

Robust and Low Cost Motor Speed Measurement

Optimierung der Sensorperformance in Kundensystemen

Dipl.-Ing. Arno Erzberger (T.H.)

ONRASens – Sensortechnologieberatung Erzberger, 92224 Amberg, Deutschland

Zusammenfassung

In vielen Bereichen der Antriebstechnik ist die Messung der Drehzahl notwendig. Klassisch wird ein Sensor für eine Regelung, ein Messgerät oder eine notwendige/vorgeschriebene Erfassung von Messwerten benötigt. Beispielsweise bei Asynchronmaschinen in der Fahrzeugtechnik, lässt sich anhand der elektrischen Parameter und der Drehzahl der Betriebsbereich des Kippmomentes vermeiden. An anderer Stelle muss die Drehzahl geregelt werden oder weitere zusätzliche Informationen bereitgestellt werden. Viele Antriebsmotoren werden nur gesteuert betrieben und beinhalten somit keine Drehzahlmessung oder es werden sehr aufwändige und kostenintensive Winkelerfassungssysteme integriert. Oft und bei der richtigen Auslegung, genügt ein einfacher, magnetischer Drehzahlsensor, der bei einer professionellen Auslegung, auch weitere Informationen, wie: Drehrichtung, Diagnosefunktion, Referenzposition, Winkelposition oder sogar sekundäre Größen, wie dynamisches Drehmoment liefert. Mit Wissen über die Ausfallrate und der Diagnosetiefe ist eine Integration in die Funktionale Sicherheit des Gesamtproduktes möglich. Hier soll nun die praxiserichte optimierte Auslegung eines Drehzahlerfassungssystems auf Basis von verfügbaren magnetischen Standardsensoren dargestellt werden, sowie zusätzliche Eigenschaften, von Baureihenkompatibilitäten bis hin zur Drehmomentmessung.

1. Einführung

Moderne magnetische Drehzahlsensoren basieren z.B. auf Hall-, GMR- oder TMR-Technologie. Zum einfacheren Verständnis beschränken wir uns hier auf Differenzhalltechnologie in Ein-Chip-Bauweise mit Back-Bias-Magnet (Abb. 1). Für die weiteren Kapitel wird einmal ein marktüblicher Differenzhall-Drehzahlsensor in gehäuseter Form mit 2-Draht PWM-Stromschnittstelle (**kurz: Sensor digital**) verwendet, sowie ein individuell erstellter Prototypenaufbau bestehend aus Magnetkreis und analogem Differenzhall-Ausgangssignal (**kurz: Sensor analog**)

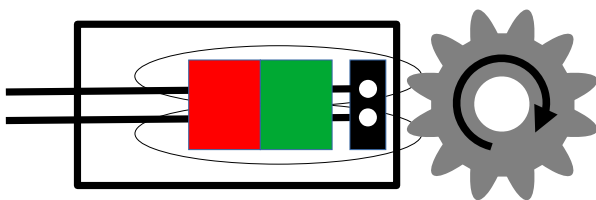


Abb. 1: Prinzipdarstellung Differenzhall Drehzahlsensor (Magnet, Differenzhallchip, Geberrad). [1]

Wesentlich bei der Gesamtbetrachtung der Untersuchungen ist, dass das Sensorsystem immer aus dem Sensor und dem Geberrad besteht. Sensor und Geberrad werden über die magnetischen Eigenschaften gekoppelt. Somit ist die Sensorperformance immer mit den physikalischen Geberradeigenschaften verbunden (Abb. 2). Eine

Beschreibung der Sensoreigenschaften ist nur in der Kombination Sensor-Geberrad oder Sensor-Geberradeigenschaften sinnvoll.

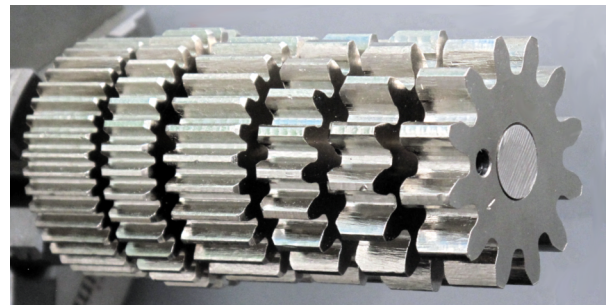


Abb. 2: Unterschiedliche Geberräder (Evolvente mit Moduln 1-3). [1]

2. Das Sensorsystem

Somit betrachten wir eine Differenzhallsensoranordnung mit Magnetkreis und weichmagnetischem Geberrad (Zahnrad).

