

Den Charakter eines Magneten sichtbar machen

Kombinierte dreidimensionale magnetische und optische Vermessung

Das Multisensorsystem CharaMag, entwickelt von Experten des Fraunhofer IIS, vereint dreidimensionale magnetische und optische Vermessung zur Charakterisierung von Permanentmagneten und magnetischen Bauteilen.

Philip Beran, Lars Seifert

Während der Massenproduktion von Magneten können Toleranzen und Fehler hinsichtlich Ihrer technischen Spezifikation auftreten. So führen fehlerhafte Magnete beispielsweise bei magnetfeldbasierten Sensoren zu Messfehlern oder reduzierter Leistungsfähigkeit in permanenten elektrischen Antrieben. Im Anwendungsfall hocheffizienter elektrischer Antriebe führen bereits kleine Parameterabweichungen einzelner Magnete zu einem schwankenden Drehmomentverlauf, damit zu unruhigem Laufverhalten, übermäßiger Geräuschentwicklung und schließlich zu reduzierter Lebensdauer. Diese modernen Anwendungsbeispiele zeigen, wie wichtig es ist, die Eigenschaften und damit den „Charakter“ der eingesetzten Magnete zu kennen.

Vermessung des Feldes von Magneten

Bei der Messung von Magnetfeldern unterscheidet man zwei grundsätzliche Varianten: skalar und vektoriell. Während bei einer skalaren Messung nur der richtungsunabhängige Absolutbetrag des Magnetfeldes erfasst wird, kann mit einer vektoriellen Messung die Vektornatur des Magnetfeldes detektiert werden. Vektoriell messende Sensoren wie beispielsweise Hall-Sensoren können als integrierte Sensoren hergestellt werden, so dass diese sehr klein und energieeffizient sind. Durch Kombination von drei vektoriellen Sensoren für jede Raumrichtung in einem gemeinsamen Substrat einer integrierten Schaltung können sie monolithisch gefertigt »»

werden, wodurch sehr kompakte sogenannte 3-D Magnetfeld-Sensoren hergestellt werden können. Solche Sensoren finden vor allem Einsatz in der Positionssensorik (Bild 1) und der Stromsensorik oder auch als Messsonden zur Vermessung und Charakterisierung von Magnetfeldern wie beispielsweise von Permanentmagneten. Fertigungsbedingt unterscheiden sich Geometrie und Materialeigenschaften von Magneten desselben Typs voneinander, weswegen eine Vermessung des Feldes für sensorische Anwendungen oftmals notwendig ist.

Für die Messung, Visualisierung und Charakterisierung von Magnetfeldern gibt es sogenannte Magnetfeldkameras, zu denen auch Systeme der am Fraunhofer IIS entwickelten Technologie HallinSight zählen. Dabei handelt es sich um Arrays aus mehreren 3-D Magnetfeld-Sensoren, welche flächig angeordnet alle drei Vektorcomponenten des Magnetfelds mit einer Auflösung von wenigen Mikrottesla erfassen können (Bild 2). Die gleichzeitige Messung an mehreren Punkten ermöglicht die flächige Erfassung des Magnetfeldes, wodurch das Feld hinsichtlich Form, Ausrichtung und Stärke analysiert werden kann. Durch eine hochgenaue magnetische Kalibrierung der Sensorarrays lassen sich präzise Messgeräte für zahlreiche Anwendungsszenarien herstellen.

Mit HallinSight ist es zudem möglich, mehrere tausend Messungen pro Sekunde durchzuführen (3D-Messung bis zu 1 kHz) und somit auch hochdynamische Prozesse oder magnetische Wechselfelder aufzuzeichnen und zu analysieren. Durch den Aufbau der Magnetfeld-Sensorarrays aus einzelnen 3-D-Sensoren sind flexible Geometrien und die Erschließung minimaler Bauräume möglich (siehe QZ Jahrgang 63 (2018) 09). Da das Silizium der Sensoren direkt auf der Leiterplatte aufgebracht wird, können minimale Messabstände von wenigen hundert Mikrometern realisiert werden. Eine gleichzeitige Bestimmung der Lage des Magnets zum Sensorarray zum Zeitpunkt der Messung kann bislang nur mittels eines mechanischen Anschlags erreicht werden, wobei die tatsächliche Magnetgeometrie und Abweichungen von der Idealform wie Abplatzungen oder Hohlräume jedoch unberücksichtigt bleiben.

