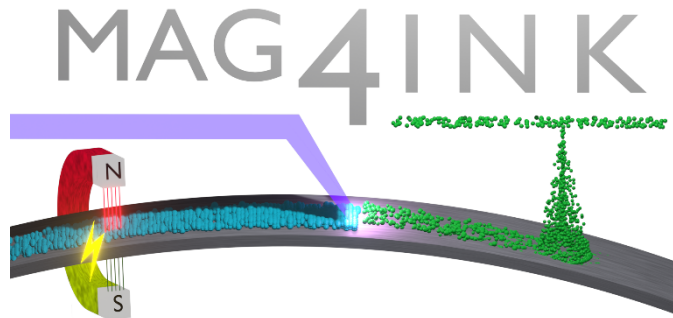


MAG4INK

Auslegung und Herstellung von gedruckten Magnetfeldsensoren für flexible Elektronik



– Abschlussbericht Teil II –

Teilvorhaben des HZDR

für den Zeitraum

01.04.2021 – 31.03.2024

Gesamtlaufzeit des Vorhabens: 01.04.2021 – 31.03.2024

Förderkennzeichen: 03VP09091

Ausführende Stelle: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR)

Antragsteller:

Antragstellende Einrichtung	Anschriften	Projektleiter	Kontaktdaten der Projektleitung
HZDR *	Bautzner Landstr. 400 01328 Dresden	Dr. Denys Makarov	0351 260 3273 d.makarov@hzdr.de
Fraunhofer FEP	Winterbergstr. 28 01277 Dresden	Thomas Preußner	0351 2586 126 thomas.preussner@fep.fraunhofer.de
Fraunhofer IKTS	Winterbergstr. 28 01277 Dresden	Dr. Mykola Vinnichenko	0351 2553 7282 mykola.vinnichenko@ikts.fraunhofer.de

* Verbundkoordinator

Zusammenfassung der Aktivitäten des Partners HZDR

(Förderkennzeichen: 03VP09091)

Magnetfeldsensoren werden in vielfältiger Weise eingesetzt, beispielsweise zur Erkennung von Verschiebungen, Drehungen oder Vibrationen. Darüber hinaus finden sie Verwendung in elektronischen Kompassen, magnetischen Festplatten oder bei Schaltanwendungen. Aktuell verfügbare Magnetfeldsensoren werden durch Dünnschichttechnologie auf starren Substraten realisiert und sind somit nicht flexibel, großvolumig und aufwendig herzustellen. Für eine kostengünstige und effiziente Herstellung ist gedruckte Elektronik eine vielversprechende Technologie. Elektronische Bauteile, die durch Drucken hergestellt werden, sind leicht und klein, dünn und flexibel, aufgrund des geringen Materialeinsatzes ökonomisch herstellbar sowie recycelbar.

Das Projekt MAG4INK stützt sich auf die Vorarbeiten der Konsortiumspartner zu großflächiger Deposition, flexiblen magnetoresistive Sensoren mittels konventioneller PVD- und Lithographieverfahren sowie auf erste Demonstrationen von druckbaren Sensorstrukturen. Auf der Grundlage dieser Vorarbeit war es möglich, realistische Validierungsziele zu definieren, von denen wir erwarteten, dass sie uns helfen könnten, die Technologie vom Niveau TRL3 auf das Niveau TRL6 zu bringen und sie so für weitere Technologietransferaktivitäten attraktiv zu machen.

Das Schlüsselement der Pasten bzw. Funktionstinten – die magnetische Komponente – wird in einem neuartigen Verfahren produziert. Um den Gesamtprozess wirtschaftlich zu gestalten, müssen wir die jährlich herstellbare Menge des pulverförmigen Ausgangsmaterials, die sogenannten anisotropen magnetoresistiven Materialien oder kurz AMR, vom bisherigen Milligramm- in den Kilogramm-Maßstab überführen. Nur so lassen sich die Produktionskosten soweit absenken, dass der Prozess für industrielle Anwendungen interessant wird.

Am HZDR waren wir verantwortlich für die magnetoresistive Charakterisierung gedruckter AMR-Sensoren und für das Design und die Realisierung von Demonstratoren mit gedruckten AMR-Sensoren. Darüber hinaus war jeder der Konsortiumspartner in die Aktivitäten anderer Partner eingebunden. Dies half uns einerseits, Risiken bei der Projektumsetzung zu minimieren, beispielsweise durch die gemeinsame Nutzung ergänzender Infrastruktur. Andererseits fördert diese starke Interaktion eine schnelle Projektentwicklung und ermöglichte den beteiligten Nachwuchsforschern hervorragende Lernmöglichkeiten von Experten in ihren jeweiligen Forschungsthemen. Im konkreten Fall des Partners HZDR waren wir an der Unterstützung des Partners IKTS bei der Auswahl und Optimierung der Opferschicht und der Unterstützung des Partners FEP bei der Deposition von AMR-Schichtstapeln beteiligt.

Beispielsweise erhielt das MAG4INK-Konsortium für die Optimierung der AMR-Schichtstapel Zugang zu den Beschichtungsanlagen des HZDR, als Ergänzung zu den großflächigen Beschichtungsaktivitäten am FEP. Dies ermöglichte uns ein schnelles Screening relevanter Materialschichtstapel und Abscheidungsbedingungen, die für weitere eingehende Untersuchungen für hochleistungsfähige AMR-Sensoren ausgewählt wurden. Darüber hinaus ermöglichte das HZDR dem Partner IKTS den Zugriff auf seine chemischen Labore, um Studien mit magnetosensitiven Verbundwerkstoffen und deren Verarbeitung mit komplementären Methoden, einschließlich Spin-Coating, durchzuführen.

Im Gegenzug profitierte das HZDR stark vom umfassenden Know-how des Partners FEP bei der Optimierung der Abscheidungsprozessparameter. Insbesondere konnte das HZDR mithilfe der Kollegen vom FEP die Zeiteffizienz bei der Herstellung von Hochleistungs-Magnetfeldsensoren um den Faktor 2 verbessern. Dies hat enorme Auswirkungen auf die Effizienz der Studenten und Forscher am HZDR. Basierend auf dieser optimierten Geräteleistung haben wir validiert, dass es die Möglichkeit gibt, 1 kg AMR-Paste pro Jahr mit dem Magnetron-Sputtering-Gerät der scia Systems GmbH (vollautomatisches Abscheidungsgerät; Abscheidungsfläche von 300 mm) herzustellen. Dieses Ergebnis ist für die zukünftige Kommerzialisierung der MAG4INK-Technologie sehr wichtig. Diese Analyse zeigt, dass selbst für Unternehmen, die über Standard-Abscheidungsanlagen für die Wafer-Scale-Produktion von AMR-Sensoren verfügen, eine klare Möglichkeit besteht, in das Geschäft der gedruckten Magneto Elektronik einzusteigen. Darüber hinaus profitierten wir am HZDR stark von der Erfahrung des Partners IKTS bei der Formulierung

von Funktionspasten für Druckprozesse. Diese Aktivitäten stimulierten völlig neue Entwicklungen der ökologisch nachhaltigen Magnetoelektronik, die in Folgeprojekten weiterverfolgt werden sollen.

Die durchgeführten Arbeiten dienten der Validierung derjenigen Prozessschritte, welche ursprünglich im Projektantrag vorgesehen waren. In enger Zusammenarbeit mit unseren Partnern vom Fraunhofer Institut FEP und IKTS haben wir am HZDR folgende wesentliche Ergebnisse zu verzeichnen:

1/ Wir führten eine Charakterisierung der magnetoresistiven Eigenschaften von Fe-, CoFe-, FeNi-basierten Dünnschichten sowie gedruckten AMR-Sensoren durch. Wir haben gezeigt, dass die Leistung von FeNi-basierten Sensoren im Vergleich zu anderen Schichtstapeln überlegen ist. Daher haben wir uns in MAG4INK vor allem auf die Charakterisierung von FeNi-basierten Sensoren konzentriert. Dabei wurden die Schichtstapel durch den Partner FEP auf großflächigen Glassubstraten hergestellt, die Beschichtung mit einer PVB-Opferschicht erfolgte durch den Partner IKTS.

2/ In Zusammenarbeit mit dem Team des IKTS wurden Beschichtung großflächiger Substrate (4-Zoll- bis 6-Zoll-Wafer) mit dem PVB-Lack als Opferschicht durchgeführt.

3/ Auf der Grundlage der Ergebnisse von AP1 wurde ein neues Opferschichtpolymer im Rahmen von AP3 getestet (Kooperation mit FhG-IKTS). Die bereitgestellte Opferschicht erwies sich als geeignet, um den Transferdruck von Magnetfeldsensoren auf beliebige Oberflächen wie Holz, Textilien, Keramik, Papier zu realisieren. Dies ist von Vorteil, um das Anwendungspotential von magnetoresistiven Sensoren zu erhöhen. Gemeinsam mit dem Projektkonsortium wird gegenwärtig eine Veröffentlichung erarbeitet.

4/ Es wurde erfolgreich eine Technologie entwickelt, um den magnetoresistiven Effekt in einzelnen Mikroflocken zu messen.

5/ Wir haben eine Optimierung der Abscheidungsparameter für CoFe-Dünnschichten durchgeführt und gedruckte Sensoren auf Basis dieses Materials hergestellt. Angesichts der höheren Toxizität von CoFe im Vergleich zu FeNi-Legierungen sowie der eher schlechten magnetoresistiven Leistung von Sensoren auf CoFe-Basis wurde dieser Forschung keine Priorität eingeräumt.

6/ Wir haben ein Konzept zur Konditionierung von mechanisch flexiblen und gedruckten Magnetfeldsensoren entwickelt. Dieses Know-how wird auf der Proof-of-Concept-Ebene validiert. Die Patentanmeldung ist eingereicht. Wir suchen interessierte Industriepartner für die Lizenzierung des Know-hows der eingereichten Patentanmeldung. Die HZDR-Technologie zur gedruckten Herstellung von Magnetfeldsensoren ist an die Firma HZDR Innovation GmbH lizenziert [<https://hzdr-innovation.de/products/flexible-magnetoelektronik/>].

7/ Wir haben Sensorlayouts entwickelt, die für beide MAG4INK Demonstratoren verwendet werden, was für das erfolgreiche Erreichen der Meilensteine MS5 und MS6 relevant ist.

Das HZDR war federführend für zwei Meilensteine verantwortlich, die erfolgreich abgeschlossen werden konnten:

Meilenstein MS5: Demonstrator 1: *Aufzeigen der Erreichbarkeit des Druckes vom AMR-Sensoren für den Einsatz als berührungslose Schalter*. Der Meilenstein konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Der entsprechende Demonstrator wird in Zusammenarbeit mit dem Partner FhG-IKTS erstellt. Der Demonstrator wurde der Forschungs- und Industrieteilnehmer auf den großen Themenmessen wie LOPEC 2023 und LOPEC 2024 in München präsentiert.

Meilenstein MS6: Demonstrator 2: *Aufzeigen der Erreichbarkeit des Druckes vom PHE-Sensoren für den Einsatz in der SkinPut-Technologie*. Der Demonstrator mit gedrucktem PHE-Sensor wurde erfolgreich vorbereitet. Da der PHE-Sensor auf flexible Polymerfolie gedruckt wurde, kann er auf die Haut aufgetragen werden. In unserem Demonstrator befindet sich der PHE-Sensor auf einem Zeigefinger und wird als Mensch-Maschine-Schnittstelle für Sicherheitsanwendungen verwendet. Darüber hinaus haben wir erfolgreich den Einsatz gedruckter PHE-Sensoren für Rotationssensoranwendungen demonstriert, beispielsweise zur Steuerung eines rotierenden ventilähnlichen Mechanismus.

1. Projektergebnisse

Im Folgenden werden die Aktivitäten des Partners HZDR zu den einzelnen Aufgaben beschrieben:

AP1 Aufskalierung der Prozesskette zur großvolumigen Pulvergenerierung durch den Nachweis der Produktivität für den industriellen Maßstab

T1.1: Untersuchungen zur Abscheidung der Opferschicht auf großflächigen Substraten

Das Team des HZDR unterstützte das Team des IKTS bei der Validierung des lichtunempfindlichen Polymers als Opferschicht. Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf das PVB-Polymer gelegt, das für das Aufbringen im Rakelverfahren auf großflächige Glassubstrate optimiert wurde. Darüber hinaus führte das HZDR eine Validierung des PVB-Polymers mittels Spin Coating auf 4-Zoll- und 6-Zoll-Wafern durch. In diesem Fall würde es die Verwendung von standardmäßigen, auf Si basierenden Wafern, die mit PVB-Polymer beschichtet sind, in Beschichtungsanlagen kleineren Maßstabs ermöglichen (diese Anlagen sind am HZDR verfügbar). Alle Tests sind hierbei erfolgreich verlaufen und haben bestätigt, dass eine Beschichtung via Spin Coating möglich ist. Die Versuche mit 4-Zoll- und 6-Zoll-Wafern zeigten jedoch auch, dass die Handhabung aufgrund der hohen Viskosität des PVB für Spincoating nicht ideal ist. Zum einen wird viel mehr Zeit zum Auftragen des PVB-Lacks benötigt, da dieser sehr zähflüssig ist, zum anderen wird auch mehr Material benötigt, um eine homogene Beschichtung zu gewährleisten.

T1.2: Prozessentwicklung zur Abscheidung der magnetosensitiven Schichten mittels Rohrkathode auf großen Substratflächen einschließlich Betrachtungen zur Arbeitssicherheit

Das Team des HZDR unterstützte das Team des FEP zudem bei der Abscheidung von magnetoresistiven Schichten auf Glas und PVB-beschichteten Glassubstraten. Bei der Projektumsetzung wurde es entscheidend, Beschichtungen kosten- und zeiteffizient durchführen zu können, um z.B. Tests zur Opferschicht als auch zur Optimierung des Schichtstapels durchführen. Für diese Aufgaben unterstützt das HZDR das Konsortium mit der Bereitstellung der Magnetron-Sputteranlage der Firma scia Systems GmbH (Chemnitz). Um eine hohe Pulverqualität gewährleisten zu können, wurden umfangreiche Optimierungen zusammen mit dem Partner FEP durchgeführt. Dabei stehen punkto Abscheidungsqualität besonders Homogenität, Reproduzierbarkeit, Effekthöhe und Fertigungsgeschwindigkeit im Fokus. Nach Anpassungen des Abscheidungsparameters konnten Schichtdickenabweichungen von weniger als 2% über die Fläche eines 300-mm-Wafers (12 Zoll) erreicht werden (Abb. 1).

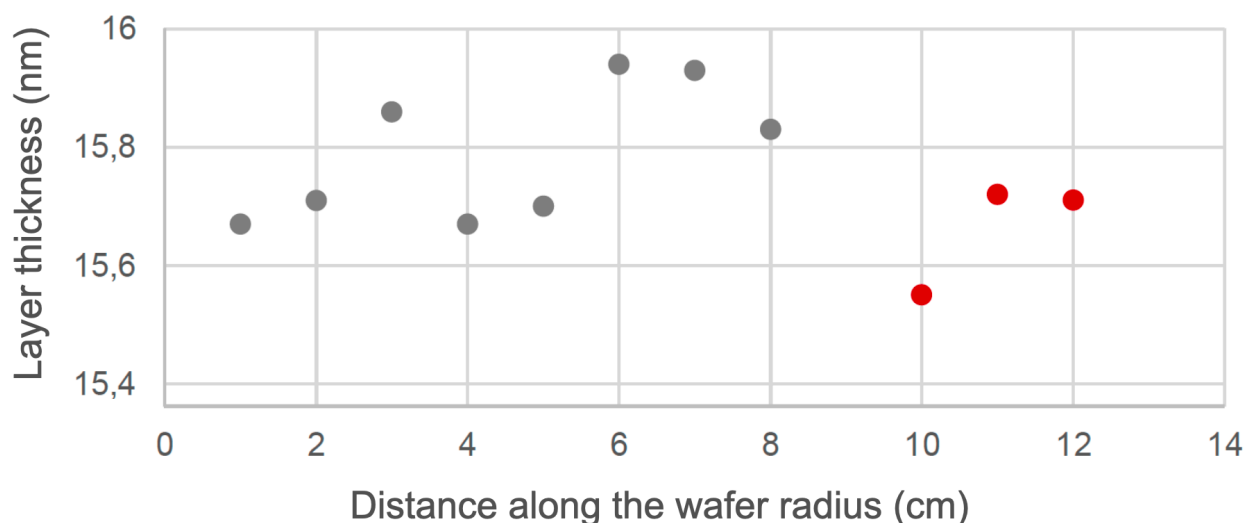


Abbildung 1: Variation der aufgetragenen Schichtdicke mit dem Beschichtungsgerät der scia Systems GmbH.

Nach der Optimierung konnte das Abscheidungsgerät AMR-Sensoren mit einer Leistung von bis zu 2,5% liefern, wenn sie auf Si-basierten Wafern hergestellt wurden. Die detaillierte Beschreibung der Optimierung der Abscheidungsbedingungen findet sich im Bericht des Partners FEP. Der typische AMR-Effekt wurde im Bereich von etwa 2% gemessen. Es wurde nachgewiesen, dass auf glatten Substraten eine gute AMR-Leistung erzielt werden kann (Abb. 2). Beispielsweise können wir bei Verwendung eines glatten Polyimidsubstrats einen AMR-Effekt von 1,9% erzielen. Auf einem raueren PET-Substrat können AMR-Sensoren mit nur 1,4% magnetoresistivem Effekt erzielt werden. Wir weisen darauf hin, dass diese Proben im selben Abscheidungsverlauf hergestellt werden.

Diese Abscheidungsanlage wurde auch für die Untersuchung geringerer AMR-Materialmengen von NiFe und CoFe verwendet, um somit effizient die Materialoptimierung voranzutreiben. Dies geschieht durch den Einsatz von FEP Personal und Material am Standort des HZDR.

Für den Prozess der Pulverherstellung werden die Substrate (300 mm Si-Wafer) via Spin Coating mit einer polymeren Opferschicht beschichtet und getrocknet. Anschließend erfolgt eine vollautomatische Beschichtung einer 100-nm-dicken magnetoresistiven Schicht. Nach der Beschichtung können die Wafer entnommen und im Ultraschallbad geliftet werden. Während des Liftvorgangs im Ultraschallbad werden die homogenen Schichten bereits zu Pulver zerkleinert. Das Pulver wurde dem Partner IKTS für weitere Aktivitäten zur Anfertigung der AMR-Paste zur Verfügung gestellt.

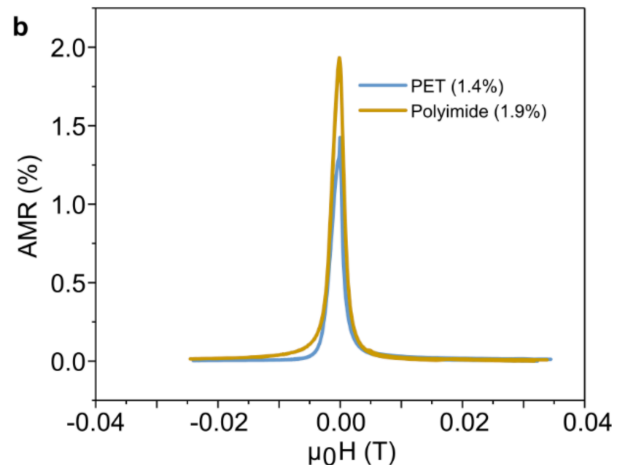


Abbildung 2: Einfluss der Wahl eines Substrats (Rauigkeit) auf den AMR-Effekt.

Wir haben eine detaillierte Validierung der Möglichkeit durchgeführt, 1 kg AMR-Paste pro Jahr mit dem Gerät der scia Systems GmbH (Abscheidungsfläche von 300 mm) herzustellen. Der gesamte Prozessablauf mit den relevanten Zeitangaben umfasst:

- (a) Beschichten von 25 Wafern mit Opferschicht: ca. 4 Stunden
- (b) Trocknen von 25 Wafern: ca. 2 Stunden
- (c) Abscheidungsbezogene Aktivitäten: ca. 20 Stunden
- (d) Abhebevorgang der Metallschicht: ca. 2 Stunden
- (e) Gesamtverarbeitungszeit für 1,5 g AMR-Pulver: 28 Stunden (zur Herstellung von 1 g AMR-Pulver werden 16x 300 mm Wafer benötigt)
- (f) Für 1 kg Paste benötigen wir 0,3 kg Pulver: ca. 235 Tage Pulvervorbereitung zur Herstellung von 1 kg Paste

Dieses Ergebnis ist für die zukünftige Kommerzialisierung der MAG4INK-Technologie sehr wichtig. Diese Analyse zeigt, dass selbst für Unternehmen, die über Standard-Abscheidungsanlagen für die Wafer-Scale-Produktion von AMR-Sensoren verfügen, eine Möglichkeit besteht, in das Geschäft der gedruckten Magneto Elektronik einzusteigen.