Die Messgröße des Sensorsystems ist die zeitliche Abbildung der Zahn-Lückenfolge als elektrisches Ausgangssignal. In Form von einfachen Logikinformationen High und Low oder als Analogsignal. Mit beiden Signalen wird die magnetische Abbildung des Geberrades in elektrischer Form dargestellt (Abb. 3). Die primäre Messgröße ist

die Drehzahl, weitere Messgrößen können z.B. Drehrichtung, Referenzposition oder Winkellage darstellen.

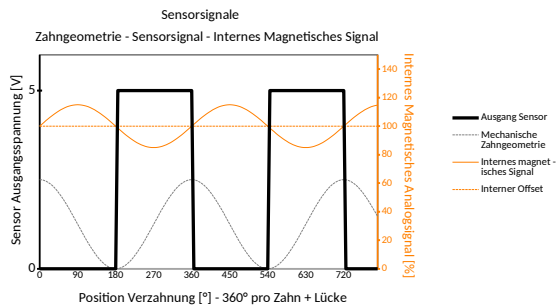


Abb. 3: Beispielhafte Signalverläufe eines Differenzhallsensors (TTL-Ausgangssignal, internes magnetisches Signal, mechanische Zahngeometrie). [1]

2.1 Messgrößen

Die Drehzahl wird aus der elektrischen Zahnfrequenz und der bekannten Zähnezahls des Geberrades ermittelt. Die Drehrichtungsinformation wird bei vielen Drehzahlsensoren als Zusatzinformation ausgegeben. Referenzpositionen werden durch Referenzmarken im Geberrad abgebildet und Winkelpositionen werden durch eine Referenzmarke im Geberrad als Triggerereignis und Zählen von Folgeelementen dargestellt. Positionen innerhalb der Elemente werden auf Basis der bekannten Drehzahl und zeitlicher Interpolation ermittelt.

Folgende Größen beschreiben das wesentliche Systemverhalten der Sensoren (Tab. 1, Messgrößen und Eigenschaften):

Größe	Einheit
Drehzahl	[Hz]
Drehrichtung	[-]
Grenzluftspalt	[mm]
Grenzfrequenz	[Hz]
Flankenjitter	[°] oder [s]

Tab. 1: Messgrößen und Eigenschaften

Die Messgrößen sind die Drehzahl und die Drehrichtungsinformation. Die wesentlichen Eigenschaften werden durch den maximalen Sensorabstand, die maximale Zahnfrequenz und den Flankenjitter dargestellt.

Somit lassen sich die wesentlichen Eigenschaften des Sensorsystems mit dem Grenzluftspalt und dem Flankenjitter beschreiben, wenn die Eigenschaft Grenzfrequenz erfüllt wird.

Der Grenzluftspalt beschreibt den maximalen Luftspalt zwischen Sensor und Geberrad, bei dem die Anforderungen noch erfüllt sind. Der Flankenjitter (Abb. 4) beschreibt die zeitliche oder geometrische Toleranz der Signalflanken.

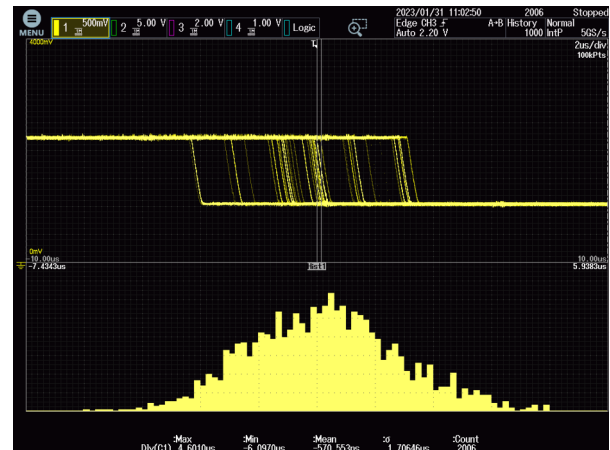


Abb. 4: Beispielhafte Flankenjittermessung, gemessen mit Sensor digital (Flankenjitter einer fallenden Flanke mit gaußähnlicher Verteilung). [2]

Bei einer reinen Drehzahlmessung ist der Grenzluftspalt die Hauptgröße. Sobald jedoch Positionsinformationen im System verarbeitet werden sollen, tritt neben dem Grenzluftspalt, auch der Flankenjitter in den Fokus.

