



# Wertvolle Informationen in Magnetfeldern

## 3D-Magnetfeldkamera macht Feldverläufe dreidimensional sichtbar

Mit einer 3D-Magnetfeldkamera lassen sich die Eigenschaften von Magneten und magnetisierbaren Bauteile vermessen. So können die Magnete schon vor dem Einbau auf ihre Eignung geprüft und die erreichbare Leistung des Gesamtsystems beurteilt werden. Eine hohe Messgeschwindigkeit macht eine solche Überwachung während des laufenden Fertigungsprozesses möglich.

Philip Beran

**M**agnetismus ist seit der Antike bekannt und die magnetische Anziehung für jeden ein Begriff. Dennoch geht das allgemeine Verständnis über Magnetfelder kaum darüber hinaus, dass es einen Nord- und Südpol gibt. Die meisten Magnete verbringen ihr Dasein als Haftmagnete an Kühlschränken, wo ihr Potenzial ungenutzt bleibt. Doch in Magnetfeldern stecken deutlich wertvollere Infor-

mationen, als auf den ersten Blick ersichtlich.

Diese werden durch die Sensor-Technologie HallinOne zur dreidimensionalen Messung von Magnetfeldern erschlossen, die am Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, Erlangen, entwickelt wurde. Während konventionelle Hallsensoren ausschließlich für senkrecht zur Chipoberfläche gelegene Magnetfelder empfindlich

sind, lassen sich mit dieser Technologie auch parallel zur Chipoberfläche ausgerichtete Felder messen. Die dreidimensionale punktförmige Messung ermöglicht es, den Fluss eines Magnetfelds in allen drei Raumachsen zu messen und daraus den Vektor des Felds zu ermitteln.

Im Gegensatz zur herkömmlichen eindimensionalen Messung von Magnetfeldern kann somit nicht nur die Stärke des

Felds in einer Richtung, sondern auch der Betrag sowie die Richtung des gesamten magnetischen Flusses erfasst werden. Mit dieser Technologie ist es möglich, verschiedene robuste Anwendungen der berührungslosen Positions- und Winkelsensoren umzusetzen, wie beispielsweise in einem Joystick zur Steuerung von Bau- und Landmaschinen.

Basierend auf integrierten Sensoren der HallinOne-Technologie, hat das Fraunhofer IIS nach eigenen Angaben die weltweit erste in einem Punkt dreidimensional messende Magnetfeldkamera HallinSight entwickelt und zur Serienreife gebracht. Anders als vergleichbare Systeme zur Messung und Darstellung von Magnetfeldern kann nach Angaben der Entwickler damit der gesamte Magnetfeldvektor gleichzeitig an vielen Punkten innerhalb einer Fläche gemessen werden. In einem gleichmäßigen Raster von 2,5 mm lassen sich 256 Magnetfeldsensoren auf einer Fläche von 4 cm × 4 cm anordnen (Bild 1).

Diese flächendeckende Messung des Vektors erlaubt vielfältige Methoden zur Prozessierung der Messwerte, wie Algorithmen zur Interpolation, Winkelberechnung und Ableitung des Magnetfelds. Durch die hohe Messgeschwindigkeit von 200 Bildern pro Sekunde (für spezielle Systeme auch mehr als 1000 Bilder pro Sekunde) können die Ergebnisse dieser Analysemethoden flüssig und quasi in Echtzeit dargestellt werden.

### 3D-Magnetfeldkamera im industriellen Einsatz

Magnetische Sensorsysteme sind seit Langem ein fester Bestandteil in industriellen Anlagen, in Automobilen sowie in der Un-

terhaltungselektronik. Da ein Magnetfeld ohne Leistungsverlust über einen Permanentmagneten erzeugbar ist und eine berührungslose Messung ermöglicht, werden diese Eigenschaften gerne zur Messung von Zuständen und Positionen genutzt. Die kostengünstige Fertigung von Magneten in hohen Stückzahlen macht solche Messsysteme bei gleichzeitiger Langlebigkeit wirtschaftlich.

