Energieeffiziente magnetoresistive TMR-Sensoren

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 – mögliche Indikatoren für magnetische, elektrische oder mechanische Parameter – in elektrische Signale umgewandelt werden, die dann mit herkömmlicher Elektronik weiterverarbeitet werden können. Interessant ist hierbei die berührungsfreie Messung der Magnetfeldänderungen.

Bild 1
Die TMR-Technologie ermöglicht flexible und effiziente Sensoren. *Bild © Sensitec GmbH*

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 (**Bild 1**). Seit etwa 1990 ist mit den sogenannten XMR-Technologien (X: any, MR: magnetoresistance) ein ganz neues Anwendungsgebiet des Magnetismus entstanden, das sich gegenwärtig weltweit sehr dynamisch entwickelt.

Autor
Dr. Rolf Slatter
Geschäftsführer Sensitec

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

Technische Beschreibung

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, **Bild 2**), die durch einen dünnen Isolator getrennt sind. Ist die isolierende Schicht oder Tunnelbarriere (Barrier Layer, 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 mithilfe der klassischen Physik nicht erklärbar und daher ein rein quantenmechanisches Phänomen [1].

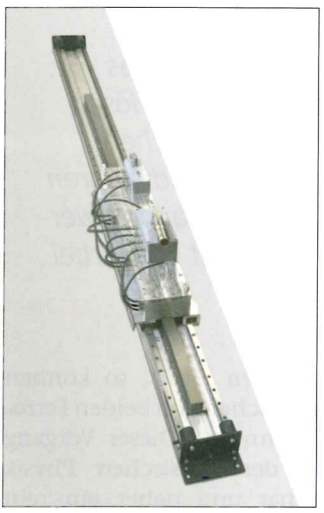
Unter dem Einfluss eines äußeren Magnetfelds kann die Richtung der Magnetisierung der beiden magnetischen Schichten unabhängig voneinander gesteuert werden. Wenn die Magnetisierungen gleich ausgerichtet sind, ist die Wahrscheinlichkeit, dass Elektronen durch die Isolatorschicht hindurch tunneln größer als bei gegensätzlicher Ausrichtung. Damit kann der elektrische Widerstand zwischen unterschiedlichen Widerstandszuständen (DR/R) variieren.

Moderne Prozesstechnik verhilft TMR-Sensoren zum Durchbruch

Obwohl der TMR-Effekt seit den 1970er Jahren bekannt war, wurde 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).

Der Widerstand des TMR-Sensors ist definiert durch die Fläche der Tunnelverbindung und die Schichtdicke beziehungsweise der Flächenwiderstand der Barriere. Ein typischer Flächenwiderstand einer Al_2O_3-Barriere liegt bei 10 MOhm/µm² (**Bild 3**). Gestaltet man eine Tunnelbarriere von 100 µm² 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 Wider-

Neuer Linearantrieb



Der Linear-Direktantrieb kann für gerade oder bei Bedarf auch gekrümmte Strecken eingesetzt werden.

FGB Steinbach stellt mit-TransInno einen völlig neu konzipierten Linearantrieb vor. Der Linearantrieb bietet sich für Umgebungen an, bei denen lange Strecken mit etwa 100 m schnell überbrückt werden müssen. Somit wird der Linearantrieb beispielsweise für Hersteller von Hochregallagern, Aufzügen oder auch für Maschinen- und Anlagenbauer interessant. TransInno ist ein Linear-Direktantrieb, der sich auf geraden oder bei Bedarf auch gekrümmten Strecken bewegen kann. Dabei ist er leistungsstark und dynamisch wie die klassischen Synchronmaschinen. „Da bei den bisherigen Lösungen entweder im Stator oder Läufer zahlreiche Kupferspulen beziehungsweise Magnete verbaut sind, ist deren Einsatz aufgrund der hohen Materialkosten insbesondere bei langen Wegstrecken zumeist unwirtschaftlich", erläutert Thorsten Steinbach, Geschäftsführer von FGB. Die neue Ausführung besteht im Sekundärteil lediglich aus Blechen mit fertigungsfreundlicher Geometrie. Auch die magnetische Flussführung wurde optimiert, sodass Wirbelstromverluste minimiert werden konnten. Weiterer Vorteil: Die Statorpole können mit einfacher Fertigungstechnik fast beliebig ausgestaltet werden, sodass sich darüber gewünschte Motoreigenschaften einprägen lassen.