3. Abstimmung Sensor mit dem Geberrad

Der Sensor wird im wesentlichen durch den Hallplattenabstand des Chips und den Magnetkreis mit Back-Bias Magnet beschrieben. Der Hallplattenabstand auf dem Chip bestimmt die Ortsauflösung des Sensors, der Magnetkreis stellt den magnetischen Rahmen für die Sensorfunktion dar.

3.1 Ortsauflösung angelehnt an Nyquist

Angelehnt an Nyquist, kann die einfache Aussage getroffen werden, dass die Zahnteilung des Geberrades mindestens doppelt so lang sein muss wie der Hallplattenabstand (Abb. 5). Dies ergibt somit einen ersten Schätzer für die untere Grenze. Da die magnetische Abtastung jedoch nicht punktförmig ist, sondern eine Ausdehnung (Abb. 6) in beide Richtungen hat, gilt für eine optimale Zahnteilung ein Wert von größer 2. Wird die Zahnteilung jedoch sehr groß, sinkt die Signalsteigung im Nulldurchgang durch das Hallelement bis hin zur Plateaubildung und es kann zu sehr hohem Signaljitter oder sogar zu Fehlimpulsen kommen. Deshalb wird für die Geberradteilung ein Bereich von 2- bis maximal 3-4-fachen Hallplattenabstand empfohlen. In diesem Bereich kann

für ein Feinauslegung optimiert werden. Die optimale Auslegung liegt häufig im Bereich von 2,5 bis 3,5.

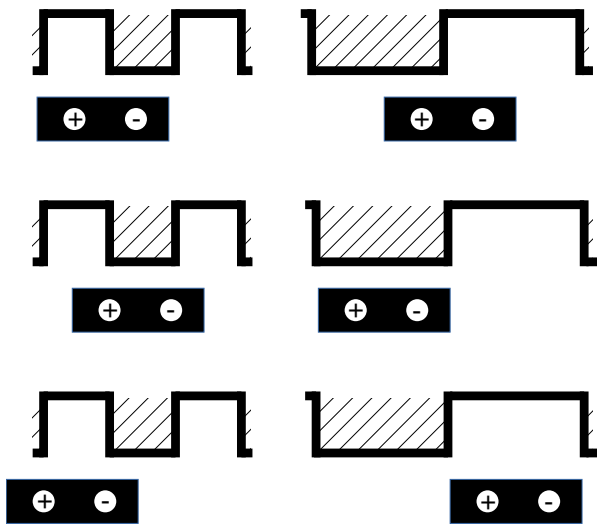


Abb. 5: Beispielhafte Darstellung der Ortsauflösung am Geberrad (links Zahnteilung 2x Hallplattenabstand, rechts Zahnteilung 4x Hallplattenabstand, oben maximales Differenzsignal, mitte/unten Differenzsignal ≈ 0). [1]



Abb. 6: Symbolische Darstellung der Ortsauflösung am Geberrad mit vereinfachter räumlicher Ausdehnung (orange).

3.2 Flankenjitter

Der Flankenjitter ist für die reine Drehzahlmessung nicht wesentlich, jedoch sollte der Einfluss auf die Drehzahlgenauigkeit überprüft und abgesichert werden.

Da der Flankenjitter (Tab. 2) jedoch von vielen Faktoren, wie Luftspalt, Temperatur, geometrische Toleranzen und weiteren Faktoren abhängig ist, muss der Flankenjitter bei einer Positionsmessung auf Basis von Drehzahlsensoren mit berücksichtigt und untersucht werden.

Luftspalt [mm]	Jitter $\pm \sigma$ [μ s]	Jitter $\pm 5 \sigma$ [μ s]	Jitter $\pm 5 \sigma$ [°]
0,5	0,137	0,685	0,0114
1,5	0,645	3,23	0,0538
2,5	1,71	8,55	0,143

Tab. 2: Beispielhafte Flankenjittermesswerte mit Sensor digital, Messung ähnlich Abb. 2 (stark vom Luftspalt abhängig). [2]

4. Grenzluftspalt

Der Grenzluftspalt oder auch Maximalluftspalt gibt an, bis zu welchem Luftspalt zwischen Sensor und Geberrad, die spezifikationsgerechte Funktion sichergestellt ist. Dies kann sich auf die vollständige Anzahl der Signalflanken, wie auch auf den Wert des Flankenjitters beziehen. Somit gilt es, in der Auslegung, den maximalen Grenzluftspalt zu erreichen. Ein optimaler Grenzluftspalt ist somit eine wesentliche Voraussetzung für eine weitere Optimierung des Sensorsystems. Bei einem optimalen Grenzluftspalt sind die analogen Signalamplituden im Hallchip maximal, sowie die Nulldurchgänge steil. Dies ergibt einen minimalen Flankenjitter und ist eine gute Voraussetzung für eine Positionsmessung mit dem Drehzahlsensor.

