

Magnetische Kuriositäten und ihre technischen Anwendungen

1 Physikalische Grundlagen

Bereits vor 35 Jahren entwickelte der Physiker J. Tellermann ein auf dem Prinzip der *Magnetostriktion* beruhendes Meßsystem.

Magnetostriktive Wegaufnehmer eignen sich zur hochgenauen Positionserfassung auch unter rauen Umgebungsbedingungen. Zum Verständnis dieser Technologie werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit zwei Anwendungen skizziert.

Vier physikalische Effekte sind im vorliegenden Kontext von Bedeutung:

- Joule-Effekt
- Villari-Effekt
- Matteucci-Effekt
- Wiedemann-Effekt

a) **Joule-Effekt** (Dimensionsänderung im magnetischen Feld)

Ein ferromagnetischer Stab wird in einem longitudinalen Magnetfeld länger.

Nebst der hier behandelten positiven Magnetostriktion existiert auch eine negative, bei der sich ein Körper unter dem Einfluss eines magnetischen Feldes verkürzt.

b) **Villari-Effekt** (Permeabilitätsänderung durch mechanische Einwirkung)

Ein ferromagnetischer Stab verändert durch eine mechanische Kraft seinen Magnetismus.

c) **Matteucci-Effekt** (Permeabilitätsänderung durch Torsion)

Ein ferromagnetischer Stab, welcher im longitudinalen Magnetfeld verdreht wird, verändert seinen Magnetismus.

d) **Wiedemann-Effekt** (Torsion durch magnetische Felder)

Ein ferromagnetischer Stab, welcher von circularen und longitudinalen Magnetfeldern durchflutet wird, verdreht sich am Ort der Überlagerung beider Felder.

1.1 Joule-Effekt

Als *Joule-Magnetostriktion* bezeichnet der Physikingenieur die Verformung eines ferromagnetischen¹ Körpers durch ein axiales Magnetfeld. Die Längenzunahme von 10 bis 30 $\mu\text{m}/\text{m}$

¹ Zu den ferromagnetischen Stoffen gehören Eisen, Nickel, Cobalt; ferner Eisen-Nickel-Legierungen wie z.B. Permalloy sowie Eisen-Silizium-Verbindungen (Transformatoren-Bleche) und einige seltene Erden. Ein moderner Werkstoff mit ausgeprägten magnetostriktiven Eigenschaften ist Terfenol-D.

bei gleichbleibendem Volumen ist eine direkte Folge der Veränderung der Domänenstruktur (Ausrichtung der Weiss'schen Bezirke) im magnetischen Feld.²

Erstmals beobachtet wurde dieser Effekt 1842 von James Prescott Joule in Form der Längenänderung eines Eisendrahtes im Moment der Magnetisierung.³ Bei diesem auch als *Joule-Effekt* bekannten Phänomen spricht man von einer direkten Magnetostriktion.

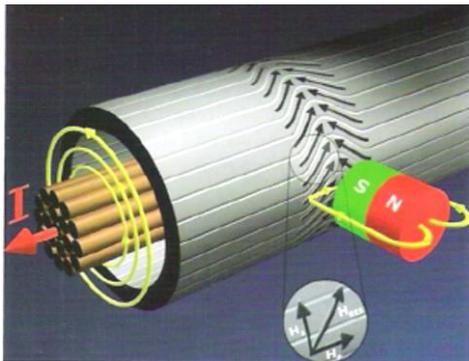
1.2 Villari-Effekt

Bei einem vormagnetisierten Werkstoff aus einer Eisen-Nickel-Legierung führt eine elastische Längenänderung durch Druck oder Zug zu einer Veränderung der Magnetisierung in Richtung der wirkenden mechanischen Spannung.

Emilio Villari wies 1868 Änderungen der Permeabilität in einem ferromagnetischen Körper nach, wenn auf diesen eine deformierende Längskraft einwirkt. Bei diesem als *Villari-Effekt* bekannten Phänomen spricht man von einer inversen Magnetostriktion.

