

# **GOUDSMIT**

## **MAGNETICS**

### **Robustes Design von Magnet-Hall-Sensor-Kombinationen**

# Einführung



In diesem Whitepaper erläutern wir, wie Goudsmit die Finite-Elemente-Methode (FEM) bei der Entwicklung von Magnet-Hall-Sensorsystemen einsetzt. Insbesondere betrachten wir, wie sich Fertigungsmängel auf den Entwurf eines Magnet-Hall-Sensorsystems auswirken können und wie wir bei Goudsmit bekannte Fertigungstoleranzen ausnutzen, um einen robusten Entwurf dieser Systeme mit einer minimalen Ausfallrate während des tatsächlichen Betriebs zu gewährleisten.

## FEM-Berechnungen zur Verbesserung der Konstruktion von Magnet-Hall-Sensorsystemen

Hall-Sensoren sind elektrische Geräte, die empfindlich auf Magnetfelder reagieren und das erfasste Magnetfeld in ein proportionales Spannungsausgangssignal umwandeln. Da diese Empfindlichkeit ausgenutzt wird, findet dieser Sensortyp eine breite Anwendung in der Industrie in Kombination mit einem Magneten zur berührungslosen Näherungsmessung, Positions- und Geschwindigkeitserfassung, z.B. in Automobilsystemen und in der Unterhaltungselektronik. Der Magnet befindet sich dann typischerweise in dem sich bewegenden Teil, während der Sensor in dem feststehenden Teil untergebracht ist, oder umgekehrt, und das elektrische Ausgangssignal des Hall-Sensors ändert sich in Abhängigkeit vom Abstand des Magneten zu diesem Element.

Solche Magnet-Hall-Sensor-Kombinationen ermöglichen nicht nur die Messung von Magnetfeldstärken, sondern auch Anwendungen wie z.B. die Feststellung, ob eine Tür offen oder geschlossen ist, die Feststellung, ob der Sicherheitsgurt in einem Auto geschlossen ist, die Messung des Abstands zu einer Oberfläche bei Magnetschwebeanwendungen oder die Messung der Drehgeschwindigkeit eines Rades. Diese - in der Regel versteckten - Erkennungssysteme sind in vielen Produkten und industriellen Fertigungssystemen zu finden.

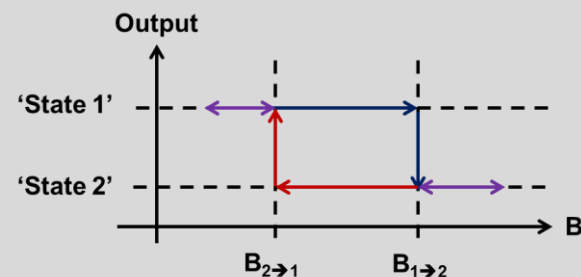
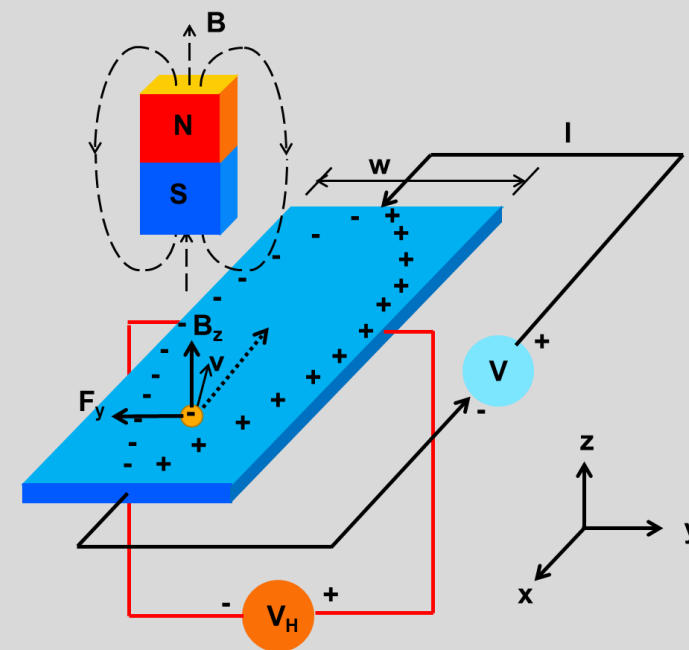
Ein einzelnes Magnet-Hall-Sensorsystem ist relativ preisgünstig. Sie werden oft in Massenprodukten oder -systemen eingesetzt. Für diese großvolumigen Anwendungen lohnt es sich, gezielt nach der günstigsten Lösung zu suchen, die dennoch die Leistungsanforderungen erfüllt. Ein wichtiges und kostspieliges Bauteil ist der Magnet. Vor allem in den letzten Jahren sind die Preise für Magnete aufgrund geopolitischer Faktoren bezüglich der Seltenen Erden stetig gestiegen. Gleichzeitig unterliegen die Elemente eines Magnet-Hall-Sensorsystems, wie jedes andere hergestellte System auch, Herstellungsmängeln, die in Form von Toleranzen in Bezug auf die Abmessungen und magnetischen Eigenschaften des Magneten und die Abmessungen und Erfassungseigenschaften des Hall-Sensors angegeben sind. Werden diese Unzulänglichkeiten bei der Konstruktion nicht berücksichtigt, können sie zu einer relativ hohen Fehlerquote und damit zu hohen Kosten führen. Um diese Kosten auf ein Minimum zu reduzieren, hat Goudsmit eine robuste Entwurfsmethode entwickelt, deren Kernstück die Verwendung von FEM-Berechnungen ist.

