

Neuartige Winkel- und Drehzahlsensoren auf Basis des Tunnelmagnetoresistiven-Effekts

Der Bedarf an mechatronischen Antrieben steigt in mehreren Industriebereichen. Nicht nur bei der Industrieautomatisierung, sondern auch in der Fahrzeugtechnik und der Luftfahrt nimmt die Anzahl der eingesetzten Antriebe stetig zu. „Dezentralisierte Antriebstechnik“, „steer-by-wire“ oder „more electric aircraft“ sind nur einige der Begriffe, die diesen Trend in den verschiedenen technologischen Bereichen beschreiben. Diese Entwicklung stellt neue Anforderungen an die eingesetzte Sensortechnologie für die Messung von linearen und rotatorischen Bewegungen.



Bild 1

TMR Sensortechnologie – Flexibel, effizient und smart. (Bild © Sensitec)

Längen- und Winkelmesssysteme auf magnetischer Basis erleben in den letzten Jahren ein rasantes Wachstum. Allen voran finden Sensoren auf Basis des magnetoresistiven (MR) Effekts zunehmend Anwendung in der Antriebstechnik, sowohl im industriellen als auch im automobilen Bereich. MR-Sensoren werden nicht nur bei der Regelung von mechatronischen, sondern auch bei pneumatischen und hydraulischen

Antrieben eingesetzt. Es können inkrementelle als auch absolute Messungen in einer Vielzahl von unterschiedlichen Konfigurationen durchgeführt werden.

Die Nutzung von magnetoresistiven (MR)-Effekten 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 können Magnetfeldänderungen, die Indikatoren für magnetische, elektrische oder mechanische Parameter sein können, in elektrische Signale umgewandelt werden, welche dann mit herkömmlicher Elektronik weiterverarbeitet werden können. Interessant ist hierbei, dass die Magnetfeldänderungen berührungsfrei gemessen werden (**Bild 1**).

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 Sensorik bildet aber heute den Bereich, in dem die Anwendungen 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: magnetoresistance) ein ganz neues Anwendungsgebiet des Magnetismus entstanden, das sich gegenwärtig weltweit sehr dynamisch entwickelt.

Grundlagen der magnetoresistiven Sensortechnologie

Der magnetische Tunnelwiderstand ist ein magnetoresistiver 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 die Magnetisierungen gleich ausgerichtet sind, ist die Wahrscheinlichkeit, dass Elektronen durch die Isolatorschicht

Autor

Dr. Rolf Slatter
Geschäftsführer, Sensitec

Kontakt:
Sensitec GmbH
Georg-Ohm-Straße 11
35633 Lahnau
www.sensitec.de

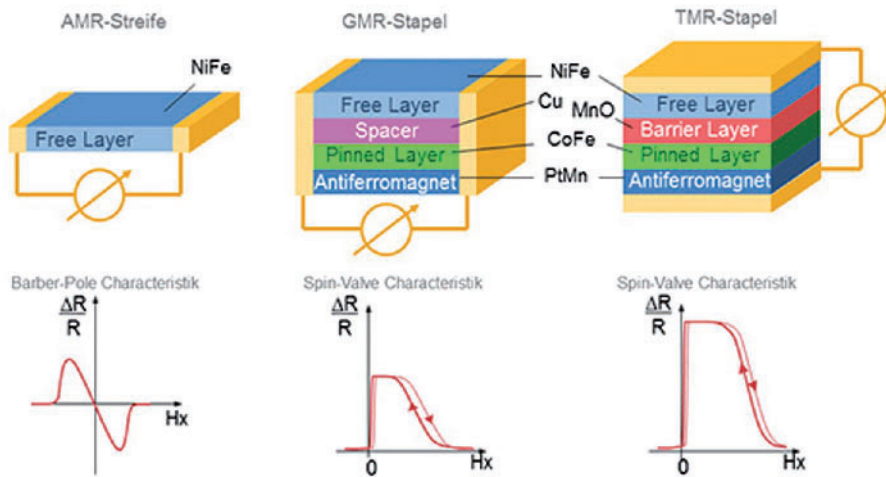


Bild 2
Vergleich der XMR Technologien. (Bild © Sensitec)