1.3 Wiedemann-Effekt

a) Carlo Matteucci beobachtete, daß die Torsion eines ferromagnetischen Stabes in einem longitudinalen Feld die Magnetisierung des Stabes ändert.⁵



b) Gustav Heinrich Wiedemann präzisierte 1858 diesen Effekt durch die Beobachtung, daß sich ein ferromagnetischer Stab an derjenigen Stelle verdreht, wo sich ein longitudinales magnetisches Feld mit einem zirkularen Magnetfeld kreuzt, welches durch einen im Stab fließenden elektrischen Strom erzeugt wird.⁶

Abb. 1
Wiedemann-Effekt⁴

² Ausser der Joule-Magnetostriktion existiert eine Volumen-Magnetostriktion, bei der sich bei gleicher Formgebung das Volumen verändert.

³ J.P. Joule, *On the Effects of Magnetism upon the Dimensions of Iron and Steel Bars* (1847).

⁴ Abb. 1: Grafik aus *Lineare Weg- und Abstandssensoren* (Verlag Moderne Industrie)

⁵ C. Matteucci, *Cours spécial sur l'induction, le magnétisme de rotation* (Paris, 1854).

⁶ G.H. Wiedemann, *Die Lehre vom Galvanismus und Elektromagnetismus*, 2 Bde. (Basel, 1861-63).

2 Technische Anwendungen

2.1 Magnetostriktive Füllstandsmessung

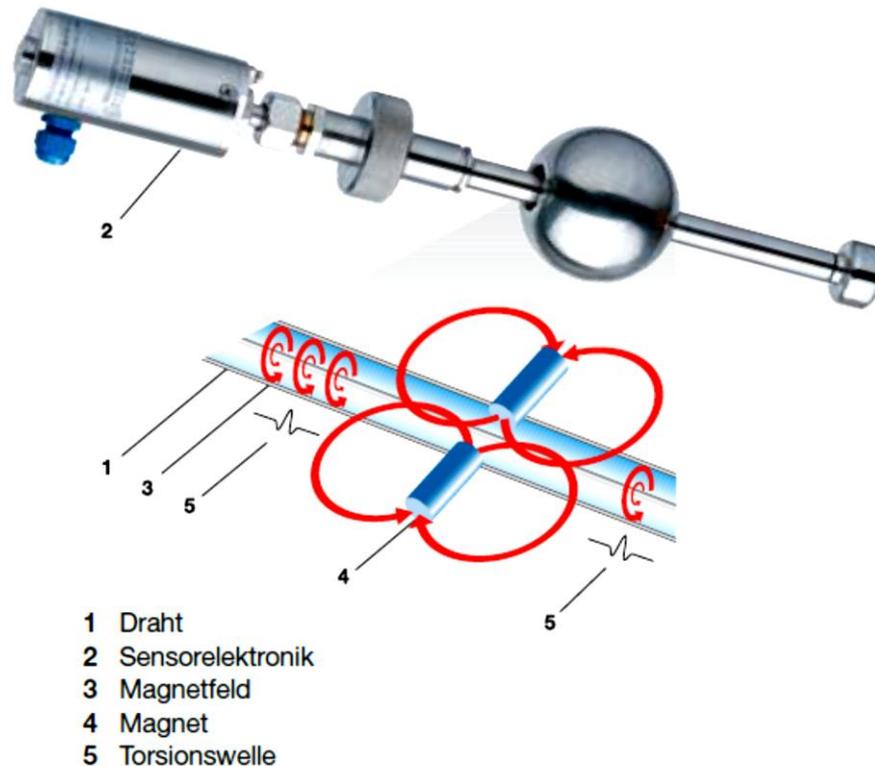


Abb. 2

Kontinuierliche Füllstandserfassung nach dem magnetostriktiven Prinzip⁷

Als Messelement dient ein Wellenleiter aus einem magnetostriktiven Material. Oft wird ein dünnes Rohr aus einer Eisen-Nickel-Legierung mit einem lichten Durchmesser von ca. 0,5 mm verwendet. Im Innern befindet sich ein axial verlaufender Kupferleiter. Eine alternative Bauform besteht aus einem Nickeldraht mit 0,8 mm Außendurchmesser.