# Der Hall-Sensor

Der Hall-Sensor macht sich den Hall-Effekt zunutze. Dieser Effekt, der 1879 von dem amerikanischen Physiker Edwin Herbert Hall entdeckt wurde, ist in der Abbildung rechts schematisch dargestellt. Es handelt sich um das Phänomen, dass bei Anlegen eines Magnetfeldes ( $B$ ) senkrecht zu einem (flachen) Leiter mit einer bestimmten Breite ( $w$ ), durch den ein elektrischer Strom ( $I$ ) fließt, eine Spannungsdifferenz - die so genannte Hall-Spannung ( $V_H$ ) - entlang dieser Breite quer zu diesem Strom entsteht. Sie ergibt sich aus der Tatsache, dass das Magnetfeld, genauer gesagt seine Komponente senkrecht zur Leiteroberfläche ( $B_z$ ), eine Kraft auf die durch den Leiter fließenden Elektronen ausübt, die Lorentzkraft genannt wird. Diese Kraft ( $F_y$ ) ist quer zur Stromrichtung  $I$  gerichtet (in der Abbildung in  $y$ -Richtung) und bewirkt, dass sich die Elektronen mehr entlang einer Seite des Leiters bewegen. Der daraus resultierende Unterschied in der Elektronen- und Ladungsdichte über die Leiterbreite erzeugt die Hall-Spannung. Die Amplitude und das Vorzeichen dieser Spannung hängen von der Amplitude und der Richtung des angelegten Magnetfeldes und damit von der Stärke, der Nähe und der Ausrichtung des angelegten Magneten ab.

Hall-Sensoren können in Millimetergröße hergestellt werden und reagieren auf relativ kleine magnetische Flussdichten in der Größenordnung von 1 bis 100 mT. Folglich können diese mit relativ kleinen Magneten kombiniert werden, um kleine und leicht zu versteckende berührungslose Näherungs-, Positions- und Geschwindigkeitsmesssysteme zu schaffen. Da diese Systeme berührungslos sind, sind sie weniger verschleißanfällig und weisen daher weniger mechanische Ausfälle auf.

Die gebräuchlichsten Arten von Hall-Sensoren sind lineare (analoge) oder (digitale) Schalter. Ein linearer Hall-Sensor liefert ein Ausgangsspannungssignal, das proportional zur gemessenen magnetischen Flussdichte ist (wobei der Messbereich durch Sättigungseffekte begrenzt wird). Bei einem herkömmlichen Hall-Sensor mit Schalter wird das erfasste Signal mit einem voreingestellten Wert (Schwellenwert) verglichen, und wenn es diesen Wert überschreitet, wechselt das Ausgangssignal des Hall-Sensors von einem konstanten Pegel zu einem anderen konstanten Pegel. Wenn das erfasste Signal anschließend kleiner wird und einen anderen voreingestellten Wert überschreitet, schaltet das Ausgangssignal des Hall-Sensors wieder auf den ursprünglichen konstanten Pegel um. Die beiden voreingestellten Werte sind durch einen (Hysterese-)Wert getrennt, um unerwünschte Schwingungen des Sensorausgangssignals zu vermeiden.



