

ZUKUNFTSFELD SPINTRONIK

# Elektronik mit dem richtigen Dreh

Von Timur Slapke

Für erfahrene Tennisspieler gehört der sogenannte Topspin zu den besonders gern genutzten Schlägen, um Gegner richtig in die Bredouille zu bringen. Dabei werden die Bälle so „angeschnitten“, dass ihr Drall zu einer Abweichung von der üblichen Flugbahn führt. Dieser „Spin“ macht es den Gegenspielern äußerst schwer, rechtzeitig an die richtige Stelle auf dem Spielfeld zu laufen und entsprechend zu reagieren. Und man muss beileibe kein Roger Federer sein, um halbwegs gute Spinbälle zu schlagen. Auch Fußballfreunde wissen die Faszination eines mit Effet versehenen Balls durchaus zu schätzen, etwa bei kunstvoll geschossenen Freistößen oder „Bananenflanken“. Doch nicht nur im Ballsport spielt der Eigendrehimpuls eine Rolle, sondern auch in der Teilchenphysik. So besitzen Elektronen – negativ geladene Elementarteilchen – sowohl eine Ladung als auch einen Spin. Macht man sich diesen in der Elektronik zunutze, ist die Rede von „Spintronik“. Auch in Deutschland wird dazu seit Jahren geforscht, beispielsweise in der Speicher- und Sensortechnologie. Im Bereich der klassischen Halbleiterchips wittern Ideen aus der Spintronik ebenfalls wieder Morgenluft.

