

GOUDSMIT

MAGNETICS

Robuust ontwerp van magneet-Hall sensor combinaties

Introductie



In dit white paper bespreken we hoe Goudsmit finite-element-method (FEM) berekeningen gebruikt bij het ontwerp van magneet-Hall sensorsystemen. In het bijzonder bekijken we hoe fabricage-imperfecties het ontwerp van een magneet-Hall sensorsysteem kunnen beïnvloeden en hoe we bij Goudsmit gebruik maken van bekende fabricagetoleranties om een robuust ontwerp van deze systemen te maken, met een minimale uitval van deze systemen tijdens bedrijf.

FEM-berekeningen ten behoeve van het ontwerp van magneet-Hall-sensorsystemen

Hall-sensoren zijn elektrische apparaten die gevoelig zijn voor magnetische velden en het gedetecteerde magnetische veld omzetten in een proportioneel spanningsuitgangssignaal. Door gebruik te maken van deze gevoeligheid heeft dit type sensor in de industrie een wijdverbreid gebruik gevonden in combinatie met een magneet voor contactloze naderingsdetectie, positie- en snelheidsdetectie, bijvoorbeeld in automobielsystemen en consumentenelektronica. De magneet bevindt zich dan meestal in het bewegende deel en de sensor in het stilstaande deel, of omgekeerd, en het elektrische uitgangssignaal van de Hall-sensor verandert met de afstand van de magneet tot dit element.

Dergelijke combinaties van magneet en Hall-sensor maken niet alleen metingen van magnetische veldsterkten mogelijk, maar ook toepassingen als bijvoorbeeld het meten of een deur open of gesloten is, of de veiligheidsgordel in een auto op slot zit, of de afstand tot een oppervlak bij magnetische levitatie of de draaisnelheid van een wiel. Deze - doorgaans verborgen - detectiesystemen zijn te vinden in tal van producten en industriële fabricagesystemen.

Een enkel magneet-Hall-sensorsysteem is relatief goedkoop en wordt vaak gebruikt in in massa geproduceerde producten of systemen. Voor deze grootschalige toepassingen loont het om gericht onderzoek te doen naar de goedkoopste oplossing die toch aan de prestatie-eisen voldoet. Een belangrijke en kostbare component is de magneet. Vooral de laatste jaren stijgen de prijzen van magneten gestaag als gevolg van geopolitieke factoren betreffende de zeldzame aardelementen. Tegelijkertijd zijn de elementen van een magneet-Hall-sensorsysteem, zoals elk gefabriceerd systeem, onderhevig aan fabricage-imperfecties, zoals gespecificeerd in termen van toleranties met betrekking tot de afmetingen en magnetische eigenschappen van de magneet en de afmetingen en detectiekenmerken van de Hall-sensor. Indien hiermee bij het ontwerp geen rekening wordt gehouden, kunnen de fabricage-imperfecties leiden tot een relatief groot aantal storingen en dus tot hoge kosten. Om deze kosten tot een minimum te beperken heeft Goudsmit een robuuste ontwerpmethodologie ontwikkeld, waarin het gebruik van FEM-berekeningen centraal staat.

