

Waferintegrierte PowderMEMS®-Mikromagnete: CMOS-kompatible Stützfeldquellen für moderne Sensoranwendungen

Ole Behrmann^{1*}, Thomas Lisec¹, Mani Teja Bodduluri¹, Daniel Cichon², Björn Gojdka¹

¹Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie ISIT, Itzehoe

²Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen IIS, Erlangen

*ole.behrmann@isit.fraunhofer.de

Kurzfassung

Die Miniaturisierung und kosteneffiziente Fertigung magnetischer Sensorsysteme erfordert neue Ansätze zur lokalen Magnetfelderzeugung. Konventionelle, diskret montierte Permanentmagnete sind mit zusätzlichem Aufwand sowie Unsicherheiten in der präzisen Positionierung verbunden. Die Integration von Mikromagneten direkt in das Sensorsubstrat bietet hierfür eine skalierbare und präzisere Lösung. Eine technologische Umsetzung dieser Integration stellt die PowderMEMS®-Technologie dar.

Die PowderMEMS®-Technologie ermöglicht die Wafer-Level-Integration dreidimensionaler NdFeB-Mikromagnetstrukturen in MEMS/CMOS-Prozesse bei Temperaturen unter 150 °C. Die resultierenden Mikromagnete weisen eine Remanenz von über 0,5 T sowie eine hohe thermische Stabilität auf und eignen sich damit als integrierte Stützfeldquellen für Hall-, AMR/GMR/TMR- und NV-Sensoren.

1. Einleitung

Für viele Magnetsensoren – darunter Back-biased-Hall-Sensoren, AMR/GMR/TMR (xMR) Sensoren und NV-Zentren-basierte Quantensensoren – ist ein definiertes magnetisches Bias- oder Stützfeld unerlässlich, um den optimalen Arbeitspunkt zu definieren, die Linearität sicherzustellen und die Robustheit gegenüber äußeren Störfeldern zu gewährleisten [1–3] oder um Vektorfähigkeit zu realisieren. Bisher werden diese Stützfelder überwiegend durch diskret montierte Permanentmagnete erzeugt, die außerhalb oder neben dem eigentlichen Sensorchip platziert werden. Dieses Konzept stößt bei zunehmender Miniaturisierung an grundlegende Grenzen: Die Positioniergenauigkeit bei der Montage liegt typischerweise im Bereich von $\pm 50\ \mu\text{m}$, und jeder Montagesschritt erhöht die Produktionskosten sowie das Risiko von Bauteilausfällen. Darüber hinaus stellen die diskreten Magnete einen relevanten Kostenpunkt dar und beanspruchen wertvollen Bauraum, was insbesondere in kompakten Anwendungen wie z.B. Roboter Gelenken oder Kleinfahrzeugen problematisch ist. Zusätzlich ergeben sich zunehmend Probleme bei der Verfügbarkeit von seltenen Erden durch strategische Exportbeschränkungen der Produktionsländer, wodurch entsprechende Einsparmöglichkeiten schon während der Magnetherstellung an Relevanz gewinnen. Die PowderMEMS®-Technologie bietet eine elegante Lösung für diese Herausforderungen: Sie erlaubt die direkte, waferbasierte Integration von dreidimensionalen NdFeB-Mikromagnetstrukturen in Silizium- oder Glassubstrate bei minimalem Verbrauch von Magnetmaterial und Prozesstemperaturen, die mit dem CMOS-Back-End-of-Line (BEOL) kompatibel sind [4]. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über das Technologieprinzip und stellt drei repräsentative Sensoranwendungen vor, in denen PowderMEMS®-Mikromagnete erfolgreich als Stützfeldquellen demonstriert wurden.

