

Fehlertoleranter Lenkwinkelgeber

Elmar Dilger

Robert Bosch GmbH
Stuttgart
elmar.dilger@de.bosch.com

Matthias Gulbins, Thomas Ohnesorge, Bernd Straube

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen,
Außenstelle Entwurfsautomatisierung EAS Dresden,
Zeunerstr. 38, 01069 Dresden
e-mail: <gulbins | thomaso | straube >@cas.iis.fhg.de

Abstract: In diesem Beitrag wird beschrieben, wie ein gegebener Lenkwinkelgeber um fehlertolerante Eigenschaften erweitert wird, damit er in zukünftigen Steer-By-Wire-Anwendungen eingesetzt werden kann. Fehlertoleranz wird hier dadurch erreicht, dass zum einen Eigenschaften der zugrundeliegenden mathematischen Beziehungen für die Berechnung der Winkelstellung der Lenksäule ausgenutzt und zum anderen neben den vorhandenen magneto-resistiven Sensorelementen zusätzlich zwei optische Sensorelemente verwendet werden. Damit wird Fehlertoleranz sowohl durch strukturelle Redundanz als auch durch die Anwendung unterschiedlicher physikalischer Messprinzipien, also Diversität, erreicht. Mittels Fehlersimulation mit verschiedenen Szenarien für die Drehbewegungen des Lenkrades werden die diagnostischen Eigenschaften des fehlertoleranten Lenkwinkelgebers evaluiert.

1 Einleitung

Schon heute sind eine Reihe von elektrischen/elektronischen Systemen für die sichere Funktion eines Kraftfahrzeugs verantwortlich. Systeme wie ABS (Antiblockiersystem), ESP (Electronic Stability Program, Fahrdynamikregelung), EGAS (Elektronische Motorleistungssteuerung) haben in das Fahrzeug Einzug gehalten und sind schon Standard geworden. Zunehmend werden X-By-Wire-Systeme Lenkung, Bremse, Antriebsstrang und Fahrwerk kontrollieren und die aktive und passive Sicherheit weiter erhöhen [Kr01].

Insbesondere der Sensorik kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Die Anforderungen an Kfz-Sensoren sind sehr hoch, sie müssen unter extremen Umgebungsbedingungen, insbesondere bei stark schwankender Umgebungstemperatur, hoher Feuchtigkeit und starken Vibrationen ein Fahrzeugleben lang genau messen [Za96, Br98]. Diese Bewährungsprobe hat der Lenkwinkelgeber LWS3 bestanden, der seit mehreren Jahren als Komponente des ESP den Lenkwinkel über 1560° misst.

In Zukunft werden Lenkwinkelgeber eine besonders wichtige Rolle bei Steer-By-Wire-Anwendungen spielen. Für diese Anwendungen ist es jedoch erforderlich, dass diese Lenkwinkelgeber zusätzlich fehlertolerant sind. Um auszuschließen, dass Umwelteinflüsse (z. B. starke Magnetfelder) ursächlich für Common-Mode-Fehler sein können, mag es sinnvoll sein, unterschiedliche physikalische Messprinzipien anzuwenden. Auftretende Fehler müssen selbständig diagnostiziert und möglichst kompensiert werden. Auf jedem Fall muss der Lenkwinkelgeber auch im Fehlerfall ein korrektes Winkelsignal liefern und dann ein Fehlersignal generieren, auf das die Systemumgebung in geeigneter Weise reagieren kann.

