

# Tunnelmagnetoresistive Sensoren für die Antriebstechnik

*Für das Messen von Länge, Position und Winkel setzen sich Sensoren in TMR-Technologie weiter durch. Unterschiede zu AMR- und GMR-Sensoren skizziert dieser Beitrag und zeigt das Verhalten im Drehfeld.*

ROLF SLATTER \*



Bild: Sensitec

**Bild 1:** Besonderes Kennzeichen der TMR-Sensortechnologie ist neben hoher Temperaturstabilität und hoher Genauigkeit die extrem niedrige Leistungsaufnahme, sodass die Versorgung neben Batterie auch durch Energy Harvesting interessant ist.

Die Nutzung von magneto-resistiven Effekten (MR-Effekt) ist vor allem überall dort naheliegend, wo das technische Problem der Umwandlung von magnetischer Information in elektrische Signale zu lösen ist. Die MR-Effekte sind deshalb für weite Bereiche der heutigen Sensorik und der magnetischen Speichertechnik von Interesse. Mit ihrer Hilfe lassen sich Magnetfeldänderungen, die Indikatoren für magnetische, elektrische oder mechanische Parameter sein können, in elektrische Signale umwandeln, die dann mit herkömmlicher Elektronik weiterverarbeitet werden können. Für die Praxis interessant ist hierbei, dass die Änderungen des Magnetfeldes berührungslos (und damit verschleißfrei) gemessen werden.

Die zurzeit größte kommerzielle Anwendung ist in den Leseköpfen von Festplatten zu finden. Hier bilden die MR-Effekte die Grundlage dafür, die stetig zunehmende Datenmenge technisch zu bewältigen. Die Industrie-Sensorik bildet heute aber den Be-

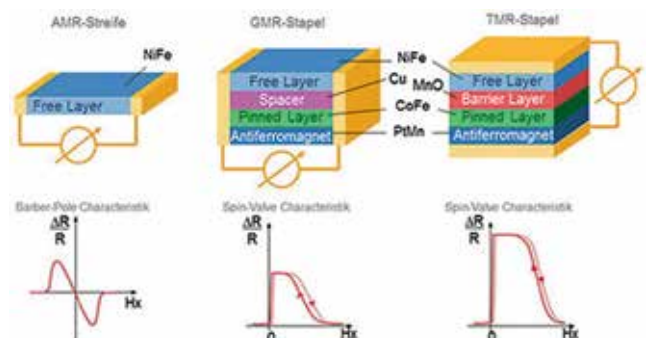
reich, in dem die Einsätze am schnellsten wachsen. So eröffnen sich stetig neue Anwendungen im Fahrzeug- und Maschinenbau, der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung oder der Medizintechnik. Seit etwa 1990 ist mit den so genannten xMR-Technologien (x: any, MR: magneto-resistance) ein ganz neues Anwendungsgebiet des Magnetismus entstanden, das sich gegenwärtig weltweit sehr dynamisch entwickelt.

Der magnetische Tunnelwiderstand ist ein magneto-resistiver Effekt, der in magnetischen Tunnelkontakten auftritt. In seiner einfachsten Form handelt es sich um ein Bauelement bestehend aus zwei Ferromagneten (Free Layer und Pinned Layer dargestellt in Bild 2), die durch einen dünnen Isolator getrennt sind. Ist die isolierende Schicht oder Tunnelbarriere (Barrier Layer dargestellt in Bild 2) extrem dünn (einige wenige Nanometer, ähnlich groß wie der Durchmesser der menschlichen DNA), so können Elektronen zwischen den beiden Ferromagneten „tunneln“. Dieser Vorgang ist mit Hilfe der klassischen Physik nicht erklärbar und ist daher ein rein quantenmechanisches Phänomen [1].