Der Messvorgang wird mit einem Stromimpuls ($T_i < 5 \mu\text{s}$) durch den Kupferdraht eingeleitet. Der elektrische Strom erzeugt ein zirkuläres Magnetfeld. Im beweglichen Schwimmer befindet sich ein Permanentmagnet, dessen Feldlinien das zirkuläre Feld kreuzen. Dort, wo sich die beiden Magnetfelder im Wellenleiter überlagern, entsteht durch den *Wiedemann-Effekt* eine Torsion resp. Verdrehung. Durch diese kurzzeitige elastische Verformung wird eine sich nach beiden Seiten ausbreitende Körperschallwelle erzeugt. Die zum leeren Ende des Wellenleiters laufende Komponente wird von einem Dämpfungselement absorbiert, während die zum Signalwandler laufende Welle ein elektrisches Signal generiert. Die Signalbildung aufgrund des inversen magnetostriktiven Effektes⁸ erfolgt mit einer Pickup-Spule oder mit

⁷ Abb. 2: Grafik aus „WIKA Produktbroschüre“.

⁸ Präziserend müsste man im Kontext ausser dem *Villari-Effekt* auch den *Matteucci-Effekt* erwähnen.

einem piezokeramischen Umformer.⁹

Die Position des Schwimmers (= Pegelstand) wird mit folgender Näherungsformel bestimmt:

$$s \approx v \cdot t$$

v := Wellengeschwindigkeit; $v = \sqrt{(G/\rho)} \approx 2'850 \text{ m/s}$
 t := Laufzeit (Zeitspanne zwischen Stromimpuls und Detektion)

2.2 Magnetostruktive Längenmessung

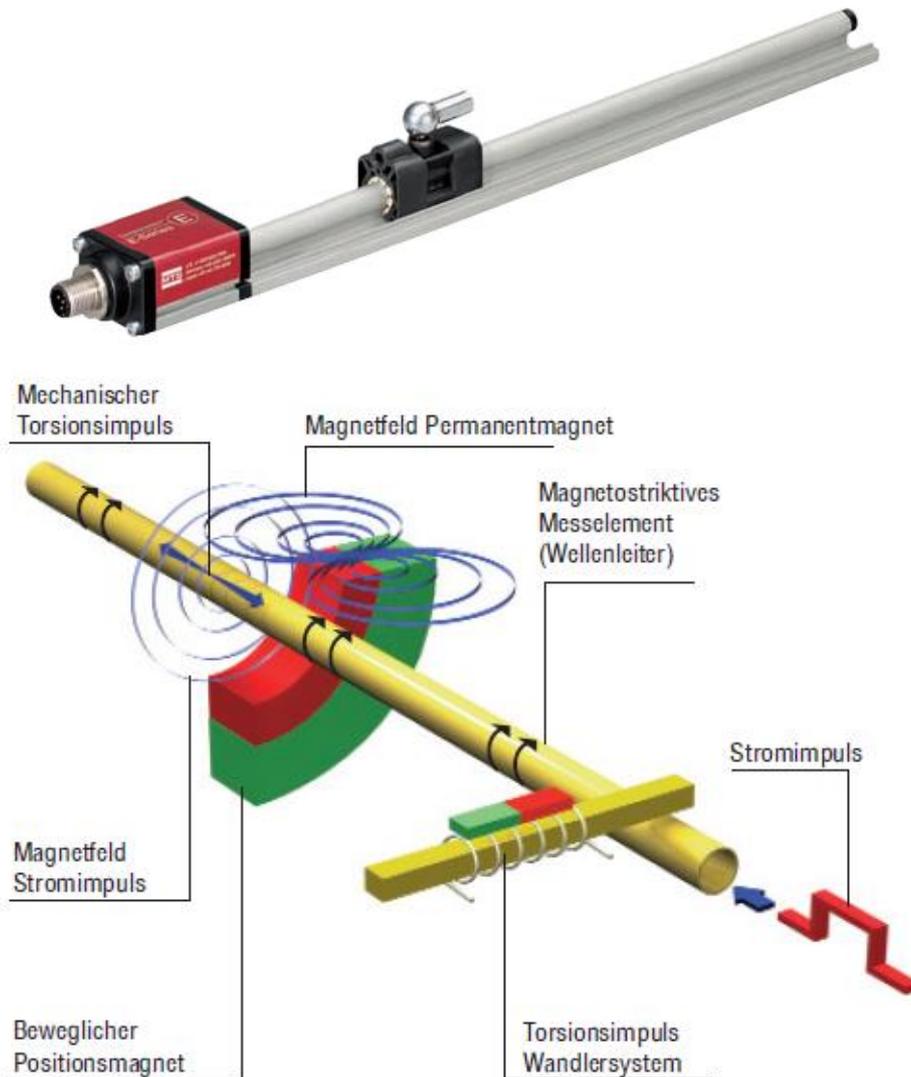


Abb. 3

Kontinuierliche Positionserfassung nach dem magnetostruktiven Prinzip¹⁰

Zwei sich in einem Wellenleiter orthogonal schneidende Magnetfelder verursachen durch Interaktion einen „Torsionsimpuls“, der sich in Form einer akustischen Welle ausbreitet. Die