Der heutige Lenkwinkelgeber des ESP besteht im wesentlichen aus zwei anisotropen magneto-resistiven (AMR) Sensorelementen, Analog-Digital-Wandlern und einem Mikroprozessor [DW00, KM00]. Die Messung des Winkels ψ mit einem AMR-Sensorelement beruht auf dem physikalischen Effekt, dass der ohmsche Widerstand bestimmter Legierungen von der Richtung des Magnetfelds abhängig ist. Das AMR-Sensorelement ist fest positioniert. Die Änderung des Magnetfelds wird durch einen Dauermagneten bewirkt, der auf einem Messzahnrad befestigt ist. Zwecks Spannungs- und Temperaturkompensation werden die magneto-resistiven Widerstände in Form von zwei, um 45° zueinander verdrehten Wheatstone-Brücken angeordnet. Aus den Differenzspannungen V_x und V_y dieser beiden Brücken lässt sich der Drehwinkel des Sensors $\psi = \arctan (V_x / V_y)$ oder normiert $\psi = \arctan (x / y)$ berechnen. Diese Winkelbestimmung ist im Bereich 0° bis 180° eindeutig. Um jedoch den Drehwinkel α der Lenksäule für den gesamten Drehbereich von ca. 1600° zu berechnen, werden zwei AMR-Sensorelemente benötigt. Die mathematische Begründung ist im Abschnitt 2 skizziert. Die zwei Messzahnräder mit den Zähnezahlen z_1 bzw. z_2 werden durch das auf der Lenksäule befestigte Zahnrad mit der Zähnezahl z angetrieben. Eine Prinzipskizze des Lenkwinkelgebers ist in Bild 1 dargestellt.

In den hier beschriebenen Untersuchungen wird Fehlertoleranz durch zwei Maßnahmen erreicht: Zum einen werden die mathematischen Eigenschaften der Zahnradpaarungen bei der Berechnung des Winkels der Lenksäule ausgenutzt. Zum anderen werden zwei optische Sensorelemente hinzugefügt, wodurch Fehlertoleranz nicht nur allein durch Redundanz sondern auch durch die Verschiedenheit der physikalischen Messprinzipien der verwendeten Sensorelemente erreicht wird.

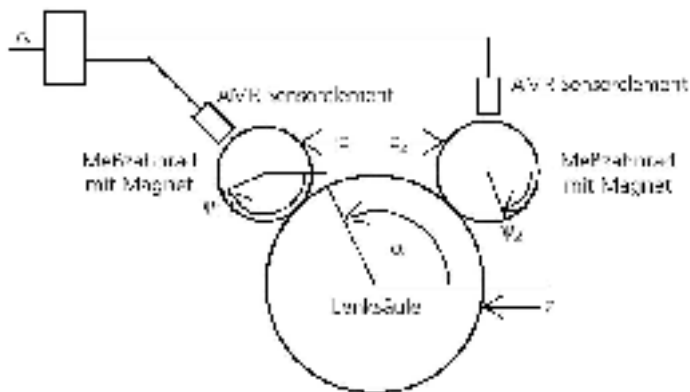


Bild 1: Prinzipskizze des Lenkwinkelgebers mit zwei AMR-Sensorelementen

Das Messprinzip der optischen Sensoren [US01] beruht auf einem Auflichtverfahren. Dabei wird eine Rasterschleife, auf der sich reflektierende und nichtreflektierende Zonen befinden, von einer LED-Lichtquelle als Sender beleuchtet. Der Lichtstrahl wird, je nachdem, auf welche Zone er fällt, in Richtung des Fotoelements reflektiert oder absorbiert. Die Rasterschleife ist fest mit der Sensorwelle verbunden, so dass bei ihrer Drehung der Lichtstrahl abwechselnd reflektiert und absorbiert wird. Das Fotoelement empfängt und wandelt dieses Licht, und der Verstärker erzeugt daraus ein digitales Signal, das bei Drehung des Sensors einen mäanderförmigen Verlauf hat. Ein leicht versetztes zweites Fotoelement liefert ein um 90° phasenverschobenes Signal. Zwei Kanäle sind notwendig, um eine Aussage treffen zu können, ob sich die Sensorwelle vorwärts oder rückwärts dreht. Eine Dekodierschaltung erzeugt aus diesen beiden Signalen Impulse für einen nachgeschalteten Vorwärts-/Rückwärtszähler, dessen Zählerstand ein Maß für die aktuelle Position der Sensorwelle ist. Da optische Sensoren inkrementell arbeiten, müssen sie – im Unterschied zu AMR-Sensoren – zu Beginn initialisiert werden. Bei optischen Sensoren berechnet sich die Periode aus $\Omega = (l \cdot 360^\circ) / \text{CPR}$, wobei l die Länge des Zählers und CPR (cycles per revolution) die Anzahl der Zählimpulse pro Umdrehung sind.