Schematische Darstellung der Funktionsweise eines gewöhnlichen Hall-Sensors vom Typ Schalter. Wenn die erfasste magnetische Flussdichte  $B_z$  ansteigt (violett-blaue Linie) und den Wert  $B_{1 \rightarrow 2}$  überschreitet, wechselt das Ausgangssignal des Hall-Sensors vom Zustand 1, der einem konstant hohen Ausgangspegel entspricht und z.B. eine "EIN"- ("AUS"-) Situation darstellt, zum Zustand 2, der einem konstant niedrigen Ausgangspegel entspricht und z.B. eine "AUS"- ("EIN"-) Situation darstellt. Wenn der Wert von  $B_z$  anschließend abnimmt (lila-rote Linie) und den Schwellenwert von  $B_{2 \rightarrow 1}$  überschreitet, wird wieder in den Zustand 1 gewechselt.

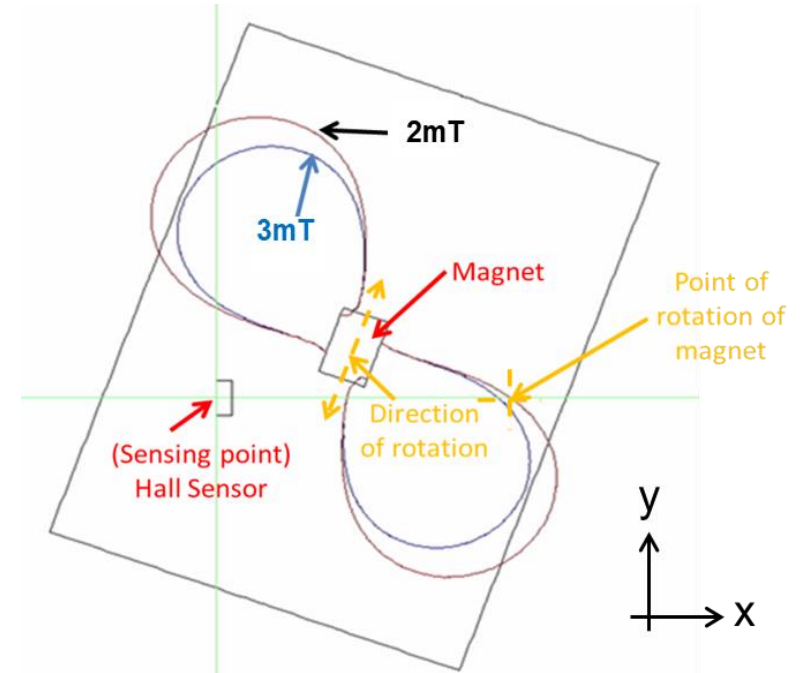
# Entwurf von Hall-Sensor-Kombinationen

Der Entwurf von Magnet-Hall-Sensorsystemen umfasst die Auswahl des Magneten und des Sensors sowie die Bestimmung der relativen Position oder Bewegung des Magneten in Bezug auf den Sensor, so dass die erzielten Messwerte den Anforderungen entsprechen.

Goudsmit verwendet Finite-Elemente-Modellierungsberechnungen (FEM) für den Entwurf von Magnet-Hall-Sensorkombinationen (und anderen Systemen). Insbesondere verwenden wir FEM, um die vom Sensor erfasste magnetische Flussdichte in Abhängigkeit von der Position/Bewegung des Magneten relativ zum Sensor zu berechnen.

Bei der FEM-Methode wird ein mathematisches Modell des Systems erstellt, indem eine Näherung seiner Geometrie gezeichnet und diese Geometrie in viele kleine Elemente, d.h. Volumen, unterteilt wird. Für jedes der Volumina wird dann ein Satz von Gleichungen formuliert, der eine Annäherung an die elementaren physikalischen Gleichungen darstellt, die für dieses Volumen gelten (diese Gleichungen gelten tatsächlich für einen Punkt und nicht für ein Volumen). Die Gleichungen für alle Elemente werden dann kombiniert und gleichzeitig gelöst, um die interessierenden Werte der Systemleistungsparameter zu ermitteln. Die FEM ist ein in der Industrie gut eingeführtes Verfahren zur Modellierung und Analyse physikalischer Systeme. Sie ist zwar relativ rechenintensiv, aber auch relativ genau. Goudsmit verwendet das Softwarepaket Comsol für seine FEM-Modellierungsprojekte [1, 2].

