

Kontaktlose, hochpräzise Positionssensorik mit Hall- und TMR-Technologien

V1.0

Inhalte

Positionssensorik im Wandel	4
Technologische Grundlagen: Funktionsprinzipien – Hall vs.TMR	4
Störfeldkompensation bei Hall- und TMR-Sensoren	6
Technologieempfehlung nach Anwendungskontext	7
Fazit und Handlungsempfehlung	8

Autoren

Frederik Berstecher, Product Line Manager – Fast Hall Sensors bei TDK-Micronas
Marcus Meyer, Head of Project Engineering bei TDK Corporation – Japan



Sensorik mit Weitblick –

Wie TDK-Micronas und Rutronik die Zukunft der Positionsmessung gemeinsam gestalten

Die Anforderungen an moderne Positionssensorik steigen rasant, insbesondere im Umfeld sicherheitskritischer Automotive-Anwendungen wie Brake-by-Wire, elektrische Parkbremsen oder Lenksysteme. Mit dem Wandel zur Elektromobilität und der zunehmenden Systemintegration rücken Genauigkeit, Bauraum, EMV-Stabilität und Materialverfügbarkeit immer stärker in den Fokus.

Das Whitepaper „Kontaktlose, hochpräzise Positionssensorik mit Hall- und TMR-Technologie“ bietet einen fundierten Vergleich zwischen Hall- und TMR-Technologie sowie einen praxisnahen Leitfaden zur Auswahl der passenden Sensorarchitektur. Denn die Entscheidung für die richtige Technologie ist hochgradig anwendungsspezifisch. Ob robuste Hall-Sensoren, hochpräzise TMR-Varianten oder hybride Architekturen mit maximaler Redundanz: Im Whitepaper erfahren Sie, wie sich Safety- und Performance-Ziele optimal vereinen lassen.

Partnerschaft mit regionaler Stärke und europäischer Perspektive

TDK-Micronas und Rutronik, beide mit Hauptsitz in Baden-Württemberg und tief verwurzelt im europäischen Elektronikmarkt, bündeln ihre Expertise, um Kunden entlang der gesamten Supply Chain zu unterstützen. Die langjährige Partnerschaft basiert auf Innovationskraft, Nähe zum Automotive-Sektor und einem tiefen Verständnis für die Anforderungen in der Entwicklung von zukunftsweisenden Mobilitätsanwendungen.

TDK ist ein führender Anbieter von Positionssensoren auf Hall- und TMR-Basis und bringt nicht nur technologisches Know-how, sondern auch ein breites Portfolio an Referenzdesigns und Design-In-Support ein. Für Rutronik ist diese Partnerschaft ein strategischer Baustein, um Kunden mit leistungsfähigen, skalierbaren und zukunftssicheren Sensoren „Made in Europe“ zu versorgen. In einem zunehmend herausfordernden geopolitischen Umfeld stärkt diese Partnerschaft gezielt die Resilienz und Handlungsfähigkeit innerhalb globaler Lieferketten.

Manuel Gauß

Senior Manager Product Marketing
Analog & Sensors bei Rutronik

Jeannette Raquet

Line Managerin für TDK-Micronas
bei Rutronik

Positionssensoren auf Hall- oder TMR-Basis sind in der Automobilindustrie weit verbreitet.

Doch was genau ist der Unterschied zwischen diesen Technologien – und wann lohnt sich ihre Kombination?

Die Nachfrage nach hochpräziser und robuster Positionssensorik für sicherheitskritische Anwendungen, wie Brake-by-Wire, elektrische Parkbremsen oder Lenksysteme, steigt rasant. Insbesondere im Umfeld der Elektromobilität und zunehmender Systemintegration werden hohe Anforderungen an Genauigkeit, Bauraum, Sicherheit und Materialverfügbarkeit gestellt. Hall- und TMR-basierte Sensoren bieten unterschiedliche Vorteile in Bezug auf Empfindlichkeit, Störsicherheit und Systemkosten. In diesem Whitepaper werden beide Technologien verglichen und es wird aufgezeigt, wie sich beide kombinieren lassen, um Safety- und Performance-Ziele gleichermaßen zu erfüllen.