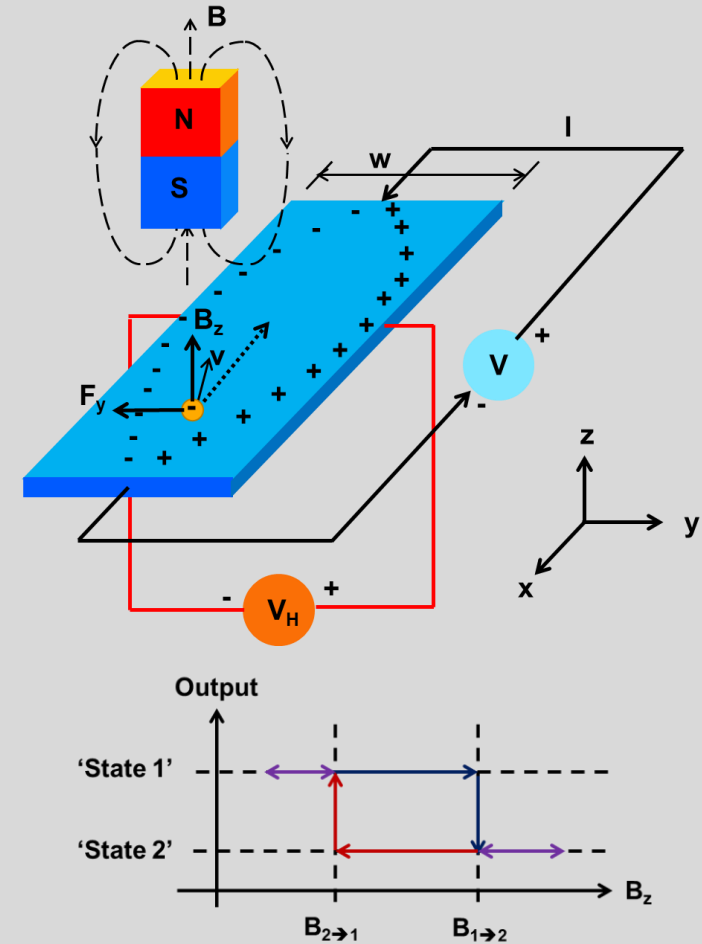
De Hall sensor

De Hall-sensor maakt gebruik van het Hall-effect. Dit effect, dat in 1879 werd ontdekt door de Amerikaanse natuurkundige Edwin Herbert Hall, is schematisch weergegeven in de figuur hiernaast. Het is het verschijnsel dat, wanneer een magnetisch veld (B) loodrecht wordt aangelegd op een (platte) geleider met een bepaalde breedte (w) waardoor een elektrische stroom (I) loopt, langs deze breedte dwars op deze stroom een spanningsverschil - de zogenaamde Hall-spanning (V_H) - wordt verkregen. Dit is een gevolg van het feit dat het magnetisch veld, meer bepaald zijn component loodrecht op het oppervlak van de geleider (B_z), een kracht uitoefent op de elektronen die door de geleider stromen, die de Lorentzkracht wordt genoemd. Deze kracht (F_y) is dwars op de richting van de stroom I gericht (in de y -richting in de figuur) en zorgt ervoor dat de elektronen meer langs één kant van de geleider bewegen. Het resulterende verschil in elektronen- en ladingsdichtheid over de breedte van de geleider creëert de Hall-spanning. De amplitude en het teken van deze spanning hangen af van de amplitude en de richting van het toegepaste magnetische veld, en dus van de sterkte, de nabijheid en de oriëntatie van de toegepaste magneet.

Hall-sensoren kunnen tot op de millimeter nauwkeurig worden gemaakt en zijn gevoelig voor relatief kleine magnetische fluxdichtheden in de orde van grootte van 1 tot 100 mT. Bijgevolg kunnen deze worden gecombineerd met relatief kleine magneten om ook kleine en gemakkelijk te verbergen contactloze nabijheids-, positie- en snelheidsdetectiesystemen te maken. Omdat ze contactloos zijn, zijn deze systemen minder gevoelig voor slijtage en vertonen zij dus minder mechanische storingen.

De meest gangbare Hall-sensoren zijn van het lineaire (analoge) type of van het (digitale) schakeltype. Een lineaire Hall-sensor levert een uitgangsspanningssignaal dat evenredig is met de gemeten magnetische fluxdichtheid (met bereikbeperkingen die worden bepaald door verzadigingseffecten). Bij een Hall-sensor van het gewone schakeltype wordt het gedetecteerde signaal vergeleken met een vooraf ingestelde (drempel)waarde en wanneer het deze waarde overschrijdt, schakelt het uitgangssignaal van de Hall-sensor over van een constant niveau naar een ander constant niveau. Wanneer het gemeten signaal vervolgens kleiner wordt en een andere vooraf ingestelde waarde overschrijdt, schakelt het uitgangssignaal van de Hall-sensor terug naar het oorspronkelijke constante niveau.

De twee vooraf ingestelde waarden worden gescheiden door een (hysteresis)waarde om ongewenste oscillaties in het uitgangssignaal van de sensor te voorkomen. .