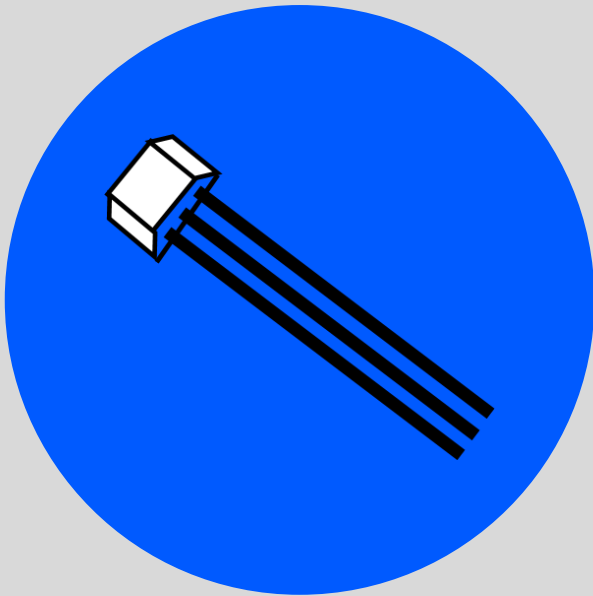
Ein Ergebnis eines FEM-basierten Entwurfs einer Magnet-Hall-Sensor-Kombination ist in der Abbildung rechts dargestellt, die die Verwendung eines Hall-Sensors vom Typ Schalter zeigt. Sie zeigt einen Magneten mit Konturen um diesen Magneten gleicher Größe der magnetischen Flussdichte in x-Richtung. Der Magnet dreht sich, und wenn die 3mT-Kontur das Hall-Element im Sensor passiert, das aufgrund seiner relativ geringen Größe als Punkt modelliert werden kann, schaltet der Sensor vom Zustand 1 (z.B. ein "EIN"-Zustand) in den Zustand 2 (ein "AUS"-Zustand). Wenn sich der Magnet zurückdreht, schaltet der Sensor wieder von 2 auf 1 (von "AUS" auf "EIN"), wenn die 2mT-Kontur diesen Messpunkt passiert. Ziel der Berechnung war es hier, die Winkel zu finden, bei denen die Umschaltungen stattfinden, um festzustellen, ob diese die entsprechenden Spezifikationen erfüllen.



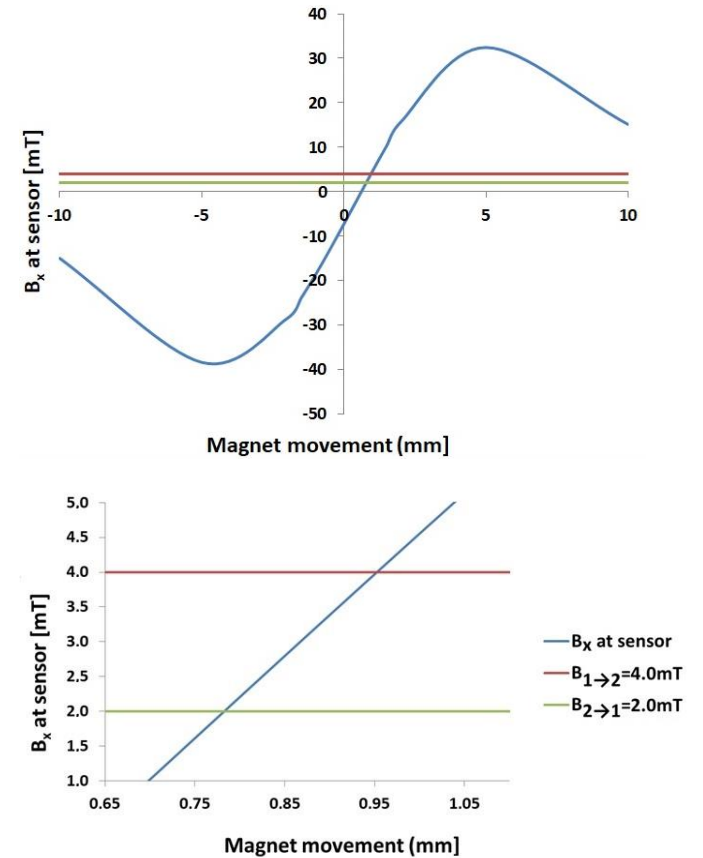
2D-Ergebnisse aus einer 3D-FEM-Berechnung für einen rotierenden Magnet-Hall-Sensor-Anwendung. Der Sensor ist vom Typ Schalter mit  $B_{2 \rightarrow 1} = 2\text{mT}$  und  $B_{1 \rightarrow 2} = 3\text{mT}$ .