Unter dem Einfluss eines äußeren Magnetfeldes kann die Richtung der Magnetisierung der beiden magnetischen Schichten unabhängig voneinander gesteuert werden. Wenn

Bild: Sensitec

**Bild 2:** Vergleich von AMR-, GMR- und TMR-Technologien (Aufbau und Signalverlauf).



\* Dr. Rolf Slatter  
... ist Geschäftsführer bei Sensitec, Lahnau.

die Magnetisierungen gleich ausgerichtet sind, ist die Wahrscheinlichkeit, dass Elektronen durch die Isolatorschicht hindurch tunneln größer als bei gegensätzlicher Ausrichtung. Damit kann der elektrische Widerstand zwischen unterschiedlichen Widerstandszuständen ( $\Delta R/R$ ) variieren.

Obwohl der TMR-Effekt seit den 1970er Jahren bekannt ist, war es erst durch verbesserte Prozesstechnik ab Mitte der 1990er Jahre möglich, reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Seit wenigen Jahren hat die Entwicklung nun auch in die Industrie Einzug gehalten, sodass inzwischen Festplatten mit TMR- statt GMR (Giant MR-Effekt)-Schreib-Leseköpfen angeboten werden. Trotzdem ist auf dem Gebiet der Sensorik bisher vornehmlich mit AMR (Anisotrope MR-Effekt) und GMR gearbeitet worden (siehe Bild 2).

### Geegnet für Batteriebetrieb oder Energy Harvesting

Der Widerstand des TMR-Sensors ist definiert durch die Fläche der Tunnelverbindung und die Schichtdicke bzw. der Flächenwiderstand der Barriere. Ein typischer Flächenwiderstand einer  $Al_2O_3$ -Barriere liegt bei  $10\text{ M}\Omega/\mu\text{m}^2$ . Gestaltet man eine Tunnelbarriere von  $100\ \mu\text{m}^2$  Fläche, so ergibt sich ein Widerstand von  $100\ \text{k}\Omega$  von einem einzigen Tunnelelement. Im Gegensatz zu AMR und GMR Sensoren gilt: je kleiner das Sensorelement, desto größer der Widerstand. Kleinere Tunnelelemente führen zu einem höheren Widerstand. Dies ist ein elementarer Unterschied zu herkömmlichen AMR- und GMR-Sensoren. Er ermöglicht es, auf gleichem Platz wesentlich hochohmigere Sensoren zu platzieren als es mit AMR- oder GMR-Sensoren möglich ist. Dadurch kann mit TMR der Leistungsverbrauch um einen Faktor 100 bis 1000 reduziert werden [2]. Die TMR-Sensoren (Bild 4) eignen sich somit gut für Anwendungen, die eine geringe Leistungsaufnahme

Bild: Sensitec



**Bild 3:** Vergleich des Energieverbrauchs in einer beispielhaften Anwendung der Sensorik (TMR-Sensor rechts im Vergleich zum AMR-Sensor links).

Bild: Sensitec

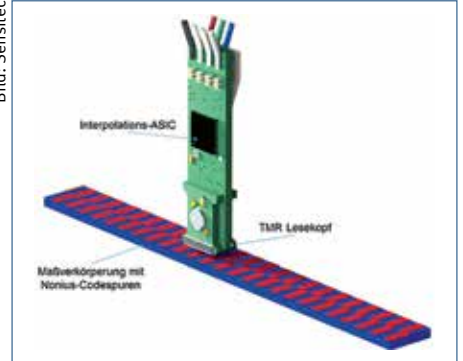


**Bild 4:** Beispiel eines TMR-Winkelsensors (TA901) für inkrementale und absolute Winkelgeber mit schneller Winkelgeschwindigkeitsmessung (Winkelgeschwindigkeit des Magnetfeldes bis 1 MHz).

erfordern, beispielsweise bei Batteriebetrieb oder bei autarken Sensoren mit Energy Harvesting. Ein weiterer ganz wesentlicher Unterschied zwischen AMR-Sensoren und GMR- bzw. TMR-Sensoren ist das Verhalten im Drehfeld. Dreht bei einem AMR-Sensor die Magnetisierung um  $90^\circ$  von parallel zur Stromrichtung auf senkrecht zur Stromrichtung, ist bereits der komplette MR-Hub erschöpft und bei  $180^\circ$  der Ausgangszustand wieder gegeben. Die Periodizität ist demnach nur  $180^\circ$ . Im Gegensatz dazu ist bei GMR- und TMR-Systemen der Ausgangszustand erst nach einer vollen Umdrehung wieder erreicht und somit besteht eine Periodizität von  $360^\circ$ .