Positionssensorik im Wandel

Die zunehmende Elektrifizierung von Fahrzeugsystemen – beispielsweise von Aktuatoren, Brake-by-Wire oder EPS – erfordert hochauflösende und funktional sichere Sensorlösungen. Neben einer hohen Winkelaufösung und geringen Latenz muss auch ein zuverlässiger Betrieb unter rauen Umweltbedingungen, wie beispielsweise Temperaturbelastung und elektromagnetische Störungen (EMV), gewährleistet sein. Hinzu kommen steigende Anforderungen an die funktionale Sicherheit (z.B. ASIL-D), die Diagnosefähigkeit, die Systemredundanz und die Energieeffizienz.

Auch die Integration gewinnt an Bedeutung: Kompakte Baugruppen und PCB-less-Designs erfordern flexible Montagekonzepte. Parallel dazu rückt die Magnetwahl stärker in den Fokus, da Ferritmagnete zunehmend als wirtschaftlich attraktive Alternative zu seltenen Erden gelten.

TDK entwickelt und produziert für diese Anforderungen passende Lösungen auf Basis von Hall- und TMR-Technologie. Um das Potenzial dieser Lösungen besser zu verstehen, lohnt sich ein Blick auf die physikalischen Prinzipien und Unterschiede der beiden Ansätze.

Technologische Grundlagen: Funktionsprinzipien – Hall vs. TMR

Hall-Effekt-Sensoren basieren auf dem klassischen physikalischen Prinzip, dass in einem stromdurchflossenen Halbleiter eine Spannung quer zur Stromrichtung entsteht, wenn ein Magnetfeld senkrecht dazu einwirkt. Die bei TDK-Micronas, ein Unternehmen der TDK-Gruppe, eingesetzten vertikalen Hall-Platten ermöglichen die Detektion von Magnetfeldern in der Chip-Ebene. Dies bringt gegenüber klassischen „horizontalen“ Designs Vorteile bei der Geometrie, Störfeldunempfindlichkeit und Signalqualität. Durch die geschickte Anordnung mehrerer Hall-Elemente können sowohl lineare als auch rotatorische Bewegungen präzise abgebildet werden – sogar in drei Dimensionen (multidimensionaler Hall-Sensor).

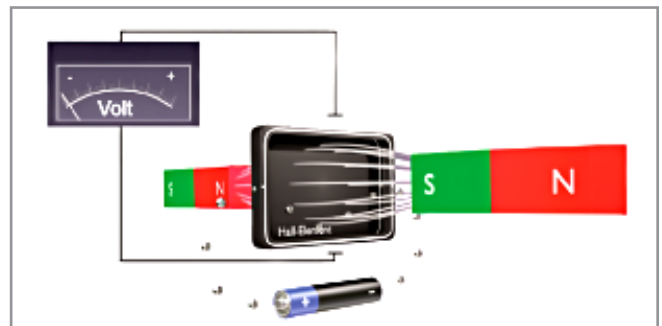


Abbildung 1: Messprinzip Hall-Sensor

TMR-Sensoren (Tunnel Magneto Resistance) nutzen den quantenmechanischen Effekt des Tunnelns von Elektronen durch eine dünne Isolationsschicht zwischen zwei ferromagnetischen Schichten. Die Widerstandsänderung dieser Struktur hängt vom Winkel der Magnetisierungsrichtungen beider Schichten zueinander ab.

TDK verwendet präzise gefertigte Dünnschicht-Stacks, um höchste Empfindlichkeit und Genauigkeit zu erreichen. Diese Technologie eignet sich ideal für hochauflösende Winkelmessungen mit minimalem Rauschen, für die keine externe Signalverstärkung erforderlich ist.