# Entwurf von Hall-Sensor-Kombinationen

Ein FEM-Berechnungsergebnis aus einer anderen Übung zur Entwicklung eines Magnet-Hall-Sensors ist hier rechts abgebildet. Hier ist die relevante magnetische Flussdichtekomponente (x) am empfindlichen Punkt des Sensors, wie sie von der FEM berechnet wurde, als Funktion der Bewegung des Magneten dargestellt. Da auch die nominalen Schaltschwellenwerte  $B_{1 \rightarrow 2}$  und  $B_{2 \rightarrow 1}$  eingezeichnet sind, lassen sich die Magnetpositionen, an denen die Schaltvorgänge stattfinden, leicht aus der Abbildung ablesen.



Ein typisches Layout für einen Hall-Sensor



FEM-Berechnungsergebnisse für eine Magnet-Hall-Sensor-Anwendung, bei der sich der Magnet entlang einer geraden Linie bewegt und dabei einen nahe gelegenen Hall-Sensor passiert. Der Sensor ist vom Typ Schalter mit  $B_{2 \rightarrow 1} = 2 \text{ mT}$  und  $B_{1 \rightarrow 2} = 4 \text{ mT}$ . Nach diesen Ergebnissen erfolgt der Wechsel von Zustand 1 nach 2 bei einer Magnetposition von (ca.) 0,95 mm und der Wechsel von Zustand 2 nach 1 bei einer Position von (ca.) 0,78 mm.

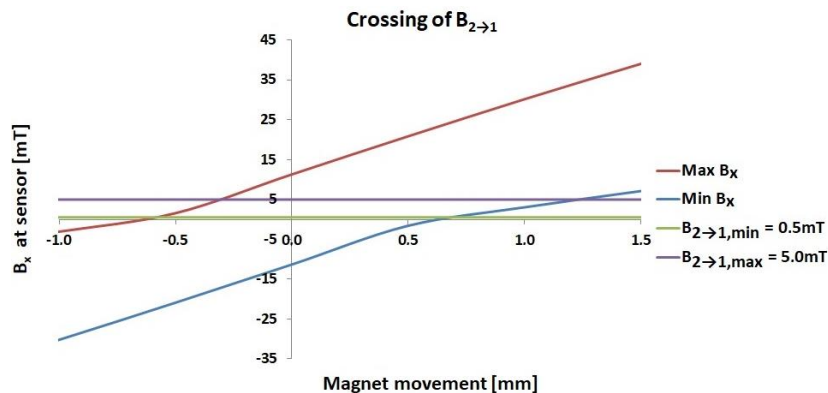
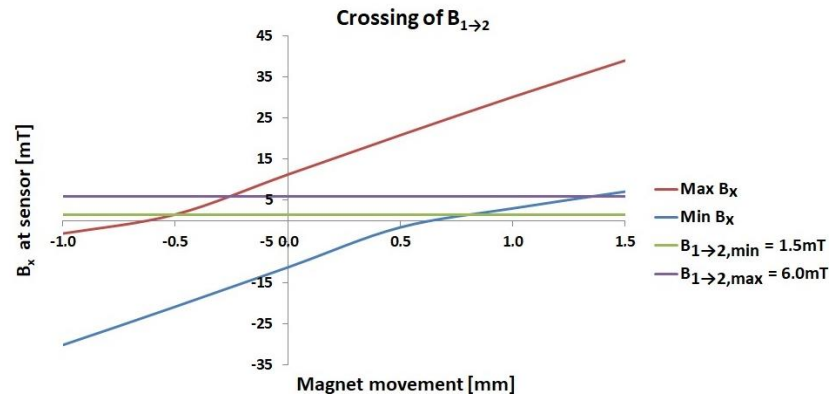
# Robustes Design von Magnet-Hall-Sensor-Kombinationen

Die auf den vorangegangenen Seiten erörterten Konstruktionsbeispiele berücksichtigen nicht die Unsicherheiten in der Konstruktion, wie z.B. (i) die magnetischen Eigenschaften und Abmessungen des Magneten, (ii) die Erfassungseigenschaften und Abmessungen des Hall-Sensors und (iii) den Abstand zwischen Magnet und Sensor, die alle typischerweise durch Fertigungstoleranzen in Form von Mindest- und Höchstwerten ausgedrückt werden. Werden diese Unwägbarkeiten bei der Konstruktion nicht berücksichtigt, kann die tatsächlich hergestellte Magnet-Hall-Sensor-Kombination in ihren Abmessungen und ihrer Leistung von den in der Konstruktionsphase getroffenen Annahmen und Vorhersagen erheblich abweichen. Bei Vorhandensein vieler und/oder relativ großer Toleranzgrenzen kann diese Leistung sogar unannehmbar werden, obwohl der Entwurf eine akzeptable Leistung aufwies. Dies kann durch einen so genannten robusten Entwurfsansatz bewältigt werden, bei dem diese Unsicherheiten berücksichtigt werden.