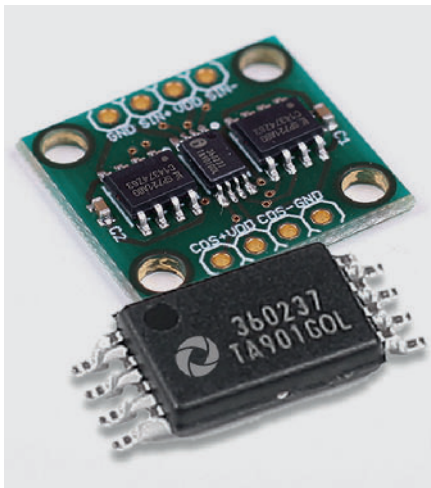


Bild 3
TMR Winkelsensor TA901. (Bild © Sensitec)

hindurch tunneln größer als bei gegensätzlicher Ausrichtung. Damit kann der elektrische Widerstand zwischen unterschiedlichen Widerstandszuständen (R/R) variieren. Obwohl der Tunnelmagneto-resistiven (TMR)-Effekt seit den 1970er Jahren bekannt war, 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, so dass inzwischen Festplatten mit TMR- statt GMR (Giant MR-Effekt)-Schreib-Leseköpfen angeboten werden. Trotzdem ist auf dem Gebiet der Sensorik bisher vornehmlich mit AMR (Anisotroper MR-Effekt) und GMR gearbeitet worden (siehe Bild 2).

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 $10 \text{ MOhm}/\mu\text{m}^2$. Gestaltet man eine Tunnelbarriere von $100 \mu\text{m}^2$ Fläche, so ergibt sich ein Widerstand von 100 kOhm 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, 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 3 zeigt den TMR Winkelsensor TA901) eignen sich so besonders in Anwendungen, wo geringe Leistungsaufnahme erforderlich ist, z. B. bei Batteriebetrieb oder bei autarken Sensoren mit „Energy Harvesting“.

Vergleich mit anderen magnetischen Sensoren

Ein weiterer ganz wesentlicher Unterschied zwischen AMR Sensoren und GMR bzw. TMR Sensoren ist das Verhalten im Drehfeld. Dreht bei einem

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

Tabelle 1
Vergleich magnetischer Sensorelemente.

Messen, Prüfen, Überwachen

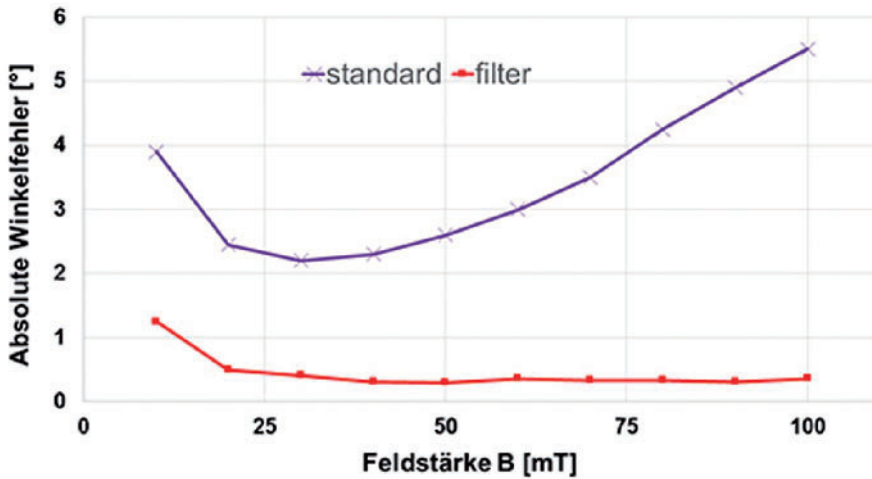
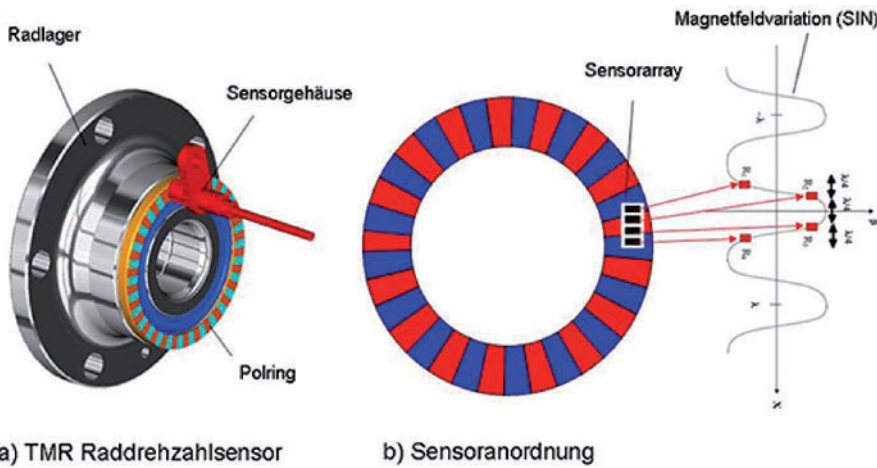