Eine Kombination mit einer Technologie zur Messung der Magnetgeometrie bietet daher einen deutlichen Mehrwert bei der Charakterisierung von Permanentmagneten oder magnetischen Bau-

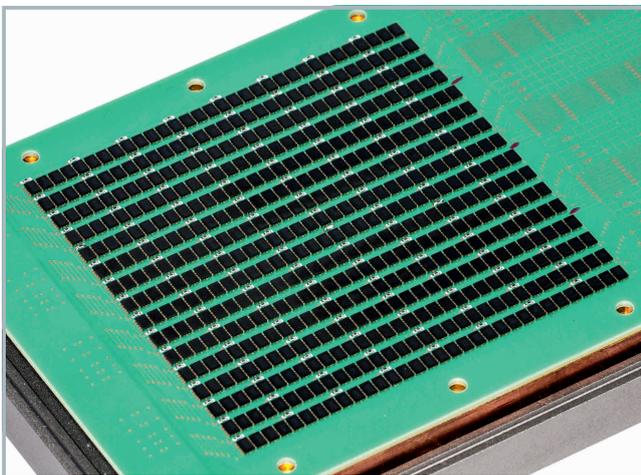


Bild 2. Sensor-Array einer HallinSight Magnetfeldkamera bestehend aus 512 einzelnen 3-D Magnetfeldsensoren. Die flächige Anordnung kann in beliebigen Abmessungen und Formen realisiert werden. © Fraunhofer IIS/Philip Beran

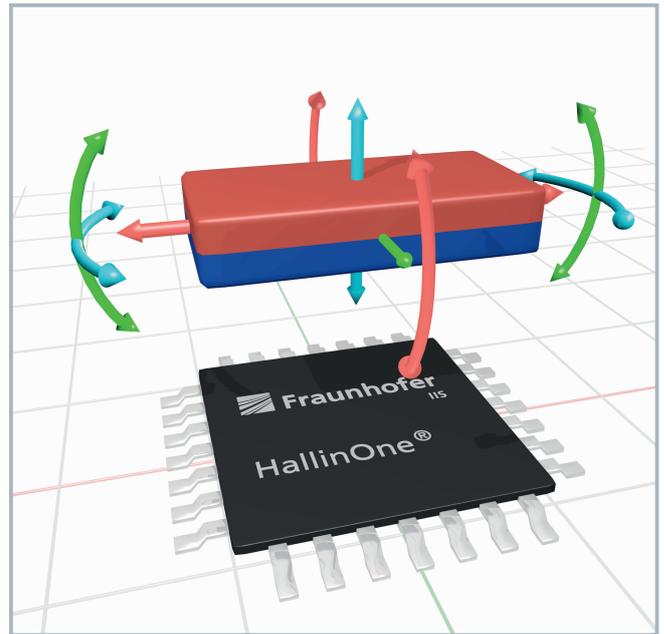


Bild 1. Freiheitsgrade: Der Magnet kann sich frei über einem Magnetfeldsensor bewegen, welcher aus der Magnetfeldänderung die Position des Magneten berechnen kann. © Fraunhofer IIS/Daniel Cichon

teilen. Dazu wurde vom Fraunhofer IIS die Technologie „CharaMag“ entwickelt, welche die Magnetfeldmessung um die optische Erfassung der Geometrie ergänzt.

Erfassung der Geometrie von Magneten

Das in einem CharaMag System verwendete Verfahren zur Erfassung der 3-D-Geometrie eines Magneten basiert auf der Lichtschnitt-Technologie. Die Projektion einer Laserlinie auf den zu vermessenden Magneten wird von einer Spezialkamera erfasst und mit hoher Geschwindigkeit ausgewertet. Aus der Position der Laserlinie im Kamerabild kann auf Basis des Triangulationsprinzips der Höhenverlauf entlang der Laserlinie auf dem Magneten ermittelt werden. Für eine vollständige Aufnahme des Magneten muss entweder der Sensor oder der Magnet in geeigneter Weise bewegt werden. Im CharaMag System wird dazu ein um den Magneten rotie-