T1.3: Untersuchungen zur Pulverherstellung

Das HZDR führte Messungen und Auswertungen des elektrischen Widerstands und des Magnetowiderstands der kontinuierlichen dünnen Metallschichten auf Glas und PVB-beschichteten Glassubstraten sowie auf einzelnen Flocken durch. Wir entwickelten eine Strategie zur Charakterisierung einzelner magnetoresistiver Flocken (laterale Größe: $5 \times 10 \text{ mm}^2$) und konnten damit nachweisen, dass diese Flocken vor der Delaminierung eine ähnliche magnetoresistive Leistung aufweisen wie die dünnen Referenzschichten (Abb. 3). Um Flocken für die

magneto-resistive Messung vorzubereiten, wurden die Proben in Streifen mit einer Größe von 5x10 mm² geschnitten. Die Streifen wurden in Aceton gelegt, bis die Opferschicht entfernt war und der gesamte MR-Film frei in Aceton schwamm. Anschließend wurden die Flocke auf ein natürlich oxidiertes Si-Waferstück übertragen. Dabei wurde das Waferstück unter die schwimmende Flocke gelegt und die Probe aus dem Aceton entfernt. Nach Abschluss der Übertragung der Flocken und der Verdampfung des Acetons wurde die Flocke mit Kontakten aus Silberpaste kontaktiert. Jedes Plättchen wurde in einer 4-Punkt-Konfiguration gemessen, wodurch bestätigt werden konnte, dass die einzelnen Plättchen die gleiche MR-Leistung aufweisen, wie es bei abgeschiedenen dünnen Schichten der Fall ist.

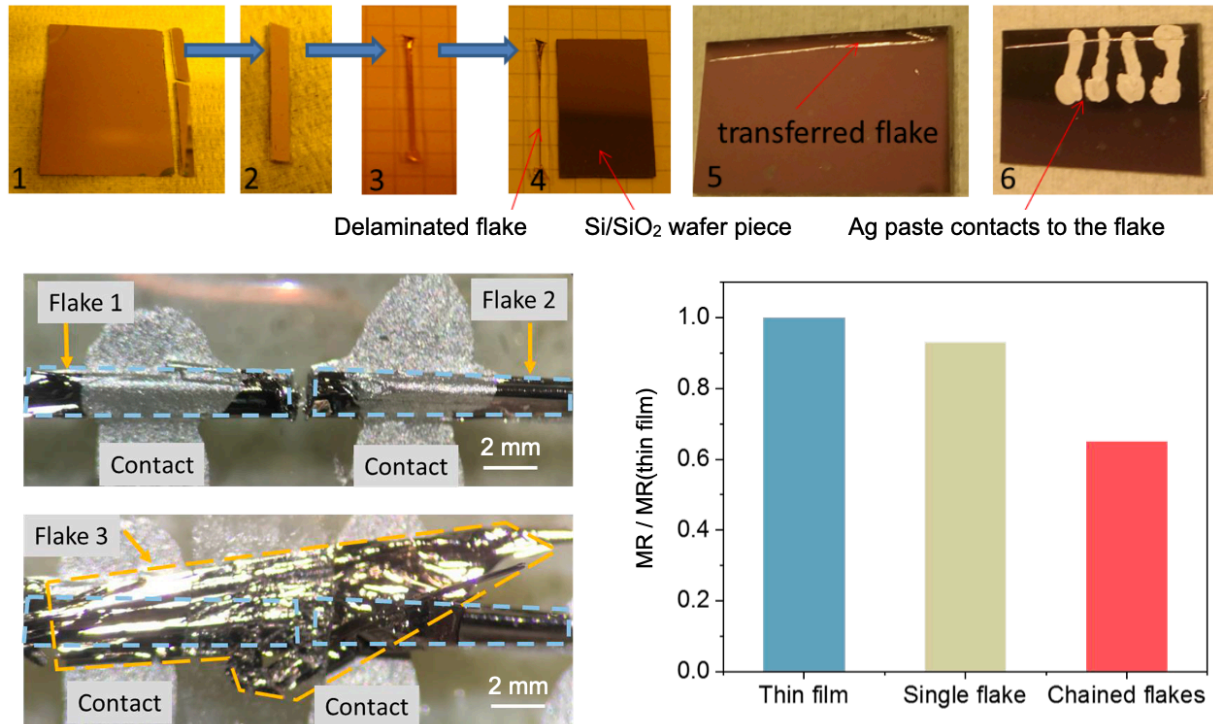


Abbildung 3: Delaminationsprozess einer magneto-resistiven makroskopischen Flocke und dessen Messung. Eine einzelne Flocke weist einen sehr ähnlichen Magnetowiderstand auf wie der ursprünglich aufgetragene Dünnschichtfilm. Der Magnetowiderstand sinkt, wenn die Messung über eine Kette delaminierter Flocken erfolgt. Diese Verringerung des MR, die bei wenigen verketteten Flocken beobachtet wird, kann ein Hinweis darauf sein, dass gedruckte Sensoren im Vergleich zu Dünnschichtsensoren einen geringeren MR-Effekt haben könnten.

AP2: Prozessvalidierung für großvolumige Abscheidung magneto-resistiver Schichten

T2.1: Funktionsnachweis der magneto-resistiven Schicht

Das HZDR führte die magnetische Charakterisierung der magneto-resistiven NiFe-Schichten mit Hilfe der SQUID-VSM-Magnetometrie durch. Die Messungen wurden in einer in-plane- und out-of-plane-Anordnung des angelegten Magnetfeldes durchgeführt, um die Sättigungsmagnetisierung, das Koerzitivfeld sowie das Sättigungsmagnetfeld zu bestimmen. Diese Parameter ermöglichen es, die Stärke der magnetischen Anisotropie in den Schichten abzuschätzen und die Magnetisierungsumkehrprozesse zu verstehen, die für die Bestimmung und Optimierung der Empfindlichkeit der magneto-resistiven Sensoren von Bedeutung sind. Um magnetosensitive Verbundstoffe für die Charakterisierung vorzubereiten, delaminieren wir dünne FeNi-Filme vom Wafer und mischen sie mit einem Polymerbindemittel. Der magnetische Verbundstoff wird dann auf ein nicht magnetisches Substrat, z. B. einen Si-Wafer, aufgetragen. Nach dem Trocknen ist der Verbundstoff bereit für die Messung mit einem Magnetometer. Typische magnetische Hystereseschleifen, die an gedruckten Verbundwerkstoffen auf FeNi-Basis gemessen wurden, sind in Abb. 4 dargestellt. Um Anisotropie in den Proben zu induzieren, wurden die Verbundwerkstoffe in einem angelegten Magnetfeld getrocknet, das in einem Winkel von 15 Grad zur

Normalenrichtung der Probe ausgerichtet war. Abbildung 4(a) zeigt 3 Hystereseschleifen, die durch Anlegen eines externen Magnetfelds in der Ebene der Probe unter verschiedenen Winkeln gemessen wurden. Die Messung zeigt, dass die Probeneigenschaften in der Ebene isotrop sind. Anisotropie ist deutlich zu beobachten, wenn die Probe in einem Magnetfeld gemessen wird, das in einem anderen Winkel zur Normalen der Probe angelegt wird, d. h. von der Richtung in der Ebene (IP, 0 Grad) zur Richtung, die senkrecht zur Probenebene steht (OOP, 90 Grad), Abb. 4(b).

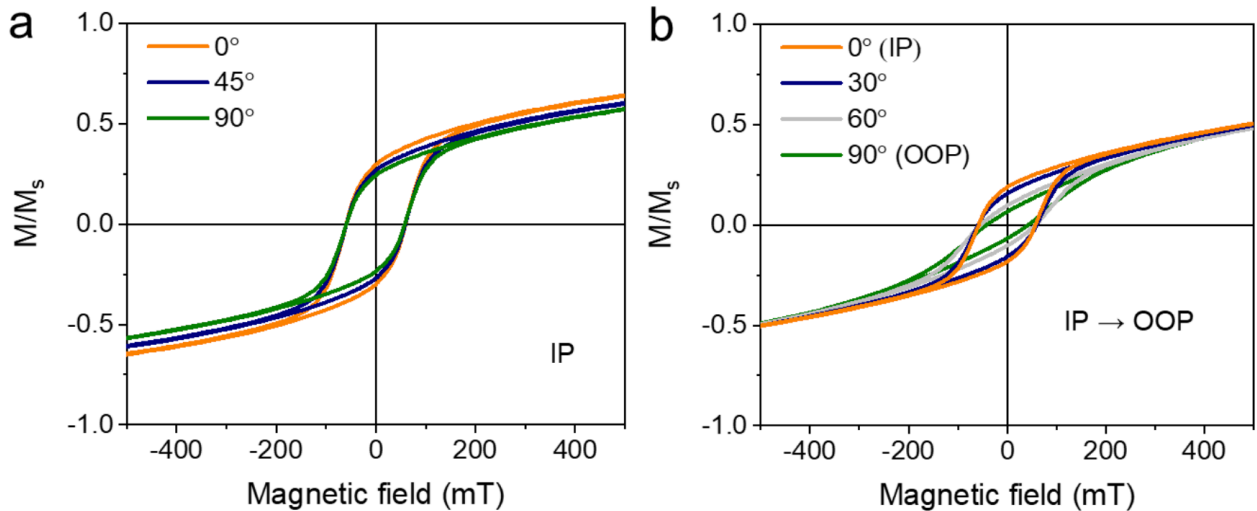
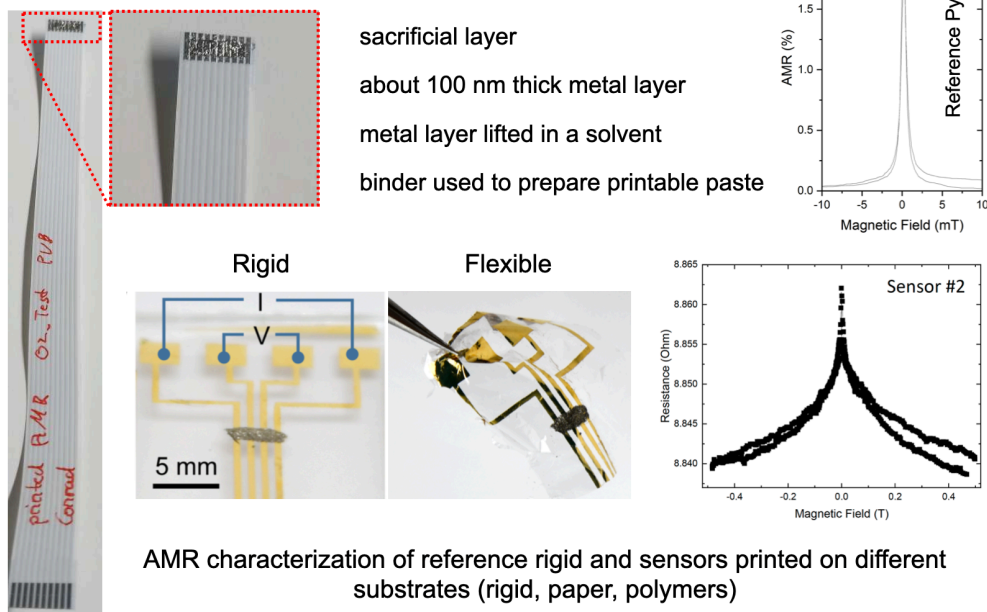


Abbildung 4: Magnetische Hystereseschleifen von gedruckten NiFe-basierten Sensoren.

Darüber hinaus führte das HZDR Transportmessungen an den Proben im abgeschiedenen Zustand durch, um den Einfluss der polymeren Opferschicht auf die Sensorleistung zu verstehen. NiFe-Schichten, die auf Wafern und auf polymerbeschichteten Wafern hergestellt wurden, zeigen ähnliche magneto-resistive Kurven mit einem nahezu identischen magneto-resistiven Effekt. Das bedeutet, dass wir mit dem etablierten Abscheidungsverfahren hochleistungsfähige magneto-resistive Flocken für die weitere Herstellung von magneto-resistiver Paste erzeugen können. Ein typischer Arbeitsablauf ist in Abb. 5 dargestellt.

A typical workflow (FEP - IKTS - HZDR)

Cooperation: sacrificial layer/printing (IKTS) & substrate/deposition (FEP)



AMR characterization of reference rigid and sensors printed on different substrates (rigid, paper, polymers)

Abbildung 5: Typischer Ablauf des Projektes zur Charakterisierung gedruckter magneto-resistiver Sensoren.

Er umfasst die Vorbereitung von Substraten mit Opferschichten durch den Partner IKTS, die Abscheidung magneto-resistiver Schichten durch den Partner FEP, die Messung der Referenzsensoren vor der Delamination durch den Partner HZDR, die Verarbeitung der abgeschiedenen Dünnschichten zu Paste und das Drucken durch den Partner IKTS, gefolgt von der Charakterisierung der gedruckten Sensoren durch den Partner HZDR. Die Sensoren wurden auf starren Substraten (Glas- und Si-Wafer) und auf Polymerfolien aufgebracht (Abb. 2 und 5). Referenzproben vor dem Ablösen vom Substrat zeigten einen AMR-Effekt von etwa 2% (Abb. 5). Im Rahmen des Projekts haben wir festgestellt, dass die Verwendung herkömmlicher flexibler Leiterplatten (FPC-Kabel) mit einem Mehrkontaktstecker eine zeit- und kosteneffiziente Möglichkeit bietet, die elektrischen und magneto-resistiven Eigenschaften der Proben nach dem Drucken zu testen. Das FPC-Kabel mit aufgedrucktem Sensor ist in Abb. 5 dargestellt. Nach dem Drucken wird eine Sensorleistung gemessen, die typischerweise im Bereich von 0,2-0,7% liegt (Abb. 5), abhängig von den Eigenschaften der formulierten Paste und der Nachbehandlung. Das Rauschverhalten des Sensors ist in Abb. 6 dargestellt. Die Eckfrequenz beträgt ca. 5 s und der Rauschpegel beträgt $25 \mu\text{Ohm}/\text{Hz}^{1/2}$, wenn der Sensor mit einem Strom von ca. 5 mA betrieben wird. Die relevanten Details zur Optimierung der gedruckten Sensoren finden sich im Bericht des Partners IKTS.

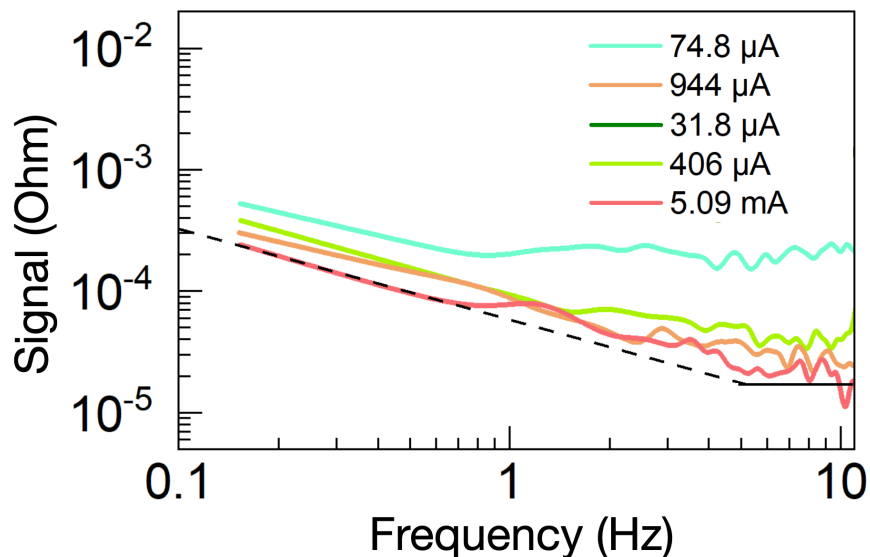


Abbildung 6: Rauschverhalten des FeNi-basierten gedruckten AMR-Sensors.

Wir haben eine Optimierung der Abscheidungsparameter für CoFe-Dünnschichten durchgeführt und gedruckte Sensoren auf Basis dieses Materials hergestellt. Insbesondere haben wir die Dicke der CoFe-Legierung optimiert, um den größtmöglichen AMR-Effekt zu erzielen. Die Proben wurden mittels Magnetronspütern bei Raumtemperatur abgeschieden (Basisdruck: 10^{-8} mbar; als Sputtergas wurde Argon bei einem Druck von 8×10^{-4} mbar verwendet; Abscheidungsrate: 0,17 nm/s). Wie in Abb. 7 gezeigt, liegt der höchste AMR im Bereich von 0,45%, was im Vergleich zu den FeNi-Dünnschichten viel niedriger ist (typischerweise liegt der AMR für FeNi-Filme im Bereich von 2–2,5%). Basierend auf der oben vorgestellten Pulverherstellungstechnik haben wir ein magnetosensitives Komposit auf Basis von CoFe-Pulver hergestellt (Feststoffanteil: 30 Gew.-%). Mithilfe eines Doctor-Blading-Verfahrens wurde das Komposit auf ein Substrat aufgetragen, auf dem wir verschiedene Kontaktlayouts mit einer Anzahl von Kontakten von 4 bis 24 vorbereiteten (Abb. 8). Das Material für die elektrischen Kontakte wurde zwischen Cu und Ag variiert. Nach dem Drucken und Trocknen wurden die gedruckten AMR-Sensoren mit einer Polymerbeschichtung (Fotolack) laminiert, wie in Abb. 8 zu sehen ist. Diese Kontaktlayouts wurden auch zur Optimierung und Charakterisierung gedruckter AMR-Sensoren auf Basis von FeNi-Legierungen verwendet. Im Gegensatz zu der hohen AMR-Leistung, die für die auf FeNi basierenden gedruckten AMR-Sensoren gemessen wurde, weisen die auf CoFe-Pulver basierenden Sensoren eine sehr geringe AMR auf dem Niveau von 0,05 % auf (Abb. 9).

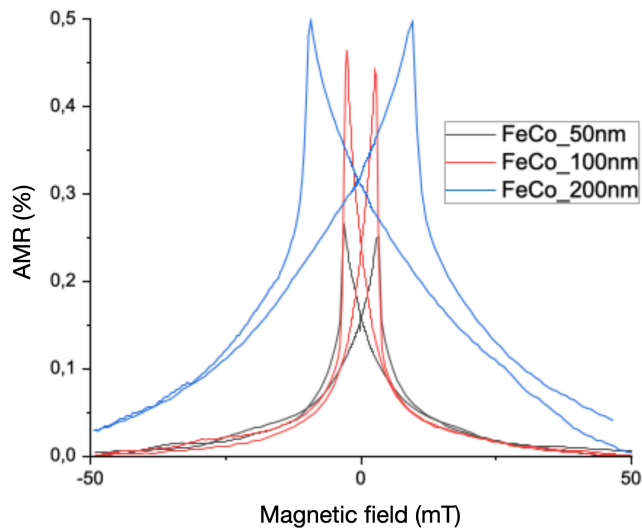


Abbildung 7: Magneto-resistive Charakterisierung von CoFe-Dünnschichten unterschiedlicher Dicke.

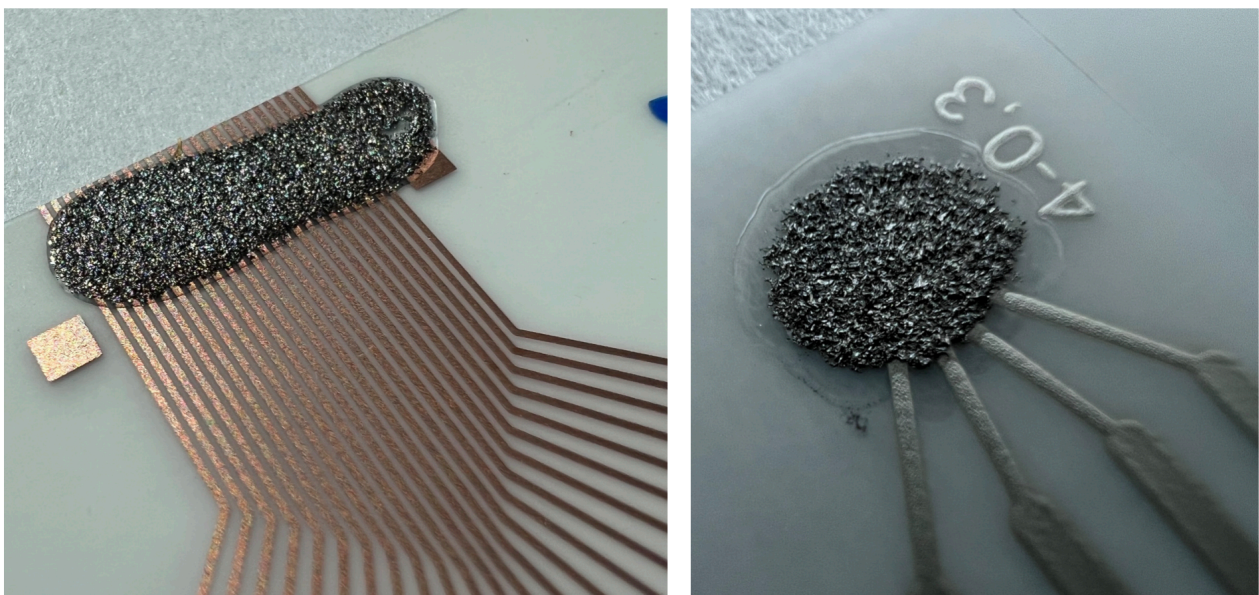


Abbildung 8: Verschiedene Kontaktlayouts, die zur Charakterisierung von AMR-Sensoren, welche auf CoFe-Pulver basieren, verwendet wurden. Die magnetosensitive Paste auf CoFe-Basis wurde im Rakelverfahren auf die elektrischen Kontakte aufgetragen.