Ein Systemparameter, der unsicher ist und in Form von Toleranzen mit einem Bereich mit einer oberen und unteren Grenze definiert ist, kann innerhalb dieses Bereichs viele Werte annehmen. Für jeden dieser Werte wird die vom Hall-Sensor gemessene magnetische Flussdichte etwas anders sein. Wenn man alle möglichen Werte des unsicheren Systemparameters innerhalb seiner Toleranzgrenzen berücksichtigt, liegt die gemessene magnetische Flussdichte ebenfalls in einem Bereich mit Ober- und Untergrenze. Der Kern des Goudsmit FEM-Ansatzes zur robusten Auslegung von Magnet-Hall-Sensorsystemen liegt in der Fähigkeit, diesen Bereich effizient zu berechnen. Bei schaltenden Hall-Sensoranwendungen wird dies ausgenutzt, um die Magnetbewegungsbereiche zu bestimmen, in denen die Schwellenwerte überschritten werden. Der robuste Entwurfsansatz konzentriert sich dann auf die Verringerung oder Verschiebung dieser Bereiche, bis die Anforderungen an die Magnetposition beim Überschreiten der Schwellenwerte erfüllt sind. Zum Beispiel durch die Wahl von Produkten höherer Qualität mit engeren Toleranzen.

Ein Ergebnis dieses Ansatzes zur Berechnung der Goudsmit-Bereiche, der an das auf der vorherigen Seite betrachtete Beispiel anknüpft, ist hier links dargestellt. Beachten Sie, dass jetzt sowohl die Überschreitung des B12- als auch des B21-Schwellenwerts nicht mehr in Form eines bestimmten Magnetbewegungswerts (Punkt) angegeben wird, wie auf der vorherigen Seite, sondern in Form eines Bereichs. Wenn der B12-Schwellenwert beispielsweise 1,5 mT (violette Linie) beträgt, würde der Kreuzungspunkt für einen Magnetbewegungswert irgendwo zwischen etwa -0,25 mm (Kreuzung mit der roten Linie) und 1,4 mm (Kreuzung mit der blauen Linie) liegen. In Anbetracht der durch die Toleranzen definierten Unsicherheiten könnte der Wert überall innerhalb dieses Bereichs liegen. Es ist zu beachten, dass dieser Bereich für die betrachtete Anwendung viel zu groß sein kann, so dass eine Anpassung der Konstruktion erforderlich ist.

Wie in der Abbildung links zu sehen ist, berücksichtigt der Goudsmit-Ansatz auch explizit die Toleranzen für die Schwellenwerte, wobei die Maximal- und Minimalwerte aus den Sensorspezifikationen stammen und hier als lila und grüne Linien dargestellt sind. Die Überschreitungsbereiche liegen nun tatsächlich zwischen der ersten Überschreitung des minimalen Schwellenwertes (rote Überschreitung mit grüner Linie) und der letzten Überschreitung des maximalen Schwellenwertes (blaue Überschreitung mit lila Linie).



Goudsmit FEM-Berechnungsergebnisse für ein robustes Design eines Magnet-Hall-Sensorsystems, bei dem sich der Magnet entlang einer geraden Linie bewegt und dabei einen Hall-Sensor in der Nähe passiert. Der Sensor ist vom Typ Schalter.