2 Die Bestimmung des Lenkwinkels aus den Winkeln zweier Messzahnräder

Im Folgenden wird die Bestimmung des Lenkwinkels α nur für eine Anordnung eines Paares von zwei Messzahnradern, d. h. zwei Sensorelementen, beschrieben [DM03]. Die Erweiterung auf vier Messzahnäder erfolgt in gleicher Weise.

Der Lenkwinkel α berechnet sich aus dem Messwinkel ψ_i des Sensorzahnades i gemäß

$$\alpha = \frac{z_i}{z} (\Psi_i + i_i \cdot \Omega_i) \quad \text{mit } 0 \leq \Psi_i < \Omega_i \quad (1)$$

wobei z die Anzahl der Zähne des Zahnades auf der Lenksäule, z_i die Anzahl der Zähne, Ω_i die Periode (z.B. 180° bei AMR-Sensoren) und i_i die aktuelle Anzahl der Umdrehungen des Sensorzahnades i sind. Zur Berechnung der Umdrehungszahl i_i ist ein Sensorpaar $i = 1, 2$ erforderlich.

Sei nun g der größte gemeinsame Teiler von $z_1\Omega_1$ und $z_2\Omega_2$:

$$g = \text{ggT}(z_1\Omega_1, z_2\Omega_2) \quad \text{und} \quad n_1 = \frac{z_2\Omega_2}{g}, \quad n_2 = \frac{z_1\Omega_1}{g}, \quad (2)$$

(n_1 und n_2 sind die jeweiligen Periodenzahlen).

Der maximale Drehwinkel α_{\max} ergibt sich für zwei Sensoren zu: $\alpha_{\max} = \frac{1}{z} \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot g$

und die Berechnung des Drehwinkels α ist im Bereich $[0, \alpha_{\max}]$ eindeutig.

Aus (1) ergibt sich

$$\alpha = \frac{z_1}{z} (\Psi_1 + i_1 \cdot \Omega_1) = \frac{z_2}{z} (\Psi_2 + i_2 \cdot \Omega_2), \quad (3)$$

also

$$z_1 \cdot \Psi_1 + z_1 \cdot i_1 \cdot \Omega_1 = z_2 \cdot \Psi_2 + z_2 \cdot i_2 \cdot \Omega_2$$

und

$$z_2 \cdot \Psi_2 - z_1 \cdot \Psi_1 = z_1 \cdot i_1 \cdot \Omega_1 - z_2 \cdot i_2 \cdot \Omega_2. \quad (4)$$

Da die rechte Seite von (4) durch g teilbar ist, muss auch die linke Seite durch g teilbar sein:

$$k = \frac{z_2 \cdot \Psi_2 - z_1 \cdot \Psi_1}{g} = \frac{z_1 \cdot i_1 \cdot \Omega_1 - z_2 \cdot i_2 \cdot \Omega_2}{g} \quad (5)$$

d.h. k ist ganzzahlig und

$$k = \frac{z_1 \cdot \Omega_1}{g} \cdot i_1 - \frac{z_2 \cdot \Omega_2}{g} \cdot i_2 \quad \text{und} \quad (6)$$

$$k = n_2 \cdot i_1 - n_1 \cdot i_2 \quad (7)$$

ist eine diophantische Gleichung zur Bestimmung von i_1 und i_2 .