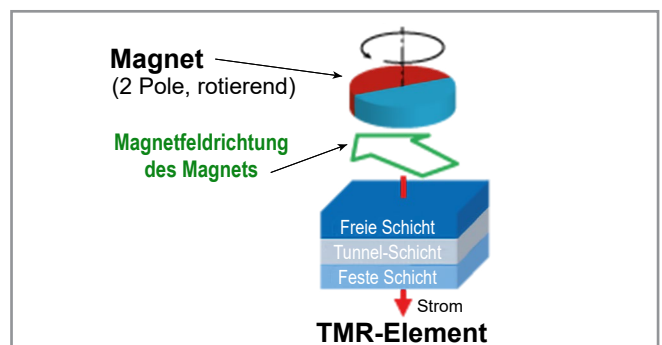


Abbildung 2: Messprinzip TMR-Sensor

Beide Technologien haben Vor- und Nachteile. Hall-Sensoren überzeugen durch ihre hohe Robustheit, eine etablierte CMOS-kompatible Fertigungstechnologie, geringe Kosten und eine gute Integration in Applikationen, die weniger kritische Anforderungen an die Genauigkeit stellen.

Die dreidimensionale Messbarkeit mit entsprechender Signalverarbeitung eröffnet zudem flexible Einsatzmöglichkeiten.