2. Die PowderMEMS®-Technologie

Die PowderMEMS®-Technologie basiert auf drei aufeinanderfolgenden Schritten, die auf 200 mm-Wafern durchgeführt werden [4]:

1. **Strukturierung von Kavitäten:** Mittels Fotolithografie und Deep Reactive Ion Etching (DRIE) werden präzise Hohlräume mit definierten Tiefen von bis zu mehreren 100 μm in das Siliziumsubstrat geätzt. Dieses Verfahren ermöglicht Positioniergenauigkeiten im Bereich weniger Mikrometer.
2. **Trockenes Befüllen:** Trockenes NdFeB-Pulver (z. B. $d_{50} = 25\ \mu\text{m}$) wird durch niederfrequente Vibration und Ultraschall in die Kavitäten eingebracht.
3. **Pulververfestigung:** Die losen Partikel werden durch Atomlagenabscheidung (ALD) von Al_2O_3 (~70 nm, bei 75-150 °C) miteinander zu mechanisch stabilen Mikroformkörpern verbunden.

Nach der Verfestigung kann die Substratoberfläche von überschüssigem Pulver gereinigt werden, sodass die PowderMEMS®-Wafer in Reinraumumgebungen weiterverarbeitet werden können. Die Magnetisierung des gesamten 200 mm-Wafers erfolgt bei Raumtemperatur out-of-plane in einem gepulsten Magnetfeld von 3,5 T, bei einer in-plane Magnetisierung erfolgt diese für individuelle Chips. Das Verfahren ist flexibel einsetzbar: Es kann an nahezu beliebiger Stelle in der MEMS-Fertigung eingebunden werden und ist nicht auf NdFeB beschränkt. Auch die Verwendung von alternativen hart- oder weichmagnetischen Materialien ist möglich [5].

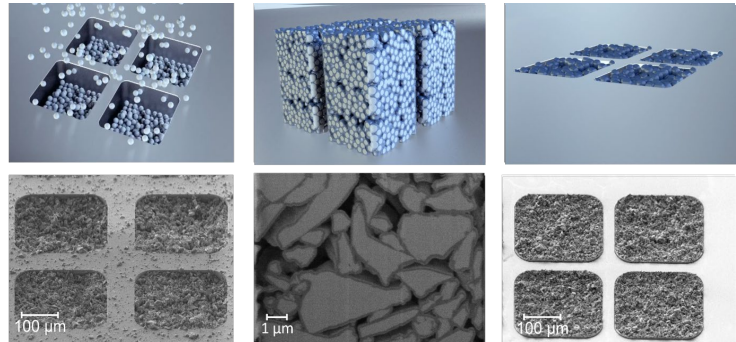


Abbildung 1: Der PowderMEMS® Prozess für die Herstellung von waferintegrierten Mikromagneten [4]. Links: Trockenes Magnetpulver (z. B. NdFeB) wird in Mikrokanalitäten eingebracht. Mitte: Das lose Pulver wird durch ALD von Al_2O_3 zu einem mechanisch stabilen Mikroformkörper verfestigt. Rechts: Bei Bedarf kann die Waferoberfläche gereinigt werden. PowderMEMS® Wafer können hierdurch im MEMS-Reinraum weiterprozessiert werden.

2.1 Magnetische Eigenschaften

Die gefertigten NdFeB-Mikromagnete erreichen eine Remanenz B_r von etwa 0,55 T wobei die intrinsische Koerzitivfeldstärke dem Bulkwert des verwendeten Pulvers entspricht [6]. Die thermische Stabilität wurde für Temperaturen bis 125 °C über mehr als 2000 Stunden nachgewiesen: Nach einem initialen Remanenzverlust von ca. 4,2% in den ersten 500 Stunden, vergleichbar mit gesinterten NdFeB-Magneten, verhalten sich die Mikromagnete langfristig stabil [1, 6].

3. Anwendungen in modernen Sensorarchitekturen

3.1 Back-biased CMOS 3D-Hall-Sensoren

In Kooperation mit dem Fraunhofer IIS wurden die weltweit kleinsten Back-biased CMOS 3D-Hall-Sensoren realisiert. PowderMEMS®-Mikromagnete werden dabei direkt in das Siliziumsubstrat unterhalb der CMOS-prozessierten Hall-Elemente integriert. Die resultierende Gesamtbauhöhe liegt unter 1 mm, was den Einsatz in bauraumkritischen Anwendungen wie Robotergelenken oder kleinen Antriebseinheiten ermöglicht. Die Funktionsfähigkeit wurde anhand der kontaktlosen Drehzahlmessung an einem Zahnrad demonstriert, einer typischen Anwendung in der Industriearbeit und dem Automobilbereich. Im Vergleich zu konventionellen Modulen reduziert der integrierte Ansatz den Bedarf an Seltenen Erden, da wesentlich weniger Magnetmaterial benötigt wird [3].