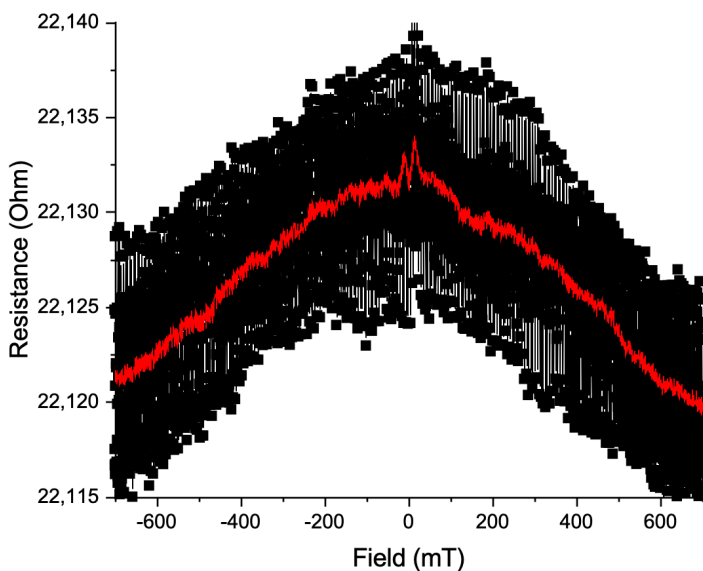


Abbildung 9: Magneto-resistive Charakterisierung von CoFe-basierten AMR-Sensoren, die im Rakelverfahren gedruckt werden. Schwarze Symbole zeigen das tatsächlich gemessene Signal. Die rote Linie stellt geglättete Daten dar, die auf der Grundlage der Mittelung benachbarter Datenpunkte berechnet wurden.

Angesichts der höheren Toxizität von CoFe im Vergleich zu FeNi-Legierungen sowie der eher schlechten magnetoresistiven Leistung von Sensoren auf CoFe-Basis wurde dieser Forschung keine Priorität eingeräumt.

T2.2: Optimierung der Schichteigenschaften und homogene Beschichtung großer Substratflächen

Die Prozedur zur Messung und quantitativen Bewertung der magnetoresistiven Eigenschaften von Proben, die aus Glasronden (\varnothing 300 mm) geschnitten wurden, konnte erfolgreich erarbeitet werden. Das Messverfahren wurde genutzt, um die Homogenität der Sensoreigenschaften über das großflächige Substrat zu verifizieren. Die Beschichtungen wurden dabei in enger Zusammenarbeit mit dem FEP durchgeführt. Die Details zur Homogenität der Abscheidung mit der Abscheidungsanlage der Firma scia Systems GmbH sind in Abb. 1 dargestellt (siehe auch zugehörige Diskussion). Die Beschreibung der Homogenität der Abscheidung mit Großflächenanlagen des Partners FEP findet sich im Bericht des Partners FEP.

T2.3: Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit und Produktivität der Abscheidung magnetoresistiver Schichten

Wir haben das Messverfahren zur quantitativen Bewertung der magnetoresistiven Eigenschaften der Sensoren auf die Bewertung der Herstellungstechnologie angewendet. Dazu wurden Proben unseres Projektpartners FEP, die in verschiedenen Fertigungsläufen hergestellt wurden, standardmäßig charakterisiert. Dieses Messverfahren wurde auf großflächigen Substraten validiert und zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit des Abscheidungsprozesses verwendet. Eine Zusammenfassung zur Reproduzierbarkeit der Herstellung der magnetoresistiven Schichten findet sich im Bericht des Partners FEP.

T2.4: Charakterisierung der AMR Schichten

Basierend auf den etablierten Mess- und Datenauswertungsverfahren (T2.2 und T2.3) führten wir eine detaillierte Analyse der großflächigeren Substrate durch, die von FhG-FEP hergestellt wurden. Die sehr gute Reproduzierbarkeit des Abscheidungsprozesses wurde bestätigt, da die bei verschiedenen Herstellungsdurchläufen gefertigten Sensoren die gleiche Empfindlichkeit und Charakteristik zeigten. Darüber hinaus war die Sensorleistung für alle bereitgestellten Substrate dieselbe, unabhängig von der Position des Sensors auf dem großflächigen Substrat. Auch dieses wichtige Ergebnis bestätigt, dass die Sensoreigenschaften sehr homogen sind.

AP3: Herstellung magnetoempfindlicher Tinten und Pasten

T3.1: Großvolumige Schicht Abscheidung und Ablösung

Wir unterstützten das IKTS-Team bei der Etablierung des Delaminierungsprozesses von magnetischen Dünnschichten vom Glassubstrat und beim Sammeln von magnetoresistivem Pulver. Besonders interessant war, dass durch die Verwendung einer PVA-Opferschicht eine Übertragung des gesamten aufgetragenen Dünnschichtfilms ohne Bruch möglich ist. Der entwickelte Prozess erwies sich als sehr zuverlässig und schonend. Insbesondere konnten wir bestätigen, dass dieser sogenannte Transferdruck-Ansatz nicht nur bei AMR-Sensoren funktionieren kann, sondern auch bei sehr anspruchsvollen Schichtstapeln mit Riesenmagnetowiderstand (GMR) funktioniert (Abb. 10). Dies ist eine wichtige Nebenentdeckung des MAG4INK-Projekts, die das Anwendungsszenario für GMR-Sensoren erweitern kann. Tatsächlich können GMR-Sensoren mit dem entwickelten Transferdruckverfahren auf Substraten verwendet werden, auf denen keine GMR-Schichtstapel hergestellt werden können. Diese Ergebnisse werden in einer Veröffentlichung zusammengefasst.

Wir haben eine Technologie etabliert, um einzelne AMR-Flocken zu trennen, auf einen Si-Wafer zu übertragen, auf dem Wafer zu fixieren und elektrische Kontakte herzustellen, die auf Dünnschichttechnologie (Lithographie und Dünnschichtabscheidung von elektrischen Kontakten, basierend auf Cr/Au-Schichtsystem) beruhen. Der Prozess umfasst die folgenden Schritte:

- ➔ Fixierung von delaminierten Flocken mit Fotolack

- Fotolack mit Orientierungsmarkierungen auf Siliziumwafer auftragen
 - Flocken mit Wattestäbchen auf nassen Fotolack auftragen
 - Fotolack auf einer Heizplatte trocknen
- ➔ Au-Kontakte (100 nm) ätzen
- Gezieltes Ätzen, sehr präzise
 - Um kleinere Flocken zu kontaktieren, ist ein Abstand von nur 10 μm erforderlich
 - Durch das Ätzen wird Au auf den Flocken entfernt

Auf der Grundlage dieser Technologie konnten wir die magnetoresistiven Eigenschaften einer einzelnen Flocke mit einer lateralen Größe im Bereich von etwa 30 μm charakterisieren (Abb. 11). Der AMR-Effekt wurde auf einem Niveau von 0,5% gemessen. Durch dieses wichtige Ergebnis ist es möglich die Einflüsse der Haupt-Herstellungsschritte Dünnschicht-Abscheidung und Druck-Technologie auf die finalen Sensoreigenschaften eindeutig zu separieren und exakt zu bewerten. Insbesondere kann dadurch eine gleichbleibende Qualität des Ausgangsmaterials garantiert werden.

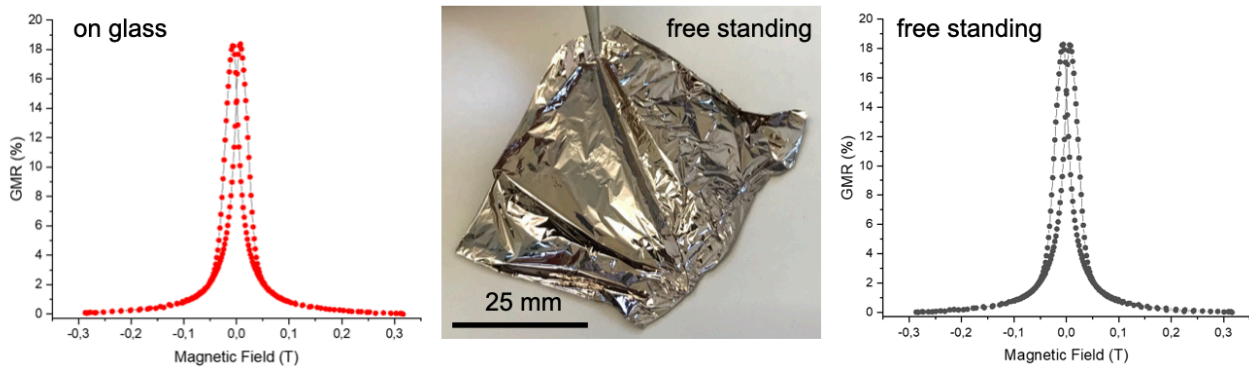


Abbildung 10: Großflächige Ablösung einer magnetoresistiven Schicht. Nach der Übertragung der delaminierten Schicht auf ein anderes Substrat bleibt die magnetoresistive Leistung unverändert. Dieses sogenannte Transferdruckverfahren kann nicht nur auf AMR-Sensoren, sondern auch auf die fortschrittlichen GMR-Sensoren angewendet werden.

T3.3: Validierung der Aufskalierung magnetoempfindlicher Tinten und Pasten

In der Anfangsphase dieser Aufgabenumsetzung haben wir AMR-Sensoren auf Basis des Doctor-Blading-Ansatzes hergestellt. Dies ist eine zeiteffiziente Methode, die ein schnelles Screening der Eigenschaften gedruckter AMR-Sensoren ermöglicht. In diesem Zusammenhang haben wir eine elektrische und magnetoresistive Charakterisierung dieser Sensoren durchgeführt. Diese Informationen wurden mit den Konsortiumspartnern geteilt und als Ausgangspunkt für die Herstellung von siebgedruckten AMR-Sensoren durch den Partner FhG-IKTS verwendet. Für diese Messungen haben wir Sensoren auf FPC-Kabel gedruckt, wie in Abb. 5 gezeigt. Darüber hinaus haben wir die Kontaktlayouts verwendet, wie sie in Abb. 8 dargestellt sind.

AP4: Schichtdruck und Nachbehandlung

T4.1: Auswahl der Druckmethode und Optimierung des Druckprozesses:

Gemeinsam mit dem IKTS-Team haben wir ein Messverfahren zur Charakterisierung der Sensorleistung (elektrischer Widerstand und Magnetowiderstand) der gedruckten Testproben und zur korrekten Auswertung der Messdaten erstellt. Das Messverfahren und die Datenauswertungsstrategie wurden mit dem Projektkonsortium geteilt. Das Messverfahren umfasst die Messung des elektrischen Widerstandes der Sensoren in einem angelegten Magnetfeld, die Bewertung der magnetoresistiven Leistung, die Bewertung des Rauschverhaltens der Sensoren (Abb. 5 und 6).

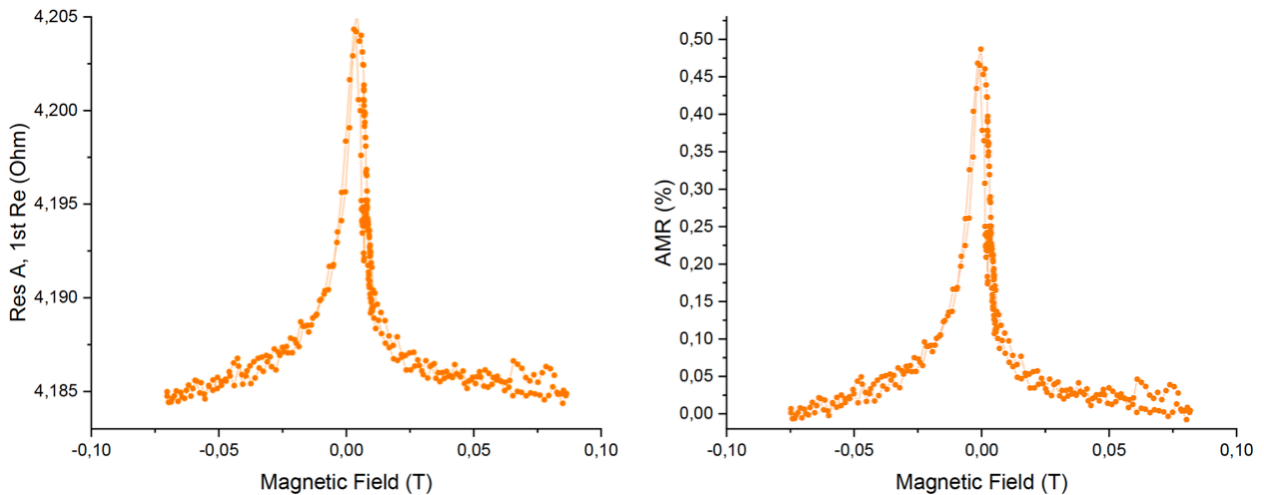
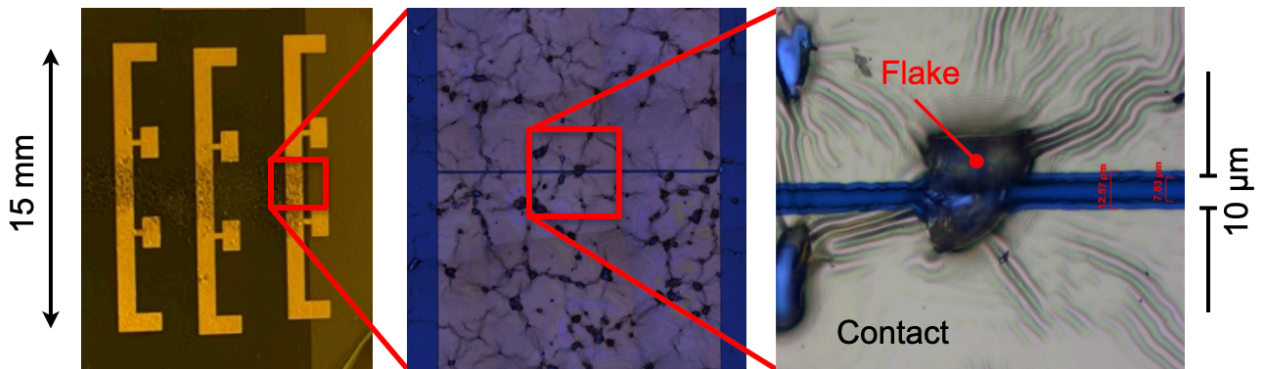


Abbildung 11: Charakterisierung einzelner AMR-Mikroflocken. Eine Flocke mit einer Größe von weniger als 30 µm wird über ein Paar Cr/Au-Kontakte kontaktiert, die lithographisch definiert werden. Die Diagramme in der unteren Reihe zeigen die gemessene Änderung des elektrischen Widerstandes der Flocke und die zugehörige AMR-Kurve.

T4.3: Charakterisierung

Basierend auf den etablierten Mess- und Datenauswertungsverfahren haben wir die Messung des elektrischen Widerstands und des Magnetowiderstands der gedruckten AMR-Sensoren durchgeführt, welche auf den starren und flexiblen Substraten vorbereitet wurden. Die Herstellungsbedingungen der Sensoren (Druckparameter, Eigenschaften der Pasten, Verkapselung) wurden vom Team des IKTS variiert. Eine Zusammenfassung der Messungen findet sich im Bericht des Partners IKTS.

Um die Auswirkungen des ausrichtenden Magnetfelds auf die Eigenschaften der gedruckten Sensoren zu validieren, haben wir durch Galvanisierung in Aluminiumoxid-Vorlagen hoch anisotrope Nanodrähte auf FeNi-Basis hergestellt. Die vorbereitete Vorlage wurde zur galvanischen Abscheidung von NiFe-Nanodrähten in die Elektrolytlösung aus NiCl₂, FeCl₂ und H₃BO₃ getaucht. Nach der Abscheidung wurde die Probe in eine NaOH-Lösung getaucht, um die Aluminiumoxid-Vorlage zu entfernen. Nachdem das Aluminiumoxid vollständig aufgelöst war, wurden die verbleibenden Nanodrähte in 2-Propanol-Lösungen mit unterschiedlichen Volumina überführt, um Tinten mit unterschiedlichen Nanodrahtkonzentrationen herzustellen. Die Nanodrähte weisen einen durchschnittlichen Durchmesser von etwa 60 nm und eine Länge von etwa 100 µm auf. Um eine Clusterbildung der NiFe-Nanodrähte zu verhindern, ist es wichtig, sie in Lösungen suspendiert zu halten. Sobald sie vollständig getrocknet sind, können die magnetischen Nanodrähte nicht wieder gleichmäßig verteilt werden, wenn sie in Tinten zurückgeführt werden. Ohne Anwendung eines externen Magnetfelds beim Trocknen neigen die Nanodrähte zur Clusterbildung und bilden keine perkolierte Matrix, die zur Herstellung der elektrischen Leitfähigkeit erforderlich ist (Abb. 12).

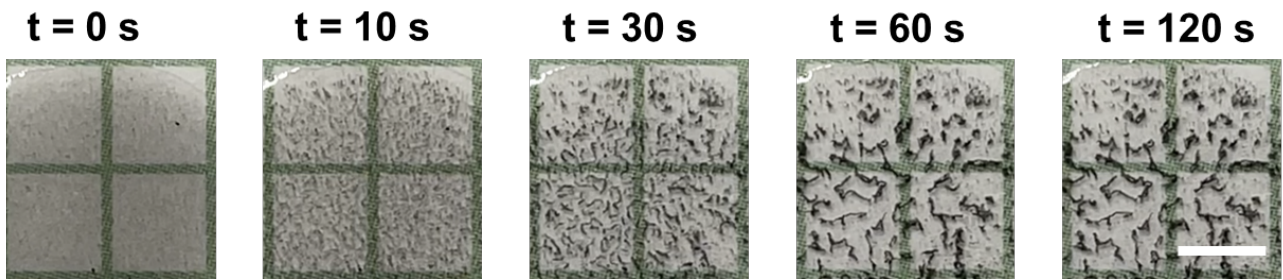


Abbildung 12: Gedruckte NiFe-Nanodrahnte ohne magnetische Ausrichtung. Im Laufe der Zeit (von 0 s bis 120 s) aggregieren die Nanodrahnte in der Tinte und bilden isolierte Inseln. Maßstab: 5 mm.

Daher haben wir ein Magnetfeld in verschiedenen Winkeln zur Probennormalen angelegt, um die Nanodrahnte auszurichten und die Bildung perkolierter Netzwerke zu erleichtern. Bei diesen Experimenten wurde ein Magnetfeld von bis zu 250 mT kontinuierlich auf das Substrat angelegt, bis die gedruckten Tinten vollständig getrocknet waren (Abb. 13).

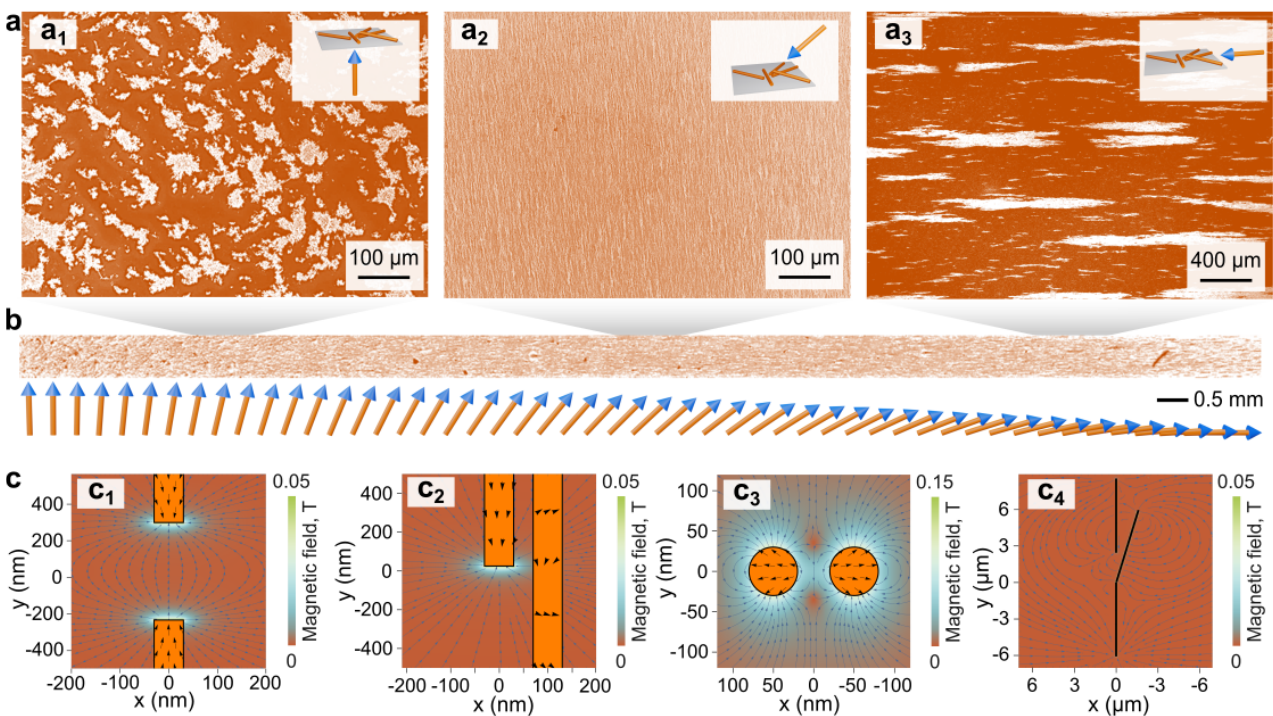


Abbildung 13: Mechanismus der Bildung von NiFe-Nanodrahnten-Netzwerken. a) Nanodrahnte-Netzwerke, gedruckt unter Magnetfeldausrichtung. Die Ausrichtungsfelder sind a1) senkrecht, a2) schräg und a3) parallel zum Substrat. b) Verteilung der Nanodrahnte, gedruckt in Magnetfeldern mit kontinuierlicher Richtungsänderung. Unten (von links nach rechts): Die Ausrichtung des Magnetfelds relativ zum Substrat ändert sich von senkrecht zu parallel. Oben: Ein entsprechendes Rasterelektronenmikroskop-Bild von NiFe-Nanodrahnten, gedruckt in den angegebenen Magnetfeldern. c) Verteilung der Magnetfelder und mechanischen Kräfte zwischen zwei NiFe-Nanodrahnten bei Anwendung eines externen Magnetfelds. In c1-3) sind zwei gerade Nanodrahnte in verschiedenen Konfigurationen relativ zueinander positioniert, darunter c1) die Kopf-Schwanz-Anordnung, c2) die Kopf/Schwanz-Körper-Anordnung, c3) die Kopf-Kopf/Schwanz-Schwanz-Anordnung; in c4) ist einer der Nanodrahnte gekrümmt und Kopf/Schwanz-Körper relativ zum zweiten angeordnet. Es wird angenommen, dass die zylindrischen Nanodrahnte entsprechend der Konkurrenz zwischen Zeeman-Energie und Formanisotropie magnetisiert werden. Blaue und schwarze Pfeile geben die Richtung der Magnetfelder bzw. mechanischen Kräfte an.