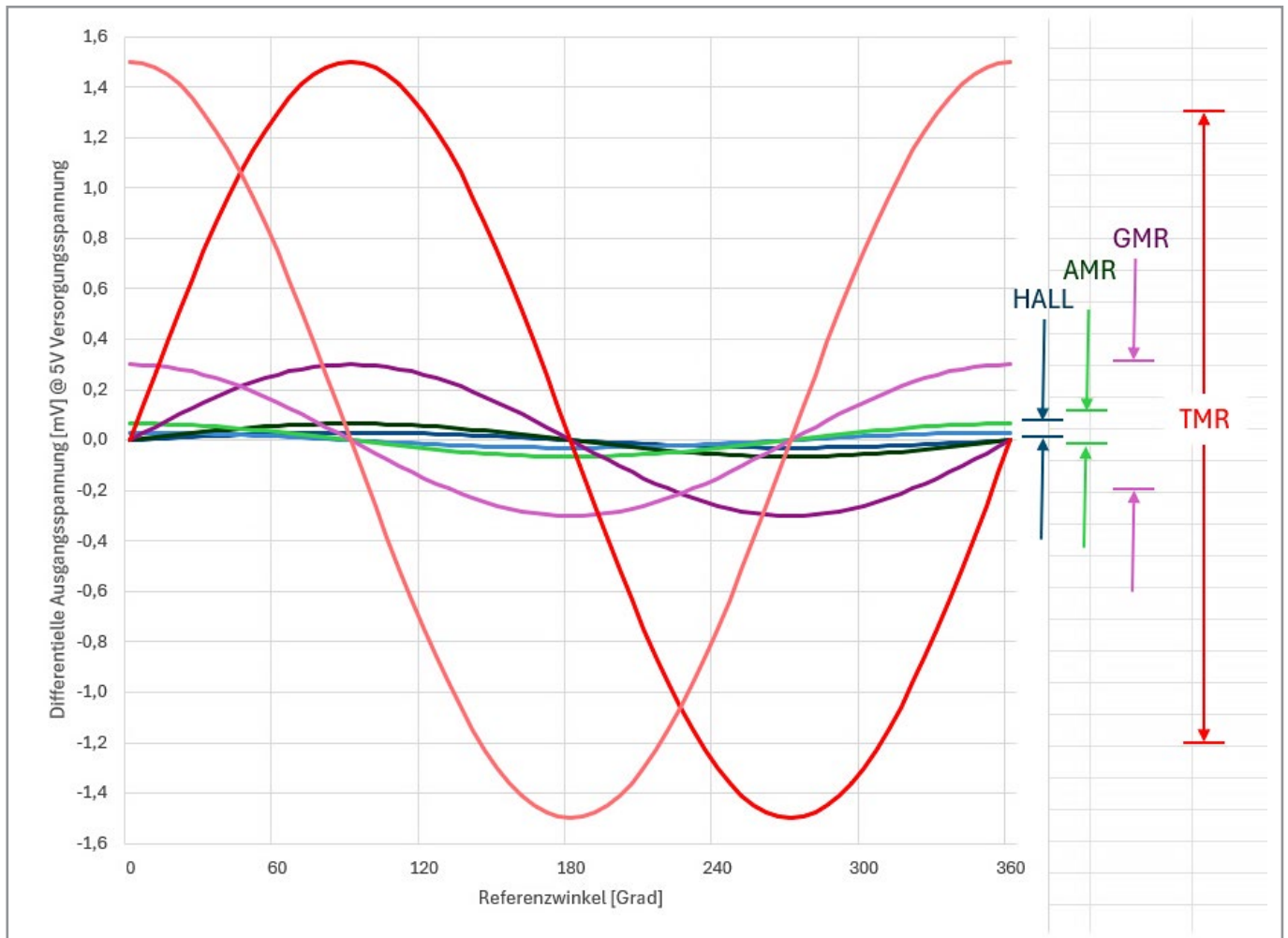


Abbildung 3: Vergleich der Ausgangssignale von Hall- und TMR-Sensoren in Bezug auf die Referenzwinkelposition – dargestellt als differentielle Ausgangsspannung (mV) über dem Winkel (Grad).

TMR-Sensoren bieten eine deutlich höhere Empfindlichkeit und Genauigkeit, insbesondere bei Anwendungen, die eine hohe Winkelauflösung (z. B. $\leq 0,1^\circ$) erfordern (siehe Abbildung 3). Aufgrund ihrer hohen Signalstärke ist keine Vorverstärkung erforderlich, weshalb sie sich ideal für dynamische oder sicherheitskritische Applikationen eignen. Auch die geringe Temperaturdrift spricht für TMR-Sensoren. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die jeweiligen Vorteile der Technologie sowie die vergleichbaren Eigenschaften.

Vorteile 2D-Hall	Vergleichbare Eigenschaften	Vorteile TMR
Intrinsische Störfeldimmunität (mit nur einer Komponente)	Hohe Winkelgenauigkeit auf Systemebene (nach dynamischer Fehlerkompensation)	Hohe Winkelgenauigkeit (nach statischer Fehlerkompensation)
Integrierte Fehlerkompensation mit analogem Sensor (programmierbar)	Kurze Verzögerungszeit und kleine Variation (TMR dominiert durch LP-Filter am Ausgang)	Bestes Signal-Rausch-Verhältnis
Hohe EMV-Robustheit mit analogem Sensor (optimiert für Remote-Setup)	On- und Off-Axis-Messkonfiguration (Hall-Sensor nur für Digital)	Direkter μ C-Anschluss ohne Notwendigkeit eines Verstärkers
Großer Magnetfeld-Betriebsbereich (5 bis 250 mT)	Unterstützung von ASIL-D und Fail-Operational-Systemen	Sehr geringer Stromverbrauch (für diskreten Sensor)
PCB-freie Lösung mit SFI ermöglicht kleinen Formfaktor	Beide Sensortechnologien lassen sich auf Ferrit optimieren	Äußerst kompakte Gehäuse
Hohe Kosteneffizienz (für Sensor +ASIC)		Hohe Kosteneffizienz (für diskreten Sensor)

Tabelle 1: Vergleich zwischen Hall- und TMR-Sensoren. Vorteile der jeweiligen Technologie sowie Gemeinsamkeiten im Überblick.

Der Anwendungsfokus beider Technologien liegt auf Lenkung, E-Motoren, Aktuatoren und Bremsen.

Störfeldkompensation bei Hall- und TMR-Sensoren

Moderne Bremssysteme müssen auch unter elektromagnetischer Belastung zuverlässige Positionsdaten liefern. Dabei beeinflusst die Fähigkeit eines Sensors, externe Magnetfelder zu kompensieren, direkt die Signalqualität und Systemstabilität.

Hall- und TMR-Sensoren verfolgen grundsätzlich unterschiedliche Ansätze zur Störfeldkompensation: Während TMR-Lösungen auf architekturseitige oder anwendungsbezogene Konzepte setzen, unterdrücken Hall-Sensoren Störfelder bereits auf Chip-Ebene.