Doch die ständig wachsenden Anforderungen an diese Systeme stellen auch für Magnete und Sensoren neue Herausforderungen dar. Um den Anforderungen in hochauflösenden Messsystemen im Mikrometer- bzw. Mikrogradbereich gerecht zu werden, müssen qualitativ hochwertige Magnete verwendet werden. Einige Magnethersteller setzen deshalb auf hochgenaue Herstellungsmethoden, was die Magnete in ihrem Preis jedoch deutlich unattraktiver macht. Der konventionelle Weg ist eine zeitlich aufwendige Prüfung des kompletten magnetischen Systems, um entsprechende Ungenauigkeiten zu kalibrieren.

Durch die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Elektromobilität sind auch die magnetischen Stator- bzw. Rotoren von Elektromotoren in den Fokus der magnetischen Prüfung gerückt. Diese Bauteile bestehen aus mehreren zusammengesetzten Magnetelementen, bei deren Zusammenbau ungewünschte Unregelmäßigkeiten im Magnetfeld entstehen können. Dies führt zwangsläufig zu einem fehlerhaften Verhalten im Betrieb, was sich negativ auf die Effizienz und Leistung des Motors auswirkt. Darüber hinaus werden auch die Laufruhe und die damit verbundene Geräuschentwicklung eines Elektromotors

beeinträchtigt. Um noch hochwertigere und effizientere Antriebe zu entwickeln, ist eine Kontrolle des Magnetfelds von Elektromotoren bereits bei der Entwicklung und auch bei der späteren Fertigung unbedingt notwendig.

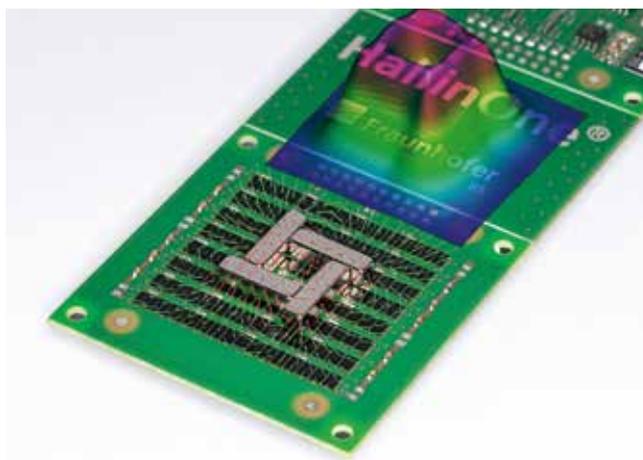
### Schnelle Charakterisierung von Magneten während der Fertigung

Mit der 3D-Magnetfeldkamera lassen sich Magnete und magnetisierbare Bauteile hinsichtlich ihrer magnetischen Eigenschaften untersuchen und charakterisieren. Anhand der Messung des Magnetfelds innerhalb einer Fläche kann nicht nur eine Aussage über die korrekte Form und Stärke des Felds getroffen werden; mittels geeigneter Algorithmen lassen sich auch weitere Kenngrößen des Magneten bestimmen, wie beispielsweise die Remanenz oder der Magnetisierungsvektor.

Durch eine Messung dieser Größen können Magnete schon vor dem Einbau im System auf ihre Eignung geprüft und die erreichbare Leistung des Gesamtsystems beurteilt werden. Eine solche Überwachung ist aufgrund der hohen Messgeschwindigkeit sogar während des laufenden Fertigungsprozesses möglich. Auch harte Defekte des Magneten, wie Risse oder Materialabbrüche, lassen sich auf diese Weise frühzeitig erkennen, was eine wirtschaftliche Aussortierung vor dem Einbau erlaubt.

Für dieses Anwendungsszenario der Magnetprüfung stellt die dreidimensionale Messung des Magnetfelds einen erheblichen Vorteil für die weitere Verarbeitung der Messwerte dar. Durch die gleichzeitige Messung an mehreren Punkten lässt sich die Ableitung des Magnetfelds in allen drei Raumachsen bestimmen, was eine Darstellung des Gradienten-Felds in Echtzeit möglich macht.