Um einen direkten Vergleich zu ermöglichen, wurden die Proben in einem Gradientenmagnetfeld eines Permanentmagneten vorbereitet. Das Magnetfeldprofil ist in Abb. 13(b) dargestellt. Wie aus den Elektronenmikroskopie-bildern (Abb. 13(a)) ersichtlich ist, ist es nur fur den spezifischen

Winkel des angelegten Magnetfelds im Bereich von etwa 30 Grad möglich, eine homogene Ausrichtung der magnetischen Nanodrähte zu erreichen. Nach dem Drucken war es notwendig, das isolierende Oxid auf der Oberfläche der NiFe-Nanodrähte mit verdünnter Phosphorsäure zu entfernen, um die Kontaktqualität zwischen den NiFe-Nanodrähten für eine erfolgreiche elektrische Perkolation sicherzustellen. Schließlich wurden die gedruckten Sensoren mit Polymethylmethacrylat beschichtet und anschließend bei Raumtemperatur verfestigt, um eine mögliche Oxidation zu verhindern.

Die gedruckten AMR-Sensoren weisen eine stark anisotrope Magnetowiderstandsleistung auf, wenn das Magnetfeld während der Messung parallel oder senkrecht zur Ausrichtungsachse der Nanodrähte angewendet wird (Abb. 14).

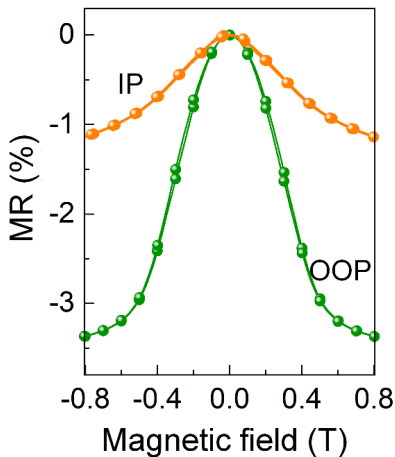


Abbildung 14: Magnetowiderstandsreaktion des gedruckten NiFe-Nanodrahtsensors bei Raumtemperatur. Magnetfelder werden entweder parallel oder senkrecht zur Ausrichtungsrichtung der Nanodrähte angelegt.

AP5: Validierung der Bedruckung und Nachbearbeitung, Erstellung der Demonstratoren

T5.1: Untersuchungen zum Druck unterschiedlicher AMR-Sensor-Layouts (Einzelsensoren, Array)

Wir haben Layouts von Kontakten vorbereitet, um einzelne gedruckte AMR-Sensoren und Arrays von gedruckten AMR-Sensoren zu realisieren. Diese Layouts wurden für den Anschluss an die Konditionierungselektronik optimiert (Abb. 15). Bei der Entwicklung des Messverfahrens wurden Anstrengungen unternommen, um parasitäre Einflüsse, die durch Temperaturschwankungen und mechanische Belastungen bei Verformung des gedruckten Sensors entstehen, aufzuheben. Dieses Messverfahren ist neu. Zum Schutz dieser Technologie haben wir 2023 ein Patent angemeldet (Amtliches Aktenzeichen: 10 2023 105 724.3; Titel der Patentanmeldung: "Verfahren und Sensorsystem"). Die AMR-Sensorlayouts für kontaktlose Schalter wurden im Demonstrator 1 umgesetzt, der auf den Messen wie LOPEC 2023&2024 in München präsentiert wurde. Der Demonstrator verfügt über einen vollständig konditionierten gedruckten AMR-Magnetfeldsensor für Smart-Button-Anwendungen. Der gesamte Demonstrator mit der gesamten notwendigen Elektronik ist in einer kleinen Box untergebracht (Abb. 16), die von den Besuchern der Ausstellungen zur Interaktion genutzt werden kann.

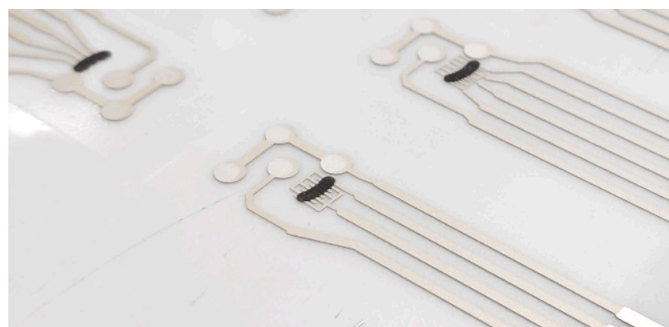
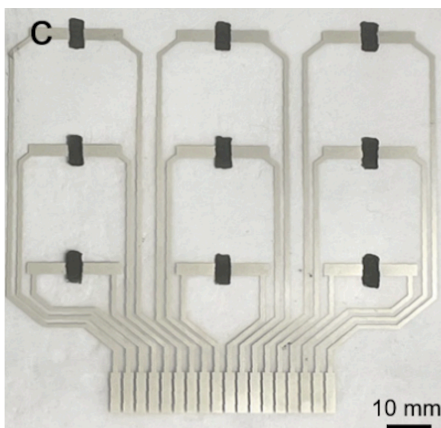


Abbildung 15: Verschiedene Layouts, die zur Realisierung gedruckter Magnetfeldsensoren verwendet wurden.

T5.2: Charakterisierung der Sensoreigenschaften der AMR-Sensoren (Demonstrator 1)

Basierend auf dem etablierten Messverfahren entwickeln wir die elektronische Schaltung, die auf einer konventionellen Leiterplattentechnologie mit der Verwendung von diskreten elektronischen Komponenten basiert (Abb. 16, oben). Die Elektronik ermöglicht es, den gedruckten Magnetfeldsensor als berührungslosen Schalter zu verwenden (Abb. 16, unten). Der entwickelte Magnetschalter kann die kapazitiven und/oder mechanischen Schalter des Standes der Technik ergänzen oder ersetzen. Dies bietet folgende wesentliche Vorteile:

- 1/ Redundanz bei Ausfall konventioneller Schalter
- 2/ Einsatz unter Wasser
- 3/ berührungsloses Schalten.



Abbildung 16: Multifunktionsschalter, der gedruckte Magnetfeldsensoren enthält. Die Leiterplatte zur Konditionierung dieser Sensoren ist auf dem Foto ebenfalls zu sehen. Die Platine enthält die Methode zur Stabilisierung der Sensorreaktion, die nun in einer Patentanmeldung zusammengefasst ist. Die Magnetfeldsensoren werden auf die kommerzielle taktile interaktive Schnittstelle gedruckt (Abb. 15, rechts), die von der Firma Kundisch vertrieben wird. Dieser Demonstrator wurde entwickelt, um zu validieren, dass MAG41NK-Magnetfeldsensoren auch auf Standardsubstrate gedruckt werden können, die in der gedruckten Elektronikindustrie verwendet werden.

T5.3: Untersuchungen zum Druck unterschiedlicher PHE-Sensor-Layouts (Einzelsensoren, Array)

Das Layout für den gedruckten PHE-Sensor ist in Abb. 17 dargestellt. Der Sensor ist auf einer flexiblen Leiterplatte aufgebaut, die am HZDR entwickelt wurde. Die Platine verfügt über 4 Kontakte, die in einer Standard-Hallkreuz-Konfiguration aufgebaut sind. Die Magnetpaste wird in der Mitte des Hallkreuzes aufgetragen. Die Paste besteht aus sphärischen FeNi-Partikeln. Der Anteil an Magnetpulver in dieser Paste beträgt 70 Gew.-%. Um magnetische Anisotropie im Sensor zu erreichen, wird der Sensor vor der Messung einem starken Magnetfeld von 0,5 T ausgesetzt.

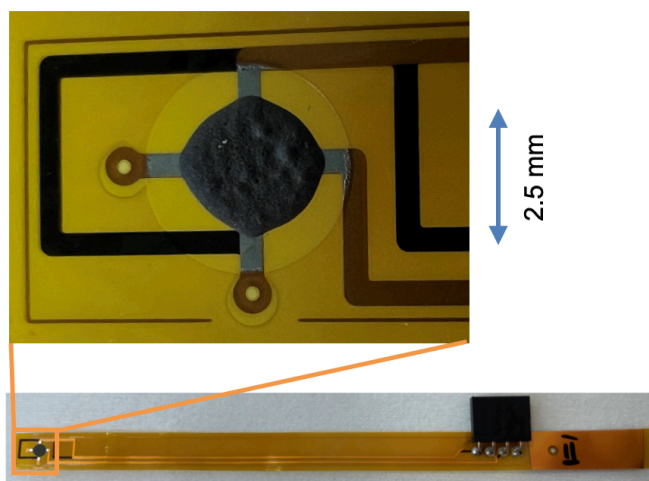


Abbildung 17: Gedruckter PHE-Sensor.

Dieser Ansatz zur Konditionierung der flexiblen und gedruckten Elektronik wird experimentell validiert und in einer Patentanmeldung zusammengefasst, die 2023 beim Deutschen Patentamt eingereicht wurde (Amtliches Aktenzeichen: 10 2023 105 724.3; Titel der Patentanmeldung: "Verfahren und Sensorsystem"). Diese Auswerteelektronik wurde bereits erfolgreich bei den auf den Messen wie LOPEC 2023&2024 gezeigten Demonstratoren eingesetzt. Das entsprechend

optimierte Sensorlayout und die neue Auswerteelektronik ermöglichte eine Langzeitstabilität der MAG4INK-Demonstratoren während der gesamten Ausstellungsdauer. Mit diesem Leistungsnachweis ist der Meilenstein MS5 erfolgreich abgeschlossen.

T5.4: Charakterisierung der Sensoreigenschaften der PHE-Sensoren (Demonstrator 2)

Wir haben eine Auswerteelektronik entwickelt und eine magnetoelektrisch abgeschirmte Umgebung realisiert, um PHE-Sensoren zu charakterisieren. Dieser Aufbau ist von entscheidender Bedeutung, um die Leistung von Sensoren in schwachen Magnetfeldern zu messen, die typischerweise kleiner als das Erdmagnetfeld sind. Dieser Aufbau wird verwendet, um die Leistung gedruckter PHE-Sensoren (Empfindlichkeit, Signal-Rausch-Verhältnis, Nachweisgrenze) zu bestimmen. Diese Arbeiten waren zwingend notwendig, gerade weil unter Realbedingungen eine Überlagerung des Erdmagnetfeldes vorliegt. Die Messung in einem Magnetfeld von bis zu 1 mT wurde mit Hilfe eines Helmholtz-Spulenpaares realisiert.

Die gedruckten PHE-Sensoren wurden in einer Zweipunkt-Messkonfiguration charakterisiert. Diese Messung ermöglicht es, die AMR-Leistung des Sensors zu ermitteln. Der Sensor zeigte einen AMR-Effekt von 0,45%. Wenn die Messung in einer 4-Punkt-Konfiguration durchgeführt wird, kann die Hall-Spannung gemessen werden. Abbildung 18(links) zeigt das planare Hall-Spannungssignal eines PHE-Sensors aus FeNi-Paste, die auf flexibler Polymerfolie gedruckt ist. Vor der Messung wurde der Sensor zunächst senkrecht zur Sensorrichtung mit einem Magnetfeld größer als 100 mT magnetisiert. In einem zweiten Experiment wurde der Sensor parallel zur Sensorrichtung magnetisiert. In beiden Fällen wurden die Messungen mit einem senkrecht zum äußeren Magnetfeld fließenden Strom durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Sensor, wenn er senkrecht zur Sensorrichtung magnetisiert wird, eine gute Linearität innerhalb eines Magnetfeldbereichs von $\pm 500 \mu\text{T}$ aufweist. Diese Linearität wird jedoch erheblich beeinträchtigt, wenn der Sensor parallel zur Sensorrichtung magnetisiert wird, selbst bei kleinen Magnetfeldern von 3 mT.

Abbildung 18 (rechts) zeigt, dass der Sensor innerhalb seines linearen Bereichs eine maximale Empfindlichkeit von 120 mV/T aufweist, und zwar für den Sensor, der senkrecht zur Sensorrichtung magnetisiert wurde. Diese hohe Empfindlichkeit ermöglicht es dem Sensor, Magnetfelder bis hinunter auf Sub-Mikrotesla-Niveau zu erfassen (hier, 660 nT).

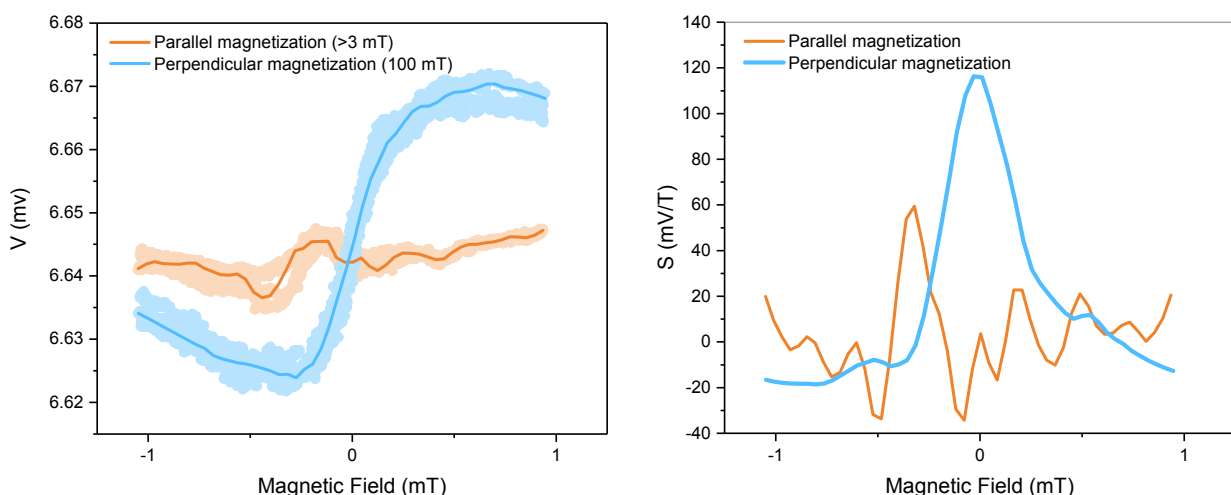


Abbildung 18: (links) Planare Hall-Spannung eines gedruckten FeNi-Sensors als Funktion eines äußeren Magnetfelds. (rechts) Empfindlichkeit und Detektivität des gedruckten FeNi-Sensors. Für diese Messungen verwendeten wir den in Abb. 17 gezeigten Sensor.

Abbildung 19 zeigt das Rauschverhalten des gedruckten PHE-Sensors. Bei 1 Hz zeigt der Sensor ein Rauschniveau von $80 \text{ nV/Hz}^{1/2}$, wenn er mit 3 mA Strom betrieben wird. Diese niedrigen Rauschniveaus, kombiniert mit der hohen Empfindlichkeit des Sensors (Abb. 18 (rechts)), unterstreichen die Fähigkeit des gedruckten PHE-Sensors, minimale Änderungen in Magnetfeldern bis zu einigen Mikrottesla zu erkennen.

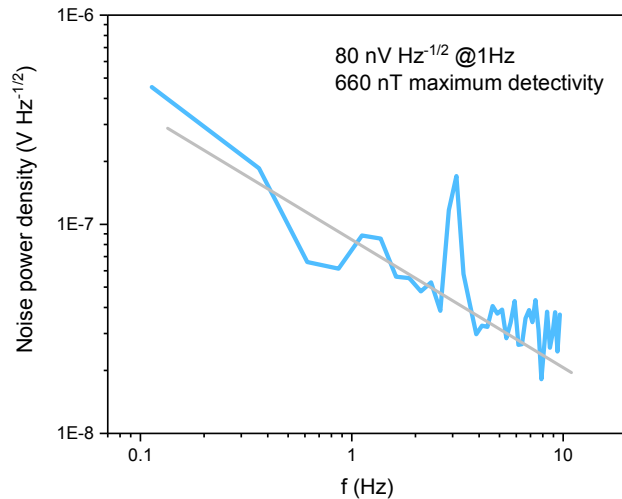


Abbildung 19: Rauschcharakteristik des gedruckten PHE-Sensors.

Diese flexiblen Sensoren können auf die Haut aufgetragen oder in ein Textil integriert werden, um entweder Smart-Skin- oder Smart-Textile-Demonstratoren zu realisieren, was das Ziel des MAG4INK Demonstrators #2 ist (Meilenstein MS6). Wir haben einen Demonstrator mit einem gedruckten PHE-Sensor vorbereitet, der sich auf einem Zeigefinger befindet. Abbildung 20 zeigt die Anwendung des Sensors für die Verwendung auf der Haut. Der Sensor ist in der Lage, Magnetfelder bei Schwellenwerten von $100 \mu\text{T}$, die von einem etwa 10 cm entfernt positionierten Stabmagneten erzeugt werden, zuverlässig zu erkennen. Das Bild rechts zeigt Schnappschüsse der aufgezeichneten Videodateien, die die gedruckten PHE-Sensoren auf flexibler Polymerfolie zeigen, die auf einem Zeigefinger angebracht ist.

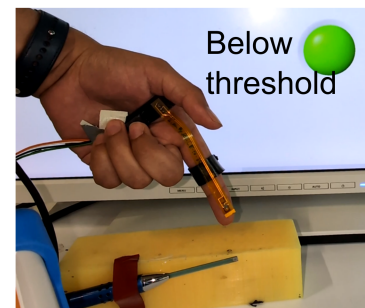
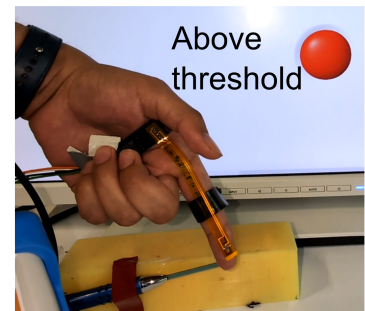
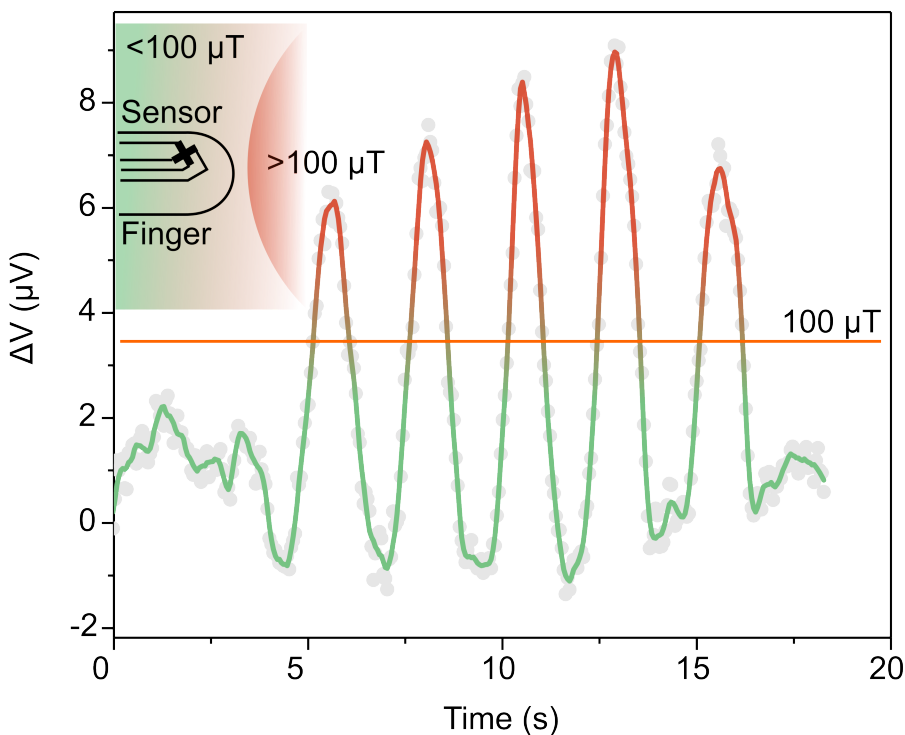


Abbildung 20: Anwendung flexibler gedruckter PHE-Sensoren auf der Haut.