Schematische weergave van de werking van een Hall-sensor van het gewone schakeltype. Wanneer de gemeten magnetische fluxdichtheid B_z toeneemt (paarsblauwe lijn) en de waarde $B_{1 \rightarrow 2}$ overschrijdt, schakelt het uitgangssignaal van de Hall-sensor over van toestand 1, die overeenkomt met een constant hoog uitgangsniveau en b.v. een "aan"- ("uit"-)situatie vertegenwoordigt, naar toestand 2, die overeenkomt met een constant laag uitgangsniveau en b.v. een "uit"- ("aan"-)situatie vertegenwoordigt. Wanneer B_z vervolgens in waarde daalt (paars-rode lijn) en de drempelwaarde $B_{2 \rightarrow 1}$ passeert, schakelt hij terug naar toestand 1.

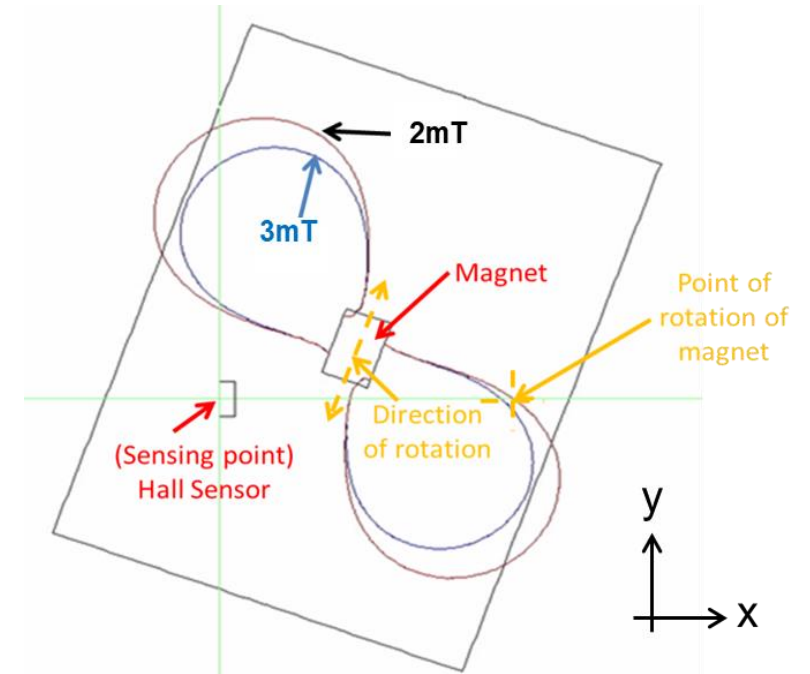
Ontwerp van Hall sensor combinaties

Het ontwerp van magneet-Hall-sensorsystemen omvat de selectie van magneet en sensor en de bepaling van de relatieve plaats of beweging van de magneet ten opzichte van de sensor, zodat de verkregen detectie aan de eisen voldoet.

Goudsmit gebruikt finite-element-modelling (FEM) berekeningen voor het ontwerp van magneet-Hall sensor combinaties (en andere systemen). In het bijzonder gebruiken we FEM om de door de sensor gedetecteerde magnetische fluxdichtheid te berekenen als functie van de plaats/beweging van de magneet ten opzichte van de sensor.

Bij de FEM-methode wordt een wiskundig model van het systeem gebouwd door een benadering van de geometrie te tekenen en deze geometrie te verdelen in vele kleine elementen c.q. volumes. Voor elk van de volumes wordt dan een reeks vergelijkingen geformuleerd die een benadering is van de elementaire natuurkundige vergelijkingen die in dit volume gelden (deze vergelijkingen gelden eigenlijk in een punt en niet over een volume). De vergelijkingen voor alle elementen worden dan gecombineerd en gelijktijdig opgelost om de gewenste waarden van de prestatieparameters van het systeem te verkrijgen. FEM is een beproefde methode voor het modelleren en analyseren van fysische systemen in de industrie. Hoewel het rekenkundig relatief duur is, is het ook nauwkeurig. Goudsmit maakt voor haar FEM-modelleringsprojecten gebruik van het softwarepakket Comsol [1, 2].