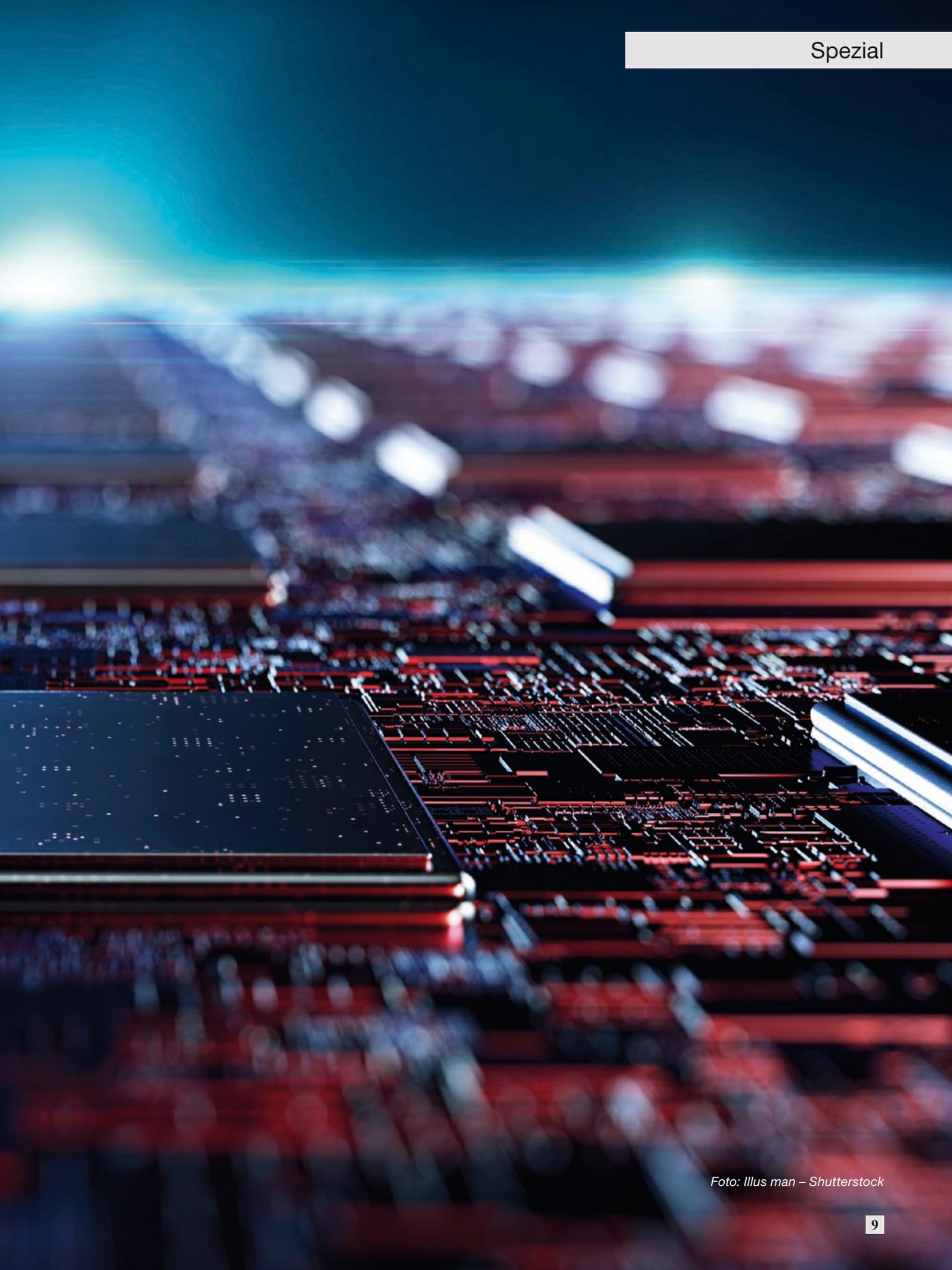


Foto: Illus man – Shutterstock

Während magnetische Festplatten als Grundspeicher preiswerter sind, dominieren bei Chips die schnelleren und robusteren Halbleiter. Magnetspeicher werden aber auch künftig eine wichtige Rolle spielen, da der Bedarf an Cloudspeichern steigt und diese Speicher letztlich auf großen Serversystemen mit magnetischen Festplatten basieren.

Foto: pinglabel – iStock

So ein Elektron kann man sich vorstellen wie einen Kreisel: Einmal dreht es sich rechtsherum, einmal linksherum. „Ein Elektron allein kann also schon eine binäre Information darstellen – zum Beispiel rechtsherum eine Eins, linksherum eine Null“, erklärt Prof. Gerd Bacher eine Elektroneneigenschaft, die in der klassischen Mikroelektronik bisher keine große Rolle spielt. „Wohl aber bei der Datenspeicherung“, betont der Inhaber des Lehrstuhls für Werkstoffe der Elektrotechnik an der Universität Duisburg-Essen. Die Verwendung von Spins – Eigendrehimpulsen von Elektronen – als Informationsträger hat eine Forschungsrichtung geprägt, die unter der Bezeichnung Spintronik bekannt ist.

Spinwellen lassen sich mit elektrischem Strom vergleichen: Wenn man eine Ladung von A nach B übertragen will, fließt Strom. Überträgt man ein magnetisches Moment von A nach B, fließt magnetischer Strom. Bacher erläutert den Grundgedanken dahinter: „In einem Prozessor gibt es sehr viele winzige Transistoren, die schalten. Der Stromtransport erfolgt über Elektronen.“ Dazu gibt es in handelsüblichen Festplatten den Magnetismus. Die Datenspeicherung erfolgt über die Ausrichtung winziger Ma-

gnete – und der Magnetismus beruht auf den Spins. „Man hat also im Kleinen einen Nord- und einen Südpol – und je nachdem, in welche Richtung diese Pole zeigen, hat man die Eins oder die Null.“ Während aber die Magnetspeicher Metalle sind, bestehen Halbleiter üblicherweise aus Materialien wie Silizium. „Nun kam die Idee auf, diese beiden verschiedenen Materialklassen zu vereinen“, so der studierte Physiker.

In den neunziger Jahren ist Gerd Bacher, der im Themenbereich Optik und Halbleiter promoviert hat, zum ersten Mal mit der Spintronik in Halbleitern in Berührung gekommen. Kurz darauf sei das Forschungsfeld zu einem regelrechten Hypethema in der Wissenschaft geworden. „Man hat gemerkt: Wenn man gewisse Halbleiter wie Galliumarsenid, das beispielsweise in Leuchtdioden oder Lichtdetektoren verwendet wird, mit Manganionen versieht, können diese Materialien plötzlich nicht nur Strom leiten und Licht emittieren, sondern sind gleichzeitig auch magnetisch.“ Allerdings sei man mittlerweile aus dem „Hypezyklus“ herausgekommen, den man in letzter Zeit auch von Graphen oder Perowskiten kennt. Dafür vertiefen Wissenschaftler wie Bacher, die am Thema dran-

bleiben, ihre Kenntnisse und entwickeln neue Materialien. Zum Beispiel magnetisch dotierte Nanokristalle oder magnetische 2-D-Materialien.