Der Sensor wird viele Male einer Magnetfeldquelle genähert. Die Sensoranzeige ist auf dem Bild links zu sehen. Die Konditionierungselektronik ist so ausgelegt, dass sie erkennt, wenn der Finger

einem Magnetfeld von mehr als $100 \mu\text{T}$ ausgesetzt ist. Wenn dieser Schwellenwert erreicht ist, wechselt die Anzeige auf dem PC-Bildschirm von grün (sicher; Feld ist kleiner als $100 \mu\text{T}$) auf rot (Warnmeldung; Feld ist größer als $100 \mu\text{T}$). Das Magnetfeld von $100 \mu\text{T}$ ist sehr klein, auf dem Niveau eines Geomagnetfelds. Die hohe Empfindlichkeit gedruckter PHE-Sensoren ermöglicht deren zuverlässige Messung, selbst wenn der Sensor auf der Haut getragen wird. Diese Fähigkeit demonstriert das Potenzial für berührungslose Interaktivität, das in verschiedenen Anwendungen genutzt werden könnte, die einen hohen Durchsatz und leicht herzustellende gedruckte Schnittstellen erfordern. Mit diesem Demonstrator haben wir den Meilenstein MS6 erfolgreich abgeschlossen.

Da es sich bei PHE-Sensoren um klassische Winkelsensoren handelt, haben wir einen zusätzlichen Demonstrator entwickelt, um die Leistungsfähigkeit unserer gedruckten PHE-Sensoren auf flexiblen Polymerfolien (Abb. 17) zur Winkelmessung zu demonstrieren. Abbildung 21 zeigt das Potenzial des Sensors in Rotationssensorenanwendungen. Ein Stabmagnet, der als Knopf zur Steuerung eines rotierenden ventilähnlichen Mechanismus fungiert, wird verwendet, um die Fähigkeit des Sensors zu demonstrieren, Rotationen bei unterschiedlicher Polarität zu erkennen. Der Sensor arbeitet effektiv bei geomagnetischen Feldstärken ($<100 \mu\text{T}$), wie die Referenz-Gaussmetersonde zeigt.

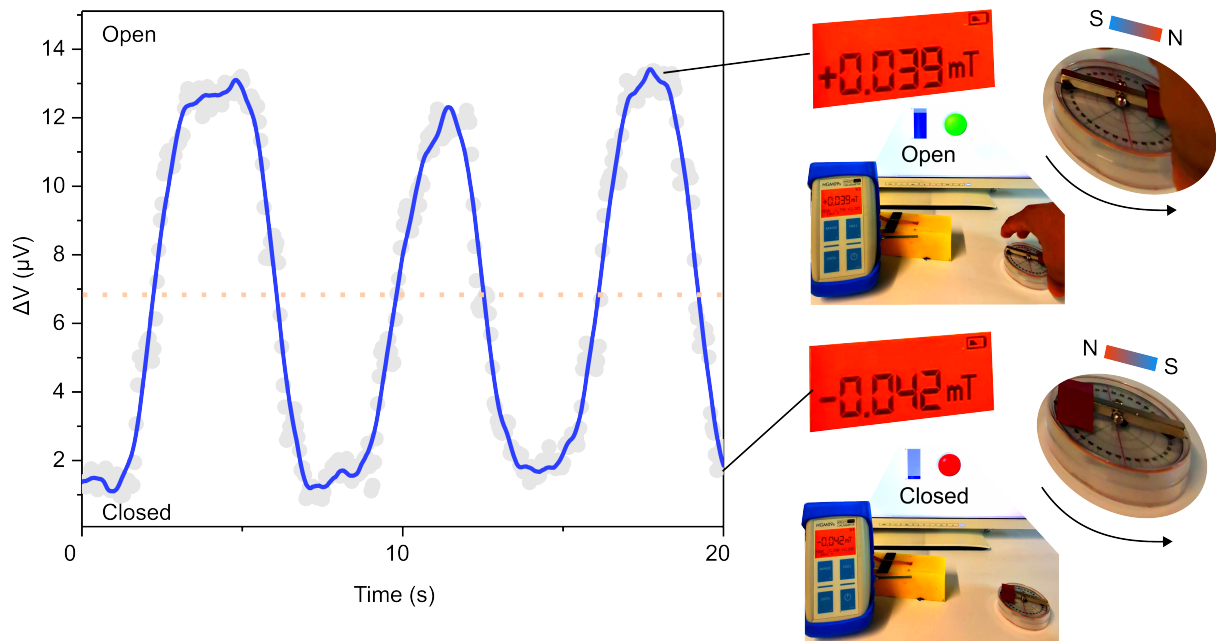


Abbildung 21: Winkelsensor basierend auf gedrucktem PHE-Sensor.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Partner HZDR alle Aufgaben, die im vorgeschlagenen Arbeitsprogramm angegeben waren, erfüllt hat. Alle Aufgaben wurden ohne Änderungen und Anpassungen erfolgreich abgeschlossen. Diese Aussage gilt für jedes Arbeitspaket und jede Aufgabe, die in diesem Bericht besprochen wird.

2. Die Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis der durch das Projekt verursachten Kosten wird seitens der Verwaltung des HZDR erbracht. In der Abrechnung wurden größtenteils Personalkosten geltend gemacht. Diese setzen sich zusammen aus den Vergütungen für Mitarbeiter entsprechend TVöD und Zuschlägen für Sachgemeinkosten, für Personalgemeinkosten und für AfA. Im Projekt entstanden außerdem in deutlich geringerem Umfang Materialkosten. Es wurden keine Dienstreisen über das Projekt finanziert. Am HZDR entstehen im Rahmen dieses Projektes keine Investitionskosten.

3. Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die geleisteten Arbeiten entsprachen im vollen Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag und waren daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen. Regelmäßige Absprachen des MAG4INK-Konsortiums (monatliche Online- oder Präsenztreffen) ermöglichten eine effiziente Projektbearbeitung. Nach Projektende bestätigen wir die erfolgreiche Erreichung aller Meilensteine und die vollständige Verwirklichung aller Projektziele.

Am HZDR sind wir verantwortlich für die magnetoresistive Charakterisierung gedruckter AMR-Sensoren und für das Design und die Realisierung von Demonstratoren mit gedruckten AMR-Sensoren. Diese Aktivitäten sind von entscheidender Bedeutung für den Erfolg des Projekts, insbesondere für die technologische Weiterentwicklung hin zu industriereifen Sensorprototypen. Die Projektdurchführung bestätigte, dass zur Erreichung des Endziels (Demonstratoren Nr. 1 (MS5) und Nr. 2 (MS6)) alle ursprünglich im Projektvorschlag vorgesehenen Aufgaben des Partners HZDR wichtig waren. Daher war der Zeitaufwand des eingestellten Personals des Partners HZDR für jede einzelne geplante Aufgabe erforderlich und angemessen.

Darüber hinaus war jeder der Konsortiumspartner in die Aktivitäten anderer Partner eingebunden. Dies half uns einerseits, Risiken bei der Projektumsetzung zu minimieren, beispielsweise durch die gemeinsame Nutzung ergänzender Infrastruktur. Andererseits förderte diese starke Interaktion eine schnelle Projektentwicklung und ermöglichte den beteiligten Nachwuchsforschern hervorragende Lernmöglichkeiten. Im konkreten Fall des Partners HZDR waren wir an der Unterstützung des Partners IKTS bei der Auswahl und Optimierung der Opferschicht und der Unterstützung des Partners FEP bei der Deposition von AMR-Schichtstapeln beteiligt. Da diese Aktivitäten des Partners HZDR zu einer Steigerung der Effektivität der Projektumsetzung führten, war dieser Zeitaufwand notwendig und erforderlich. Beispielsweise ermöglichte der Einsatz der Depositionsgeräte am HZDR ein effektives Screening relevanter Materialschichtstapel und Depositionsbedingungen, die für weitere eingehende Untersuchungen für hochleistungsfähige AMR-Sensoren ausgewählt wurden.

Im Gegenzug profitierte das HZDR stark vom umfassenden Know-how des Partners FEP bei der Optimierung der Abscheidungsprozessparameter. Insbesondere konnte das HZDR mithilfe der Kollegen vom FEP den Zeitaufwand bei der Herstellung von Hochleistungs-Magnetfeldsensoren um den Faktor 2 verbessern. Dies hat enorme Auswirkungen auf die Effizienz der Studenten und Forscher am HZDR. Basierend auf dieser optimierten Geräteleistung haben wir validiert, dass es eine Möglichkeit gibt, 1 kg AMR-Paste pro Jahr mit dem Magnetron-Sputtering-Gerät der scia Systems GmbH (vollautomatisches Abscheidungsgerät; Abscheidungsfläche von 300 mm) herzustellen. Dieses Ergebnis ist für die zukünftige Kommerzialisierung der MAG4INK-Technologie sehr wichtig. Diese Analyse zeigt, dass selbst für Unternehmen, die über Standard-Abscheidungsanlagen für die Wafer-Scale-Produktion von AMR-Sensoren verfügen, eine klare Möglichkeit besteht, in das Geschäft der gedruckten Magnetoelektronik einzusteigen. Im Hinblick auf dieses wichtige Ergebnis für das MAG4INK-Projekt und seine zukünftigen Transferaktivitäten war der zeitliche Aufwand seitens des Partners FEP erforderlich und angemessen.

Darüber hinaus profitierte das HZDR stark von der Erfahrung des Partners IKTS bei der Formulierung von Funktionspasten für Druckprozesse. Diese Aktivitäten stimulierten völlig neue Entwicklungen der ökologisch nachhaltigen Magnetoelektronik, die in Folgeprojekten weiterverfolgt

werden sollen. Angesichts der grundlegenden Neuartigkeit dieses Themas und seiner Relevanz für unsere Gesellschaft war der zeitliche Aufwand des Partners IKTS für diese Aktivitäten erforderlich und angemessen.

4. Der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses - auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Da die Weiterentwicklung der MAG4INK-Technologie auf den synergetischen Aktivitäten aller Konsortiumspartner basiert, ist dieser Abschnitt für das gesamte Konsortium verfasst.

Die Umstellung von Batch-Prozessen auf Inline-Prozesse bei der Pulveraufbereitung, insbesondere bei der Abscheidung der Opferschicht, Abscheidung der AMR-Schicht, Trocknung und auch Ablösen der AMR-Schichten, würde die Gesamtkosten der Technologie weiter senken und ihre Wettbewerbsfähigkeit für potenzielle Kunden erhöhen. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass das Ziel von 1 kg druckbarer Tinte/Paste bereits innerhalb des gesteckten Zeitrahmens von einem Jahr mittels Batch-Produktion erreicht werden kann.

Ebenso bieten Technologien zur effizienten Sensorfertigung Potential für die Kostenreduktion der Sensoren. Diese beinhalten zu einem Druckverfahren aber auch Nachbehandlungsverfahren wie Hochleistungsdiodenlaserarrays (HPDL) und Flash-Lamp-Annealing (FLA). Im Rahmen dieses Projektes haben wir auf solche Technologien zurückgegriffen, die sich gut skalieren lassen und somit einen einfachen Technologietransfer erlauben. Die Evaluierung bzw. Skalierung mit Hilfe der oben beschriebenen Verfahren zu inline-Prozessierung mit resultierender Kostenreduktion sollen in Projekten mit Industriebeteiligung erfolgen.

Zu den nächsten Schritten nach Projektende gehören:

1/ Drittmittelakquise, z.B. über BMBF und EU (direkt im Anschluss an MAG4INK).

- Diesbezüglich sind wir bereits erfolgreich mit dem Erwerb der Finanzierung für das Projekt „Senscubator“ im Rahmen der BMBF DATI-pilot Innovationscommunities Initiative, das sich unter anderem mit Entwicklungs- und Validierungsthemen rund um Sensorik auf flexiblen Substraten befassen wird.

2/ Akquise von bilateralen Projekten mit industriellen Partnern (mittelfristig: 1-2 Jahre). Die Firmen aus dem Beirat sind an den Projektergebnissen interessiert, wodurch dieser Weg die Ergebnisse zu verwerten auszuloten ist. Inwiefern der erreichte TRL dafür ausreichend ist, wird Ergebnis weiterer Gespräche im Anschluss an das Projekt sein.

- Die Firma Kundisch GmbH & Co. KG hat sich mit dem MAG4INK-Team in Verbindung gesetzt und zeigt Interesse, die Magnetfeldsensoren für ihre berührungslosen Tastaturen für „Human Maschine Interfaces“ (HMI) einzusetzen. In Zusammenarbeit mit Herrn Sebastian Gepp von der Firma Kundisch (Mitglied des Beirats des MAG4INK-Projekts) sehen wir darin große Chancen, unsere Technologie weiterzuentwickeln und näher an die Markterfordernisse anzupassen. Auch die FESTO GmbH & Co. KG ist Teil des Beirats des MAG4INK-Projekts und hat bereits Interesse an der Technologie bekundet zur Messung von Abständen. Für beide Kooperationen stellt der MAG4INK-Demonstrator (Meilenstein MS5) den Schlüsselfaktor dar. Diese Aktivitäten mit den Firmen Kundisch und FESTO werden unmittelbar nach Projektende beginnen.
- Wir werden nach Möglichkeiten der Übertragung der Projektergebnisse einschließlich der Herstellungstechnologie sowie der Bauteilauslegung auf andere Anwendungsfelder (z.B. der Luft- und Raumfahrt) suchen. Im ersten Schritt können diese Aktivitäten auch im Rahmen gemeinsamer Drittmittelprojekte durchgeführt werden.

3/ Lizenzierung des Know-hows: Zusammenarbeit mit der Industrie auch über den Beirat.

4/ IP-Schutz: Zusätzlich zu der bereits eingereichten Patentanmeldung zur Konditionierung gedruckter Sensoren wird das MAG4INK-Team weitere wichtige technologische Schritte für die Patentierung in Betracht ziehen.

5/ Produktentwicklung basierend auf gedruckten Magnetfeldschaltern und linearen Sensoren (ab 3 Jahre nach Projektende). Dies erfordert einen Übergang von TRL6 (aktueller Stand) zu TRL8,

der die folgenden Aufgaben umfasst: (i) Mechanische Langzeitstabilitätsprüfung, (ii) Betrieb bei verschiedenen Temperaturen und Feuchtigkeitsbedingungen, (iii) Erstellung von Datenblättern für gedruckte Sensoren.

- Für diese Aktivitäten betrachten wir den Aufbau einer Pilotlinie mit Automatisierung zur großvolumigen Fertigung von Magnetfeldsensoren. Die Pilotlinie kann auf interessierte Industriepartner übertragen werden (z. B. Unternehmen, die Magnetfelssensoren herstellen, wie Sensitec, und auch Unternehmen, die Systeme mit Magnetfeldsensoren herstellen, wie Littelfuse).
- Alternativ oder ergänzend besteht die Möglichkeit, die Pilotlinie an unser Spin-off (siehe nächsten Punkt in der Liste) zu übertragen.

6/ Ausgründungen von MAG4INK: Junge Forscher aus dem MAG4INK-Team könnten den Kern der potenziellen Ausgründungen bilden. Die ersten Schritte für diese Ausgründungsaktivitäten werden beispielsweise über das Programm EXIST finanziert. Folgende Nachwuchswissenschaftler/innen wurden im Rahmen des Projektes ausgebildet:

- Dr. Eduardo Sergio Oliveros-Mata (HZDR): hat im März 2024 seine Promotion zum Thema "gedruckte Magnetfeldsensoren" verteidigt.
- Herr Clemens Vogt (Fraunhofer IKTS): plant, seine Doktorarbeit bis Ende 2024 abzuschließen.
- Frau Regina Fust (Fraunhofer IKTS): hat ihre Bachelorarbeit "Behandlung und Charakterisierung von AMR-Pulver und ihr Einfluss auf die Viskosität von Fluiden" an der HTW Dresden im August 2024 verteidigt.

Die mögliche Transferstrategie der MAG4INK-Technologien wird wie folgt betrachtet:

1/ Anbieten von magnetosensitivem Pulver als Beschichtungsservice bei FhG-FEP. Neben dem AMR-Pulver kann der Partner FhG-FEP die hier validierte Delaminierungstechnologie auch für andere Funktionsmaterialien nutzen, darunter auch für Materialien, die nicht in Pulverform mittels herkömmlicher metallurgischer Methoden hergestellt werden können. Der Partner FhG-FEP ist gut darauf vorbereitet, Pilotlinientests und Technologietransfers an interessierte Industriepartner durchzuführen. Informationen zu diesen Möglichkeiten werden nach Projektende auf der Webseite der FhG-FEP verfügbar sein [L1].

2/ Anbieten von magnetosensitiver Pasten und Verifikationsmuster der Sensoren über FhG-IKTS und HZDR. Dazu gehören der Transfer und die Lizenzierung der Druck- und Nachbearbeitungstechnologie sowie die Bereitstellung von Pilotserien gedruckter Magnetfeldsensoren. Die Informationen zu diesen Möglichkeiten werden nach Projektende auf der Webseite der FhG-IKTS verfügbar sein [L2, L3]. Die erste Version der Datenblätter für die gedruckten Magnetfeldsensoren ist nun erstellt und wird bis zum Ende des Projekts fertiggestellt sein. Diese Datenblätter werden auch über die Webseiten der teilnehmenden Konsortiumspartnern bereitgestellt.

3/ Angebot einer Auswerteelektronik für gedruckte magnetosensitive Sensoren durch den Partner HZDR. Zu diesen Aktivitäten gehört auch die Lizenzierung des Know-hows der eingereichten Patentanmeldung an interessierte Industriepartner. Die HZDR-Technologie zur Herstellung gedruckter Magnetfeldsensoren ist an die Firma HZDR Innovation GmbH lizenziert [L4].

[L1] <https://www.fep.fraunhofer.de/de/Anwendungsfelder.html>

[L2] https://www.ikts.fraunhofer.de/de/abteilungen/energiesysteme/werkstoffe_komponenten/werkstoffe_gedruckte_systeme/fa_tinten_pasten_fuer_funktionsschichten.html

[L3] https://www.ikts.fraunhofer.de/de/abteilungen/energiesysteme/werkstoffe_komponenten/hochtemperatur-elektrochemie_funktionalisierte_oberflaechen/diodenlaser-array_nachbearbeitung_inkjet-gedruckter_schichten.html

[L4] <https://hzdr-innovation.de/products/flexible-magnetoelektronik/>

5. Der während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Der Stand der Technik wurde kontinuierlich in der wissenschaftlichen Literatur und bei den Patentanmeldungen verfolgt. Wir haben keine Ergebnisse von Drittanbietern festgestellt, die die Implementierung der MAG4INK-Technologie behindern oder unseren Handlungsspielraum einschränken könnten.

Aktuelle Veröffentlichungen zeigen eine aktive Entwicklung im Forschungsbereich gedruckter Magnetfeldsensoren und belegen die Aktualität und Neuartigkeit des MAG4INK-Projekts. Nachfolgend sind einige relevante Veröffentlichungen aufgeführt:

E. S. Oliveros-Mata, R. Xu, L. Guo, D. Makarov

Magnetically aware actuating composites: Sensing features as inspiration for the next step in advanced magnetic soft robotics

Phys. Rev. Appl. 20, 060501 (2023).