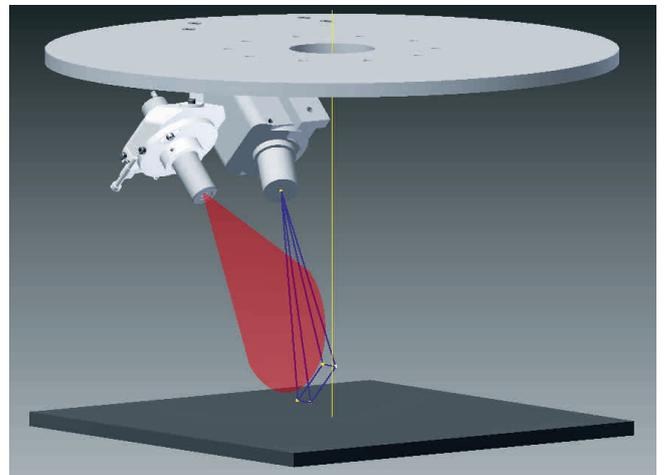


Bild 3. Laser und Kamera sind hängend an einer Trägerplatte befestigt, die um die gelb markierte Achse rotiert. Ein zu charakterisierender Magnet befindet sich etwa im Zentrum der unteren Auflagefläche. © Fraunhofer IIS/Sebastian Schroll

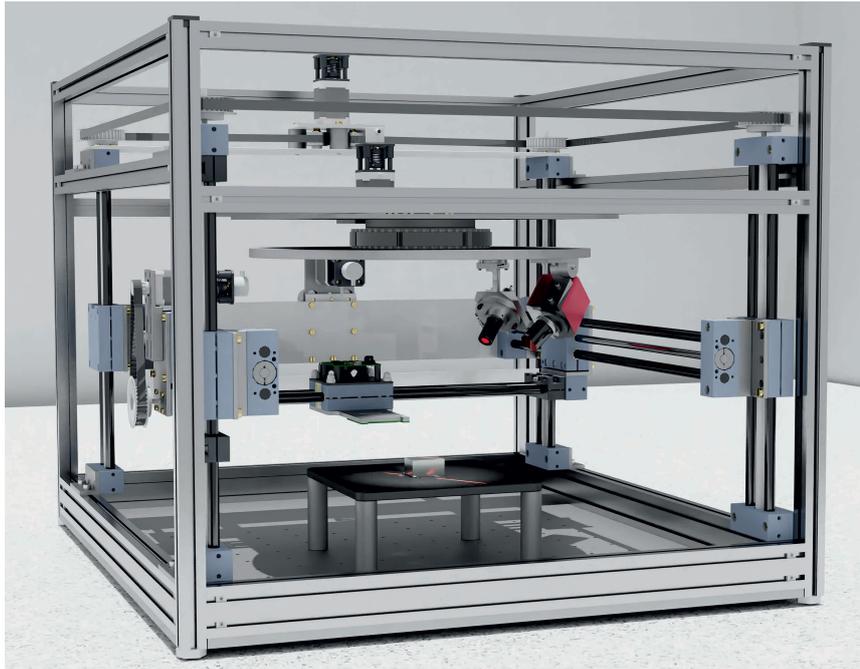


Bild 4. Demonstrator eines CharaMag Systems. Der zu charakterisierende Magnet wird mittig auf einen Messtisch gelegt und vermessen. Auf der runden Scheibe sind Sensor und Laser für das Lichtschnittverfahren montiert – darunter die motorisch bewegbare Magnetfeldkamera. © Fraunhofer IIS/Daniel Cichon

render Lichtschnitt-Sensor verwendet (Bild 3). Dies spart Kosten und verhindert das Risiko, dass sich mehrere Lichtschnitt-Sensoren gegenseitig stören. Auf diese Weise kann beispielsweise die Form eines quader- oder zylinderförmigen Objekts – abgesehen von der Auflagefläche – mit nur einem Sensor in einem Scan komplett erfasst werden. Selbst die Innenfläche von Ringmagneten kann mit dieser Anordnung weitestgehend erfasst werden, sofern das Aspektverhältnis von Höhe zu Innendurchmesser nicht zu groß ist.