⁹ Piezokeramische Sensoren nutzen den *Piezoelektrischen Effekt*; darunter versteht man die Erzeugung von Oberflächenladung bei einem Kristall, wenn dieser einer mechanischen Verformung unterworfen ist (entdeckt 1880 von den Gebrüder Jaques und Pierre Curie).

¹⁰ Abb. 3: Grafik aus „MTS Produktbroschüre“.

Wellenlaufzeit wird von einer Auswertelektronik im Sensorkopf in ein zur jeweiligen Position proportionales Meßsignal umgesetzt. Auf diese Weise entsteht ein zuverlässiges Positionsmesssystem mit hoher Genauigkeit, Wiederholbarkeit und Störfestigkeit gegenüber äußeren mechanischen Einflüssen.

Das für die Torsion benötigte tangentielle Feld wird durch den Positionsmagneten generiert, der sich berührungslos am Sensorstab entlangbewegt. Das den Wellenleiter konzentrisch umgebende magnetische Wirbelfeld wird durch einen Stromimpuls induziert.

Zur Detektion der Ultraschallwelle dient im einfachsten Fall eine Spule, mit welcher die im Wellenleiter entstehende Veränderung der magnetischen Eigenschaften registriert wird. Komplexere Systeme benutzen – wie in Abb. 3 dargestellt – ein Torsionsimpuls-Wandler-System. Dieses besteht aus einem aus magnetostriktivem Material gefertigten Blechstreifen, der mit dem Wellenleiter fest verbunden ist, sowie aus einer Spule und einem ortsfesten Permanentmagneten.¹¹ Zur Signalbildung wird der *Villari-Effekt* genutzt. Das auf diese Weise gewonnene Signal wird in einer nachgeschalteten Elektronikstufe weiterverarbeitet.

2.3 Aktoren

Die Magnetostriktion wird nicht nur bei Sensoren, sondern auch für „unkonventionelle Aktoren“ genutzt, z.B. für ein Einspritzventil mit magnetostriktivem Stab im Kraftfahrzeug (um eines von mehreren Beispielen zu nennen).

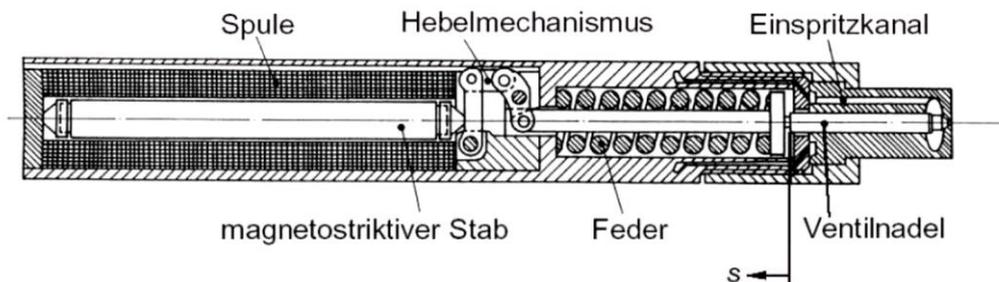


Abb. 4
Einspritzventil mit magnetostriktivem Stab¹²

Fachliteratur

Hering E., Schönfelder G.

Sensoren in Wissenschaft und Technik, Vieweg + Teubner

Hesse S., Schnell G.

Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation, Vieweg + Teubner

Janocha H.

Unkonventionelle Aktoren, Oldenbourg Wissenschaftsverlag

¹¹ Bias-Magnet

¹² H. Janocha, *Unkonventionelle Aktoren im Kraftfahrzeug* (Zentrum für innovative Produkte, 2004).