P. Gupta, D. D. Karnaushenko, C. Becker, I. E. Okur, M. Melzer, B. Özer, O. G. Schmidt, D. Karnaushenko

Large Scale Exchange Coupled Metallic Multilayers by Roll-to-Roll (R2R) Process for Advanced Printed Magnetolectronics

Advanced Materials Technologies 7, 2200190 (2022)

R. Xu, G. S. Cañón Bermúdez, O. V. Pylypovskyi, O. M. Volkov, E. S. Oliveros Mata, Y. Zabala, R. Illing, P. Makushko, P. Milkin, L. Ionov, J. Fassbender, and D. Makarov

Self-healable printed magnetic field sensors using alternating magnetic fields

Nature Communications 13, 6587 (2022)

E. S. Oliveros Mata, C. Voigt, G. S. Cañón Bermúdez, Y. Zabala, N. M. Valdez-Garduño, M. Fritsch, S. Mosch, M. Kusnezoff, J. Fassbender, M. Vinnichenko, and D. Makarov

Dispenser printed bismuth-based magnetic field sensors with non-saturating large magnetoresistance for touchless interactive surfaces

Adv. Mater. Technol. 7, 2200227 (2022)

E. S. Oliveros Mata, G. S. Cañón Bermúdez, M. Ha, T. Kosub, Y. Zabala, J. Fassbender, and D. Makarov

Printable anisotropic magnetoresistance sensors for highly compliant electronics

Applied Physics A 127, 280 (2021)

M. Ha, G. S. Cañón Bermúdez, T. Kosub, I. Mönch, Y. Zabala, E. S. Oliveros Mata, R. Illing, Y. Wang, J. Fassbender, and D. Makarov

Printable and Stretchable Giant Magnetoresistive Sensors for Highly Compliant and Skin-Conformal Electronics

Adv. Mater. 33, 2005521 (2021)

6. Die erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF

Die Ergebnisse des Projekts wurden den Mitgliedern des Beirats präsentiert, dem unter anderem die Firmen Kundisch und FESTO angehören. Darüber hinaus wurde das Projekt den Mitgliedern des OES-Netzwerks vorgestellt, dem mehr als 50 Unternehmen angehören, die im Bereich der flexiblen und gedruckten Elektronik tätig sind. Um die Sichtbarkeit des Vorhabens zu steigern, wurden folgende Aktivitäten geschaltet:

(A) Internetauftritte:

- Projektbeschreibung [<https://www.fep.fraunhofer.de/de/ueber-uns/projekte/MAG4INK.html#1>]
- News-Mitteilungen:
[https://www.ikts.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/2021_8_27_n_gedruckte_magnetfeldsensoren_fuer_das_internet_der_dinge.html]
[<https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=63895&pNid=0&pLang=de>]
[<https://www.validierungsfoerderung.de/aktuelles/aktuelles/wie-lassen-sich-gedruckte-magnetfeldsensoren-in-industrierelevanten-groessenordnungen-herstellen>]
- Das MAG4INK-Projekt mit entsprechenden Informationen wird auf der VDI/VDE-Homepage angekündigt.
- Die Projektwebseite (<https://www.mag4ink.com/>) wurde erstellt und gepflegt.
- Der Flyer des MAG4INK-Projekts wurde erarbeitet und an Konsortiumspartnern übergeben. Der Flyer haben wir bei Messen und/oder Konferenzen und/oder Besuchen von Industrie- und Forschungspartnern verwendet (PDF-Datei beigefügt).
- Powerpoint-Folien mit allgemeinen Informationen zu den Projektzielen und einer Zusammenfassung der Kompetenzen des Konsortiums wurden erstellt und zwischen den Konsortiumspartnern ausgetauscht, z.B. für Präsentationen auf Konferenzen.
- Interview of the MAG4INK team for the BMBF [<https://www.validierungsfoerderung.de/aktuelles/aktuelles/wie-lassen-sich-gedruckte-magnetfeldsensoren-in-industrierelevanten-groessenordnungen-herstellen>].

(B) Außerdem wurden Projektaktivitäten bei den folgenden Konferenzen/Messen/Veranstaltungen angesprochen und präsentiert:

- LOPEC 2024 [06.03. – 07.03.2024], München. Vortrag von Mykola Vinnichenko (Fraunhofer IKTS) zum Thema “High-Throughput Printing and Post-Processing Approaches for Realization of Novel Flexible Magnetoresistive Sensors”.
- MRS Fall Meeting [26.11. – 01.12.2023], Boston, USA. Vortrag von Dr. Mykola Vinnichenko (Fraunhofer IKTS) zum Thema “High-Throughput Printing and Post-Processing Approaches for Realization of Novel Flexible Magnetoresistive Sensors” [https://www.mrs.org/meetings-events/fall-meetings-exhibits/2023-mrs-fall-meeting/symposium-sessions/presentations/detail/2023_mrs_fall_meeting/2023_mrs_fall_meeting-3954252].
- V2023 – Vacuum & Plasma [18.09. – 21.09.2023], Dresden. Poster von Morris Ott (Fraunhofer FEP)
- Eurosensors 2023 [10.09. – 13.09.2023], Lecce, Italien. Vortrag von Clemens Voigt (Fraunhofer IKTS) zum Thema “Printed Anisotropic Magnetoresistive Sensors on Flexible Polymer Foils” [<https://www.eurosensors2023.eu/conference-program/>].
- Konferenz "Building Bridges for the Next Generations" [17.05.2023], Dresden: eingeladener Vortrag von Denys Makarov (HZDR) zum Thema “Responsible magnetoelectronics”
- SVC 2023 [08.05. – 11.05.2023], Maryland, USA. Vortrag von Morris Ott (Fraunhofer FEP): „Synthesis of magnetic particles for printable inks by sputtering for sensor applications“
- LOPEC 2023 [28.02. – 02.03.2023], München. Vortrag von Mykola Vinnichenko (Fraunhofer IKTS) zum Thema „Scalable printing of anisotropic magnetoresistive sensors on flexible substrates“
- Jahrestreffen des OES am HZDR [23.11.2022], Dresden. Präsentation der Aktivitäten des MAG4INK-Projekts vor den Mitgliedern des OES-Netzwerks.
- Electronica 2022 [15.11. – 18.11.2022], München (Demo):
o Interview: Dr. Sindy Morsch [https://www.linkedin.com/posts/fraunhoferikts_electronicmanufacturing-sensors-printedelectronics-

activity-6995635256317911040-Bn55/?utm_source=share&utm_medium=member_desktop

- Sensor:Disrupt [28.09.2022], Chemnitz [<https://sensorxdisrupt.de/>]:
 - o Dr. Denys Makarov: Vortrag "Flexible und druckbare Sensoren und Aktoren"
 - o Dr. Mykola Vinnichenko: Vortrag: "Gedruckte Magnetfeldsensoren auf Bi-Basis, hergestellt mit skalierbaren Methoden von industrieller Relevanz"
- Automatica 2022 [21.06. – 24.06.2022], München
- 8. Dresdner Werkstoffsymposium [02.06. – 03.06.2022], Dresden: eingeladener Vortrag von Denys Makarov (HZDR) zum Thema "Druckbare Hochleistungs-Magneto Elektronik"
- LOPEC 2022 [22.03. – 24.03.2022], München (Vortrag und Demo) [<https://lopec.com>]
- Jahrestreffen der scia Systems GmbH [16.03.2022], Chemnitz: eingeladener Vortrag von Denys Makarov (HZDR) zum Thema "FlexiSens: smart magnetic field sensor technologies"

(C) Verbreitung der Projektergebnisse an die breite Öffentlichkeit

- Wissenschaftsfestival SPIN 2030 [08.03. – 09.03.2024], Technische Sammlungen Dresden: Ausstellung
- Zukunftsmesse, Deutsches Museum Nürnberg [16.09. – 17.09.2023], Nürnberg: Ausstellung
- Dresdner Lange Nacht der Wissenschaften [30.06.2023]

(D) Beiträge im Tagungsband

- Artikel in SVC-Bulletin, Fall/Winter 2023, "Synthesis of magnetic particles for printable inks by sputtering for sensor applications", S. 66 [<https://www.flipsnack.com/svcdigitalpublications/2023-fall-winter-bulletin/full-view.html>] (PDF-Datei beigefügt).
- C. Voigt, S. Mosch, E.S. Oliveros-Mata, D. Makarov, C. Schubert, M. Ott, T. Preußner, M. Vinnichenko: Printed Anisotropic Magnetoresistive Sensors on Flexible Polymer Foils. Proceedings 97, 177 (2024); [<https://doi.org/10.3390/proceedings2024097177>] (PDF-Datei beigefügt).

(E) Patentanmeldung

- Am HZDR haben wir die Patentanmeldung für die Realisierung der Auswerteelektronik für gedruckte und mechanisch flexible Magnetfeldsensoren angemeldet (Amtliches Aktenzeichen: 10 2023 105 724.3; Titel der Patentanmeldung: "Verfahren und Sensorsystem"). Diese Patentanmeldung wird derzeit beim Deutschen Patentamt geprüft.

(F) Veranstaltungen für Studierende und Nachwuchswissenschaftler

- PETASPIN 2023 School on "Spintronics" [12.12. – 15.12.2023], Messina, Italien. Vorlesung von Denys Makarov über magnetische Verbundwerkstoffe
- Seminar des Graduiertenkollegs LokoAssist "Seamless integration of assistance systems for natural locomotion of humans" [20.04.2023], TU Darmstadt, Darmstadt: eingeladener Vortrag von Denys Makarov (HZDR) zum Thema "Flexible, printable and self-healable magnetic field sensors for soft robotics and human-machine interfaces"
- Seminar des Graduiertenkollegs 2340 "Interactive fiber rubber composites" [06.12.2022], TU Dresden, Dresden: eingeladener Vortrag von Denys Makarov (HZDR) zum Thema "Flexible, printed and self-healable high-performance magnetoelectronics for human-machine interfaces and soft robotics"

(G) Manuskript in Vorbereitung

- C. Voigt, E.S. Oliveros-Mata, P.T. Das, S. Mosch, Y. Zabala, M. Ott, M. Fritsch, T. Preußner, D. Makarov, M. Vinnichenko, D. Borin, I. Soldatov, R. Schäfer, and A. Michaelis: Scalable printing of anisotropic magnetoresistive sensors on flexible substrates. Adv. Mater. Technol. (in Vorbereitung, Einreichung geplant Januar-Februar 2025)

7. Gemeinsame Zusammenfassung aller Partner des MAG4INK-Projektes

Das Projekt MAG4INK basiert auf den Vorarbeiten der Konsortiumspartner zu großflächiger Deposition, flexiblen magnetoresistiven Sensoren mittels konventioneller PVD- und Lithographieverfahren sowie auf ersten Demonstrationen von leistungsfähigen Sensorstrukturen. Auf der Grundlage dieser Vorarbeit war es möglich, realistische Validierungsziele zu definieren, von denen wir erwarten, dass sie uns helfen könnten, die Technologie vom Niveau TRL3 auf das Niveau TRL6 zu bringen und sie so für weitere Technologietransferaktivitäten attraktiv zu machen.

Das Schlüsselement der Pasten bzw. Funktionstinten – die magnetische Komponente – wird in einem neuartigen Verfahren produziert. Um den Gesamtprozess wirtschaftlich zu gestalten, müssen wir die jährlich herstellbare Menge des pulverförmigen Ausgangsmaterials, die sogenannten anisotropen magnetoresistiven Materialien oder kurz AMR, vom alten Milligramm- in den Kilogramm-Maßstab überführen. Nur so lassen sich die Produktionskosten so weit senken, dass der Prozess für industrielle Anwendungen interessant wird.

Die im Vorhaben MAG4INK zu validierende Prozesskette für die Herstellung von integrierten Sensoren umfasst im Wesentlichen folgende Schritte: (i) Substrat-Belackung, (ii) Magnetron-Sputter-Abscheidung magnetoresistiver Dünnschichten, (iii) Herstellung magnetoresistiver Pulver, (iv) Pasten-/Tintenformulierung, (v) Druck der Sensoren, (vi) Nachbearbeitung der gedruckten Schichten (Laminierung, Laser), (vii) magnetoresistive Charakterisierung gedruckter AMR-Sensoren und (viii) Design und Realisierung von Demonstratoren mit gedruckten AMR-Sensoren.

Das Fraunhofer FEP war im Wesentlichen verantwortlich für die Schichtabscheidung der AMR-Schichtmaterialien auf mit Opferlack beschichteten Substraten. Dazu wurden folgende wesentliche Arbeiten durchgeführt:

- Beschaffung, Installation und Inbetriebnahme von Hardware zur großflächigen Schichtabscheidung von AMR-Schichtmaterialien
- Abscheidung von magnetischen AMR-Schichtmaterial (Ta-Fe-Ta-, NiFe- und CoFe-Schichten) mittels großflächigen Magnetronsputterns für die Verarbeitung zu Pasten für den Sensordruck
- Optimierung der AMR-Schichtmaterialien für ihren Einsatzzweck in Druckprozessen sowie deren Sensorperformance
- Untersuchungen zur Homogenität, Reproduzierbarkeit und Produktivität der Schichtabscheidung
- Begleitende Untersuchungen zur Sensorfertigung und -performance.

Das Fraunhofer IKTS war für die Forschungsarbeiten verantwortlich, welche für die Validierung der Prozessschritte erforderlich sind, die für die Herstellung von druckbaren flexiblen AMR-Sensoren entscheidend sind:

- Untersuchung der Opferschichtpräparation auf produktionsrelevanten Glassubstraten 40 x 40 cm²
- Lift-Off der vom Fraunhofer FEP abgeschiedenen AMR-Schichten und Optimierung des Ultraschallmahls,
- Formulierung der druckbaren Pasten auf Basis des gewonnenen Pulvermaterials,
- Optimierung des Drucks und der Nachbearbeitung der Sensorstrukturen und
- Erprobung von Kontaktierungs- und Verkapselungsansätzen für die Demonstratorpräparation.

Der Partner HZDR war verantwortlich für die magnetoresistive Charakterisierung gedruckter AMR-Sensoren und für das Design und die Realisierung von Demonstratoren mit derartigen Sensoren:

- Charakterisierung der magnetoresistiven Eigenschaften von Fe-, CoFe-, FeNi-basierten Dünnschichten sowie gedruckten AMR-Sensoren.

- Entwicklung der Technologie, um den magnetoresistiven Effekt in einzelnen Mikroflochten zu messen.
- Entwicklung des Konzepts zur Konditionierung von mechanisch flexiblen und gedruckten Magnetfeldsensoren.
- Entwurf und Realisierung von Demonstratoren auf Basis der mit der MAG4INK-Technologie hergestellten Sensoren.

Die Projektaufgaben wurden in enger Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern vom Fraunhofer IKTS und FEP, sowie dem HZDR bearbeitet. Jeder der Konsortiumspartner war in die Aktivitäten anderer Partner eingebunden. Dies half uns einerseits, Risiken bei der Projektumsetzung zu minimieren, beispielsweise durch die gemeinsame Nutzung ergänzender Infrastruktur. Andererseits fördert diese starke Interaktion einen schnellen Projektfortschritt und ermöglichte den beteiligten Nachwuchsforschern hervorragende Lernmöglichkeiten von Experten in ihren jeweiligen Forschungsthemen. Der wesentliche Erfolg der Projektbearbeitung lag in der Bündelung der Kompetenzen sowie im interdisziplinären Austausch der beteiligten Mitarbeiter. Dabei wurden folgende Wesentliche Erkenntnisse erzielt:

- Der Sputterprozess von magnetischen Materialien hat die Herausforderung der Schwächung des Targetmagnetfeldes durch das Targetmaterial selbst. Durch Nutzung spezieller Magnetfelder konnte gezeigt werden, dass Materialdicken von Eisen von bis zu 2,5 mm prozessierbar sind. Jedoch sind dabei spezielle Anforderungen an die Gleichmäßigkeit der Targetfertigung zu stellen. Diese Erkenntnisse zur Prozessführung sind für eine kommerzielle Nutzung unabdingbar.
- Durch geeignete Prozessführung des PVD-Prozesses werden die Anforderungen an Beschichtungsgleichmäßigkeit, Reproduzierbarkeit und Produktivität erreicht. Unter Nutzung von Großflächen-Beschichtungsanlagen ist eine Herstellung von 1000 g Pulver (770.000 Sensoren) innerhalb von 4 bis 6 Wochen realistisch. Selbst unter Laborbedingungen ist die Bereitstellung von nennenswerten Pulvermengen möglich.
- Für die untersuchten Schichtmaterialien wurde der AMR-Effekt an abgeschiedenen Schichten bestimmt. Dabei ergaben sich für Eisen 0,2%, Nickel-Eisen (Permalloy) (2,7%), Cobalt-Eisen (0,5%). Damit ist NiFe das Material mit dem größten gemessenen Effekt und ist für den Einsatz präferiert. Cobalt-Eisen wurde auf Grund seiner Toxizität nicht weiter verfolgt.
- Für die Optimierung der Schichten war der AMR-Effekt sowie der elektrische Widerstand vordergründig. Während der Arbeiten zur Drucktechnologie stellte sich die mechanische Eigenspannung der Schichten als weitere wesentlicher Parameter heraus, der über die Flakewölbung entscheidet. Mittels Optimierung des Sputterdruckes und des Energieeintrages konnten alle 3 Parameter optimiert werden. Im Wesentlichen sind die 3 Parameter mit der Schichtdicke korreliert und somit gemeinsam optimierbar. Für die NiFe-Beschichtung konnten die auftretenden Schichteigenspannungen auf $\frac{1}{4}$ reduziert werden, wobei der elektrische Widerstand um 30% reduziert werden konnte. Der AMR-Effekt wurde zu 2,7% bestimmt.
- Die für die Projektbearbeitung notwendigen Materialmengen konnten bereitgestellt werden.
- Mittels Flash-Lamp-Annelaung konnten die gedruckten Sensoren erfolgreich gesintert werden. Dabei wurde der Widerstand um Faktor 45 reduziert.
- Mittels Clamshell-Biegetest wurden die gedruckten Sensoren mehrfach einer Biegung unterzogen. Dabei stellten sich die Sensoren als äußerst robust dar. Nach der Belastung wurde eine Erhöhung des Widerstands um ca. 4% und eine Verringerung des AMR-Effekts um ca. 10% festgestellt.
- Die Herstellung von PVB-basierten Polymerlösungen wurde für Chargen bis zu 1000 g als Grundlage für die Abscheidung von Opferschichten etabliert und reproduzierbar nachgewiesen. Die 15–25 μm dicken, in Ethanol löslichen Opferschichten wurden durch das Rakelverfahren realisiert. Die auf dieser Schicht abgeschiedenen Permalloy-Dünnschichten (Py, Ni₈₀Fe₂₀) zeigten den gleichen AMR-Effekt wie bei der Abscheidung auf höherpreisigen Fotolacken.

- Es wurde festgestellt, dass die Produktivität der AMR-Schichtabscheidung am Fraunhofer FEP und der Lift-off-Prozesse am Fraunhofer IKTS die Herstellung von ca. 2,7 g AMR-Pulvermaterial pro Tag mit Laboraggregaten ermöglichte, die direkt im Rahmen des MAG4INK-Projekts zur Verfügung standen. Dies zeigt, dass es möglich ist, innerhalb von ca. einem halben Jahr 500 g AMR-Pulver herzustellen, und erfüllt das Projektziel.
- Durch kontrolliertes Mahlen des AMR-Materials konnten Py-flockenartige Partikel mit einem durchschnittlichen Feret-Durchmesser von 8,9 bis 30 μm und einer Dicke von 0,1 μm hergestellt werden. Die Menge der Partikel mit einem Durchmesser im μm - oder Sub- μm -Bereich war vernachlässigbar. Dadurch waren sie für die Formulierung von hochviskosen Pasten geeignet, verhinderte jedoch ihre Verwendung für die Herstellung von niedrigviskosen Tinten.
- Die Herstellung und Skalierbarkeit von sieb- und dispenserdruckbaren hochviskosen Py-Pasten (3–34 Pa s, 100 s⁻¹, Feststoffanteil 17–26 ma.-%) wurde unter Verwendung verschiedener Partikelgrößen und -formen validiert. Die Herstellung der tintenstrahldruckbaren, niedrigviskosen (7–8 mPa s, Feststoffanteil 10 ma.-%) AMR-Tinten auf der Basis von handelsüblichen Nanopartikeln aus Invar (Fe₆₅Ni₃₅) wurde nachgewiesen.
- Es wurden optimale Parameter für den Sieb-, Dispenser- und Inkjetdruck ermittelt. Sie ermöglichten die Realisierung einer breiten Palette von AMR-Sensor-Strukturarten (Rechtecke, Mäander, Brückenstrukturen) mit hoher Qualität auf flexiblen Polymer-substraten.
- Es wurde der optimale Bereich der Nachbearbeitungsparameter für die Diodenlaserarrays ermittelt, der die elektrische Leitfähigkeit und die magnetoelektrische Funktionalität der gedruckten Strukturen auf Polymersubstraten ermöglicht. Bei einer Laserfluenz von 17,4 J/cm² und einer Verarbeitungsgeschwindigkeit von 0,7 m/min (Verweilzeit 8,6 ms) wurde der beste AMR-Effekt der Sieb- und Dispensergedruckten Strukturen erzielt. Bei den mit Inkjetdruck hergestellten Strukturen wurde der beste AMR-Effekt bei einer Laserfluenz von 7 J/cm² und einer Verarbeitungsgeschwindigkeit von 1,75 m/min (3,4 ms Verweilzeit) realisiert. Daher ist der Meilenstein 4 „Nachweis Verringerung des Sensorwiderstandes durch geeignete Nachbereitung der gedruckten Strukturen“ in vollem Umfang erreicht worden.
- Die Mikrostruktur der optimalen Py-basierten AMR-Sensoren, die durch die Kombination von Sieb-/Dispenserdruck und Diodenlaserbearbeitung auf Polymersubstraten hergestellt wurden, zeigte Anzeichen einer Sinterung zwischen den flockenförmigen Partikeln. Der AMR-Effekt dieser Schichten betrug 0,56–0,77 % für den Magnetfeldbereich ± 15 mT.
- Nach der Laserbehandlung wurde das vollständige Sintern von Inkjetgedruckten Invar-Strukturen beobachtet, was zu einem AMR-Effekt von 0,33% für den Magnetfeldbereich ± 20 mT führte.
- Die Kontaktierungs- und Verkapselungsansätze der gedruckten Sensoren wurden validiert. Die gedruckten Referenzmäanderstrukturen zeigten eine gute Stabilität gegenüber Biegezyklen (Widerstandserhöhung um weniger als 4% nach 30.000 Biegewechsels auf einen Radius von 2,5 cm). Die gedruckten Brückenstrukturen zeigten eine stabile Ansprechspannung im Temperaturbereich von -40 bis +60°C und waren für die 180°-Winkelerfassung geeignet.
- Wir haben gezeigt, dass die Leistung von FeNi-basierten Sensoren im Vergleich zu anderen Schichtstapeln überlegen ist. Daher haben wir uns in MAG4INK vor allem auf die Charakterisierung von FeNi-basierten Sensoren konzentriert. Dabei wurden die Schichtstapel durch den Partner FEP auf großflächigen Glassubstraten hergestellt, die Beschichtung mit einer PVB-Opferschicht erfolgte durch den Partner IKTS.
- Auf der Grundlage der Ergebnisse von AP1 wurde ein neues Opferschichtpolymer im Rahmen von AP3 getestet. Die bereitgestellte Opferschicht erwies sich als geeignet, um den Transferdruck von Magnetfeldsensoren auf beliebige Oberflächen wie Holz, Textilien, Keramik, Papier zu realisieren. Dies ist von Vorteil, um das Anwendungspotential von magnetoresistiven Sensoren zu erhöhen.