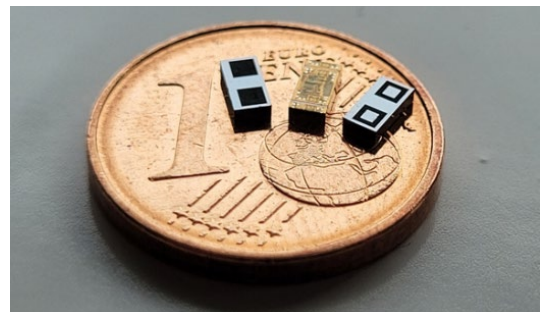


Abbildung 2: Weltweit kleinste Back-biased CMOS Hall-Sensoren mit integrierten PowderMEMS® Mikromagneten [3].

3.2 AMR-Stromsensoren mit substratintegriertem Stützfeld

Anisotrope magnetoresistive (AMR) Sensoren benötigen für ihre Funktion ein definiertes in-plane-Biasfeld, das die magnetoresistiven Schichten in einem definierten Arbeitspunkt hält. In einem kommerziell eingesetzten AMR-Sensorsystem (ADK769, Sensitec GmbH, Wetzlar) werden bislang zwei diskrete Hartferrit-Magnete per Pick-and-Place in das Sensormodul eingebracht (**Abbildung 3**, links).

Im PowderMEMS®-Ansatz werden NdFeB-Mikromagnete direkt in die Rückseite des fertig prozessierten ADK769-Wafers integriert (**Abbildung 3**, rechts). Das damit realisierte In-Plane-Biasfeld beträgt $H_x = 3,109 \pm 68 \text{ kA/m}$ und erfüllt damit die für den zuverlässigen Betrieb des Sensors notwendigen $3 \pm 1 \text{ kA/m}$. Die mit PowderMEMS®-Magneten modifizierten sowie unmodifizierten ADK769 Chips wurden nachfolgend in Stromsensormodule

(CMS2025, Sensitec) eingebaut und verglichen. Beide Chipvarianten zeigen ein nahezu identisches Messverhalten, wodurch die Tauglichkeit des PowderMEMS® Ansatzes demonstriert wird [1].

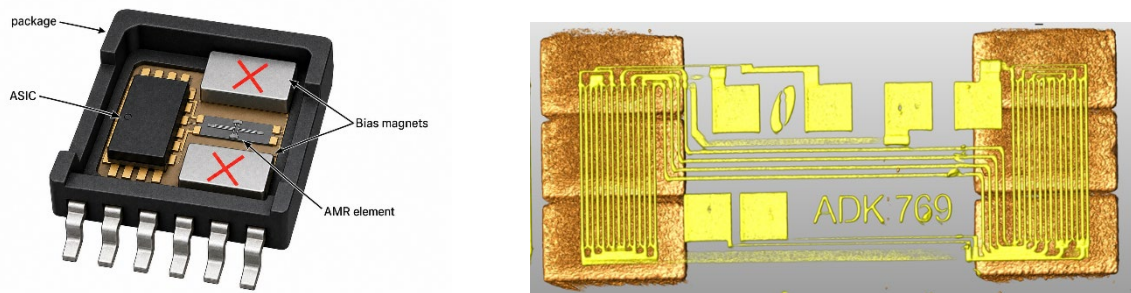


Abbildung 3: Modifikation eines handelsüblichen AMR-Sensors mit PowderMEMS®-Mikromagneten. Links: Bestehender Aufbau mit diskret eingebrachten Stützmagneten (markiert durch rote Kreuze), welche durch PowderMEMS® Mikromagnete ersetzt werden [1]. Rechts: µCT-Aufnahme eines PowderMEMS® modifizierten ADK769 AMR Chips. Die Mikromagnete sind direkt unterhalb der AMR-Elemente angeordnet.