Wenn die Zähnezahlen z_1 und z_2 so gewählt werden, dass n_1 und n_2 teilerfremd sind, so ist Gleichung (7) für jedes k eindeutig lösbar. Da k ganzzahlig ist, muss das k , das in Gleichung (5) aus den durch Störungen verfälschten Messwinkeln ψ_1 und ψ_2 berechnet wird, auf den nächsten ganzzahligen Wert gerundet werden. Bei der Berechnung des Drehwinkels α aus den beiden Messwinkeln ψ_1 und ψ_2 wird zuerst Gleichung (5) gelöst; mit dem berechneten k erhält man dann aus Gleichung (7) die Umdrehungszahlen i_1 und i_2 und mit Gleichung (1) wird schließlich der Drehwinkel α berechnet.

3 Robustheit und Genauigkeit

Alle Abweichungen der Messwinkel ψ_1 und ψ_2 wirken sich auf k aus (vgl. Gleichung (5)). Da k ganzzahlig sein muss, können diese Abweichungen in einem gewissem Bereich durch Runden korrigiert werden. Unter *Robustheit* verstehen wir die Eigenschaft des Systems, dass trotz der Abweichungen von ψ_1 und ψ_2 ein korrektes k ermittelt werden kann. Für die Abweichung des k aus Gleichung (5) muss also $\Delta k < 0,5$ gelten. Aus dieser Ungleichung werden die Genauigkeitsanforderungen an die Sensorelemente abgeleitet. Dabei gehen wir davon aus, dass beide Sensorelemente eines Paares gleichermaßen fehlerbehaftet sind. Die maximale Abweichung eines Sensorelementes betrage $\Delta\psi_i$.

Bei der Verwendung von magneto-resistiven und optischen Sensorelementen lassen sich drei Paare aus Sensorelementen bilden: rein magneto-resistiv, rein optisch und gemischt magneto-resistiv – optisch. Entsprechend der jeweiligen Paarungen ergeben sich Genauigkeitsanforderungen an die verschiedenen Sensorelemente.

Die Genauigkeit des Systems bezieht sich auf den berechneten Drehwinkel α . Sie hängt von der Genauigkeit der eingesetzten Sensorelemente und von der Geometrie des Sensorsystems ab. Unter *Genauigkeit* verstehen wir die größte Abweichung des Drehwinkels α , die – bei vorgegebener Genauigkeit der Sensorelemente – auch im ungünstigsten Fall nicht überschritten wird. Nach Gleichung (1) ergibt sich für die Abweichung des Drehwinkels α

$$\Delta\alpha = \frac{z_i}{z} \cdot \Delta\psi_i \quad (8)$$

Da zur Berechnung des Drehwinkels α ein beliebiges Sensorelement verwendet werden kann, wird dasjenige herangezogen, für das die Genauigkeit nach Gleichung (8) am größten ist.

4 Fehlertoleranz

Verwendet man nur ein Paar von Sensorelementen zum Bestimmen des Drehwinkels α , so kann mit der im folgenden erläuterten Überwachung des k erkannt werden, ob ein Sensorelement fehlerhaft ist. Im Fehlerfall muss das gesamte System außer Betrieb genommen werden, weil der Drehwinkel α nicht mehr zuverlässig berechnet werden kann. Um Fehlertoleranz zu erreichen, d. h. den Drehwinkel α trotz eines Sensorfehlers korrekt zu berechnen, ist Redundanz in Form weiterer Sensorelemente notwendig. Im folgenden wird ein Vier-Sensor-System, bestehend aus zwei magneto-resistiven und zwei optischen Sensorelementen, betrachtet. Dieses System ist in Bild 2 dargestellt.