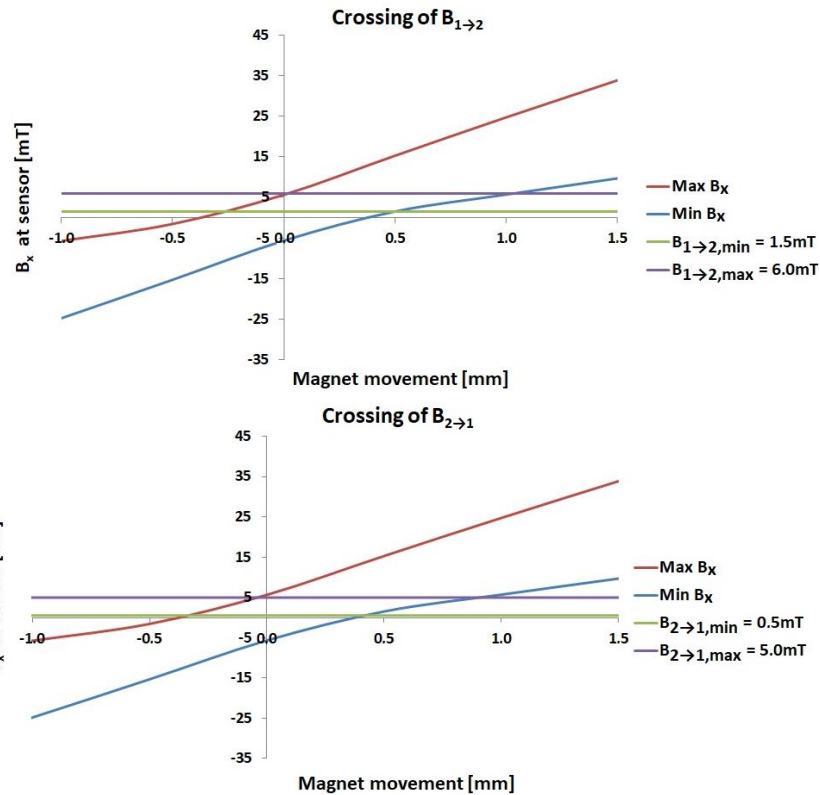
# Robustes Design von Magnet-Hall-Sensor-Kombinationen

Der Goudsmit FEM-Ansatz zur robusten Auslegung von Magnet-Hall-Sensorsystemen liefert 2 Kreuzungsbereiche. Einen für den  $B_{1 \rightarrow 2}$  Schwellenwert und einen für den  $B_{2 \rightarrow 1}$  Schwellenwert. Die Berechnung dieser Bereiche liefert zwar eine qualitative Beschreibung der Auswirkung von Systemunsicherheiten auf die Leistung des Systems, kann aber lange dauern und erfordert viel Speicherkapazität. Ein wesentliches Merkmal des Goudsmit-Ansatzes ist, dass die benötigte Zeit und Speicherkapazität durch geschickte Wahl der FEM-Berechnungen reduziert wird. Dabei wird unter anderem die Kenntnis der Eigenschaften des Magneten und der von ihm abgestrahlten Magnetfelder ausgenutzt.

Die Berechnung der Bewegungsbereiche des Magneten kann dazu beitragen, den Entwurf robuster zu gestalten, indem er so angepasst wird, dass diese Bereiche verkleinert und/oder in einen anderen Bewegungsbereich verschoben werden. Dadurch wird eine bessere oder vollständig garantierte Erfüllung der Spezifikationen für die Zustandswechselorte oder -bereiche gewährleistet. Außerdem können so die Ausfallrate und die damit verbundenen Kosten reduziert werden. Die Verkleinerung und Verschiebung der Schwellenübergangsbereiche kann durch Änderung der Sensoreigenschaften und/oder der Materialeigenschaften und/oder ihrer relativen Position erfolgen.

Um eine Vorstellung von dieser Verkleinerung der Bereiche zu vermitteln, sei noch einmal das Anwendungsbeispiel auf der vorherigen Seite betrachtet. Die dortigen Ergebnisse wurden durch die Verwendung eines Magneten mit einer maximalen Abweichung der Magnetisierungsrichtung von 6 Grad erzielt. Solche Abweichungen von der geraden Nord-Süd-Richtung der Magnetisierung sind auf Fertigungsungenauigkeiten zurückzuführen. Es sind verschiedene Magnetqualitäten erhältlich, die jeweils eine unterschiedliche maximale Abweichung der Magnetisierungsrichtung aufweisen und unterschiedlich teuer sind. Je kleiner diese maximale Abweichung ist, desto höher sind die Kosten für den Magneten.