- Es wurde erfolgreich eine Technologie entwickelt, um den magnetoresistiven Effekt in einzelnen Mikroflocken zu messen.
- Wir haben ein Konzept zur Konditionierung von mechanisch flexiblen und gedruckten Magnetfeldsensoren entwickelt. Dieses Know-how wird auf der Proof-of-Concept-Ebene validiert. Die Patentanmeldung ist eingereicht.
- Wir haben Sensorlayouts entwickelt, die für zwei MAG4INK Demonstratoren verwendet werden. Demonstrator 1: Wir realisierten gedruckte AMR-Sensoren für den Einsatz als berührungslose Schalter: Der Demonstrator wurde der Forschungs- und Industrieteilnehmer auf den Themenmessen wie LOPEC 2023 und LOPEC 2024 in München präsentiert.
- Demonstrator 2: Wir haben gedruckte planare Hall-Effekt-Sensoren (PHE) für den Einsatz in der SkinPut-Technologie realisiert. Da der PHE-Sensor auf flexible Polymerfolie gedruckt wurde, kann er auf die Haut aufgetragen werden. In unserem Demonstrator befindet sich der PHE-Sensor auf einem Zeigefinger und wird als Mensch-Maschine-Schnittstelle für Sicherheitsanwendungen verwendet. Darüber hinaus haben wir erfolgreich den Einsatz gedruckter PHE-Sensoren für Rotationssensorenanwendungen demonstriert, beispielsweise zur Steuerung eines rotierenden ventilähnlichen Mechanismus.

Zum Abschluss des Projektes konnten alle geplanten Meilensteine vollständig erreicht werden. Die dem Projekt zu Grunde liegende Mag4Ink-Technologie wurde erfolgreich validiert. Dabei zeigten sich Ansatzpunkte zur weiteren Optimierung der Sensoren als auch zur Erhöhung der Produktivität mit einhergehender Verringerung der Produktionskosten, so dass eine Kommerzialisierung der Technologie ermöglicht wird. In Anbetracht des Aufwands für die Pulvervorbereitung einschließlich des großflächigen Magnetron-Sputterns der AMR-Schichten und unter Berücksichtigung der im Rahmen des MAG4INK-Projekts verfügbaren Anlagen wurden die Herstellungskosten auf 0,6-0,7 €/Sensor für die Brückensensoren und 1-2 Eurocent für kleine quadratische (2x2 mm²) Sensorstrukturen geschätzt. Der Einsatz größerer Anlagen wird die Herstellungszeit und die Produktionskosten der Sensoren weiter senken. In dieser Hinsicht ist die MAG4INK-Technologie wettbewerbsfähig mit den aktuellen Preisen für kostengünstige kommerzielle Magnetfeldsensoren.

Projektbeschreibung

ZIEL

- bisherige Magnetfeldsensoren sind nicht flexibel, relativ großvolumig und vergleichsweise aufwendig herzustellen
- Forschende des Fraunhofer IKTS, des Fraunhofer FEP und des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf (HZDR) wollen zeigen, dass sich Magnetfeldsensoren in industrierelevanten Größenordnungen kostengünstig drucken lassen
- hierfür werden adaptierte elektronische Funktionstinten oder -pasten auf Basis dünner Schichten hergestellt, um Bauelemente zu erzeugen, die leicht und klein, dünn und flexibel und sogar recycelbar sind

ANWENDUNGSFELDER

- berührungslose Schalter für interaktive gedruckte Elektronik
- intelligente Textilien zur Bewegungsüberwachung, Fitnessmonitore
- tragbare Rehabilitationsüberwachungssysteme
- Mensch-Maschine-Schnittstellen basierend auf der Interaktion mit Magnetfeldern

Kontakt

Fraunhofer-Institut für Organische Elektronik,
Elektronenstrahl- und Plasmatechnik (FEP)

Thomas Preußner

Winterbergstraße 28
01277 Dresden
Telefon: +49 351 2586 126
thomas.preussner@fep.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien
und Systeme (IKTS)

Dr. Mykola Vinnichenko

Winterbergstraße 28
01277 Dresden
Telefon: +49 351 2553 7282
mykola.vinnichenko@ikts.fraunhofer.de

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V. (HZDR)

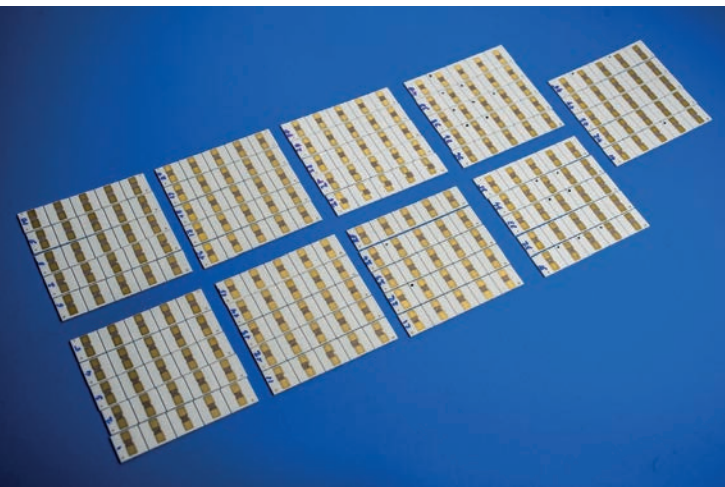
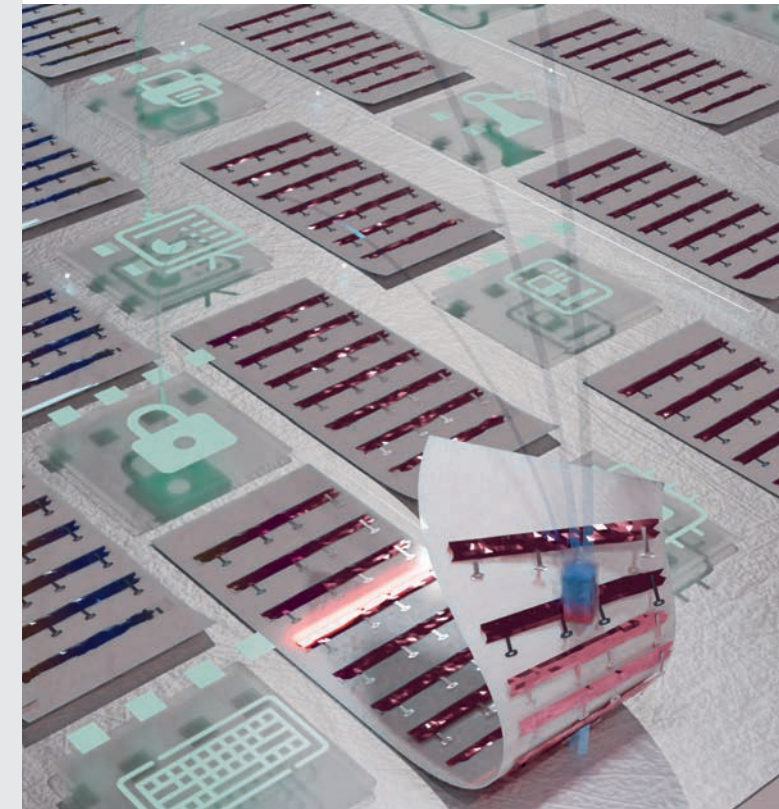
Dr. Denys Makarov (Verbundkoordinator)

Bautzner Landstraße 400
01328 Dresden
Telefon: +49 351 260 3273
d.makarov@hzdr.de

www.mag4ink.com



MAG4INK



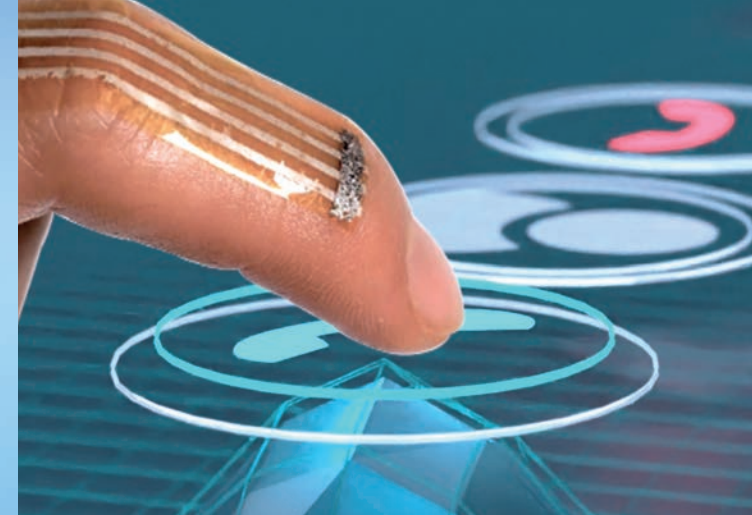
PROJEKT

Auslegung und Herstellung von gedruckten
Magnetfeldsensoren für flexible Elektronik

 **Fraunhofer**
FEP

 **Fraunhofer**
IKTS

HZDR
HELMHOLTZ ZENTRUM
DRESDEN ROSSENDORF



SCHRITT 1 – Herstellung des Pulvers

- Herstellung magnetosensitiver Pulver auf Basis von Magnetronspattern
- reproduzierbare, großvolumige Abscheidung dünner magnetischer Schichten
- Optimierung der Schichteigenschaften hinsichtlich der Sensorfunktion

SCHRITT 2 – Formulierung der Druckpasten und Sensorherstellung

- Entwicklung und Herstellung polymerer Opferschichten sowie deren Abscheidung auf Glassubstrate
- Ablösung der magnetischen Schichten und Mahlung zu Pulver
- Formulierung von Pasten und Tinten basierend auf den magnetischen Pulvern
- Optimierung und Validierung des Drucks und der Nachbearbeitung der AMR-Sensorstrukturen auf flexiblen Substraten

SCHRITT 3 – Charakterisierung der Sensoren

- Nachweis der Sensorfunktion in unterschiedlichen Feldbereichen
- Korrelation von Schichtabscheidung, Pulverparametern, Eigenschaften der Tinten / Pasten sowie den magnetoresistiven Eigenschaften der gedruckten Schichten und Sensoren
- Herstellung der Projektdemonstratoren

Die **Projektförderung** erfolgt im Rahmen des Förderprogramms „Validierung des technologischen und gesellschaftlichen Innovationspotenzials wissenschaftlicher Forschung – VIP +“

Laufzeit: 01.04.2021 – 31.03.2024

Fördersumme: 1,45 Mio. Euro

VDI | VDE | IT



GEFÖRDERT VOM

**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Abstract

Printed Anisotropic Magnetoresistive Sensors on Flexible Polymer Foils [†]

Clemens Voigt ^{1,*} , Sindy Mosch ¹, Eduardo Sergio Oliveros-Mata ² , Denys Makarov ² , Conrad Schubert ², Morris Ott ³, Thomas Preußner ³ and Mykola Vinnichenko ¹ 

¹ Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems IKTS, Winterbergstraße 28, 01277 Dresden, Germany; sindy.mosch@ikts.fraunhofer.de (S.M.); mykola.vinnichenko@ikts.fraunhofer.de (M.V.)

² Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Bautzner Landstraße 400, 01328 Dresden, Germany; e.oliveros-mata@hzdr.de (E.S.O.-M.); d.makarov@hzdr.de (D.M.); c.schubert@hzdr.de (C.S.)

³ Fraunhofer Institute for Organic Electronics, Electron Beam and Plasma Technology, Winterbergstraße 28, 01277 Dresden, Germany; morris.ott@fep.fraunhofer.de (M.O.); thomas.preussner@fep.fraunhofer.de (T.P.)

* Correspondence: clemens.voigt@ikts.fraunhofer.de

[†] Presented at the XXXV EUROSENSORS Conference, Lecce, Italy, 10–13 September 2023.

Abstract: The experimental approach to the fabrication of flexible anisotropic magnetoresistive (AMR) sensors for magnetic field detection in the mT range is validated. It is based upon a combination of screen printing with high-power diode laser array post-processing, both of which are scalable and high-throughput methods. The whole process chain is evaluated, including powder preparation, paste formulation, screen printing, laser sintering, and characterization of microstructure and magnetoresistive response of the resulting sensors. Using high-quality permalloy powder with platelet geometry, the sensors with an AMR effect of 0.5–0.6% at 2–3 mT were realized on polymer substrates. The further optimization of the sensors' preparation steps is in progress.

Keywords: printed electronics; flexible electronics; anisotropic magnetoresistance; printed magnetic field sensors; screen printing; high-power diode laser array processing



Citation: Voigt, C.; Mosch, S.; Oliveros-Mata, E.S.; Makarov, D.; Schubert, C.; Ott, M.; Preußner, T.; Vinnichenko, M. Printed Anisotropic Magnetoresistive Sensors on Flexible Polymer Foils. *Proceedings* **2024**, *97*, 177. <https://doi.org/10.3390/proceedings2024097177>

Academic Editors: Pietro Siciliano and Luca Francioso

Published: 11 April 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Anisotropic magnetoresistive sensors as rigid surface-mounted devices are widely used for the detection of motion (displacement, rotation, vibration) and contactless electric current measurements [1]. The integration of the sensors in flexible substrates using printing technology is expected to enable novel applications like contactless human–machine interfaces [2]. However, this requires resolving a number of experimental challenges, such as the preparation of high-quality powder material, formulation of printable paste, and realization of the functional AMR structures. The present work expands on the experimental approach tested in [2] for Bi-based materials to the AMR sensors.

2. Materials and Methods

The preparation steps of the AMR sensors based on permalloy powder material (Ni80Fe20) are shown in Figure 1. The resistance of printed and post-treated sensors on polyimide foil was measured in a magnetic field applied by 2 coils with a high-precision multimeter (Tensormeter RTM1, HZDR Innovation, Dresden, Germany). The AMR effect was then calculated by Equation (1), where R_H is the resistance in the magnetic field, and R_0 is the resistance without the magnetic field.

$$AMR\ effect[\%] = 100\% \times \frac{R_H - R_0}{R_0} \quad (1)$$

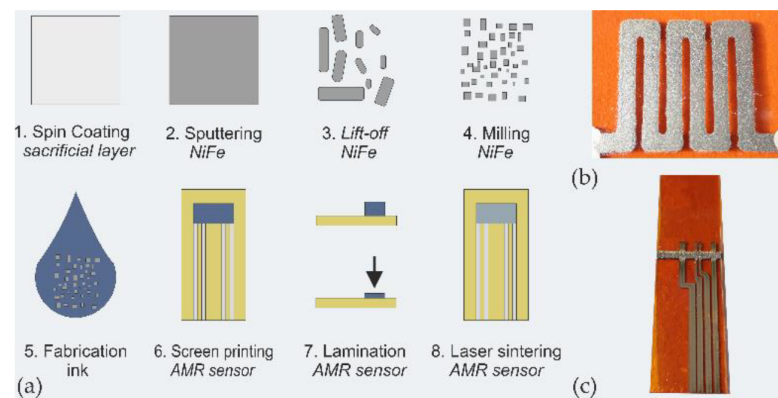


Figure 1. (a) Schematics of process chain. (b) Photo of printed and laminated meander structure on polyimide foil and (c) photo of printed, laminated, and sintered structure on also printed contacts.

3. Discussion

The printed AMR sensors show resistance and AMR effect depending on the applied post-treatment. The as-printed layers are not conductive. After lamination, the resistance of the layers is in the kOhm—range depending on the used screen printing parameters. Laser sintering enables very good resistance in the Ohm—range and a good AMR effect of up to 0.6%, depending on the laser fluence. Maeander structures also show angle dependency of the applied magnetic field. In Figure 2, two magnetoresistive plots are shown, which illustrate the sensing response of the sensor in the parallel and perpendicular directions to the current.

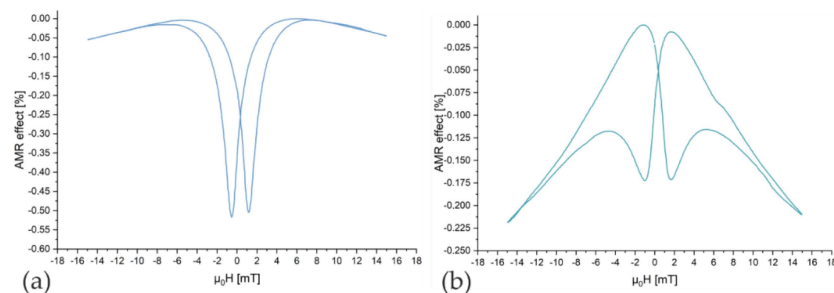


Figure 2. MR plots of meander structure sintered with an optimal fluence of 17.4 J/cm² where the magnetic field is parallel to the long axis (a) and perpendicular (b).

Author Contributions: Conceptualization, C.V. and M.V.; methodology, C.V. and M.V.; validation, M.V., S.M., M.O., T.P., C.S., E.S.O.-M. and D.M.; investigation, M.V., S.M., M.O., T.P., C.S., E.S.O.-M. and D.M.; resources, M.V., S.M., M.O., T.P. and D.M.; data curation, C.V.; writing—original draft preparation, C.V.; writing—review and editing, C.V., M.V., S.M., M.O., T.P. and D.M.; visualization, C.V.; supervision, M.V.; project administration, D.M.; funding acquisition, M.V. and D.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) and VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, grant numbers 03VP09091, 03VP09092, and 03VP09093 as a VIP+ project.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The Data shown in this publication are available upon request from the corresponding author.

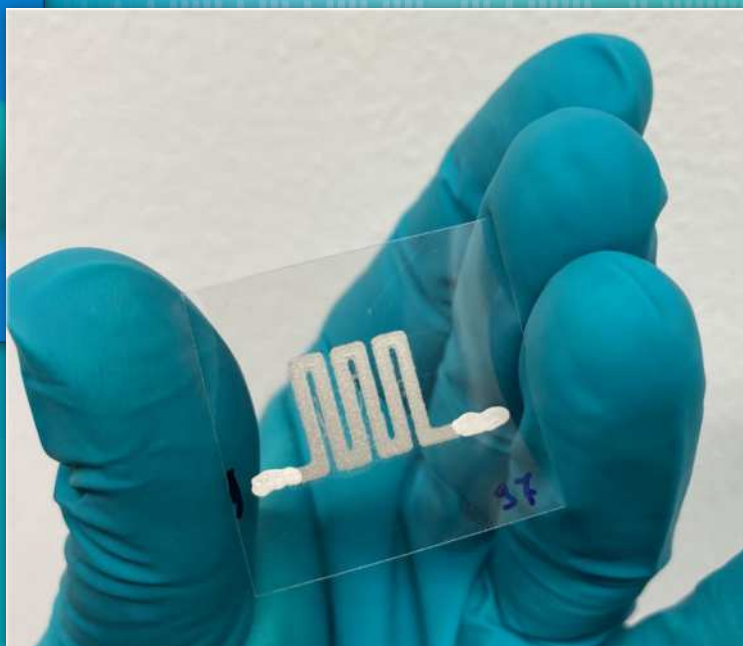
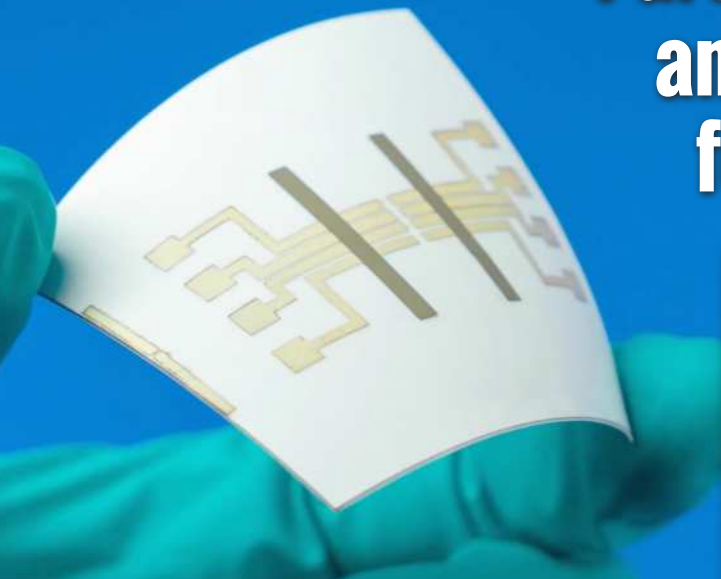
Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Wurz, M.C.; Prediger, M.S. Physical Sensors: Magnetic Sensors. In *Reference Module in Biomedical Sciences*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2021.
2. Oliveros-Mata, E.S.; Voigt, C.; Cañón Bermúdez, G.S.; Zabala, Y.; Valdez-Garduño, N.M.; Fritsch, M.; Mosch, S.; Kusnezoff, M.; Fassbender, J.; Vinnichenko, M.; et al. Dispenser Printed Bismuth-Based Magnetic Field Sensors with Non-Saturating Large Magnetoresistance for Touchless Interactive Surfaces. *Adv. Mater. Technol.* **2022**, *7*, 2200227. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Synthesis of Magnetic Particles for Printable Inks and Pastes by Sputtering for Sensor Applications



**By Morris Ott¹, Thomas Preussner¹, Mykola Vinnichenko², Clemens Voigt², Sindy Mosch²,
Denys Makarov³, Eduardo Sergio Oliveros Mata³, Kerstin Täschner¹, Jörg Neidhardt¹**

¹Fraunhofer Institute for Organic Electronics, Electron Beam and
Plasma Technology FEP, Dresden, Germany

²Fraunhofer Ceramics Technologies and Systems IKTS, Dresden, Germany

³Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Dresden, Germany

Printed magnetoresistive sensors are paving the way for novel applications like contactless flexible electromagnetic switches and touchless human-machine interfaces. The reported sensors, which can be processed with industrial printing methods, are based on non-saturating large magnetoresistance materials like bismuth. However, due to their limited sensitivity in the low field range certain applications like smart textile technologies and safety wearables are still not accessible. To overcome these limitations, a scalable technological approach, called MAG4INK, will be presented for the preparation of printed flexible anisotropic magnetoresistive (AMR) sensors with a sensitivity in the low field range.