4.1 Einfache Grenzluftspaltbestimmung

Ein einfacher Weg zur Grenzluftspaltbestimmung ist es, den Luftspalt der Sensorgeberradkombination derart zu vergrößern, bis ein Signalverlust am Sensorausgang entsteht. Auf diese Art kann ermittelt werden bis zu welchem Luftspalt eine Messung möglich ist. Jedoch sind hier die internen Signale im Sensorchip nicht ersichtlich und es kann zu Signalfehlern kommen, speziell bei unbekanntem oder neuartigen Geberradgeometrien.

4.2 Magnetischer Signalhub im Sensorchip

Mit dem analogen magnetischen Signalhub (Abb. 6) kann eine genauere Betrachtung des Grenzluftspaltes durchgeführt werden, weil hier der Signalhub mit den Schwellen im Chip verglichen werden kann und die Aussage kann direkt auf das Schaltverhalten bezogen werden.

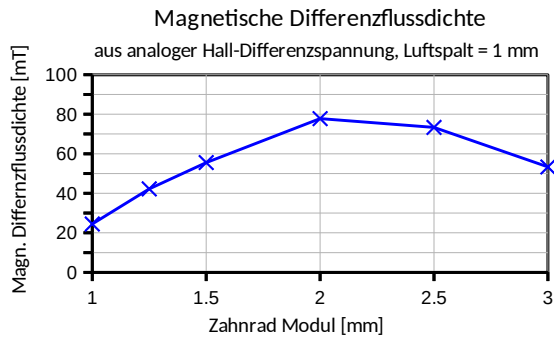


Abb. 7: Analoge magnetische Differenzflussdichtemessung mit **Sensor analog** (bei 1 mm Luftspalt über die Moduln 1-3 (Abb. 2)). [1]

4.3 Magnetische Signalgeometrie im Sensorchip

Wenn neben dem magnetischen Signalhub auch noch der analoge Signalverlauf zur Verfügung steht, kann auch die Lage und die Steigung des Signals im Nulldurchgang bestimmt werden und unerwünschte Signalformen ausgeschlossen werden.

Beispielhaft wurde ein Prüfgeberrad mit unterschiedlichen Lückenlängen mit **Sensor analog** vermessen (Abb. 8). Die Amplituden- und die Zeitbasis sind hier nebensächlich und zur besseren Übersichtlichkeit nicht angegeben.

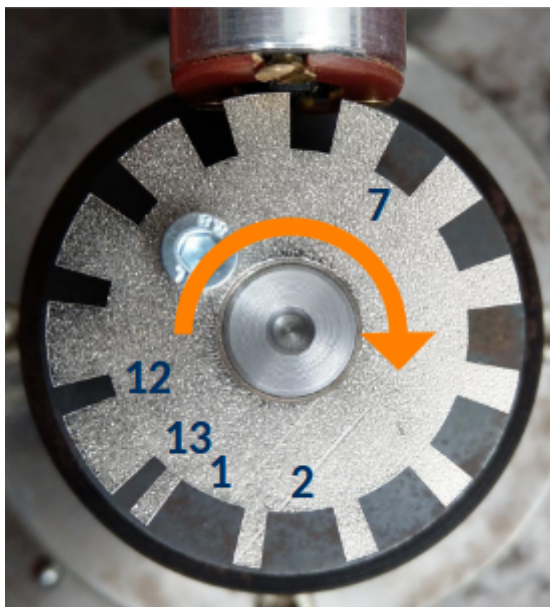


Abb. 8: Prüfgeberrad mit unterschiedlicher Zahngeometrie (Lücken Nr. 1 bis Nr. 13). Drehrichtungspfeil (orange) und **Sensor analog** (oben).