Die Messung dieser Ableitungen erlaubt auch den Einsatz in sicherheitskritischen Anwendungen, die robust und störresistenter gegenüber Einflüssen wie Temperatur und Erdmagnetfeld sein müssen. Ein weiterer Vorteil der vektorialen Messung besteht darin, dass sich durch die vollständige Erfassung des Magnetfelds Inter- und Extrapolationsalgorithmen anwenden lassen, um das Magnetfeld physikalisch korrekt zwischen den Messpunkten und sogar außerhalb der Messfläche anzugeben. >>>



**Bild 1.** Die Magnetfeldkamera misst den dreidimensionalen Magnetfeldvektor hochauflösend und in kürzester Zeit innerhalb einer Fläche. Dargestellt sind das Vektorfeld und der Betrag des gemessenen Felds. (© Fraunhofer IIS/ Philip Beran)

### Flexible Konfiguration und hohe Messgenauigkeit

Anders als vergleichbare Systeme kann die 3D-Magnetfeldkamera nach Entwicklerangaben flexibel an verschiedene Messszenarien angepasst werden. Je nach Anforderung kann nicht nur die zu messende Fläche beliebig skaliert werden, sondern es lassen sich auch Spezial-Geometrien wie Ringanordnungen oder Anordnungen im Volumen realisieren.

Möglich wird dies durch den Aufbau des Messsystems aus vielen HallinOne-Einzelsensoren, die entweder in einem regelmäßigen Raster von 2,5 mm oder in beliebigen anderen Abständen und Konfigurationen angeordnet werden. Somit können je nach Anforderung maßgeschneiderte Messsysteme für verschiedene Anwendungen realisiert werden (Bild 2).

Die Verwendung von Einzelsensoren bietet wesentliche Vorteile: Zum einen übernimmt jeder Sensor-IC selbst die Steuerung der nach dem physikalischen Prinzip des Hall-Effekts messenden Sensorelemente. Zum anderen findet die komplette elektronische Signalauswertung direkt auf dem Sensor-IC statt.

Durch die vollständige Mikrointegration der Auswerteelektronik lässt sich nicht nur eine sehr hohe Auflösung des Magnetfelds im Mikrotelbereich, sondern auch ein qualitativ hochwertiges und stabiles Messsignal erreichen. Letztlich liefert jeder Sensor ein fertig prozessiertes digitales Messergebnis, das sich über eine zentrale Auswertelogik sammeln und weiterverarbeiten lässt.

Da jeder Sensor-IC selbstständig Messungen ausführt, können sehr hohe Mess-

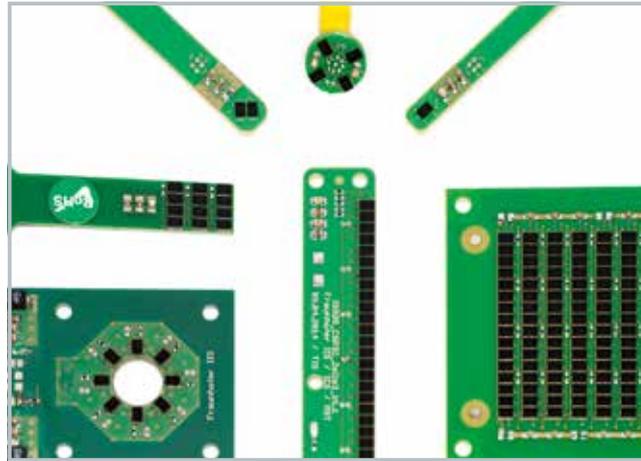


Bild 2. Durch maximale Flexibilität der HallinSight-Technologie lassen sich unterschiedliche Sensoranordnungen und Messkonfigurationen realisieren.