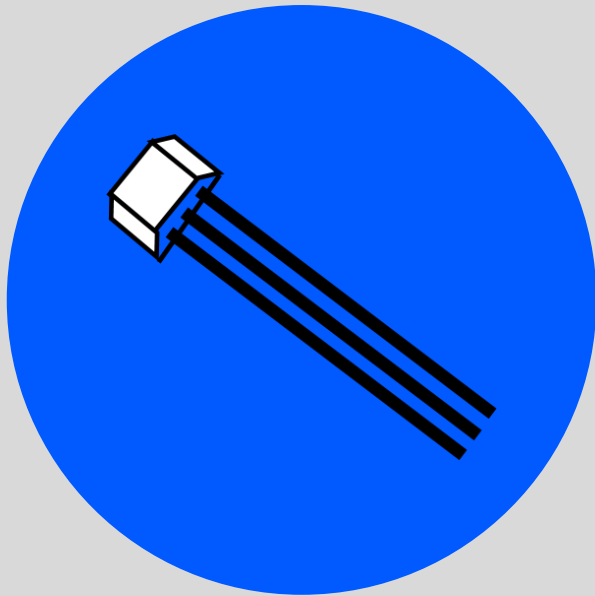
Een resultaat van een FEM gebaseerd ontwerp van een magneet-Hall sensor combinatie is afgebeeld in de figuur rechts, welke het gebruik van een switch type Hall sensor laat zien. De figuur toont een magneet met rondom deze magneet contouren van gelijke grootte van de magnetische fluxdichtheid in de x-richting. De magneet draait en wanneer de 3mT-contour het Hall-element in de sensor passeert, dat als een punt kan worden gemodelleerd omdat het relatief klein is, schakelt de sensor van toestand 1 (bijvoorbeeld een "ON"-toestand) naar toestand 2 (een "OFF"-toestand). Wanneer de magneet terugdraait, schakelt de sensor terug van 2 naar 1 (van "UIT" naar "AAN") wanneer de 2mT-contour dit waarnemingspunt passeert. Het doel van de berekening hier was het vinden van de hoeken waaronder de omschakelingen plaatsvinden, om te bepalen of deze voldoen aan de overeenkomstige specificaties.



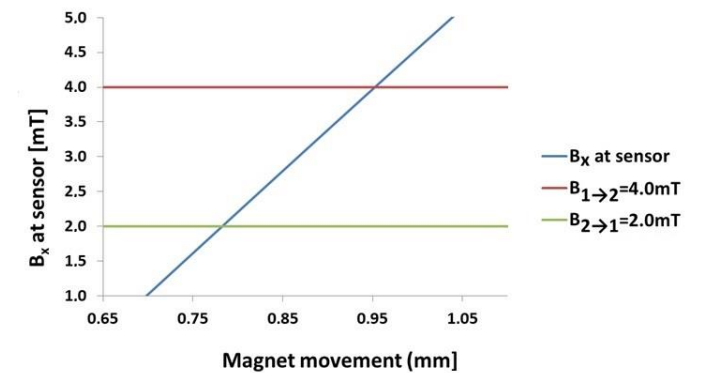
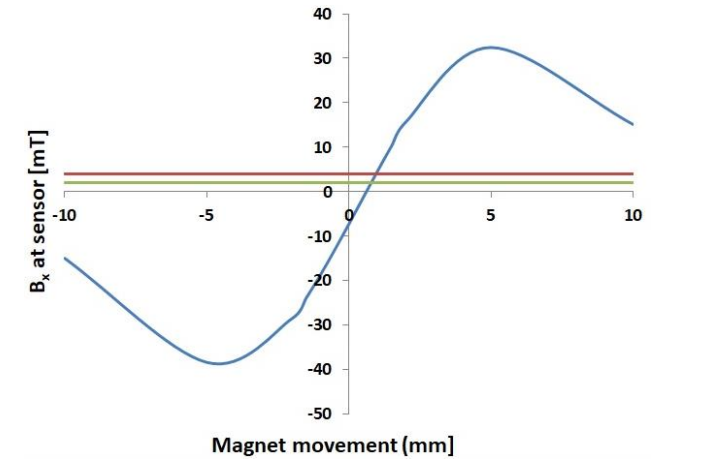
2D resultaten van een 3D FEM-berekening voor een roterende magneet-Hall sensor toepassing. De sensor is van het schakeltype met $B_{2 \rightarrow 1} = 2\text{mT}$ en $B_{1 \rightarrow 2} = 3\text{mT}$.