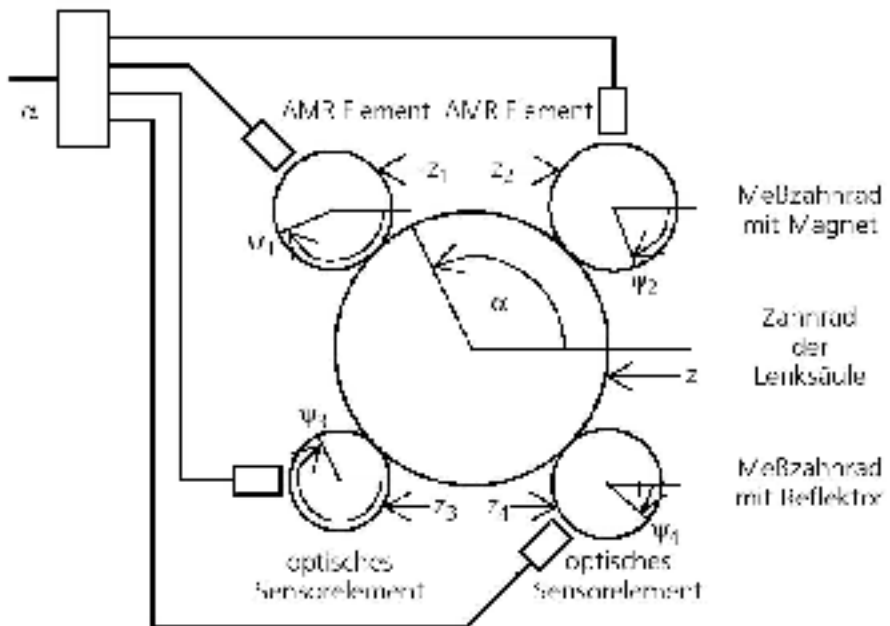


Bild 2: Der diversitäre Lenkwinkelgeber mit zwei magneto-resistiven und zwei optischen Sensorelementen

Das Vier-Sensor-System verwendet zwei Typen von Sensorelementen mit verschiedenen Messprinzipien und ist damit diversitär. Die vier Sensorelemente s_1, s_2, s_3 und s_4 bilden sechs Sensorpaare $p_{12}, p_{13}, p_{14}, p_{23}, p_{24}$ und p_{34} . Damit die Redundanz wirksam wird und in Fehlertoleranz umgesetzt werden kann, müssen alle Sensorpaare überwacht werden. Die korrekte Funktion eines Sensorpaares kann durch Überwachung des berechneten k festgestellt werden. Die verallgemeinerte Form von Gleichung (5) lautet:

$$k_{ij} = \frac{z_i \cdot \Psi_i - z_j \cdot \Psi_j}{g} \quad (9)$$

Die Messwinkel ψ_i und ψ_j springen auf Null, wenn sie den Wert Ω_i bzw. Ω_j erreichen. Das bedeutet, dass auch k_{ij} an diesen Stellen um n_j bzw. n_i springen muss. k_{ij} wird dahingehend überwacht, dass Änderungen nur zulässig sind, wenn sie in Sprüngen von $\pm n_j$ oder $\pm n_i$ erfolgen.

Bei sechs Sensorpaaren sind 64 Kombinationen der Überwachungssignale möglich. Jede Kombination entspricht einer fehlerhaften Situation. Für jede fehlerhafte Situation erfolgt eine Bewertung jedes Sensorelementes und eine Entscheidung, welches Sensorelement zur Berechnung des Drehwinkels herangezogen wird.

In Tabelle 1 sind einige fehlerhafte Situationen, die daraus ableitbare Bewertung der Sensorelemente („1“ bedeutet Sensorelement in Ordnung, „0“ Sensorelement fehlerhaft, „-“ Sensor möglicherweise fehlerhaft) sowie das zur Berechnung des Drehwinkels α zu verwendende Sensorelement aufgelistet. Die Sensorelemente sind so indiziert, dass die Genauigkeit entsprechend Gleichung (9) mit fallendem Index wächst.