Die Verwendung des Lichtschnitt-Verfahrens bietet sich für die Vermessung von Magneten in besonderer Weise an, da die Oberfläche von Magneten in der Regel matt grau bis silbrig glänzend ist. Während sich matte Oberflächen für eine Lichtschnitt-Vermessung ideal eignen, können sehr glänzende Oberflächen bei konkaven Oberflächen zu Messartefakten führen, was jedoch bei Magneten aufgrund ihrer meist konvexen Form (zum Beispiel bei Quader oder Zylinder) nicht auftritt. Ein Vorteil des Lichtschnitt-Verfahrens ist zudem, dass keine Referenzmarken auf dem Magneten nötig sind, sondern dessen Oberfläche direkt dreidimensional erfasst werden kann. Die Rohdaten der Lichtschnittmessung werden über eine einmalig bestimmte Transformation in 3D-Koordinaten umgerechnet, welche in Form einer Punktwolke dargestellt werden können. Der Fit einfacher geometrischer Formen an die 3D-Punktwolke bietet eine simple Möglichkeit Formabweichungen zur Soll-Geometrie festzustellen. Die im CharaMag System genutzte Messanordnung ermöglicht eine geometrische Mess-Auflösung kleiner 60 µm im Messvolumen eines Kegels mit einer maximalen Höhe von 50 mm und einem maximalen Durchmesser von 100 mm. Durch Anpassungen des Systems können auch höhere Messgenauigkeiten oder größere Erfassungsbereiche realisiert werden.

Das CharaMag-System

Die Kombination der beiden Technologien Magnetfeldkamera und Lichtschnitt bietet die innovative Möglichkeit, Magnete umfassend zu charakterisieren. Das Messergebnis ist ein digitaler Zwilling des Magneten, dessen Parameter sowohl die exakte Geometrie (Ab-

messungen, Verformungen und Abweichungen von der Soll-Geometrie), Position und Lage des Magneten, als auch das vektorielle Magnetfeld des Magneten beinhaltet. Damit sich beide Messmodalitäten nicht gegenseitig stören, wurde im CharaMag System die mechanische Hardware der Lichtschnitt-Sensorik mit nicht-magnetisierbaren Materialien realisiert und die Magnetfeldkamera während des Lichtschnitt-Scans zur Seite gefahren.

In Bild 4 ist der gemeinsame Aufgabe beider Technologien in Form eines Demonstrators zu sehen. Durch die Bewegung der Magnetfeldkamera in allen Raumrichtungen können höhere geometrische Auflösungen erreicht werden, wodurch sich auch kleinste Details im Magnetfeld erfassen lassen. Das Messkonzept des CharaMag Systems ist, den Magneten während der kompletten Charakterisierung nicht zu bewegen und hat den Vorteil, dass die Koordinatensysteme beider Messmodalitäten einfach zusammengeführt werden können. Die Referenzierung der beiden Messsysteme aufeinander geschieht über ein patentiertes Verfahren, welches auf der Bestimmung der Position von mindestens drei Bezugspunkten im gemeinsamen Messvolumen basiert. Solange diese drei Punkte nicht auf einer Linie liegen, kann die Transformation (Translation und Rotation) zwischen den Koordinatensystemen der beiden Sensoren bestimmt werden, wodurch sich die Daten in ein gemeinsames System überführen lassen. Als Referenzobjekte werden im CharaMag System magnetisierte Kegelspitzen aus Stahl verwendet, da sich die Positionen dieser Spitzen mit beiden Messverfahren sehr genau bestimmen lassen.

Um nun den „Charakter“ bzw. die Qualität des Magneten zu bewerten, können die fusionierten Daten aus beiden Messmodalitäten nach verschiedenen Kriterien ausgewertet werden. Zum einen können die exakten Abmessungen und mechanische Defekte des Magneten präzise erkannt und beurteilt werden (Bild 5). Zum anderen lassen sich auch Magnetfeldfehler erkennen, welche nicht auf die Geometrie des Magneten zurückgeführt werden können, sondern auf dessen Magnetisierung. So können Magnete nicht nur zu schwach magnetisiert sein, sondern auch einen fehlerhaften »»