Bild 4
Optimierung der Winkelgenauigkeit mittels Oberwellenfilterung. (Bild © Sensitec)

AMR Sensor die Magnetisierung um 90° von parallel zur Stromrichtung auf senkrecht zur Stromrichtung, ist bereits der komplette MR-Hub erschöpft und bei 180° ist der Ausgangszustand wieder gegeben. Die Periodizität ist demnach nur 180°. Im Gegensatz dazu ist bei GMR und TMR Systemen der Ausgangszustand erst nach einer vollen Umdrehung wieder erreicht und somit eine Periodizität von 360° gegeben.

Die TMR Sensoren werden auch in Dünnschichttechnologie hergestellt, wobei wesentliche Teile der Produktionskette für GMR Sensoren übernommen werden können. Die Unterschiede werden in **Tabelle 1** 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, zum Beispiel jene, die auf dem Hall-Effekt beruhen [3, 4].

Um höchste Anforderungen an Signalqualität zu erfüllen, wird eine Oberwellenfilterung bei der Abbildung der Magnetfeldrichtung in ein elektrisches Signal genutzt. Diese Filterung verursacht keine zusätzlichen Signallaufzeiten. Durch die Oberwellenfilterung werden mehrere Oberwellen unterdrückt, und das analoge Sensorausgangssignal gleicht dadurch nahezu einem perfekten Sinus. Durch dieses Ver-



a) TMR Raddrehzahlsensor **b) Sensoranordnung**

Bild 5
Funktionsprinzip des Raddrehzahlsensors. (Bild © NTN-SNR Bearings)

	AMR	TMR
Periodizität	180°	360°
Genauigkeit	0.1°	0.4°
Signal Amplitude	12 mV/V	80 mV/V
Amplitude TK	-0,35%/K	-0,15%/K
Offset	2 mV/V	3 mV/V
Relativer Offset TK	~ 1,6% @100 K	~ 1% @100 K
Widerstand TK	0,42%/K	-0,1%/K
Hysterese	Vernachlässigbar	0,1 %
Sensorwiderstand	Meanderfläche	Barrierdicke

Tabelle 2
Vergleich zwischen AMR- und TMR-Winkelsensoren.

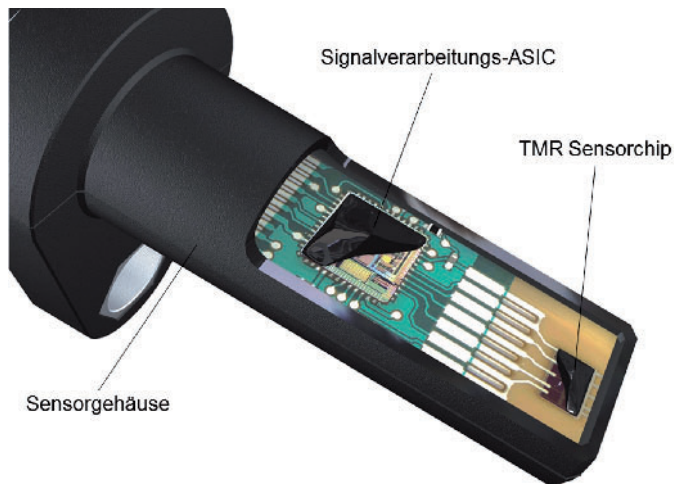


Bild 6
TMR Radrehzahlsensor. (Bild © NTN-SNR Bearings)

fahren können absolute Winkelgenauigkeiten von besser als $0,4^\circ$ bei Raumtemperatur und ideale Einbautoleranzen über ein breites Feldstärkenbereich erreicht werden (**Bild 4**).