(© Fraunhofer IIS/ Philip Beran)

frequenzen erreicht werden. Der komplette Magnetfeldvektor lässt sich auf diese Weise mit bis zu 4 kHz messen, wobei die Messung von einzelnen Feldkomponenten sogar mit bis zu 10 kHz durchgeführt werden kann.

In Kooperation mit Würth Elektronik eiSos arbeitet das Fraunhofer IIS derzeit auch daran, die Messfrequenz der HallinSight-Technologie in eine Größenordnung zu bringen, mit der hochfrequente Magnetfelder direkt gemessen werden können. Dadurch soll es möglich werden, geometrisch hochauflösende Prüfsysteme ohne konventionelle Messspulen zu bauen, die ein gleichzeitiges vektorielles Erfassen des Magnetfelds erlauben. Auf diese Weise lassen sich zum Beispiel bestehende Technologien zur Wirbelstromprüftechnik um die Messung von bislang unbekanntem Feldanteilen erweitern und für die weitere Auswertung berücksichtigen.

Darüber hinaus können die Sensoren für Messbereiche von wenigen Millitesla bis zu mehreren Tesla konfiguriert werden, wodurch ein sehr großer Dynamikbereich bei der Messung erreicht wird. Zu verdanken ist dies dem physikalischen Prinzip des Hall-Effekts, welcher bis hin zu hohen Feldstärken ein lineares Messsignal liefert und keine irreversiblen Schäden durch Übersteuerung erfährt. Der optimale Messbereich lässt sich für jeden Sensor individuell einstellen, wodurch die Magnetfeldmessung dynamisch an die bestehende Feldstärke angepasst werden kann.

### 3D-Helmholtzspule zur Kalibrierung des Messsystems

Ein wichtiger und unerlässlicher Schritt ist die Kalibrierung des Messsystems. Auf-

grund von Herstellungstoleranzen bei integrierten Schaltungen weist jeder Magnetfeldsensor leichte Variationen hinsichtlich seiner magnetischen Eigenschaften auf. Auch beim Aufbringen der Sensoren auf eine Leiterplatte sind Lagetoleranzen hinzunehmen, die sich nicht vermeiden lassen.

Zur Vermessung und Kalibrierung dieser Schwankungen wird am Fraunhofer IIS eine selbst entwickelte 3D-Helmholtzspule eingesetzt, um Referenz-Magnetfelder sowohl in Bezug auf ihre Stärke und Homogenität als auch hinsichtlich ihrer Orientierung zueinander zu erzeugen. Dieses Set-up zur Erzeugung eines Referenz-Magnetfelds wurde in Kooperation mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) hochgenau vermessen und entsprechend charakterisiert. Durch exakte Kenntnis des erzeugten Magnetfelds ist es somit möglich, innerhalb des Magnetfelds eine hochgenaue Kalibrierung durchzuführen.

Dabei werden magnetische Eigenschaften wie Empfindlichkeit und Offset der Sensoren sowie deren Temperaturverhalten ebenso vermessen wie störende Querempfindlichkeiten. Diese machen sich durch ein Übersprechen zwischen den Feldkomponenten bemerkbar, sodass deren genaue Kenntnis für die zuverlässige Rekonstruktion des Magnetfeldvektors essenziell ist.

Auch bei der Bestückung von Leiterplatten treten zwangsläufig Toleranzen auf, welche die Ausrichtung der Einzelsensoren zueinander stark beeinflussen. Durch diese aufwendige Kalibrierung lässt sich ein aus vielen diskreten Sensoren aufgebautes HallinSight-System betrachten wie ein monolithisch integriertes Sensorarray. ■

## INFORMATION & SERVICE

### AUTOR

Dipl.-Phys. Philip Beran, geb. 1986, ist Senior Scientist und Projektleiter am Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, Erlangen.

### KONTAKT

Philip Beran  
T 09131 776-4471  
philip.beran@iis.fraunhofer.de

### QZ-ARCHIV

Diesen Beitrag finden Sie online:  
[www.qz-online.de/6237653](http://www.qz-online.de/6237653)