Fertigungsgerätebau Adolf Steinbach GmbH & Co. KG
Strahlunger Straße 18
97616 Salz
www.fgb-steinbach.de

Multiturn Drehgeber mit geringer Bautiefe

Damit Antriebe kompakter gestaltet werden können, muss auch die Drehgeberlösung entsprechend angepasst werden. Hierfür hat Kübler ein völlig neues Produkt entwickelt – den Sendix F5883 in der Version Motor-Line. Der optische Hohlwellen-Drehgeber mit einer Bautiefe von 43 mm spart verglichen mit dem Multiturn-Drehgeber Sendix 5883 mit mechanischem Getriebe 27 mm ein. Dank der Intelligent-Scan Technology ist der Drehgeber volloptisch, hochgenau sowie 100 % Magnetfeldfest. Eine flexible Anbindung an Frequenzumrichter ist durch die Vielzahl an Schnittstellen wie SSI, BiSS, SinCos, RS422 und Gegentakt gegeben. Dank dem robusten Lageraufbau im Safety-Lock-Design ist der Drehgeber besonders widerstandsfähig gegen Installationsfehler, Schock und Vibrationen. Der Drehgeber ist mit einer durchgehenden Hohlwelle bis maximal 15 mm sowie mit Klemmung A- und B-seitig verfügbar.

Fritz Kübler GmbH
Schubertstraße 47
78054 Villingen-Schwenningen
www.kuebler.com

stand. 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** zeigt den TMR-Winkelsensor TA901) eignen sich so besonders in Anwendungen, wo geringe Leistungsaufnahme erforderlich ist, zum Beispiel bei Batteriebetrieb oder bei autarken Sensoren mit „Energy Harvesting".

Ein weiterer ganz wesentlicher Unterschied zwischen AMR-Sensoren und GMR beziehungsweise TMR-Sensoren ist das Verhalten im Drehfeld. Dreht bei einem 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. Diese Unterschiede sind in der **Tabelle** 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-Effekten bieten deutliche Vorteile gegenüber bisherigen magnetischen Sensoren, zum Beispiel jene, die auf dem Hall-Effekt beruhen [3, 4].