In diesem Beispiel werden die Berechnungsergebnisse für das gleiche System wie auf der vorigen Seite dargestellt, jetzt aber mit einer höheren Magnetqualität. Diesmal mit einer maximalen Abweichung des Magnetisierungsrichtungswinkels von 3 Grad anstelle von 6 Grad. Wie zu sehen ist, sind die Bereiche, in denen die Schwellenwerte überschritten werden, deutlich kleiner geworden. Genauer gesagt wurde der Kreuzungsbereich für den  $B_{1 \rightarrow 2}$  Schwellenwert von etwa 2,0 mm (-0,6 mm  $\rightarrow$  1,4 mm) für einen Magneten mit einer maximalen Abweichung der Magnetisierungsrichtung von 6° auf etwa 1,3 mm (-0,3 mm  $\rightarrow$  1,0 mm) für einen Magneten mit einer maximalen Abweichung der Magnetisierungsrichtung von 3° reduziert. Ebenso wurde der Kreuzungsbereich für den  $B_{1 \rightarrow 2}$  Schwellenwert von ca. 1,9 mm (-0,6 mm  $\rightarrow$  1,3 mm) für einen Magneten mit einer maximalen Magnetisierungsrichtungsabweichung von 6° auf ca. 1,2 mm (-0,3 mm  $\rightarrow$  0,9 mm) für einen Magneten mit einer maximalen Magnetisierungsrichtungsabweichung von 3° reduziert.



Goudsmit FEM-Berechnungsergebnisse für ein robustes Design eines Magnet-Hall-Sensorsystems, bei dem sich der Magnet entlang einer geraden Linie bewegt und dabei einen nahegelegenen Hall-Sensor passiert. Der Sensor ist vom Typ Schalter. Die Ergebnisse wurden mit demselben System wie auf der vorherigen Seite erzielt, jedoch mit einem Magneten mit einer maximalen Abweichung der Magnetisierungsrichtung von 3° statt 6°.

# Schlussfolgerungen

Magnet-Hall-Sensor-Kombinationen sind in vielen industriellen Systemen zur berührungslosen Näherungsmessung, Positions- und Geschwindigkeitserfassung zu finden. Goudsmit kann den Entwurf dieser Systeme mit Hilfe eines auf der Finite-Elemente-Methode (FEM) basierenden Ansatzes unterstützen. Mit diesem Ansatz kann das System bereits in der Entwurfsphase in einer Simulationsumgebung getestet und optimiert werden. Dies trägt dazu bei, die Entwicklungskosten erheblich zu senken, da zahlreiche Tests mit realen Magneten vermieden werden können.

Der FEM-Ansatz von Goudsmit für den Entwurf von Magnet-Hall-Sensorsystemen wird in diesem White Paper beschrieben und seine Eigenschaften werden anhand von Beispielen für Schalter-Hall-Sensoren illustriert. Vor kurzem hat Goudsmit diesen Ansatz erweitert, um auch die Unsicherheiten der Systemparameter zu berücksichtigen, die durch Toleranzen bei den Materialeigenschaften, den Sensoreigenschaften und dem relativen Abstand zwischen Magnet und Sensor quantifiziert werden. Mit diesem Ansatz lässt sich ein robusteres Design erzielen, das zu einer strikteren Erfüllung der Systemspezifikationen und geringeren Ausfallraten führt. Das Hauptmerkmal dieses robusten Entwurfsansatzes ist, dass durch die Ausnutzung von Goudsmits Wissen über Magnete, clevere Entscheidungen in Bezug auf die Simulationen getroffen werden können. Dadurch wird die gesamte Simulationszeit und damit auch die Produktentwicklungszeit erheblich reduziert.

## Referenzen

- [1] M. Leskens & C. van de Paal (2019).  
*Optimization of Magnetic Systems through Finite Element Modelling.*  
15th XMR Symposium on Magnetoresistive Sensors & Magnetic Systems, 19-20th March 2019 – Wetzlar, Germany .
- [2] COMSOL Multiphysics® Modeling Software: <https://www.COMSOL.com>.

## YouTube

FEM-Berechnungen für Magnetfilter (Stahl):  
<https://youtu.be/97RcfKic3y8>

FEM-Berechnungen für Magnetfilter (Edelstahlpartikel):  
<https://youtu.be/OOaClbPLxCs>



Geschrieben von Martijn Leskens  
FEM Spezialist

[ml@goudsmit.eu](mailto:ml@goudsmit.eu)



**Mehr Informationen über FEM-Berechnungen bei Goudsmit?**

<https://www.goudsmitmagnets.com/solutions/service/calculation-and-simulation.html>

Petunialaan 19  
5582 HA Waalre  
The Netherlands  
goudsmitmagnets.com