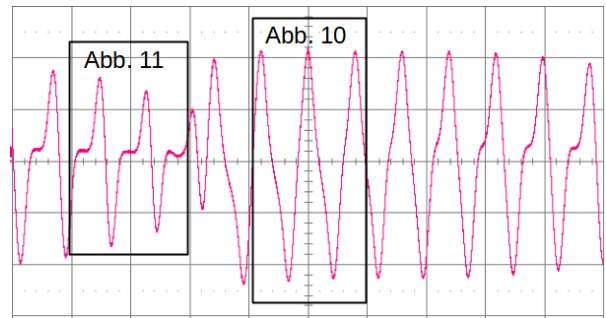


Abb. 9: Differenzflussdichte gemessen mit **Sensor analog** (bei 0,5 mm Luftspalt über die Lücken 1 - 13 (Abb. 8)).

Abbildung 9 zeigt den Signalverlauf über eine vollständige Umdrehung des Prüfgeberrades bei Luftspalt 0,5 mm. Abbildung 10 zeigt den Verlauf der Differenzflussdichte in Lücke 3, der hier gleichzeitig den günstigsten Verlauf, mit steilen Nulldurchgängen und hoher Signalamplitude zeigt und somit einen minimalen Flankenjitter des Digitalsignales aufweisen wird.

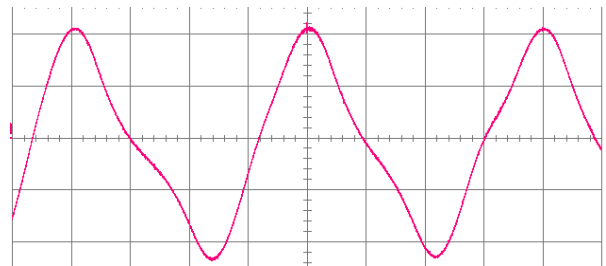


Abb. 10: Differenzflussdichte gemessen mit **Sensor analog** (bei 0,5 mm Luftspalt Lücke 3 (Abb. 8)).

Abbildung 11 zeigt den Verlauf der Differenzflussdichte in Lücke 12, der hier gleichzeitig den ungünstigsten Verlauf, mit flachen Nulldurchgängen, Plateau-Anteil und geringer Signalamplitude zeigt und somit einen erhöhten Flankenjitter, bis hin zu auftretenden Fehlimpulsen des Digitalsignales führen kann.

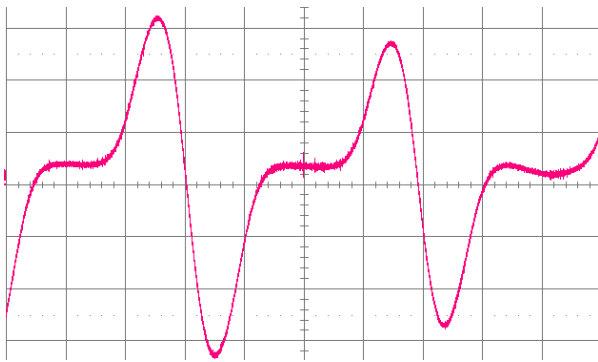


Abb. 11: Differenzflussdichte gemessen mit **Sensor analog** (bei 0,5 mm Luftspalt Lücke 12 (Abb. 8)).

5. Praxisgerechte Sensorsystemauslegung

Nach der detaillierten Beschreibung der doch recht komplexen Zusammenhänge, kann mit einer einfachen aber systematischen Auslegung eine praktikable Vorgehensweise durchgeführt werden.

- Anhand der Systemanforderungen Sensoren vorauswählen
- Die Verzahnungsgeometrie der Geberräder auf die Ortsauflösung des Sensors abstimmen oder passende Sensoren für eine feste Verzahnungsgeometrie auswählen.
- Grenzluftspaltmessungen durchführen:
 - a) Digitaler Signalabbruch oder
 - b) Analoges Signalhub oder
 - c) Analoges Signalhub und Signalform

6. Standardisierung und Baureihenbildung

Nach der Sensorsystemauslegung steht der Weg für eine mögliche Standardisierung und Baureihenbildung offen. Nachdem der Sensor technisch und kaufmännisch optimiert wurde und die Systemauslegung auf eine Geberradgeometrie durchgeführt wurde, kann der Sensor für unterschiedliche Baureihen und Produkte eingesetzt werden. Das Geberrad kann nun in den Parametern, an neue Applikationen angepasst werden, die die Funktion des Sensorsystems nicht beeinflussen: z.B. verschiedene Geberraddurchmesser, Radbreiten, mechanische Radschnittstellen uvm. Es genügt somit eine Sensor-Geberradgeometrieauslegung um eine vollständige Standardisierung und Baureihenbildung

durchzuführen. Mit den weiteren Freiheitsgraden können nun weitere Geberradformen konstruiert werden. Eine einfache Funktionsprüfung kann die neue Geberradform absichern.