Die TMR-Sensoren werden auch in Dünnschichttechnologie hergestellt, wobei we-

Bild: Sensitec



**Bild 5:** Zur absoluten Winkelbestimmung am Wellenumfang nutzt der TMR-Längensensor das Nonius-Prinzip.

sentliche Teile der Produktionskette für GMR-Sensoren übernommen werden können. Diese Unterschiede sind in der Tabelle (nächste Seite) zusammengefasst. Die Tabelle macht auch deutlich, dass AMR, GMR und TMR komplementäre Technologien sind. Alle drei MR-Effekte verfügen über spezifische Vorteile, die in einer bestimmten Anwendung entscheidend sein können. Alle MR-Effekte bieten deutliche Vorteile gegenüber bisherigen magnetischen Sensoren, z.B. jene, die auf dem Hall-Effekt beruhen [3, 4]. Insbesondere hat sich gezeigt, dass die Messtechnik bei Arbeitsabständen bzw. Luftspalten funktioniert, bei denen die bisherige Hall-Sensorik versagt hat. Außerdem ist die Leistungsaufnahme des Sensors um Größenordnungen geringer als bei Hall- bzw. auch

AMR- und GMR-Sensoren, was Anwendungen in autarken, drahtlosen Sensoren ermöglichen kann [5, 6, 7].

TMR-Sensoren sind nicht nur für inkrementelle Winkelmessung anwendbar, sondern auch für absolute Winkelmessung am Wellenende oder am Wellenumfang. Um letzteres zu ermöglichen, wird das Nonius-Prinzip angewandt, d.h. es werden zwei oder drei Spuren mit unterschiedlichen Polteilungen benutzt und der Winkel durch die unterschiedlichen Phasenlagen der Signale der jeweiligen Sensoren (ein Sensor pro Spur) berechnet (Bild 5). In Zusammenarbeit mit NTN-SNR Bearings hat Sensitec eine neue Lösung entwickelt mit einer Auflösung bis 17 Bit/Umdrehung (131.072 Impulse/Umdrehung) sowie einer sehr hohen absoluten Winkelgenauigkeit von  $\pm 0,1^\circ$  (Bild 6).

Bei einer weiteren interessanten Anwendung handelt es sich um kabellose Linearführungssysteme mit integrierter Positionsmessung (Bild 7). Im Verbundprojekt „KaLiPso“ haben Sensitec, SNR Wälzlager und das Institut für Fertigungstechnik der Leibniz Universität Hannover mit Unterstützung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) zwischen 2013 und 2015 gemeinsam an dieser Entwicklung gearbeitet [8].

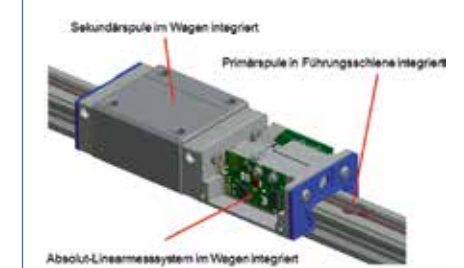
Linearführungssysteme bilden die Basis für jegliche lineare Bewegung innerhalb von Maschinen und Anlagen in vielen industriellen Bereichen. Die Produktivität der Maschinen und Anlagen verlangt nach Systemen mit hoher Leistungsdichte bezogen auf Verfahrgeschwindigkeit und Genauigkeit; die Anwender verlangen nach geringem Montage- und Wartungsaufwand. Externe Messsysteme verursachen hohen Montageaufwand. Kabel, die rauen Betriebsbedingungen (Kühlschmiermittel, Späne, Temperatur) unterliegen, sind häufig Ursache von Stillständen und Ausfällen. Deshalb wird im Projekt KaLiPso die Grundlage für ein Pro-



**Bild 6:** Ein TMR-Winkel- und -Drehzahlsensor für die radiale Abtastung.



**Bild 7:** Linearführungssystem mit integrierter Positionsmessung (zur detaillierten Betrachtung des Sensorik siehe Bild 8).