In der wissenschaftlichen Literatur ist der Begriff der Spintronik nicht immer sauber definiert. Teilweise ist damit die Verwendung von Spins als Informationsträger in klassischen Halbleitern wie Silizium oder Galliumarsenid gemeint, teilweise werden auch Metalle einbezogen. Bei den Halbleitern fehle noch das erste richtige Produkt auf dem Markt, stellt Gerd Bacher fest. Bei Metallen sei man aber bereits sehr weit. „Da gibt es Sensoren und Speicher für verschiedene Anwendungen. Das basiert letztlich alles auf dem Riesenmagnetowiderstand, der am Ende der 80er Jahre entdeckt wurde.“

## Entdeckung mit Effekt

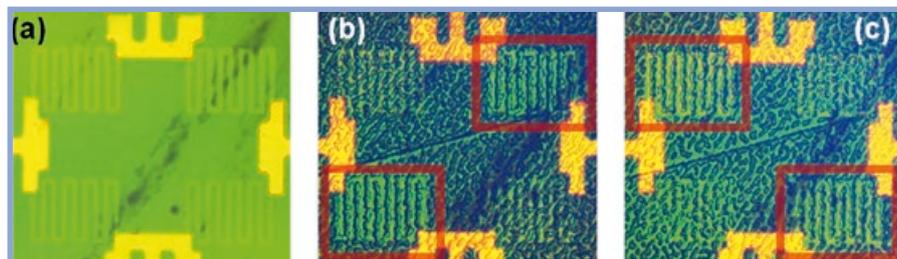
Als Prof. Peter Grünberg am Forschungszentrum Jülich gemeinsam mit seinem französischen Kollegen Albert Fert den GMR-Effekt – GMR steht für *giant magnetoresistance* – entdeckt hat, war Prof. Sergej Demokritov von der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster (WWU Münster) dabei. „Damals war ich Postdoc bei Peter

Grünberg und habe diese bahnbrechende Forschung, die 2007 mit einem Nobelpreis ausgezeichnet wurde, hautnah miterlebt.“ Diese Entdeckung hat die Basis für die Spintronik gelegt und für einen riesigen Schub für die Computertechnologie gesorgt. Dadurch haben sich die Kapazitäten der magnetischen Festplatten Anfang der neunziger Jahre enorm nach vorn entwickelt.

Demokritov kam 1989 als Alexander-von-Humboldt-Stipendiat aus Moskau nach Deutschland, hat zusammen mit Grünberg gearbeitet und auch zahlreiche Publikationen veröffentlicht. Anschließend hat er neun Jahre an der Technischen Universität Kaiserslautern verbracht und dort unter anderem habilitiert. Seit 2004 ist der Physiker Leiter der nach ihm benannten Arbeitsgruppe Nichtlineare Magnetische Dynamik am Institut für Angewandte Physik der WWU Münster. „Im großen Feld der Spintronik bin ich auf dem Unterfeld der Magnonik tätig“, so der gebürtige Moskauer. Während die Spintronik sich allgemein damit beschäftigt, wie elektrische Ladung und magnetische Spins miteinander verbunden sind und inwieweit sich beides unabhängig voneinander steuern lässt, beschäftigt sich Demokritovs Arbeitsgruppe im Detail mit dynamischen Effekten und deren Nutzung für magnetische Speicher.

„Bei magnetischen Speichern geht es um die Speicherung von Information mithilfe magnetischer Momente“, hebt Sergej Demokritov hervor. „Es geht immer um zwei Fragen: Wie schreibe ich Informationen und wie lese ich Informationen. Der GMR-Effekt hat sich mit dem Lesen beschäftigt und die Lesefähigkeit drastisch erhöht.“ Das Problem des Schreibens dagegen sei immer noch nicht zufriedenstellend gelöst, weil die Änderung der Magnetisierung kompliziert ist, vor allem in kleinen Dimensionen. „Wenn man Informationen in magnetischen Systemen übertragen möchte, ist die Dämpfung – anders als in optischen Systemen – ein wichtiger Störfaktor. Wir forschen seit fünf Jahren daran, wie man diese Dämpfung durch verschiedene Tricks mit elektrischen Signalen steuern kann.“