7. Höherwertige Funktionen

Mit dem Wissen über das Sensorsystemverhalten sind nun auch zusätzliche höherwertige Sensoranwendungen möglich. Mit einer optimierten Geberradgeometrie und Wissen über den Flankenjitter der Drehzahlsensoren, kann ein kostengünstiger und robuster Drehmomentsensor (Abb. 12 und 13) aufgebaut werden. Voraussetzung ist ein im System vorhandener Wellenteil, der als elastisches Torsionselement verwendet werden kann. Durch die Messung der Drehzahl am Welleneingang und der Messung am Wellenende, kann über den Phasenversatz der Drehzahlsignale, die Wellenverdrehung und somit das dynamische Drehmoment in der Welle gemessen werden.

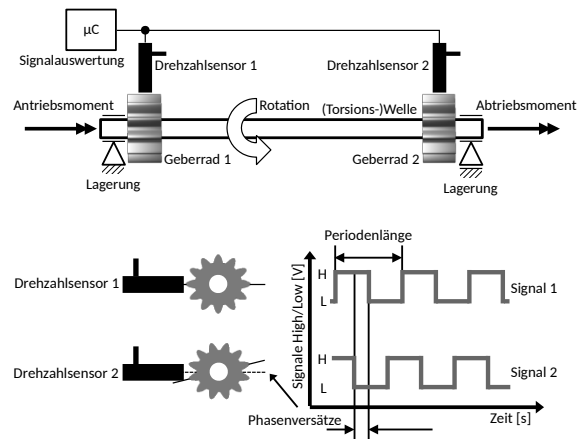


Abb. 12 und 13: Drehmomentmessverfahren auf Basis zweier Drehzahlsensoren und Auswertung des Phasenversatzes bei bekannter Torsionssteifigkeit. [3]

8. Zusammenfassung und Ausblick

Die Drehzahlmessung mit verfügbaren magnetischen Sensoren ist sehr einfach und kostengünstig. Somit lässt sich ein Drehzahlsensor leicht ins System integrieren. Mit der richtigen Auslegung des Sensorsystems ist die Genauigkeit sehr hoch und kann in vielen Fällen mit deutlich teureren und größeren Messsystemen mithalten.

Wesentlich ist die Erkenntnis, dass das Sensorsystem aus Sensor und Geberrad besteht und beide eine wesentliche Rolle übernehmen und die Eigenschaften stark beeinflussen. Der Grenzluftspalt und der Flankenjitter sind die primären Größen für die Sensorsystemauslegung. Eine optimale Abstimmung der Ortsauflösung des Sensors mit dem Geberrad ergibt

hohe Luftspalte und einen geringen Jitter. Mit dieser optimierten Auslegung können sogar höherwertige Messaufgaben, wie Positions-, Winkel- oder Drehmomentmessungen durchgeführt werden.

Bei Applikationen mit wenig mechanischen Toleranzen, wie z.B. die Drehzahlmessung an E-Maschinen in der Nähe der Lagerung, kann auch mit einer vereinfachten Systemauslegung schnell und kostengünstig eine robuste Sensorlösung entwickelt werden.

In vielen Fällen ist die Sensorauslegung mit wenig Aufwand verbunden und Erkenntnisse hieraus, können für weitere Applikationen übernommen werden. So dass für eine umfangreiche Produktpalette nur ein oder wenige Sensortypen notwendig sind. In vielen Fällen sind aufwändige Messsysteme nicht notwendig, wenn die volle Leistungsfähigkeit von magnetischen Drehzahlsensoren ausgenutzt wird. GMR- und TMR-Sensoren verfügen oft über einen höheren nutzbaren Luftspaltbereich und können die Leistungsfähigkeit weiter verbessern.

Literatur

- [1] A. Erzberger, Doppelter Luftspalt, Fachzeitschrift Elektronik 05/2022, Weka Fachmedien
- [2] A. Erzberger, Der 4. Frühling – Robuster Prüfstand mit neuer Messtechnik, Hausmagazin #67, Yokogawa 2023
- [3] A. Erzberger, Der unsichtbare Drehmomentsensor, Fachzeitschrift Elektronik 09/2022, Weka Fachmedien
- [4] A. Erzberger, Kippen oder nicht kippen, Fachzeitschrift Elektronik 22/2022, Weka Fachmedien