fehlerhafte Situationen verursacht durch Sensorpaare p_{ij} bestehend aus s_i und s_j	Überwachung des k des Sensorpaars p_{ij}						Lokalisierung des fehlerbehafteten Sensorelements s_i				Sensorelement zur Berechnung des Drehwinkels α
	p_{12}	p_{13}	p_{14}	p_{23}	p_{24}	p_{34}	s_1	s_2	s_3	s_4	
keine Fehlernachricht	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	s_1
p_{14}	1	1	0	1	1	1	-	1	1	-	s_2
$p_{13} + p_{24}$	1	0	1	1	0	1	-	-	-	-	s_1
$p_{14} + p_{24}$	1	1	0	1	0	1	-	-	1	-	s_3
$p_{12} + p_{23} + p_{24}$	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	s_1
$p_{12} + p_{14} + p_{24}$	0	1	0	1	0	1	-	-	1	-	s_3
$p_{13} + p_{24} + p_{34}$	1	0	1	1	0	0	-	-	-	-	s_1
$p_{12} + p_{13} + p_{14} + p_{24}$	0	0	0	1	0	1	0	-	-	-	s_2
$p_{12} + p_{13} + p_{23} + p_{24} + p_{34}$	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	s_1
$p_{12} + p_{13} + p_{14} + p_{23} + p_{24} + p_{34}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(s_1)

Tabelle 1: Fehlerhafte Situationen, Lokalisierung des fehlerbehafteten Sensorelements zur Berechnung des Drehwinkels α

5 Experimente

5.1 Validierung des Modells

Die Algorithmen zur Berechnung des Drehwinkels und die Maßnahmen zur Fehlererkennung wurden durch ein MATLAB-Modell beschrieben. Die Simulationen bestätigten die theoretisch abgeleiteten Ergebnisse. Auch für den Hardware-Prototyp des Lenkwinkelgebers (s. Bild 2) wurden die theoretischen und simulativen Ergebnisse überprüft (Tabelle 1).

5.2 Fehlerinjektion

Das Verhalten des Lenkwinkelgebers wurde für verschiedene Fehlersituationen simuliert. Fünf verschiedene Szenarien für Drehbewegungen des Lenkrades, also zeitabhängige Veränderungen des Drehwinkels α , sind im Bild 3 und Bild 4 dargestellt. Diese Szenarien mit einer Länge von 30 s dienten als Eingangssignale für die Fehlersimulation. Jedes Szenario beginnt mit der Initialisierung der optischen Sensorelemente zum Zeitpunkt $t = 0$.

Wir definierten 13 funktionelle Fehler für ein magneto-resistives Sensorelement (kurz: AMR-Fehler) und fünf funktionelle Fehler für ein optisches Sensorelement (kurz: optische Fehler). Diese Einzelfehler wurden in das MATLAB-Modell zu verschiedenen Zeitpunkten injiziert. Die Fehler wurden in allen Szenarien zum Zeitpunkt $t = 0$ s (vor der Initialisierung), zu den Zeitpunkten $t = 5$ s und $t = 17,5$ s im Szenario 1, zu den Zeitpunkten $t = 7,5$ s und $t = 20$ s im Szenario 2 und zum Zeitpunkt $t = 10$ s in den Szenarien 3, 4 und 5 injiziert (Bild 3 und Bild 4). Jeder Fehler wurde mit jedem Szenario mit den verschiedenen Aktivierungszeitpunkten simuliert. Insgesamt wurden 432 Fehlersimulationen ausgeführt: Jeder AMR-Fehler wurde in jedem der beiden AMR-Sensorelemente und jeder optische Fehler in jede der beiden optischen Sensorstrecken injiziert. Das ergibt $13 \cdot 2 + 5 \cdot 2 = 36$ Fehler. Jeder dieser Fehler wurde mit zwei Szenarien mit drei verschiedenen Zeitpunkten der Fehleraktivierung und drei Szenarien mit zwei verschiedenen Zeitpunkten der Fehleraktivierung simuliert, d. h. $2 \cdot 3 + 3 \cdot 2 = 12$ mal.