Ontwerp van Hall sensor combinaties

Een FEM-berekeningsresultaat van een andere ontwerp oefening voor een magneet-Hall-sensor is hier rechts afgebeeld. Hier wordt de relevante magnetische fluxdichtheidscomponent (x) op het gevoelige punt van de sensor, zoals berekend door FEM, weergegeven als functie van de beweging van de magneet. Door het tonen van de nominale drempelschakelwaarden $B_{1 \rightarrow 2}$ en $B_{2 \rightarrow 1}$, kunnen de magneetlocaties waar de schakelingen plaatsvinden gemakkelijk uit de figuur worden gehaald.



Een typische lay-out van een Hall sensor



FEM-berekeningsresultaten voor een magneet-Hallsensor-toepassing waarbij de magneet langs een rechte lijn beweegt en een nabijgelegen Hall-sensor passeert. De sensor is van het schakeltype met $B_{2 \rightarrow 1}=2\text{mT}$ en $B_{1 \rightarrow 2}=4\text{mT}$. Volgens deze resultaten vindt de overgang van toestand 1 naar 2 plaats op een magneetplaats van (ongeveer) 0,95 mm en de overgang van toestand 2 naar 1 op een plaats van (ongeveer) 0,78 mm.

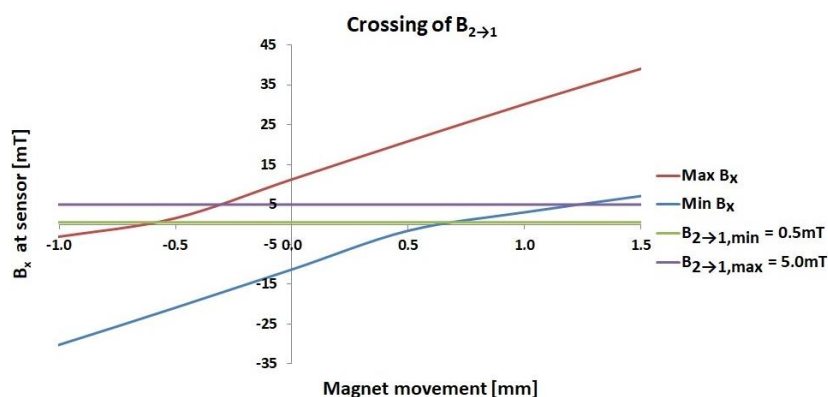
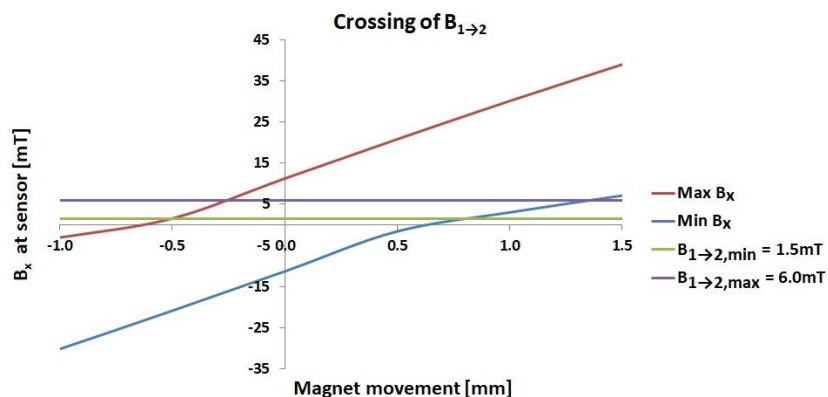
Robuust ontwerp van Magneet-Hall sensor combinaties