Dafür haben die Münsteraner Wissenschaftler bereits mehrere Wege gefunden. In ihrer letzten Studie hat das Forscherteam danach



Durch Anwendung eines geeigneten magnetischen Feldes werden die magnetischen Achsen durch einen leicht verstärkten Mäanderkontrast sichtbar. Grafik: Fraunhofer ENAS

gesucht, wie die Dämpfung überhaupt entsteht und ob sie sich intrinsisch kompensieren lässt. „Wir haben nun physikalisch grundlegend verstanden, wie das funktioniert“, sagt Sergej Demokritov. Das Ganze sei kontraintuitiv. Demokritov geht ins Detail: „Wir haben herausgefunden, dass man mithilfe sogenannter Anisotropien die unterschiedlichen Dämpfungs Kanäle gezielt schließen kann.“ Was heißt das? „Die Energie in dem kohärenten Modus kann sozusagen nicht im Sand verlaufen und versickern.“ Diese Ergebnisse sind natürlich eher im Bereich der Grundlagenforschung angesiedelt und noch nicht konkret auf vorhandene Applikationen anwendbar.

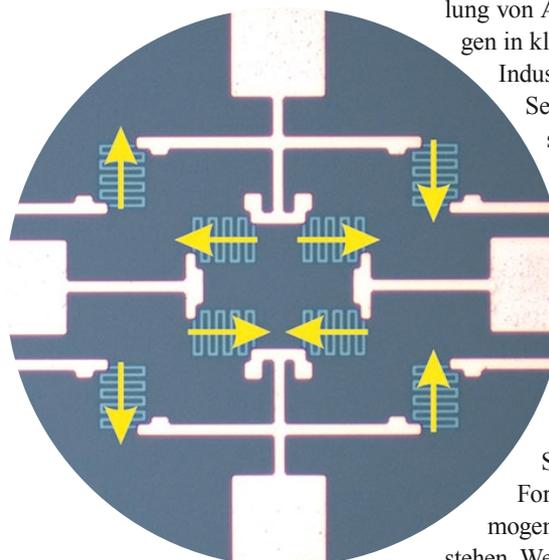
### Sensoren mit Spin

Viel näher an der industriellen Applikation ist dagegen Dr. Patrick Matthes vom Fraun-

hofer-Institut für Elektronische Nanosysteme (ENAS) in Chemnitz. Der Themenleiter Magnetsensorik in der Abteilung Back-End-of-Line hat den Fokus auf der Anwendungsforschung. Im Bereich der Spintronik geht es am ENAS vor allem darum, hochsensitive Magnetfeldsensoren zu präparieren und für verschiedene Anwendungsumgebungen nutzbar zu machen. „Wir sind sehr gut mit der Maschinenbau- und der Automobilbranche vertraut. Klassische Anwendungsfälle hierbei sind Näherungs- beziehungsweise Abstands- und Positionssensorik oder die Winkelbestimmungen, die auch in Automobilen verschiedentlich bereits seit einigen Jahren in Verwendung sind.“

Patrick Matthes und seinen Kollegen am ENAS geht es um die Technologieentwicklung und deren Transfer sowie die Entwicklung von Anwendungen und Speziallösungen in kleineren Stückzahlen, die von der Industrie so nicht geleistet wird. „Zur Sensorfertigung stehen uns in Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Mikrotechnologien der TU Chemnitz industriennahe Fertigungslinien auf bis zu 200 Millimeter Waferdurchmesser inklusive der erforderlichen Messtechnik zur Verfügung.“ Das ENAS konzentriert sich auf die Fertigung monolithisch integrierter, mehrdimensionaler Sensoren, wobei den Fraunhofer-Forschern reproduzierbare und homogene Prozessabläufe zur Verfügung stehen. Wenn nicht, dann werden eben Prozesse für neue Materialien oder Sensordesigns erarbeitet und die Sensoren für spezifische Anwendungen angepasst.

