftrennung oder Verjüngung des Wellenstranges, ist kostengünstig produzierbar, kann ohne wesentliche Beeinflussung des Maschinenaufbaus eingefügt werden (kurze Baulänge) und ist tolerant gegen parasitäre Belastungen wie Quer-/Axialkräfte und Biegemomente. Der Aufnehmer kann bis in den Stillstand messen, d.h. ist statisch kalibrierbar. Einschließlich einer Auswerteschaltung und einem Mikrocontroller zur Meßwertverarbeitung kann der Sensor einfach an jeder zugänglichen Stelle an der Welle angebracht werden.

In weiteren Schritten werden die Eigenschaften des Sensors an rotierenden Wellen sowie schnelle Lastwechsel und systematische Fehler durch Hystereseeigenschaften des Wellenmaterials untersucht.

Literatur:

- [1] S. Keil, Beanspruchungsermittlung mit Dehnungsmeßstreifen, Zwingenberg: CUNEUS 1995
- [2] D. Juckenack, Sensors for measuring torque. In: W. Göpel, J. Hesse, J.N. Zemel (ed.), Sensors, Vol.7, Weinheim: VCH, 1994, pp. 483-512
- [3] G. Hinz, H. Voigt, Magnetoelastic sensors. In: W. Göpel, J. Hesse, J.N. Zemel (ed.), Sensors, Vol.5, Weinheim: VCH, 1989, S. 97-152
- [4] H. Büttner, Zur Messung mechanischer Spannungen durch Ausnutzung des magnetoelastischen Effektes, Maschinenbautechnik 8(3), 1959, S. 146-150.
- [5] L. Jähnig, Drehmomentsensoren auf der Basis des magnetostruktiven Effektes, VDI-Berichte 509, 1984, S. 187-191.
- [6] W.J. Fleming: "Magnetostrictive torque sensors – comparison of branch, cross, and solenoidal designs", SAE Techn. Paper 900 264, 1991
- [7] F.T. Calkins, R.C. Smith, A.B. Flatau, An energy-based hysteresis model for magnetostrictive transducers, IEEE Trans. on Magnetics, vol 36/2 (2000), pp. 429-439
- [8] M. Raupach, P. Hauptmann: "Drehmomentsensor auf Basis amorpher Magnetika", Sensoren – Aktoren – Buskommunikation, Magdeburg 1995, S. 131-137.
- [9] R. Boll, Weichmagnetische Werkstoffe. Firmenpubl. Vacuumschmelze GmbH, Hanau 1993

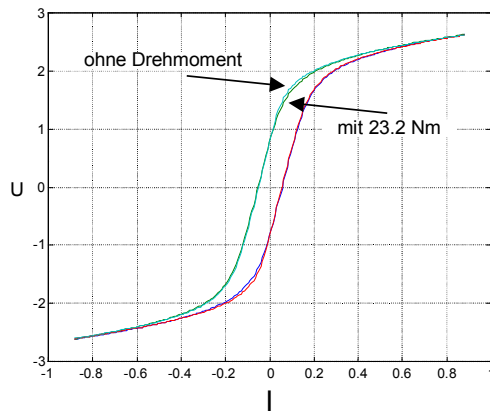


Bild 7: Hysteresekurve mit unbelasteter und belasteter Welle

Die Auswertung der Koeffizienten der Sigmoid-Funktion und der Polynom-Anpassungen liefert dagegen sehr interessante Ergebnisse (s. **Bild 8**): Besonders die Polynom-Koeffizienten ungerader Ordnung zeigen eine deutliche Abhängigkeit vom Drehmoment mit kleinen Streuungen. Für ein Polynom 3. Ordnung $H = k_0 + k_1 B + k_2 B^2 + k_3 B^3$ ist z.B. $\Delta k_3 = 3\%$, $\Delta k_1 = 8\%$ bei $\Delta M = 100\%$ mit Streuungen $< 1\%$. Die Erklärung hierzu läßt sich in der (nahezu) Punktsymmetrie der Hysterese zum Koordinatenursprung finden, die mit Polynomen mit ungeraden Koeffizienten am besten nachgebildet wird. Mit den Geradenkennlinien aus den Koeffizientenwerten k_1 und k_3 kann dann das Drehmoment M bestimmt werden:

$$\begin{aligned} k_1 &= k_{1M} \cdot M + k_{10} \\ k_3 &= k_{3M} \cdot M + k_{30} \end{aligned} \quad (3)$$

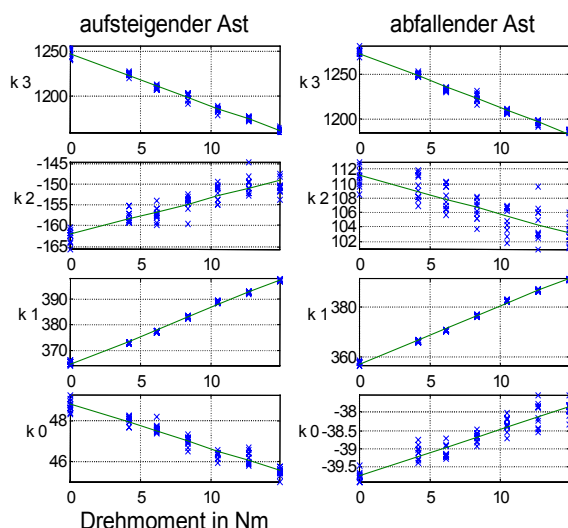


Bild 8: Anpassung mit Polynom 3. Ordnung: Abhängigkeit der Modellparameter vom Drehmoment