Bij de op de vorige bladzijden besproken ontwerpvoorbeelden is geen rekening gehouden met onzekerheden in het ontwerp, zoals die in (i) de magnetische eigenschappen en afmetingen van de magneet, (ii) de detectiekenmerken en afmetingen van de Hall-sensor en (iii) de afstand tussen de magneet en de sensor, die alle typisch worden uitgedrukt via fabricagetoleranties in termen van een minimum- en maximumwaarde. Wanneer bij het ontwerp geen rekening wordt gehouden met deze onzekerheden, kan de werkelijk vervaardigde magneet-Hallsensorcombinatie qua afmetingen en prestaties sterk afwijken van de aannames en voorspellingen in de ontwerpfase. Bij aanwezigheid van veel en/of relatief grote tolerantiegrenzen kan deze prestatie zelfs onaanvaardbaar worden, ook al vertoonde het ontwerp een aanvaardbare prestatie. Dit kan worden ondervangen door een zogenaamde robuuste ontwerpbenadering, waarbij met deze onzekerheden rekening wordt gehouden.

Een systeemp parameter die onzeker is en gedefinieerd wordt in termen van toleranties, met een bereik met een boven- en ondergrens, kan binnen dit bereik vele waarden aannemen. Voor elk van deze waarden zal de door de Hall-sensor gemeten magnetische fluxdichtheid enigszins verschillend zijn. Bijgevolg zal, wanneer alle mogelijke waarden van de onzekere systeemp parameter binnen zijn tolerantiegrenzen worden beschouwd, de gemeten magnetische fluxdichtheid ook binnen een bereik met boven- en ondergrens liggen. De kern van de Goudsmit FEM-benadering voor het robuust ontwerpen van magneet-Hal-sensorsystemen ligt in de mogelijkheid om dit bereik efficiënt te berekenen. In het geval van schakeltype Hall-sensortoepassingen wordt dit vervolgens benut om de magneetbewegingsbereiken te bepalen waar de drempelwaarden worden overschreden. De robuuste ontwerpbenadering richt zich vervolgens op het verkleinen of verplaatsen van deze bereiken totdat aan de drempeloverschrijdende magneetlocatievereisten is voldaan. Bijvoorbeeld door producten van hogere kwaliteit met nauwere toleranties te kiezen.

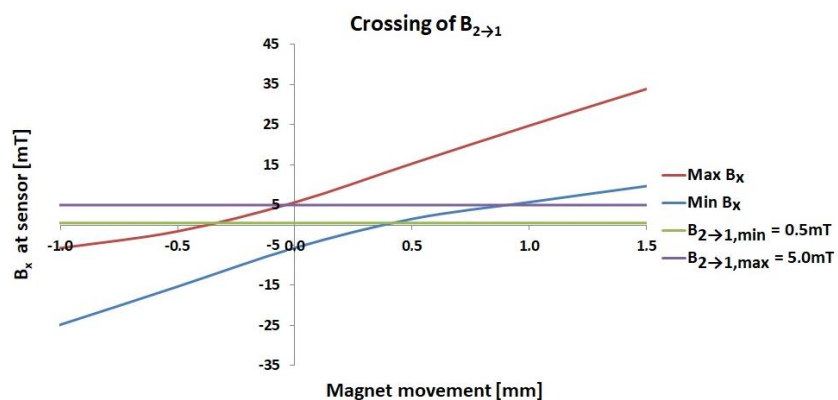
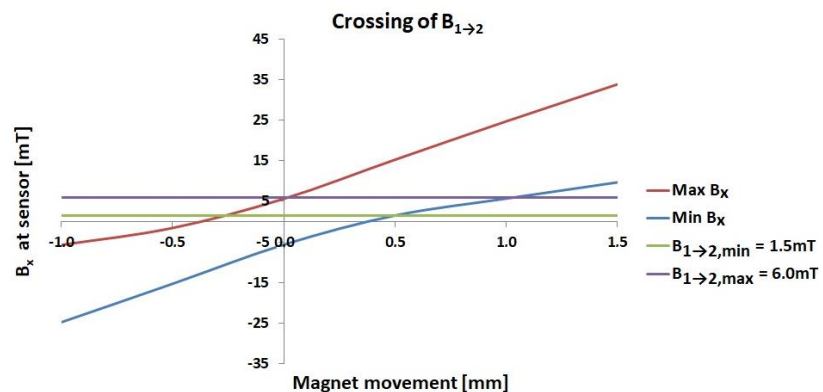
Een resultaat van deze Goudsmit-berekeningsaanpak, dat een vervolg is op het voorbeeld dat op de vorige bladzijde is besproken, staat hier links. Merk op dat nu zowel de overschrijding van de $B_{1 \rightarrow 2}$ als de $B_{2 \rightarrow 1}$ -drempelwaarde niet meer in termen van een specifieke magneetbewegings(punt)waarde wordt gespecificeerd, zoals op de vorige bladzijde, maar juist in termen van een bereik. Bijvoorbeeld, als de $B_{1 \rightarrow 2}$ -drempelwaarde 1,5mT zou zijn (paarse lijn), zou de kruising voor een magneetbewegingswaarde ergens tussen ongeveer -0,25mm (kruising met de rode lijn) en 1,4mm (kruising met de blauwe lijn) liggen. Gezien de door de toleranties bepaalde onzekerheden zou het overall binnen dit bereik kunnen liggen. Merk op dat dit een veel te groot bereik kan zijn voor de betrokken toepassing, zodat een aanpassing van het ontwerp nodig is.