Bei dem quantitativen Vergleich von Leistungseigenschaften von gängigen AMR und TMR Winkelsensoren, dargestellt in **Tabelle 2**, erkennt man, dass der AMR Sensor weiterhin eine höhere Genauigkeit und niedrigere Hysterese aufweist. Der TMR Sensor kann jedoch eine absolute Winkelmessung über 360° ermöglichen und weist eine exzellente Temperaturstabilität aus, was in vielen Anwendungen einen Temperaturabgleich überflüssig macht. Weiterhin bedeutet die hohe Signalamplitude, dass oft auf eine Verstärkung des Analog-Sensorsignals verzichtet werden kann, was wiederum zu Kostensparnissen führen kann.

Anwendungen von TMR-Sensoren

Sensitec arbeitet seit mehreren Jahren in Forschungsprojekten mit NTN-SNR Bearings, Erfinder des ASBs (Active Sensor Bearing), zusammen sowie mit der Technischen Universität Kaiserslautern als auch der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. Im Rahmen eines französisch-deutschen Projekts namens „CAMEL“ wurde ein TMR Sensor entwickelt, der auf einer Al₂O₃-Tunnelbarriere basiert. Neben den technischen Machbarkeitsstudien lag ein Schwerpunkt des Projekts auf der Industrialisierung des Sensorherstellungsprozesses und bei der Untersuchung von potenziellen automobilen Anwendungen [5]. Eine wichtige Anwendung im Rahmen des CAMEL Projektes war die Erfassung von Polringen,

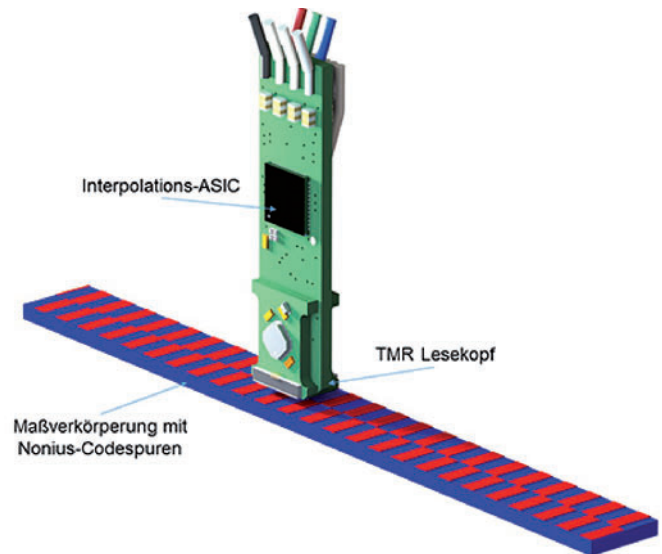


Bild 7
Nonius-Prinzip mit TMR Längensensor. (Bild © Sensitec)

beispielsweise zur Winkel- und Geschwindigkeitsmessung. **Bild 5** illustriert ein typisches Messprinzip.

Der Polring produziert ein periodisches Magnetfeld. Vier Tunnelelemente sind räumlich versetzt angeordnet, so dass sie unterschiedliche Phasen des Magnetfeldes abtasten. Üblicherweise werden für einen Sensor einzelne MR-Elemente zu einer Wheatstone-Brücke verschaltet. Um die Offset-Spannung der Brücke klein zu halten, müssen die Widerstände der Einzelelemente quasi identisch sein. Bei TMR Sensoren müsste man dafür die Widerstände einzelner Tunnelelemente exakt kontrollieren, was in der Praxis schwierig zu realisieren ist. Daher wurde ein alternatives Sensor-Konzept entwickelt, in dem vier Blöcke aus Tunnelelementen in Serie geschaltet und in einem so genannten „current loop circuit“ verarbeitet werden. Die Ausgangsspannungen der einzelnen Blöcke können in einer ersten Stufe der Elektronik separat verstärkt und somit unterschiedliche Widerstände der einzelnen Blöcke kompensiert werden. Durch Verschaltung der einzelnen Blöcke erhält man zwei sinusförmige Signale, die um 90° phasenverschoben sind und somit eine genaue Winkelmessung ermöglichen. Mit dieser Auswerteelektronik wurden die TMR Sensoren zum Einsatz an Polringen getestet (**Bild 6**).