„Darüber hinaus beschäftigen wir uns auch mit fundamentalen Dingen, vor allem ▶



Aufnahme eines voll funktionalen 2-D-Sensorprototypen, der aus zwei verschachtelten Wheatstone-Brücken besteht. Jedes Spinventil-Mäander besitzt eine individuelle magnetische Achse (gelbe Pfeile). Grafik: Foto: Fraunhofer ENAS

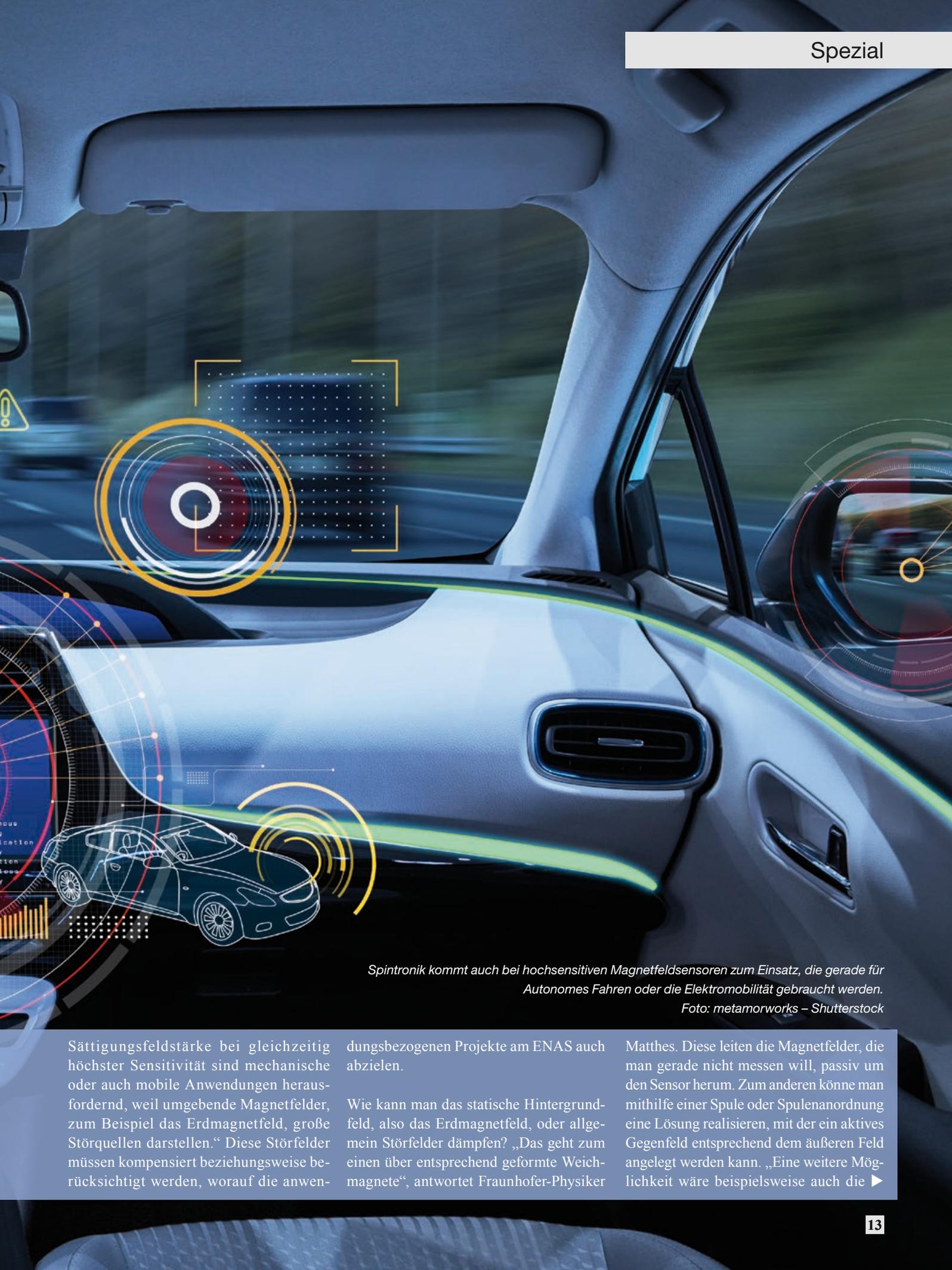


in Bezug auf das lokale Laser-Tempern, um lokal verschiedene sensitive Richtungen der Sensoren einzustellen“, ergänzt Matthes. Diese verschiedenen Richtungen seien vor allem wichtig, wenn man zum Beispiel eine Wheatstonesche Brückenschaltung zur Messung elektrischer Widerstände und Widerstandsänderungen oder aber einen mehr-

dimensionalen Sensor monolithisch aufbauen möchte, der nicht nur eine, sondern im besten Fall alle drei Raumrichtungen misst.