Zoals in de figuur links te zien is, houdt de Goudsmit-benadering ook expliciet rekening met toleranties op de drempelwaarden, waarbij de maximum- en minimumwaarden uit de sensorspecificaties worden verkregen en hier als paarse en groene lijnen worden weergegeven. De overschrijdingsbereiken liggen nu in feite tussen de eerste overschrijding van de minimale drempelwaarde (overschrijding rood met groene lijn) en de laatste overschrijding van de maximale drempelwaarde (overschrijding blauw met paarse lijn).



Goudsmit FEM-berekeningsresultaten voor een robuust ontwerp van een magneet-Hallsensor systeem waarbij de magneet langs een rechte lijn beweegt en een nabijgelegen Hall-sensor passeert. De sensor is van het schakeltype.

Robuust ontwerp van Magneet-Hall sensor combinaties



Goudsmit FEM berekeningsresultaten voor een robuust ontwerp van een magneet-Hallsensor systeem waarbij de magneet langs een rechte lijn beweegt, langs een nabijgelegen Hall-sensor. De sensor is van het schakeltype. De resultaten zijn verkregen met hetzelfde systeem als op de vorige pagina, maar met een magneet met een maximale afwijking van de magnetisatie-richting van 3° in plaats van 6° .

De Goudsmit FEM-benadering voor een robuust ontwerp van magneet-Hall-sensorsystemen levert twee grenswaarden op. Eén voor de $B_{1 \rightarrow 2}$ drempelwaarde en één voor de $B_{2 \rightarrow 1}$ drempelwaarde. De berekening van deze bereiken levert weliswaar een kwalitatieve beschrijving op van het effect van systeem-onzekerheden op de prestaties, maar kan lang duren en veel geheugencapaciteit vergen. Een belangrijk kenmerk van de Goudsmit-benadering is dat de vereiste tijd en opslagcapaciteit worden verminderd door slimme keuzes te maken met betrekking tot de FEM-berekeningen. Bij het maken van deze keuzes wordt onder andere gebruik gemaakt van kennis van de eigenschappen van de magneet en de uitgestraalde magneet.

De berekening van de magneetbewegingsbereiken kan helpen bij het robuust maken van het ontwerp door het zodanig aan te passen dat deze bereiken kleiner worden en/of naar een ander bewegingsbereik worden verschoven. Aldus wordt een betere of volledig gegarandeerde vervulling van de specificaties inzake de locaties of bereiken van toestandsveranderingen gewaarborgd. Dit kan ook het faalpercentage en de daarmee samenhangende kosten verminderen. De inkrimping en verschuiving van de drempelwaarde-bereiken kan worden bewerkstelligd door de kenmerken van de sensor en/of de magneet en/of hun relatieve positie te wijzigen.