**Bild 8:** Das kabellose Linearführungssystem mit integrierter Positionsmessung aus Bild 7 im Detailbild erklärt.

dukt geschaffen, bei dem das externe Messsystem in das Führungssystem integriert werden kann, um Störanfälligkeit und Montagekosten zu minimieren. Um die Verfügbarkeit weiter zu steigern und neue Anwen-

dungen zu ermöglichen, wird das Kabel durch eine drahtlose Kommunikation ersetzt. Dies wird über die im Projekt entwickelte Sensortechnik mit extrem geringer Energieaufnahme, einer dazu passenden drahtlosen Datenübertragung und die Versorgung des Systems aus der Umgebungenergie möglich (Bild 8).

Das neue Positionsmesssystem, welches auf der Hannover Messe 2015 als Studie erstmals der Öffentlichkeit vorgestellt wurde und jetzt für den Serieneinsatz vorbereitet wird, zeichnet sich sowohl durch eine extrem geringe Leistungsaufnahme als auch durch eine hohe Auflösung aus. Dadurch ergeben sich zwei Alleinstellungsmerkmale für diese innovative Lösung: Erstens werden Kabel und Kabelschlepp zwischen Antrieb und Schlitten nicht benötigt. Die Energie kann von einer Batterie oder einer lokalen Energiequelle über Energy Harvesting geliefert werden. Zweitens wird die Positionsmessung nie ausgeschaltet, sodass jede Bewegung des Schlittens kontinuierlich verfolgt und die aktuelle Absolut-Position immer gespeichert bleibt, selbst bei ausgeschalteter Motorsteuerungseinheit. // KU

**Sensitec**

**Literaturhinweise**

- [1] Duret, C. et al, "TMR: a new frontier for magnetic sensing", Proc. of 11th Symposium Magneto-resistive Sensors and Magnetic Systems, Wetzlar, 2011
- [2] Paul, J., Lehdorff, R. & Duret, C.; „Ressourceneffizienz am Beispiel magneto-resistiver Sensoren“, Mikrosystemtechnik Kongress 2011, Darmstadt
- [3] Slatter, R.; „Neuartige magneto-resistive Sensoren für Winkel- und Längenmessaufgaben im Automobil“, Sensoren im Automobil IV, Expert Verlag, Renningen, 2011
- [4] Doms, M. et al; "AMR vs. GMR vs. TMR – Eigenschaften, Unterschiede, Anwendungen", Proc. of 5. Mikrosystemkongress, Aachen, 2013
- [5] Duret, C. et al; „TMR: Going to Applications“, Proc. of 12th Symposium Magneto-resistive Sensors and Magnetic Systems, Wetzlar, 2013
- [6] Slatter, R., Doms, M., "Energy efficient magneto-resistive sensors for low-power and wireless applications", Proc. of Smart Systems Integration Conference, Vienna, 2014
- [7] Slatter, R., Buß, R.; „Energieeffiziente, miniaturisierte magnetische Sensoren für energieautarke Anwendungen“, 8. GMM-Workshop Energieautarke Sensorik - EAS 2016, Renningen, 2016
- [8] Lindemann, R.; "KaLiPso - Wireless position measuring in linear guides using integrated TMR Sensors", Proc. of 14th Symposium Magneto-resistive Sensors and Magnetic Systems, Wetzlar, 2017
- [9] Slatter, R., von Manteuffel, G.; „Neue Entwicklungen bei magneto-resistiven Sensoren für Weg-, Winkel-, Strom- und Feldmessung in und um das Automobil“ in Automobil-Sensorik, Tille, T. (Hrsg.), Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016.

	AMR	GMR	TMR	HALL
$\Delta R/R$	0	+	++	-
Empfindlichkeit	+	+	+	-
Signal/Rauschen	++	0	0	-
Bandbreite	++	+	+	-
Leistungsaufnahme	0	+	++	-
Temperaturstabilität	+	++	++	-
Hysterese	++	0	0	++
Strahlungsresistenz	+	+	+	-
Miniaturisierbarkeit	0	+	++	-

**Tabelle:** Ein Vergleich der magnetischen Sensorelemente nach Technologien.