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 Größenord-

nungen geringer als bei Hall beziehungsweise auch AMR- und GMR-Sensoren, was Anwendungen in autarken, drahtlosen Sensoren ermöglichen kann [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 wird durch die unterschiedlichen Phasenlagen der Signale der jeweiligen Sensoren (ein Sensor pro Spur) berechnet (**Bild 7**). In Zusammenarbeit mit NTN-SNR hat Sensitec eine neue Lösung entwickelt mit einer Auflösung bis 17 bit/Umdrehung (131.072 Puls/Umdrehung) sowie einer sehr hohen absoluten Winkelgenauigkeit von $\pm 0,1^\circ$ (**Bild 8**). Durch diese Anwendungen deutet sich jetzt schon an, dass dieser neue MR-Effekt die Verbreitung von MR-Sensoren insbesondere in der Antriebs- und Fahrzeugtechnik weiter beschleunigen wird [8].

Zusammenfassung

Steigende Anforderungen an Sensoren in der Antriebstechnik führen zu einem wachsenden Anteil an magnetischen Sensoren, insbesondere jener, die auf dem magnetoresistiven Effekt basieren. MR Sensoren sind ein gelungenes Beispiel für die Mikro-Nano-Integration. Aktuelle Neuentwicklungen öffnen neue Möglichkeiten für den

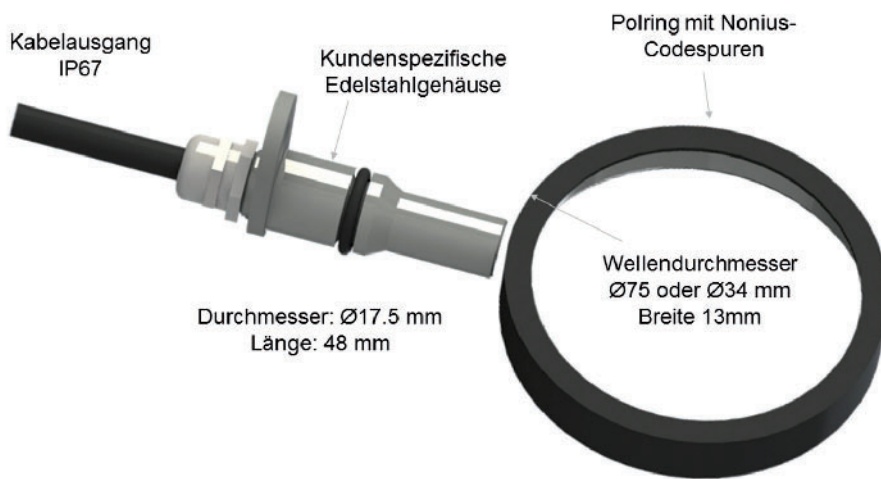


Bild 8

TMR Winkel- und Drehzahlsensor für radiale Abtastung. (Bild © NTN-SNR Bearings)

Fahrzeugentwickler. Bei TMR Sensoren verfügt eine neue Winkelsensorfamilie über eine höhere Winkelgenauigkeit und höhere Dynamik als bisherige TMR Sensoren und auch Hall-Effekt Sensoren. TMR Sensoren sind nicht nur für Winkel- und Längenmessaufgaben geeignet, sondern auch für An-

wendungen im Bereich der Feld- oder Strommessung.

Literatur

[1] Duret, C.; et al: TMR : a new frontier for magnetic sensing. Proc. of 11th Symposium Magnetoresistive Sensors and Magnetic Systems, Wetzlar, 2011

[2] Paul, J.; Lehdorff, R.; Duret, C.: Ressourceneffizienz am Beispiel magnetoresistiver Sensoren. Mikrosystemtechnik Kongress 2011, Darmstadt

[3] Slatter, R.: Neuartige magnetoresistive 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, Germany, 2013

[5] Duret, C.; et al: TMR: Going to Applications. Proc. of 12th Symposium Magnetoresistive Sensors and Magnetic Systems, Wetzlar, 2013

[6] Slatter, R.; Doms, M.: Energy efficient magnetoresistive 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] Slatter, R.; von Manteuffel, G: Neue Entwicklungen bei magnetoresistiven Sensoren für Weg-, Winkel-, Strom- und Feldmessung in und um das Automobil. In Automobil-Sensorik, Tille, T. (Hrsg.), Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016