TMR-Sensoren verfügen zwar inhärent über ein sehr hohes Signal-Rausch-Verhältnis, besitzen aber keine aktive Kompensation auf Chip-Ebene. Bei starken Störfeldeinflüssen benötigen sie daher zusätzliche Kompensationsstrategien über eine geeignete Systemarchitektur (siehe Abbildung 4).

TMR-Sensoren im Stack-Design bieten durch ihre differenzielle Signalverarbeitung eine effektive Lösung zur Störfeldkompensation. Dabei sind zwei Sensoren vertikal gegensinnig auf der Leiterplatte angeordnet. Der Master-Sensor befindet sich in der Nähe des Magneten, der Slave-Sensor auf der gegenüberliegenden Seite. Während das Nutzfeld aufgrund der unterschiedlichen Abstände variiert, wirkt ein externes Störfeld auf beide Sensoren nahezu identisch. Durch die softwareseitige Differenzbildung der beiden Sensorsignale werden diese Störeinflüsse weitgehend eliminiert. Die Differenz der ermittelten Winkelwerte dient dabei direkt als Maß für den Korrekturwert zur Kompensation des Streufeldeffekts. Die Software übernimmt zusätzlich die Signalaufbereitung inklusive Offset- und Gain-Korrektur, Orthogonalitätsabgleich und Winkelberechnung sowie optionale Funktionen wie die Harmonischenkompensation. Auch sicherheitsrelevante Funktionen (FuSa) werden im System realisiert. Dieses Design erfordert keine komplexe Hardware und ermöglicht eine robuste, störfeldtolerante Winkelmessung ohne externe Abschirmung.

Lineare TMR-Sensorpaare ermöglichen durch differenzielle Signalverarbeitung eine intrinsische Störfeldunterdrückung. Typischerweise werden zwei TMR-Zellen seitlich versetzt entlang des Magnetfeldverlaufs in radialen Off-Axis-Konfigurationen positioniert. Die Sensorbrücken sind dabei invers ausgelegt, sodass sich gleichförmige externe Störfelder in beiden Signalen weitgehend gegenseitig aufheben.

Obwohl beide Sensoren das gleiche Störfeld erfassen, unterscheiden sich ihre Nutzfeld-Komponenten aufgrund ihrer relativen Position zum Magneten voneinander. Die Subtraktion der Signale unterdrückt Effekte auf der Signalebene und liefert ein stabiles Differenzsignal, das das reine Nutzfeld repräsentiert. Die Software übernimmt die separate Signalaufbereitung beider Kanäle – einschließlich Offset- und Gain-Korrektur, Orthogonalitätskompensation und Winkelberechnung.

Dieses Verfahren ist besonders geeignet für Anwendungen mit dynamischen Magnetfeldverläufen und hoher EMV-Belastung und bietet eine hohe Genauigkeit bei minimalem Hardwareaufwand.

Lineare TMR-Sensoren mit differenzieller Auswertung bieten eine robuste Lösung zur Störfeldkompensation, die sowohl hardwareseitig als auch über modellbasierte Software realisiert werden kann. Dazu werden zwei XY-sensitive TMR-Zellen so angeordnet, dass sie sowohl das Nutzfeld als auch gleichartige homogene externe Störfelder erfassen. Differenzverstärker subtrahieren die Signale beider Sensoren ($U_{x1}-U_{x2}$, $U_{y1}-U_{y2}$), wodurch sich feldbedingte Offsets wirksam herausfiltern lassen. Die Software übernimmt die weitere Signalaufbereitung – etwa die Korrektur von Offset, Gain und Orthogonalität sowie die Winkelberechnung.

Zusätzliche Funktionen wie die Kompensation von Harmonischen und funktionale Sicherheitsüberwachung (FuSa) können bei Bedarf implementiert werden, sind aber nicht zwingend erforderlich. Bei Anwendungen mit applikationsbedingter Asymmetrie, die beispielsweise durch die Einbaulage oder Temperatureffekte verursacht wird, kann zudem eine modellbasierte Feldkompensation im Steuergerät erfolgen. Diese nutzt ein zuvor kalibriertes Systemmodell, um verbleibende Abweichungen zu korrigieren. Diese Methode ist sehr flexibel, erfordert jedoch eine Validierung auf Komponenten- oder Fahrzeugebene. Das Ergebnis ist ein hochgenaues, störfeldstabiles Sensorsignal bei minimalem Hardwareaufwand.