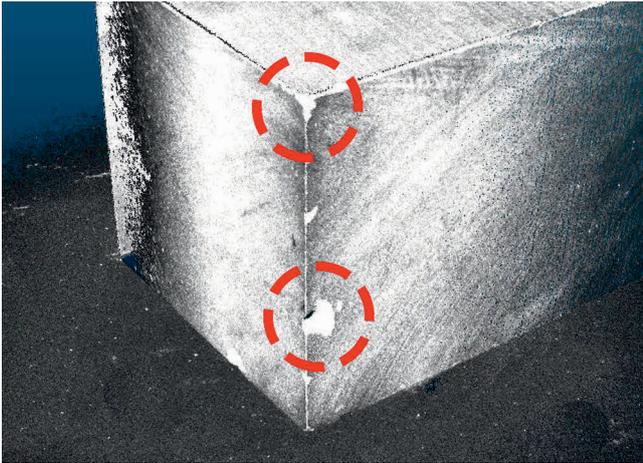


Bild 5. Rekonstruierte 3-D Geometrie eines Quadermagneten mit Abplatzungen. Die Daten liegen in Form einer Punktwolke vor, aus welcher sich Abmessungen und Formabweichungen berechnen lassen. © Fraunhofer IIS/Andreas Jobst

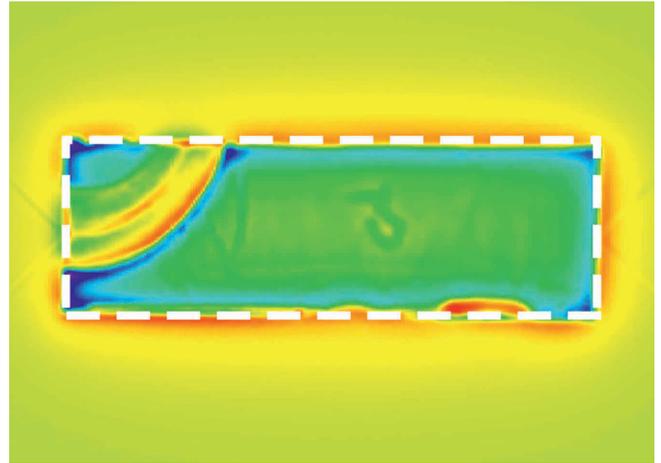


Bild 6. Geometrisch hochaufgelöste Magnetfeldmessung eines Quadermagneten. In der Darstellung sind Inhomogenitäten im Magnetfeld erkennbar, welche durch eine fehlerhafte Magnetisierung verursacht werden. © Fraunhofer IIS/Philip Beran

Magnetisierungsvektor oder entmagnetisierte Bereiche aufweisen (Bild 6). Erkannte Defekte beider Messmethoden können anhand einer fusionierten Darstellung anschaulich und nachvollziehbar sichtbar gemacht werden, wie Bild 7 zeigt.

Dank der anpassungsfähigen Lichtschnitt-Technologie kann ein CharaMag System sehr flexibel an die kundenspezifischen Anforderungen adaptiert werden, wodurch sich vielfältige Anwendungsszenarien realisieren lassen. Beispielsweise ist die Erfassung von komplexen Magnet-Geometrien oder auch eine hohe Messgeschwindigkeit mit hohem Durchsatz möglich. Ebenso wie die Lichtschnitt-Technologie lässt sich auch die HallinSight Technologie zur Magnetfeldmes-

sung nahezu beliebig hinsichtlich Magnet-Geometrie oder Messdynamik auslegen, um nahezu jegliche Anforderungen zu erfüllen. So lässt sich ein CharaMag System beispielsweise in der Fertigung oder für die Eingangskontrolle einsetzen, wo sowohl eine hohe Messgenauigkeit als auch ein hoher Durchsatz gewünscht sind.