Om een idee te geven van deze verkleining van de reikwijdte, wordt opnieuw gekeken naar de voorbeeldtoepassing van de vorige bladzijde. De resultaten daar werden verkregen door een magneet te gebruiken met een maximale afwijking op de magnetiseringsrichting van 6 graden. Dergelijke afwijkingen van de rechte noord-zuidrichting van de magnetisatie ontstaan door fabricage-onnauwkeurigheden. Er zijn verschillende kwaliteiten magneten verkrijgbaar, die elk een verschillende maximale afwijking in magnetisatie-richting en kosten hebben. Hoe kleiner deze maximale afwijking, hoe hoger de kosten van de magneet.

In dit voorbeeld worden berekeningsresultaten weergegeven voor hetzelfde systeem als besproken op de vorige pagina, maar nu met een hogere magneetkwaliteit. Deze keer met een maximale afwijking van de magnetisatie-richtingshoek van 3 graden in plaats van 6 graden. Zoals te zien is, zijn de drempeloverschrijdingsbereiken nu aanzienlijk kleiner geworden. Meer bepaald is het drempelwaardebereik voor $B_{1 \rightarrow 2}$ verkleind van ongeveer 2,0mm (-0,6mm \rightarrow 1,4mm) voor een magneet met een maximale afwijking van de magnetisatie-richting van 6° tot ongeveer 1,3mm (-0,3mm \rightarrow 1,0mm) voor een magneet met een maximale afwijking van de magnetisatie-richting van 3° . Evenzo is het grenswaardebereik voor $B_{2 \rightarrow 1}$ verlaagd van ongeveer 1,9mm (-0,6mm \rightarrow 1,3mm) voor een magneet met een maximale afwijking van de magnetiseringsrichting van 6° tot ongeveer 1,2 mm (-0.3mm \rightarrow 0.9mm) voor een magneet met een maximale afwijking van de magnetiseringsrichting van 3° .

Conclusie

Magneet-Halsensor combinaties worden in veel industriële systemen aangetroffen voor contactloze nabijheidsdetectie, positie- en snelheidsdetectie. Goudsmit kan het ontwerp van deze systemen ondersteunen door middel van een op finite-element modellering (FEM) gebaseerde aanpak. Hiermee kan het systeem vroeg in de ontwerpfase in een simulatie-omgeving getest en geoptimaliseerd worden. Dit helpt om de ontwikkelingskosten aanzienlijk te verlagen door het vermijden van talloze tests met echte magneten.

De Goudsmit FEM-aanpak voor het ontwerpen van magneet-Hall-sensorsystemen is in deze white paper beschreven en met voorbeelden van schakeltype Hall-sensoren zijn de eigenschappen ervan geïllustreerd. Recentelijk heeft Goudsmit deze aanpak uitgebreid om ook rekening te houden met systeemparameteronzekerheden, zoals gekwantificeerd door toleranties op magneetkarakteristieken, sensorkarakteristieken en relatieve afstand tussen magneet en sensor. Deze aanpak kan worden gebruikt om een robuuster ontwerp te verkrijgen, dat leidt tot een striktere naleving van de systeemspecificaties en lagere faalpercentages. Het belangrijkste kenmerk van deze robuuste ontwerpbenadering is dat door gebruik te maken van Goudsmits kennis van magneten, slimme keuzes kunnen worden gemaakt ten aanzien van de simulaties. Hierdoor wordt de totale simulatietijd, en daarmee de productontwikkelingstijd, aanzienlijk verkort.

Referenties

- [1] Leskens, M. & 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 calculaties voor magneetfilters (staal):
<https://youtu.be/97RcfKic3y8>

FEM calculaties voor magneetfilters (roestvrijstaal deeltjes):
<https://youtu.be/OOaClbPLxCs>



Door Martijn Leskens
FEM specialist

ml@goudsmit.eu

Wilt u meer lezen over FEM calculaties van Goudsmit?

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

Petunialaan 19
5582 HA Waalre
The Netherlands
goudsmitmagnets.com