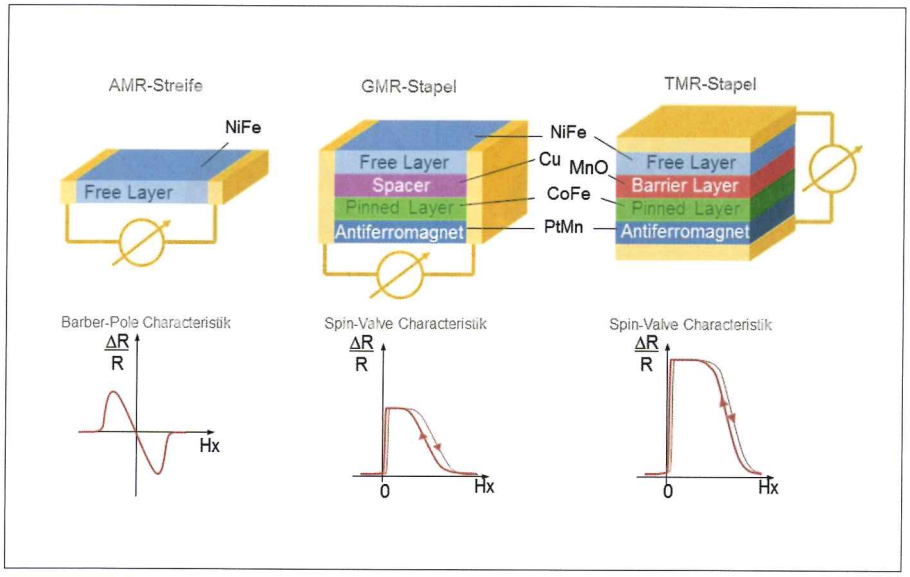


Bild 2
Vergleich der XMR-Technologien

Bild © Sensitec GmbH

Neuentwickelter TMR-Sensor

Sensitec arbeitet seit mehreren Jahren in Forschungsprojekten mit NTN-SNR Bearings, Erfinder des ASBs (Active Sensor Bearing) sowie mit der TU Kaiserslautern als auch der Johannes Gutenberg-Universität Mainz zusammen. Im Rahmen eines französisch-deutschen Projekts namens CAMEL wurde ein TMR-Sensor entwickelt, der auf einer Al_2O_3-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-Projekts war die Erfassung von Polringen, beispielsweise zur Winkel- und Geschwindigkeitsmessung. **Bild 5** illustriert ein typisches Messprinzip. Der Polring produziert ein periodisches Magnetfeld. Vier Tunnelelemente sind räumlich versetzt angeordnet, sodass sie unterschiedliche Phasen des Magnetfelds 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 sogenannten 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. Insbesondere hat sich gezeigt, dass die Messtechnik bei Arbeitsabständen beziehungsweise Luftspalten funktioniert, bei der die bisherige Hall-Sensorik versagt hat. Außerdem ist die Leistungsaufnahme des Sensors um Größenordnungen geringer als bei Hall beziehungsweise auch AMR- und GMR-Sensoren, was Anwendungen in autarken, drahtlose Sensoren ermöglichen kann.

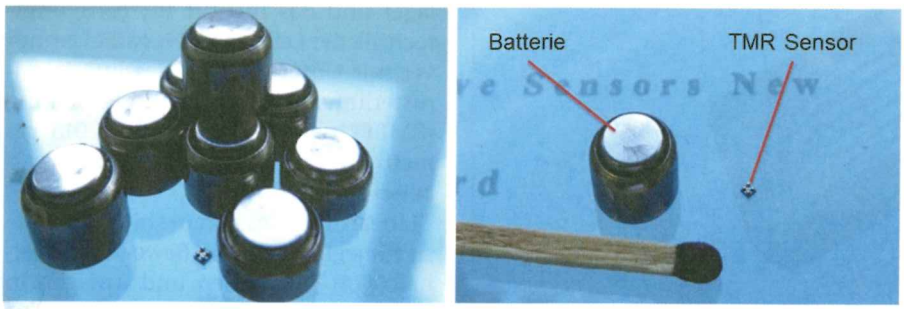


Bild 3
Bedeutung des Energieverbrauchs in der Sensorik: Deutlich reduzierter Energiebedarf durch TMR Sensor (rechts) im Vergleich mit AMR Sensor (links) in einer beispielhaften Anwendung