Anwendungsszenarien

Bereits erfolgreich im Einsatz sind CharaMag Systeme bei der Vermessung von Magnetfeldern, bei denen das magnetische Feld auf die Geometrie des magnetischen Bauteiles referenziert wird, wodurch sie als sogenannte „Golden Samples“ für die Einrichtung und Kalibrierung von Fertigungslinien eingesetzt werden können. Da der Kunde selbst Golden Samples generieren und kalibrieren kann, bildet das CharaMag System ein wichtiges Bindeglied im Qualitätsmanagement. Ein weiterer Vorteil des CharaMag Systems ist die motorisierte Positionierung der Magnetfeldkamera, wodurch eine geometrische Erfassung des Magnetfeldes mit bis zu 10 µm räumlicher Auflösung möglich ist. Durch die hohe räumliche Auflösung und die Vermessung des Feldes in allen drei Raumachsen werden feinste Details eines Magnetfeldes sichtbar, wie in Bild 8 gezeigt.

Ein weiteres Anwendungsszenario für CharaMag Systeme ist der Einsatz in der Produktentwicklung: Wenn es beispielsweise um die Untersuchung der Machbarkeit von magnetischer Positionssensorik geht, wird häufig die erforderliche Qualität der zum Einsatz kommenden Magnete vernachlässigt. Da für erste Versuche oftmals ein günstiger Standardmagnet aus Massenproduktion zum Einsatz kommt, ist es wichtig zu überprüfen, ob dieser Magnet die für die Anwendung benötigten Eigenschaften bezüglich Form und Magnetisierung hat. Günstige Magnete sind in der Regel nicht für Sensorik-Aufgaben ausgelegt, weswegen es nahezu unerlässlich ist, diese Magnete vor dem Einsatz in Laboraufbauten genau zu charakterisieren. Durch die vollständige Vermessung der Magnete ist es zusätzlich möglich, mit dem digitalen Zwilling des Magneten belastbare und wirklichkeitsnahe Simulationen durchzuführen.

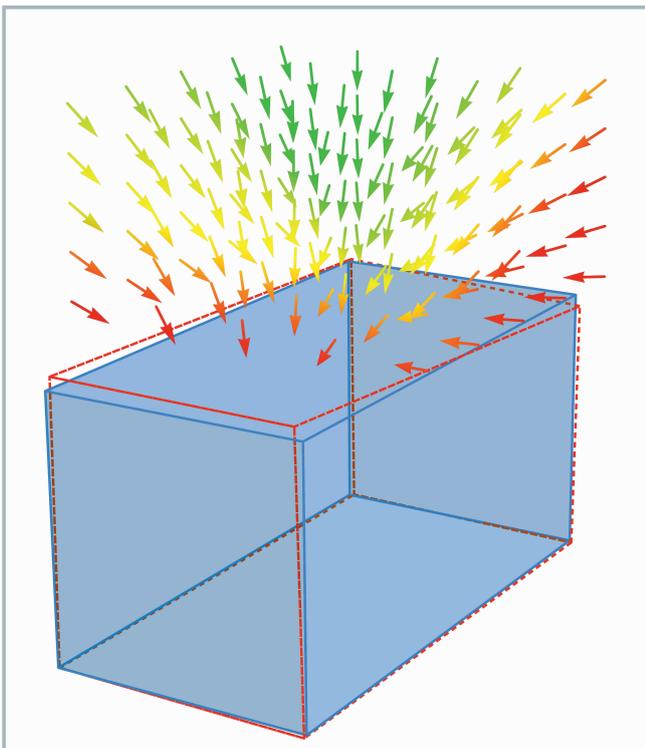


Bild 7. Fusionierte Daten des CharaMag Systems. In der Darstellung sind Abweichungen der Soll-Geometrie eines Quadermagneten rot dargestellt und Abweichungen vom idealen Magnetfeld als rote Pfeile. © Fraunhofer IIS/Philip Beran