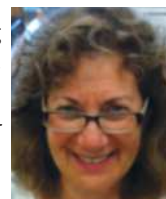
The combination of high quality PVD layers, utilizing the superior process control for the synthesis of ultrapure magneto resistive material with an adjustable morphology and structure, and advanced printing technologies is the core of the MAG4INK technology. Therefore, 100 nm thin magnetic films were coated on a sacrificial layer, released by a lift off process and processed via ultrasound milling to powder. By using this powder to formulate printable inks and pastes for printing in combination with innovative high-power diode laser array post-processing, it is currently possible to realize sensors with a magnetoresistive

effect of about 0.5 % in magnetic fields of ± 6 mT, with the goal of shifting the sensitivity into sub mT range.

The utilization of high rate tubular cathodes and high throughput in-line PVD equipment ensures yields of several grams of powder per day. The approaches for solving the challenges of manufacturing of iron (Fe) and permalloy (NiFe) thin films as well as the source technology for stable magnetic sputtering will be shown. The synthesis-structure-property relations of the resulting films will be presented.

Note from Managing Editor: We are delighted to share with the readers of the Bulletin some of the interesting Powerpoint Presentations from past TechCons. We hope you find them as interesting as we do.

Sue Taube/Managing Editor



© 2023 Society of Vacuum Coaters all rights reserved, ISSN 0737-5921, ISBN 978-1-878068-43-9

Synthesis of Magnetic Particles for Printable Inks and Pastes by Sputtering for Sensor Applications

Morris Ott¹, Thomas Preussner¹, Mykola Vinnichenko², Clemens Voigt², Sindy Mosch², Denys Makarov³, Eduardo Sergio Oliveros Mata³, Kerstin Täschner¹, Jörg Neidhardt¹

¹Fraunhofer Institute for Organic Electronics, Electron Beam and Plasma Technology FEP, Dresden, Germany;

²Fraunhofer Ceramics Technologies and Systems IKTS, Dresden, Germany;

³Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Dresden, Germany

Printed magnetoresistive sensors are paving the way for novel applications like contactless flexible electromagnetic switches and touchless human-machine interfaces. The reported sensors, which can be processed with industrial printing methods, are based on non-saturating large magnetoresistance materials like bismuth. However, due to their limited sensitivity in the low field range certain applications like smart textile technologies and safety wearables are still not accessible. To overcome these limitations, a scalable technological approach, called MAG4INK, will be presented for the preparation of printed flexible anisotropic magnetoresistive (AMR) sensors with a sensitivity in the low field range. The combination of high quality PVD layers, utilizing the superior process control for the synthesis of ultrapure magneto resistive material with an adjustable morphology and structure, and advanced printing technologies is the core of the MAG4INK technology. Therefore, 100 nm thin magnetic films were coated on a sacrificial layer, released by a lift off process and processed via ultrasound milling to powder. By using this powder to formulate printable inks and pastes for printing in combination with innovative high-power diode laser array post-processing, it is currently possible to realize sensors with a magnetoresistive effect of about 0.5 % in magnetic fields of ± 6 mT, with the goal of shifting the sensitivity into sub mT range.

The utilization of high rate tubular cathodes and high throughput in-line PVD equipment ensures yields of several grams of powder per day. The approaches for solving the challenges of manufacturing of iron (Fe) and permalloy (NiFe) thin films as well as the source technology for stable magnetic sputtering will be shown. The synthesis-structure-property relations of the resulting films will be presented.

<https://www.svc.org>

DOI: <https://doi.org/10.14332/svc23.proc.0056>

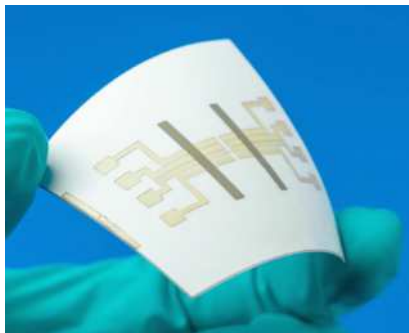


Synthesis of magnetic particles for printable inks and pastes by sputtering for sensor applications

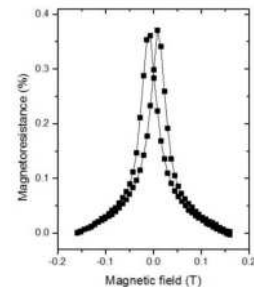
Morris Ott, Thomas Preussner, Mykola Vinnichenko, Clemens Voigt, Sindy Mosch, Denys Makarov, Eduardo Sergio Oliveros Mata, Kerstin Täschner, Jörg Neidhardt

11th May 2023 session thin film sensors SVC

Anisotropic Magnetoresistance as a sensor application



changing the direction of an external magnetic field, applied on an AMR sensor, leads to a change in sensors resistance



page 3



Processing Chain for magnetic particles for an AMR sensor application



substrate preparation



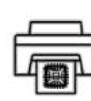
coating



powder production



production of inks & pastes



printing

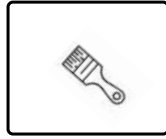


post print treatment

page 4



Processing Chain for magnetic particles for an AMR sensor application



substrate preparation

cleaning of the float glass
1200 x 600 mm²
+
coating with organic sacrificial layer

page 5



Fraunhofer
FEP

Substrate preparation



Ultrasonic wet cleaning
using detergent



max. 600 x 1200 mm²



30 µm ... 6 mm



Water conductivity



page 6



Fraunhofer
FEP

Processing Chain



coating



page 7







Fraunhofer
FEP


Pilot coating equipment at FEP



10 process stations

-  DC and PMS
-  PVD and PECVD
-  Planar and cylindrical

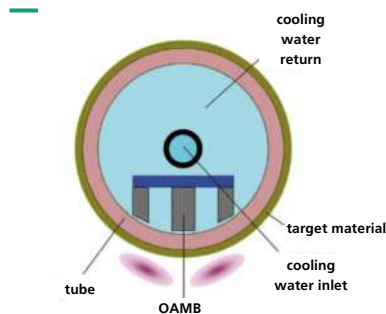
 max. 600 x 1200 mm²

 Room temperature
Pre- and Postannealing
FLA

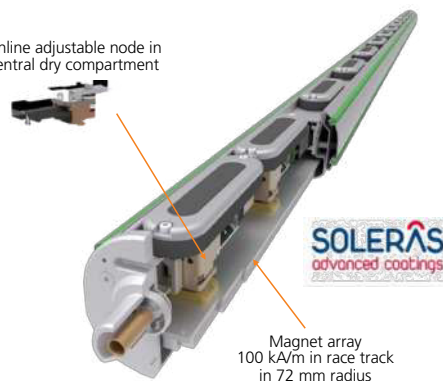
page 8



Iron sputtering with an In-situ adjustable magnetbar



Online adjustable node in central dry compartment



Magnet array
100 kA/m in race track
in 72 mm radius

e-REFLEX In-situ adjustable magnetbar

page 9

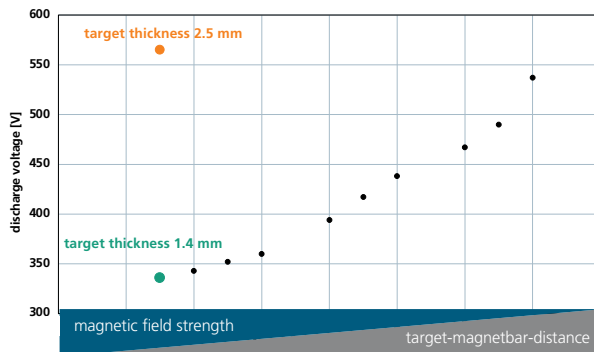


Iron sputtering with an In-situ adjustable magnetbar



$$R_{dyn} = 22 \dots 28 \frac{\text{nm} \cdot \text{m}}{\text{min}} \quad (P = 4 \frac{\text{kW}}{\text{m}})$$

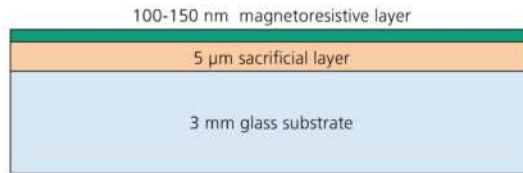
Targeted control of the discharge voltage and particle energy by adjusting the magnetic field



page 10



Deposition of a magnetoresistive layer



AMR material	Ta-Fe-Ta
	$R_{\text{spec.}}$ [$\mu\Omega\text{cm}$]
bulk	10...15
coating	20...24

page 11



Fraunhofer
IPT

ADVERTISEMENT

ANGSTROM SCIENCES

World Leader in Magnetron Sputtering Technology

OUR OPTIMIZED TECHNOLOGY YIELDS
SUPERIOR PERFORMANCE RESULTING IN:

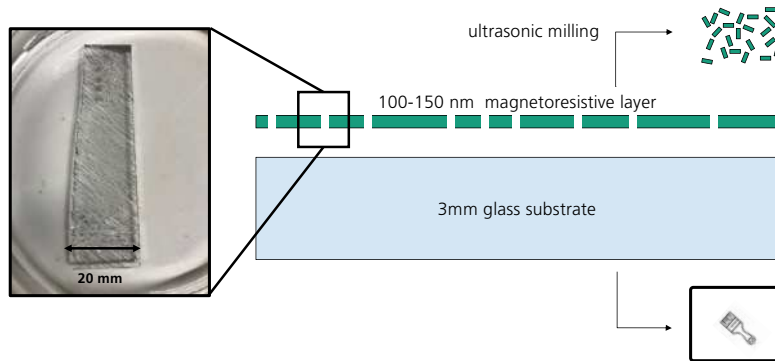
- High Target Utilization
- High Film Uniformity
- High Deposition Rates

www.angstromsciences.com

40 South Linden Street
Duquesne, PA 15110 • USA
Phone: +1.412.469.8466
Fax: +1.412.469.8511



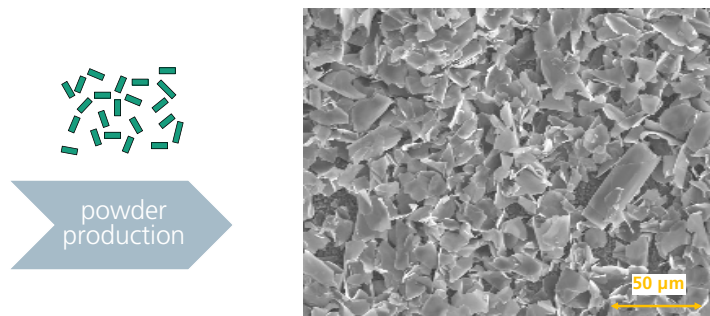
lift off process: removing the sacrificial layer



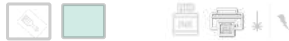
page 12



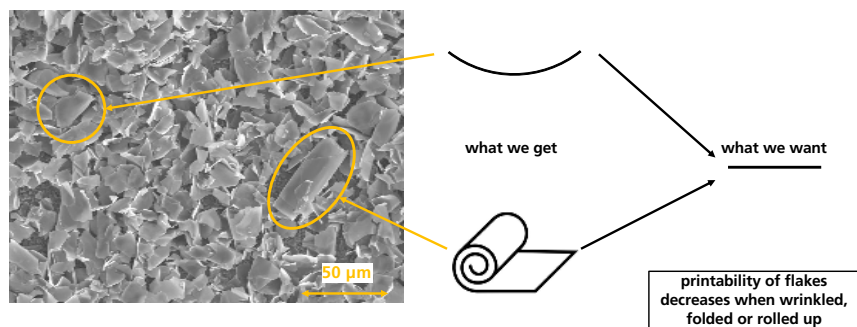
Thin film stress for lifted off particles



page 13



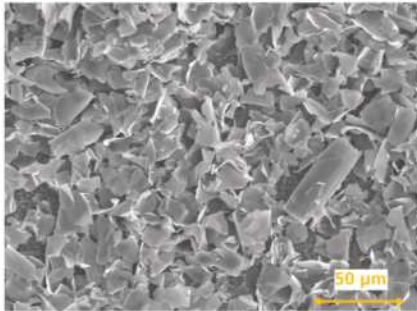
Thin film stress for lifted off flakes



page 14



Tensile film stress for lifted off flakes



No.	Duty cycle [µs]	Pressure [Pa]	Mechanical film stress [MPa]
1	19+3	0.6	+ 965
2	10+10	0.6	+ 949
3	10+10	0.15	+ 597

reducing tensile film stress by lowering depositing pressure

page 15



Innovation and Industry

ER GROUP



100+
Years of global innovation, growth and partnership



ER PRINT

ER FORMING

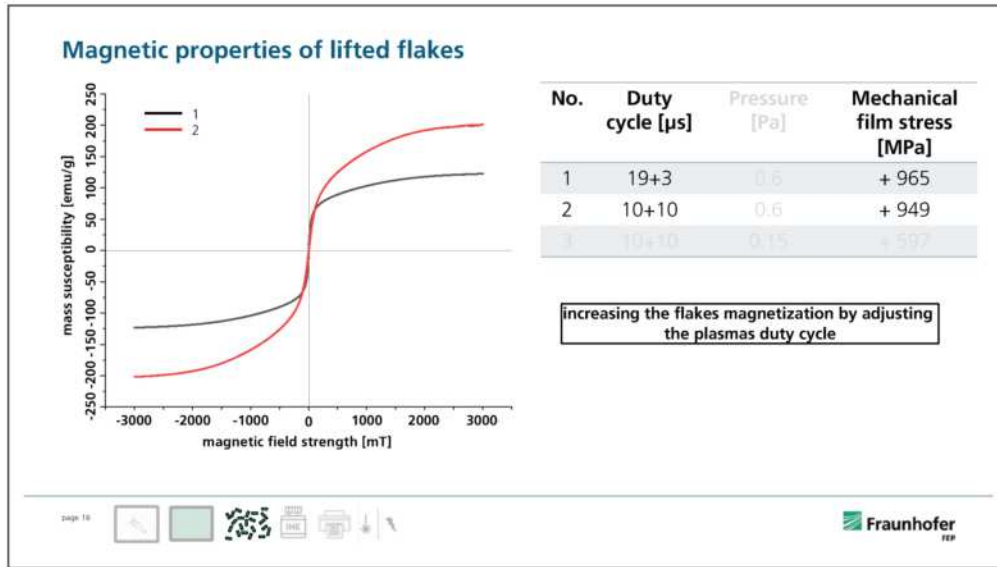
ER COATING

ER VACUUM

Visit our new website: www.eandr.com

Emerson & Renwick Ltd.
Peel Bank Works, Accrington BB5 4EF England
+44 (0)1254 872727 sales@eandr.com

ADVERTISEMENT



Optimize Your Vacuum System

Create a **FREE** web account

With Quality Hardware and Components

Your added value

- Experience the ease of ordering vacuum components
- Download newly designed product spec sheets, drawings and 2D/3D CAD models
- Create a free account to track orders, submit quote requests and manage documents
- Browse our extensive digital catalog of 6000 products and place orders from any device with ease



ADVERTISEMENT

Pfeiffer Vacuum, Inc.
USA
T 800-248-8254

PFEIFFER **VACUUM**
Your Success. Our Passion.

www.pfeiffer-vacuum.com

Powder manufacturing productivity



one Run: 40 minutes with three substrates (400 x 400 mm²)

→ 0.4g AMR material

→ **4.7g per day**

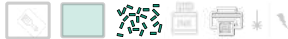


23.4g per week

→ **22 weeks** for **500g** AMR material under laboratory conditions

→ enough material for **80 Mio. sensors**

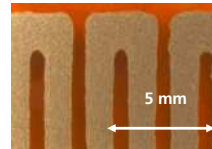
page 17



from powder to sensor



- Choice of binding agent
- Control of ink and paste viscosity
- Particle shape

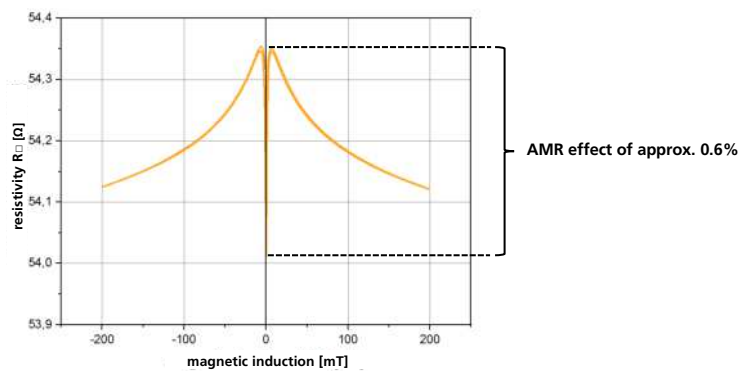


- Choice of printing technology
- Ratio particles/binder after printing
- Thickness and defects of printed structures

page 18



AMR properties for Permalloy (NiFe) as ink material



page 19



Flash Lamp Annealing equipment




arc length: 750 mm

0.9 – 9.5 ms

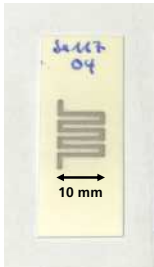
max. 60 J/cm²

page 20



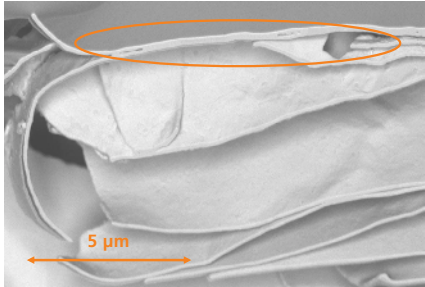

Flash Lamp Annealing of printed AMR sensors

Permalloy based sensor



R _□ [Ω]	
As printed	Post FLA
151	5.7



→ Increased conductivity by factor 30



sintered particles by flash lamp annealing

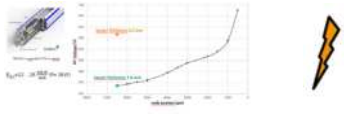
15 J/cm²

page 21

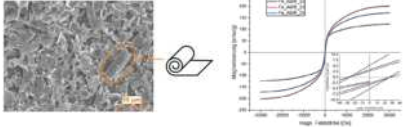



take home notes

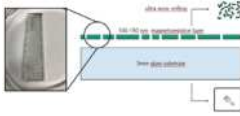
large area inline coating of magnetic materials



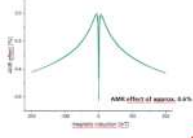
targeted adjustment of layer and particle properties




production of particles of any sputterable material



building an AMR sensor out of sputtered particles



page 22



contact

Morris Ott

Division Plasmatechnology
S2S-Technologies & Precision Coating
Tel. +49 351 2586 -426

morris.ott@fep.fraunhofer.de

Fraunhofer FEP
Winterbergstraße 28
01277 Dresden
Germany
www.fep.fraunhofer.de



Acknowledgement

Essential results were obtained in the public project „MAG4INK“ with support code 03VP09093, funded by BMBF.



About the Author: Morris Ott



Morris Ott studied material science at the Technical University in Ilmenau, Germany with specialization to thin film technologies. In 2019 he graduated in the topic of large area, rf-sputtered ITO. Since then, he works as process engineer and project manager at the Fraunhofer Institute for Organic Electronics, Electron Beam and Plasma Technology FEP in Dresden. His work is devoted to applied research in fields of thin films, physical vapor deposition, plasma and vacuum technology as well as Flash Lamp Annealing.