Bei den ultraempfindlichen Sensoren kommt auch der von Peter Grünberg entdeckte GMR-Effekt wieder ins Spiel. „GMR- und TMR-Sensoren – englisch

für *tunneling magnetoresistance* – haben im Unterschied zu Hall-Sensoren einen beschränkten sensitiven Feldbereich entsprechend ihrer ferromagnetischen Natur“, schildert Patrick Matthes. Dafür können sie aber eine um den Faktor zehn, 100 oder auch 1.000 größere Sensitivität haben. „Durch die Einschränkungen der



*Spintronik kommt auch bei hochsensitiven Magnetfeldsensoren zum Einsatz, die gerade für Autonomes Fahren oder die Elektromobilität gebraucht werden.*

*Foto: metamorworks – Shutterstock*

Sättigungsfeldstärke bei gleichzeitig höchster Sensitivität sind mechanische oder auch mobile Anwendungen herausfordernd, weil umgebende Magnetfelder, zum Beispiel das Erdmagnetfeld, große Störquellen darstellen.“ Diese Störfelder müssen kompensiert beziehungsweise berücksichtigt werden, worauf die anwen-

dungsbezogenen Projekte am ENAS auch abzielen.

Wie kann man das statische Hintergrundfeld, also das Erdmagnetfeld, oder allgemein Störfelder dämpfen? „Das geht zum einen über entsprechend geformte Weichmagnete“, antwortet Fraunhofer-Physiker

Matthes. Diese leiten die Magnetfelder, die man gerade nicht messen will, passiv um den Sensor herum. Zum anderen könne man mithilfe einer Spule oder Spulenanordnung eine Lösung realisieren, mit der ein aktives Gegenfeld entsprechend dem äußeren Feld angelegt werden kann. „Eine weitere Möglichkeit wäre beispielsweise auch die ▶

Anordnung eines Arrays von Sensoren, mit dem man das Messfeld vom Störfeld trennt.“ Das funktioniert über zwei oder mehrere Sensoren, von denen einer das Referenzmagnetfeld misst und die anderen die Felder, die man wirklich messen möchte.

## Magnete für die Masse

GMR-Sensoren werden bereits im Massenmarkt eingesetzt, seit sie in den frühen 2000er Jahren die bis dahin verwendeten AMR-Sensoren – abgekürzt für *anisotropic magnetoresistance* – im Lesekopf von Festplatten ersetzten. Seit Ende der 2000er Jahre werden auch TMR-Sensoren für diesen Anwendungsfall verwendet. „Mit diesen Sensoren ist man heutzutage in der Lage, das magnetische Streufeld von ultradünnen

Magnetisierung beider Schichten.“ Die Widerstandsänderung betrage für GMR üblicherweise fünf bis zehn Prozent und für TMR größer 100 Prozent.

Im industriellen Umfeld setzt man zurzeit noch verstärkt auf die Halbleitertechnologie. Für die Magnetfeldsensorik bedeutet dies Sensoren, die auf dem sogenannten Hall-Effekt basieren. „Spintronische Systeme sind verglichen mit den Hall-Sensoren in ihrem Aufbau komplexer und unter anderem temperatursensibler“, klärt Fraunhofer-Forscher Patrick Matthes auf. „Daher hat es ausgehend von ersten Anwendungen im Consumer-Bereich bis zur Anwendungsreife in härteren Umgebungen, wie etwa dem Automobil, länger gedauert.“ In Zukunft werden aber zunehmend Marktanteile

schen Diagnostik könnte Spintronik dadurch völlig neue Perspektiven und Märkte eröffnen.

Wenn es aber um die klassischen Computerchips geht, sind industrielle spintronische Anwendungen noch Zukunftsmusik. „In Deutschland hatte die Halbleiterindustrie leider nicht den langen Atem, um die Spintronik ausreichend zu entwickeln“, bedauert Gerd Bacher von der Uni Duisburg-Essen. „Es wurden zwar viele Projekte gestartet, aber nur wenig ist umgesetzt worden.“ Kein Wunder, dass man sich beim Halbleiterkonzern Infineon, dem unangefochtenen Marktführer in Deutschland, nicht zum Thema Spintronik äußern möchte, da dieser Bereich nach Aussagen der Pressestelle „nicht zum Kerngeschäft“ gehöre. Das Ergebnis: In Asien und