Bild © Sensitec GmbH

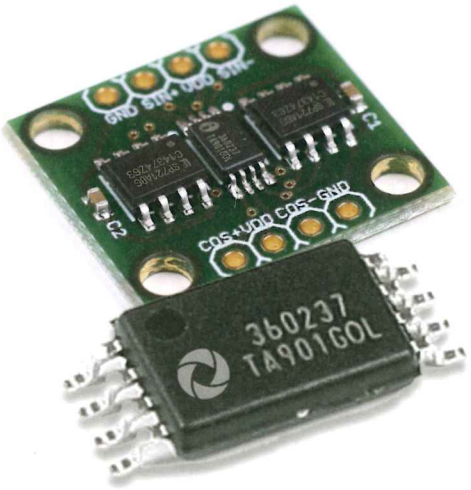


Bild 4
TMR-Winkelsensor TA901 *Bild © Sensitec GmbH*

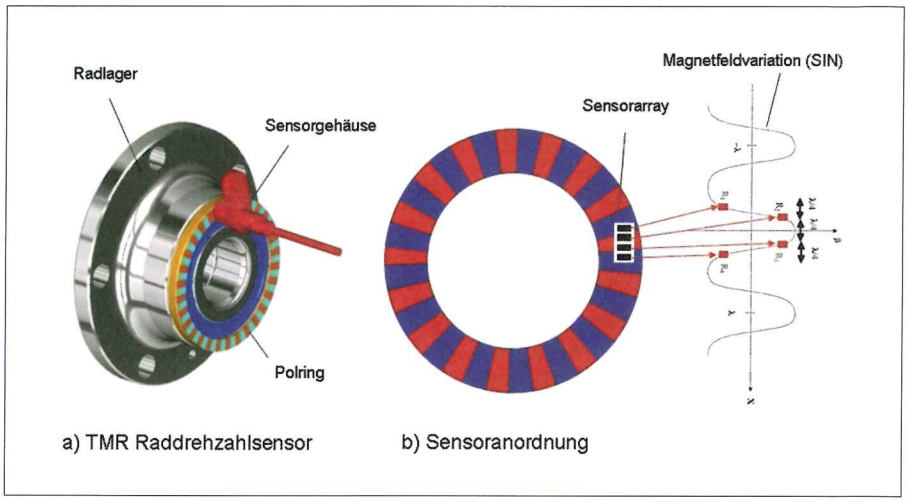


Bild 5
Funktionsprinzip des Raddrehzahlsensors *Bild © NTN-SNR Bearings*

Anwendungen Raddrehzahlsensor

Bild 6 stellt einen Demonstrator für einen TMR-Raddrehzahlsensor dar. Hiermit konnte demonstriert werden, dass ein Luftspalt von mehreren Millimetern zulässig ist. Diese Eigenschaft führt zu Kosteneinsparungen bei mechanischen Fahrwerkskomponenten und ermöglicht zudem eine schnelle, unkomplizierte Montage. Darüber hinaus ist kein Stützmagnet erforderlich, wie bei den bisher üblichen AMR-Raddrehzahlsensoren. Besonders erwähnenswert bei diesem Demonstrator ist der Betrieb mittels Solarzelle. Diese Zelle versorgt den Sensor, die Signalverarbeitungselektronik und ein Display. Damit wird die sehr geringe Stromaufnahme des Sensors unterlegt.

Es gibt auch die ersten Anwendungen im Industriebereich, wo die niedrige Leistungsaufnahme von TMR-Sensoren spielentscheidend ist. In Großanlagen verzeichnet sich ein starker Trend zu Zustandsüberwachung, um Kosten zu sparen durch gezielte Wartung sowie durch die Vermeidung von Havarien. Weiterhin möchte man Kosten und Aufwand von Verkabelung durch drahtlose Kommunikation vermeiden [6]. Beispielhaft ist die Nutzung von TMR-Sensoren, um die Geschwindigkeit und Anzahl Umdrehungen von drehenden Wellen zu überwachen. Die Sensoren werden in einem so genannten plummer block oder gehäusten Kugellager integriert (**Bild 7**). Informationen über Drehzahl und Umdrehungen werden drahtlos an einen übergeordneten Prozess-Rechner übertragen. Weiterhin wird eine Nachschmiervorrichtung mittels dieser Informationen angesteuert, um das Kugellager gezielt nachzuschmieren und dadurch Ausfälle aufgrund mangelnder Schmierung zu vermeiden. Ein Ziel dieser Entwicklung, welche auch in Zusammenarbeit mit NTN-SNR Bearings erfolgt, ist eine Batterielebensdauer von mehreren Jahren zu erreichen, welche länger ist als die Betriebslebensdauer des Kugellagers. Die extrem niedrige Leistungsaufnahme des TMR-Sensors ist absolut erforderlich, um dieses Ziel zu realisieren. Darüber hinaus ist eine hohe Robustheit zwingend, da die Umgebungsbedingungen in Großanlagen der Öl- oder Chemie-Industrie sehr anspruchsvoll sind.

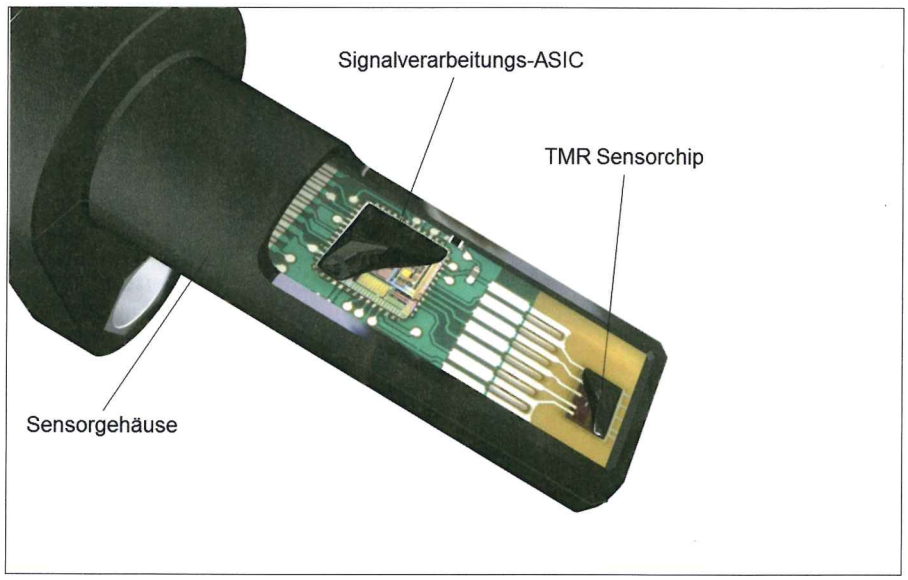


Bild 6
TMR-Radrehzahlsensor *Bild © NTN-SNR Bearings*

Kabellose Linearführungssysteme mit integrierter Positionsmessung

Bei einer weiteren interessanten Anwendung handelt es sich um kabellose Linearführungssysteme mit integrierter Positionsmessung. 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 (**Bild 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 Ver-