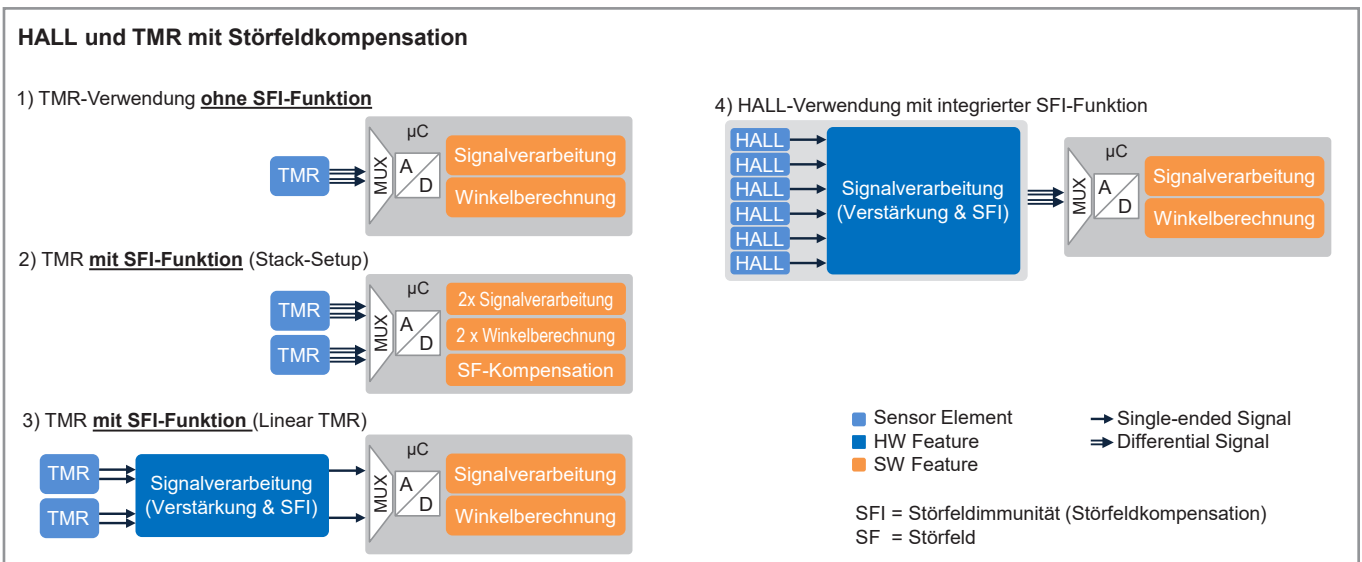


Abbildung 4: Übersicht der Störfeldkompensationsstrategien für Hall und TMR

Die **Hall-Sensoren** der HAL 302x-Serie verfügen über eine integrierte Störfeldkompensation direkt auf Chip-Ebene. Grundlage hierfür ist eine hexagonale 6ZD-Zellenstruktur mit sechs symmetrisch angeordneten Hall-Elementen, deren Signale intern differenziell ausgewertet werden. Dadurch lassen sich homogene externe Magnetfelder – wie sie durch Gleich- oder Wechselstreufelder entstehen – bereits im Sensor selbst rechnerisch unterdrücken. Die Signalverarbeitung erfolgt vollständig innerhalb des Chips. Über eine Sin/Cos-Transformation werden Ziel- und Störfeld voneinander getrennt. Verstärkung, Offset, Orthogonalität und Nullindex sind programmierbar. So entsteht ein hochgenaues, störfeldkompensiertes Ausgangssignal, das die Anforderungen gemäß ISO 11452-8 bereits auf Komponentenebene erfüllt – ganz ohne externe Abschirmung oder Kalibrierung. Auch unter ungünstigen Bedingungen wie kleinen Luftspalten oder

einer asymmetrischen Magnetanordnung bleibt das Signal stabil. Typische Restfehler bei Störfeldern von 4.000 A/m liegen unter 0,1°. Zusätzlich sind FuSa-Funktionen (funktionale Sicherheit) integriert, die eine erweiterte Diagnoseabdeckung bieten und die externe Sicherheitsüberwachung auf Steuergeräteebene vereinfachen. Die Software übernimmt neben der Winkelberechnung auch die optionale dynamische Fehlerkompensation für höchste Messgenauigkeit.