3.3 NV-Zentren-basierte Quantensensoren

Stickstoff-Fehlstellen-Zentren (NV-Zentren) in Diamant gelten als vielversprechende Plattform für hochempfindliche Quantensensoren, da sie bei Raumtemperatur kohärente Spin-Zustände aufweisen. Für die Vektorisierung der Zeeman-Aufspaltung der magnetischen Unterzustände, sowie der Einstellung eines besonders empfindlichen Arbeitspunktes, ist ein definiertes statisches Stützfeld notwendig. Im Rahmen einer Kooperation wurden PowderMEMS®-Mikromagnete unterschiedlicher Geometrien ($700\text{ }\mu\text{m} \times 700\text{ }\mu\text{m}$ und $800\text{ }\mu\text{m} \times 800\text{ }\mu\text{m}$) in Si-Interposer-Chips integriert und als Stützfeldquellen für Diamant-NV-Zentren verwendet. Die Flussdichte der PowderMEMS® Mikromagnete wurde mittels ODMR-Spektroskopie durch Analyse der Zeeman-Aufspaltung vermessen. Es wurde zudem gezeigt, dass die Feldstärke lateral bis zu einem Abstand von 6 mm zum Magnetmittelpunkt homogen ist. Die Integration auf dem Si-Interposer ermöglicht eine drastische Volumenreduktion des bisher makroskopischen Permanentmagneten für NV-Sensoren und ist ein wesentlicher Schritt in Richtung massenfertigungstauglicher Quantensensoren [2].

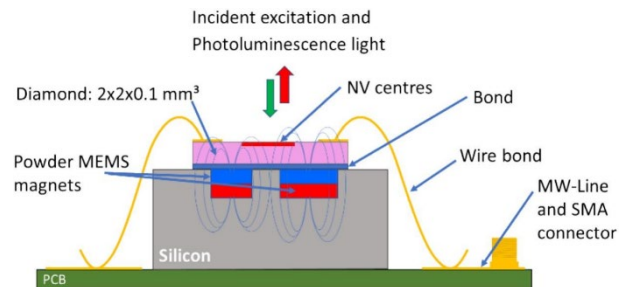


Abbildung 4: Integrationsbeispiel für PowderMEMS Mikromagneten in NV-Sensoren [2].

Quellen

- [1] B. Gojdka et al., "AMR Sensor With Substrate-Integrated PowderMEMS Permanent Magnets for In-Plane Biasing," *IEEE Sensors Journal*, vol. 25, no. 21, pp. 39289–39295, 2025, doi: 10.1109/JSEN.2025.3609635.
- [2] M. Bähr et al., "PowderMEMS® magnets as enabler for miniaturized NV based quantum sensors and quantum processor architectures," *Micro and Nano Engineering*, vol. 28, p. 100316, 2025, doi: 10.1016/j.mne.2025.100316.
- [3] B. Gojdka et al., "Fully Integrated Back-Biased 3d Hall Sensor with Wafer-Level Integrated Permanent Micromagnets," in *Proceedings of the IEEE MEMS*, Munich, Germany, 2023, pp. 1099–1102.
- [4] T. Lisec, O. Behrmann, and B. Gojdka, "PowderMEMS—A Generic Microfabrication Technology for Integrated Three-Dimensional Functional Microstructures," *Micromachines*, vol. 13, no. 3, p. 398, 2022, doi: 10.3390/mi13030398.
- [5] M. Paesler, T. Lisec, and H. Kapels, "High Temperature Magnetic Cores Based on PowderMEMS Technique for Integrated Inductors with Active Cooling," *Micromachines*, vol. 13, no. 3, 2022, doi: 10.3390/mi13030347.
- [6] M. T. Bodduluri, B. Gojdka, N. Wolff, L. Kienle, T. Lisec, and F. Lofink, "Investigation of Wafer-Level Fabricated Permanent Micromagnets for MEMS," *Micromachines*, vol. 13, no. 5, p. 742, 2022, doi: 10.3390/mi13050742.