Optimierung von Prozessen

In Anwendungen von magnetischer Positionssensorik führen Va-

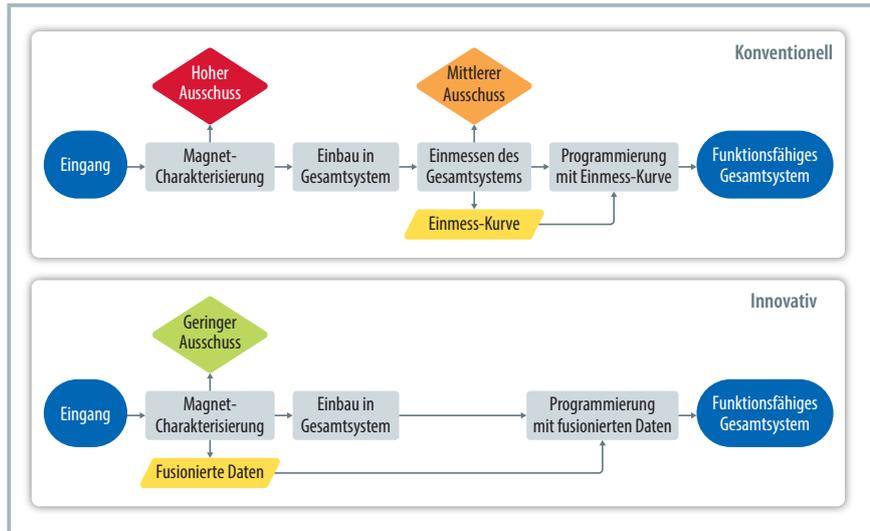


Bild 9. Flussdiagramme zum Vergleich einer konventionellen mit einer innovativen Fertigungskette für die Herstellung von magnetischen Sensorsystemen. © Fraunhofer IIS/ Philip Beran

riationen der Eigenschaften von Magneten dazu, dass nach dessen Einbau in die komplette Baugruppe jedes System aufwändig eingemessen werden muss. Diese kostspielige Einmessung macht viele preissensible Anwendungen für magnetische Sensorik noch nicht erschließbar. Diese Applikationen werden zugänglich, wenn ein Verfahren zur Charakterisierung von Magneten eingesetzt wird, dank welchem die Einmessung jedes Systems entfallen kann. Zusätzlich können durch die damit verbundene Verbesserung der Positionsgenauigkeit neue Anwendungen erschlossen werden, in denen eine präzise mehrachsige magnetische Positionssensorik, wie beispielsweise die am Fraunhofer IIS entwickelte 6-D Technologie HallinMotion, notwendig ist.

Der heutige Stand für typische Fertigungsketten von Magnet-Systemen und die damit verbundene Verarbeitung von Magneten ist im oberen konventionellen Zweig von Abb. 9 skizziert. Sowohl die Qualitätskontrolle als auch das Einmessen sind zusätzliche Produktionsschritte, bei denen stets Ausschuss aufgrund fehlerhafter Magnete entsteht. Eine innovative Fertigungskette, an dessen Beginn eine Magnet-Charakterisierung mit einem CharaMag System steht, ist im unteren Zweig dargestellt. Da die Magnete vollständig

vermessen werden, müssen sie nur noch dann ausgesondert werden, wenn sie aufgrund eines zu schwachen Feldes oder mechanischer Beschädigungen komplett ungeeignet für den Einbau in der jeweiligen Applikation sind. Damit können die Magnete sehr selektiv und kostensparend schon vor der Kombination mit dem Gesamtsystem aus der Fertigungslinie genommen werden.

Ausblick

Mit den Möglichkeiten des Multisensorsystems CharaMag stehen dem Anwender zahlreiche Möglichkeiten zur Entwicklung neuer Sensorsysteme, zum Qualitätsmanagement in der Herstellung sowie zur Optimierung von Fertigungsprozessen zur Verfügung. Das Fraunhofer IIS steht als Teil der größten europäischen Organisation für anwendungsorientierte Forschung für innovative Projektanfragen zur Verfügung. ■

INFORMATION & SERVICE

AUTOREN

Dr. Philip Beran ist Senior Scientist, und Dr. Lars Seifert ist Gruppenleiter am Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen, Erlangen.

WEITERFÜHRENDE LINKS

- CharaMag <https://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/zfp/produkte/CharaMag.html>
- HallinSight <https://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/sse/sensor-solutions/hallinsight.html>
- HallinMotion <https://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/sse/sensor-solutions/hallinmotion.html>

KONTAKT

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen
 philip.beran@iis.fraunhofer.de
 lars.seifert@iis.fraunhofer.de

Bild 8. Geometrisch hochaufgelöste Magnetfeldmessung eines codierten Magnet-rings mit Polabstand kleiner einem Millimeter. Durch weitere Analyse der Daten können Fehler der Magnetisierung erkannt werden. © Fraunhofer IIS/Philip Beran