Ferritmagnete sind eine wirtschaftliche und gut verfügbare Alternative zu NdFeB-Magneten. Sowohl Hall- als auch TMR-Sensoren lassen sich darauf optimieren. Ihre Vorteile sind unter anderem die Unabhängigkeit von Seltenen Erden, eine hohe Temperaturstabilität und Kostensicherheit. Die geringere Magnetfeldstärke kann durch Systemkalibrierung oder Signalverstärkung ausgeglichen werden.

Technologieempfehlung nach Anwendungskontext

Die Auswahl der richtigen Sensortechnologie für Positionsmessung und Automobilanwendungen erfordert eine sorgfältige Bewertung technischer und normativer Anforderungen wie Genauigkeit, EMV-Robustheit, Bauraum, Sicherheitsanforderungen und Systemkosten.

Hall-Sensoren eignen sich besonders für Anwendungen mit mittlerer Winkelauflösung, in EMV-kritischer Umgebung oder bei begrenztem Bauraum.

Die HAL 302x-Serie bietet integrierte Streufeldkompensation und ist nach gängigen Automotive-Standards qualifiziert – ideal für kompakte, robuste Designs mit solider Grundsicherheit und redundanter Auslegung.

TMR-Sensoren wie die TAS-Serie ermöglichen höchste Winkelauflösung ($\leq 0,001^\circ$), große Bandbreite und eine dynamische, energiesparende Signalverarbeitung. Sie sind die bevorzugte Wahl für Anwendungen mit höchsten Anforderungen an funktionale Sicherheit, Diagnosefähigkeit und Reaktionsgeschwindigkeit – etwa in Brake-by-Wire- oder Lenkungssystemen. Die Sin/Cos-Ausgabe in Kombination mit minimalem Stromverbrauch erlaubt präzise Regelung und gleichzeitig normkonforme Safety gemäß ISO 26262.

Sicherheitskritische Anwendungen profitieren besonders von einer kombinierten Nutzung beider Technologien. Dual-Stack-Architekturen ermöglichen gegenseitige Überwachung, verbessern die EMV-Robustheit und erhöhen die Diagnosefähigkeit – bei gleichzeitig minimalem Mehraufwand in Kosten und Komplexität. Auf diese Weise lassen sich Redundanz, funktionale Sicherheit und genaue Winkelerfassung effizient vereinen – ein entscheidender Vorteil für moderne Steuerungs- und Sicherheitsanwendungen.

Anwendung	Bevorzugte Lösung	Begründung für Hall	Begründung für TMR
Brake-by-Wire (EMB, EHB)	TMR/Hall oder Hybrid	Störfeldtoleranz, großer Magnetfeldbetriebsbereich für hohe Luftspaltvariationen, integrierter Verstärker mit HV-Festigkeit und EMV-Robustheit für remote-Setup, Safety-relevant	Höchste Präzision und Bandbreite, direkte μ C-Kopplung, Safety-relevant
Lenksysteme (EPS, RWS)	TMR/Hall oder Hybrid	Störfeldtoleranz, Safety (ASIL-D) mit integrierter Sicherheitsüberwachung, volle Redundanz bei einseitiger PCB-Bestückung, geringe Latenz	Hohe Winkelauflösung, geringes Rauschen, geringe Latenz, dynamische Erfassung, Safety (ASIL-D)
E-Motor-Positionsfeedback	TMR/Hall	Störfeldtoleranz, hohe Genauigkeit bei mechanischen Toleranzen, integrierter Verstärker mit HV-Festigkeit und EMV-Robustheit für remote-Setup, integrierte Fehlerkompensation	TMR für präzise Sin/Cos-Signale, On- und off-axis Integration möglich

Tabelle 2: Technologieempfehlung nach Anwendungskontext

Für eine effiziente Systemauslegung empfiehlt es sich, die Sensorarchitektur frühzeitig auf Redundanz und Diagnosefähigkeit hin zu planen. In kosten- und platzkritischen Anwendungen bleibt der Hall-Sensor erste Wahl. Für sicherheitsrelevante Applikationen mit höchsten Ansprüchen ist hingegen die gezielte oder kombinierte Nutzung von Hall- und TMR-Technologie der Schlüssel zu einer leistungsfähigen, normkonformen und wettbewerbsfähigen Lösung.