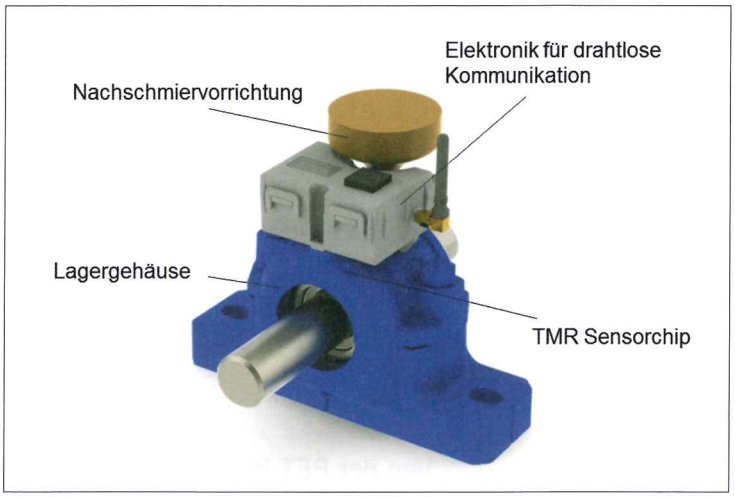


Bild 7
Intelligentes selbstschmierendes Lager
Bild © NTN-SNR Bearings

fahrgeschwindigkeit 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 Produkt 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 Anwendungen 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 Umgebungsenergie möglich.

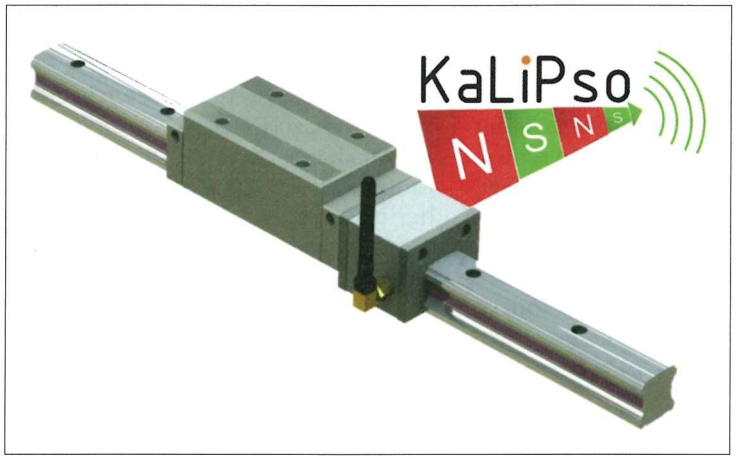


Bild 8
Kabelloses Linearführungssystem mit integrierter Positionsmessung
Bild © Institut für Fertigungstechnik der Leibniz Universität Hannover

Das neue Positionsmesssystem, welches auf der Hannover Messe 2015 erstmals der Öffentlichkeit vorgestellt wurde, zeichnet sich sowohl durch eine extrem geringe Leistungsaufnahme als auch durch eine hohe Auflösung aus. Dadurch ergeben sich zwei Alleinstellungsmerkmale für diese innovative Lösung:

1. Kabel und Kabelschlepp zwischen Antrieb und Schlitten werden nicht benötigt. Die Energie kann von einer Batterie oder einer lokalen Energiequelle über Energy Harvesting geliefert werden.
2. Die Positionsmessung wird nie ausgeschaltet, sodass jede Bewegung des Schlittens kontinuierlich verfolgt und die aktuelle Absolut-Position immer gespeichert wird, selbst bei ausgeschalteter Motorsteuerungseinheit. Weitere Merkmale (zum Beispiel ein Betriebsstundenzähler) können ergänzend integriert werden.

Durch diese spannenden Anwendungen deutet sich jetzt schon an, dass dieser neue MR-Effekt die Verbreitung von MR-Sensoren weiter beschleunigen wird.

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.; Lehndorff, 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.: MR: Going to Applications. Proc. of 12th Symposium Magnetoresistive Sensors and Magnetic Systems, Wetzlar, Germany, 2013
[6] Slatter, R.; Doms, M.: Energy efficient magnetoresistive sensors for low-power and wireless applications. Proc. of Smart Systems Integration Conference, Vienna, 2014

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

Tabelle
Vergleich magnetischer Sensorelemente
Tabelle © Sensitec GmbH