**„IN DEUTSCHLAND HATTE DIE HALBLEITERINDUSTRIE LEIDER NICHT DEN LANGEN ATEM, UM DIE SPINTRONIK AUSREICHEND ZU ENTWICKELN. ES WURDEN ZWAR VIELE PROJEKTE GESTARTET, ABER NUR WENIG IST UMGESETZT WORDEN.“**

*Prof. Gerd Bacher, Inhaber des Lehrstuhls für Werkstoffe der Elektrotechnik an der Universität Duisburg-Essen.*

ferromagnetischen Schichten mit einer Fläche von ein paar Dutzend Nanometern im Quadrat – entsprechend einem einzelnen Bit – zuverlässig zu bestimmen“, hebt Patrick Matthes hervor.

AMR-Sensoren haben eine relativ einfache Sensorgeometrie. „Hier braucht man nur ein ferromagnetisches Schichtsystem, also im einfachsten Falle eine weichmagnetische Lage, beispielsweise eine Nickel-Eisen-Legierung“, erklärt Matthes. „Darin tritt dann über die Magnetisierungsrichtung in Bezug auf die Stromrichtung, die man über die Sensorgeometrie einstellen kann, ein geringer oder hoher elektrischer Widerstand auf – der Magnetowiderstandseffekt.“ Dieser Effekt betrage im Regelfall wenige Prozent. Bei GMR- und TMR-Sensoren benötigt man hingegen zwei voneinander getrennte, je nach Anwendungsfall bestenfalls entkoppelte ferromagnetische Schichten. Patrick Matthes weiter: „Die Richtungen dieser verschiedenen Schichtmagnetisierungen verursachen dann den Magnetowiderstandseffekt, minimaler und maximaler elektrischer Widerstand für parallele und antiparallele

an spintronische Systeme übergehen, ist sich Matthes sicher, da die Performance deutlich besser sei – zum Beispiel die Sensitivität, die Sensorgröße oder die Leistungsaufnahme.

## Innovationen für die Industrie

Was hochsensitive Magnetfeldsensoren betrifft, so bergen diese aus Sicht von Patrick Matthes ein hohes Potenzial für die Informations- und Kommunikationstechnologie sowie den Automobilsektor. Aber auch für die chemisch-pharmazeutische Industrie sieht der Fraunhofer-Wissenschaftler Anknüpfungspunkte. Konkret könnten mit winzigen Kügelchen, sogenannten Beads, die mit ferromagnetischen Materialien und einer speziellen Oberflächenchemie ausgestattet sind, medizinische Anwendungen realisiert werden. „Damit könnte man beispielsweise dezidiert bestimmte Biomoleküle oder auch Bakterien binden, zu den Magnetensoren leiten und letztlich Krankheiten, Verunreinigungen oder ähnliches nachweisen.“ Unter anderem in der medizini-

Nordamerika sei man da schon weiter, sind sich die Grundlagenforscher Gerd Bacher und Sergej Demokritov einig.

Allerdings sind gerade bei metallischen Halbleiterchips auch die Herausforderungen noch am größten. „In einem herkömmlichen Chip gibt es rund mehr als fünf Milliarden Transistoren“, erklärt Bacher. „Bis man diese spinbasiert hat, ist es noch ein weiter Weg.“ Dennoch: Für die Zukunft bietet spinbasierte Elektronik grundlegende Vorteile. „Man hätte erstens die Möglichkeit, über die Ausrichtung der Spins die Polarisation beim Licht zu ändern“, so Gerd Bacher. „Zweitens hätte man durch das Umklappen der Spins einen Schaltprozess, der weniger Energie benötigt.“ Drittens könne man ein Bauelement entwickeln, bei dem die Informationsspeicherung mit einer Eins und einer Null in die Informationsverarbeitung integriert wird. Am Ende bleibe es aber immer ein Wettbewerb zwischen Spintronik und der Innovation in der klassischen Elektronik. Sergej Demokritov resümiert: „Es ist ein Wettlauf, dessen Ergebnis wir nicht voraussagen können.“ ■



*In der industriellen Chipproduktion setzt man zurzeit noch auf die bewährte Halbleitertechnologie. Der Einsatz spinbasierter Transistoren könnte die Wärmeentwicklung jedoch deutlich minimieren und damit Energie sparen. Foto: Maxiphoto – iStock*