	Analoge Fast-Hall-Sensoren		Analoge TMR-Sensoren				
Produktname	HAL 302x 	HAR 3025 	TAS2240 	TAS4240 	TAS8240 	TAS214x 	TAS414x 
Anzahl sensitiver Elemente	3 oder 6 Z-Platte	2x 6 Z-Platte	2 HB	4 HB	8 HB	2 FB	4 FB
Winkelfehler (w/ Stat. Komp.)	$\leq \pm 0.6^\circ$		$\leq \pm 0.5^\circ$			$\leq \pm 0.3^\circ$	
Winkelfehler (w/ Dyn. Komp.)	$\leq \pm 0.1^\circ$ (Gain, Offset, Phase)		$\leq \pm 0.1^\circ$ (abhängig von der SW-Implementierung)				
Ausgang	Analog, Diff. oder SE verstärkt 4 V _{PP} Sin & Cos	2x Analog, Diff. oder SE verstärkt 4 V _{PP} Sin & Cos	Analog, Single Ended 1.5 V _{PP} Sin & Cos	2 x Analog, Single Ended 1.5 V _{PP} Sin & Cos	4x Analog, Single Ended 1.5 V _{PP} Sin & Cos	Analog, Differential 3 V _{PP} Sin & Cos	2 x Analog, Differential 3 V _{PP} Sin & Cos
Messaufbau	Auf der Achse		Auf / Neben der Achse				
Magnetischer Feldstärkenbereich	5 ... 250 mT (programmierbar)		20...80 mT (typisch), 80...130 mT (erweiterter Bereich)				
Redundanz	-	•	-	•	•	-	•
Funktionale Sicherheit (auf Systemebene)	ASIL C	ASIL D	ASIL B	ASIL D	ASIL D	ASIL B	ASIL D
Selbstdiagnose (FSM)	•	•	-	-	-	-	-
Stöfeldrobustheit	•	•	Auf Systemebene				
Gehäuse	SOIC8	QFN24	DFN4	DFN8 / TSSOP8	QFN16 / TSSOP16	DFN8 / TSSOP8	QFN16 / TSSOP16

Tabelle 3: Übersicht über das kombinierte Sensorportfolio von TDK-Micronas mit Fokus auf anwendungsspezifische Systemlösungen und hybride Architekturansätze. (Quelle: TDK-Micronas)

Fazit und Handlungsempfehlung

Die Wahl zwischen Hall- und TMR-Technologien kann nicht pauschal erfolgen – sie muss kontextbezogen und anwendungsspezifisch getroffen werden. Dabei gilt:

- Hall-Sensoren eignen sich für robuste, kompakte Systeme mit moderaten bis hohen Genauigkeitsanforderungen.
- TMR-Sensoren sind erste Wahl bei hochpräzisen, dynamischen und sicherheitskritischen Applikationen
- Hybride Architekturen bieten eine optimale Balance aus Präzision, Redundanz und EMV-Stabilität.

Empfehlung für die Auswahl

1. Definieren Sie die Applikationsanforderungen (Genauigkeit, EMV, Safety-Level, Bauraum, Kosten).
2. Bewerten Sie anhand der Tabelle 2 die passende Sensorfamilie.
3. Ziehen Sie hybride Lösungen in Betracht, wenn Redundanz und/oder höchste Genauigkeit gefordert sind.
4. Nutzen Sie verfügbare Referenzdesigns und Evaluation Boards zur Systemvalidierung.
5. Ziehen Sie eine Beratung durch TDK-Micronas hinzu – für maßgeschneiderte Design-In-Unterstützung.