Falls bei der Simulation eines Fehler der Lenkwinkelgeber eine Fehlernachricht erzeugt, dann gilt dieser Fehler als *erkannt*. Jedoch muss darüber hinaus noch das fehlerhafte Sensorelement lokalisiert werden. Ein Fehler heißt *diagnostiziert*, falls der Lenkwinkelgeber das fehlerhafte Sensorelement selbst erkannt hat. Um die Fehlertoleranzeigenschaften des Lenkwinkelgebers zu zeigen, wird der Lenkwinkel α , den das fehlerbehaftete System berechnet, mit dem nominalen (fehlerfreien) Winkel verglichen. Somit können vier verschiedene Situationen eintreten:

- (i) Fehler diagnostiziert; Lenkwinkel korrekt (innerhalb der spezifizierten Toleranzen)
- (ii) Fehler erkannt, aber nicht lokalisiert; Lenkwinkel korrekt

- (iii) Fehler diagnostiziert; Lenkwinkel nicht korrekt
- (vi) Fehler nicht erkannt; Lenkwinkel nicht korrekt

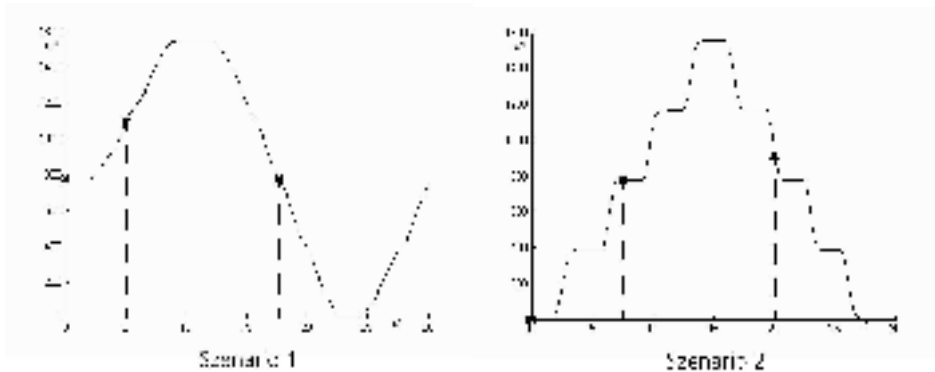


Bild 3: Szenarien 1 und 2 für Drehbewegungen der Lenksäule mit den Zeitpunkten, an denen die Fehler aktiviert werden.

Es ist offensichtlich, dass die Situation (i) das gewünschte Verhalten des Lenkwinkelgebers sein sollte. Auch die Situation (ii) ist noch zu akzeptieren, falls die Systemumgebung des Lenkwinkelgebers entsprechend reagieren kann. Jedoch dürfen die Situationen (iii) und (iv) unter realen Bedingungen nicht auftreten.

Die Ergebnisse der Fehlersimulationen bezüglich der Fehlerdiagnose sind in Tabelle 2 dargestellt. Neben der Nummer des Szenarios (s. Bild 3) ist der Zeitpunkt der Fehlerinjektion eingetragen. In der Spalte Sensor beziehen sich die „1“ oder die „2“ auf eines der beiden Sensorelemente des magneto-resistiven bzw. des optischen Typs. In den Spalten 13 AMR Fehler und 5 opt. Fehler ist angegeben, welche der Situationen (i) bis (iv) bei der Simulation des entsprechenden Fehlers aufgetreten ist.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die optischen Fehler werden bis auf den ersten Fehler diagnostiziert. Dieser Fehler verhindert, dass der jeweilige Vorwärts-/Rückwärtszähler zurückgesetzt werden kann. Nach der Initialisierung hat dieser Fehler keinen Einfluss auf die Funktion des Zählers mehr.
- Die AMR-Fehler werden mit den Szenarien 1 und 2 für alle Zeitpunkte nach der Initialisierung erkannt.

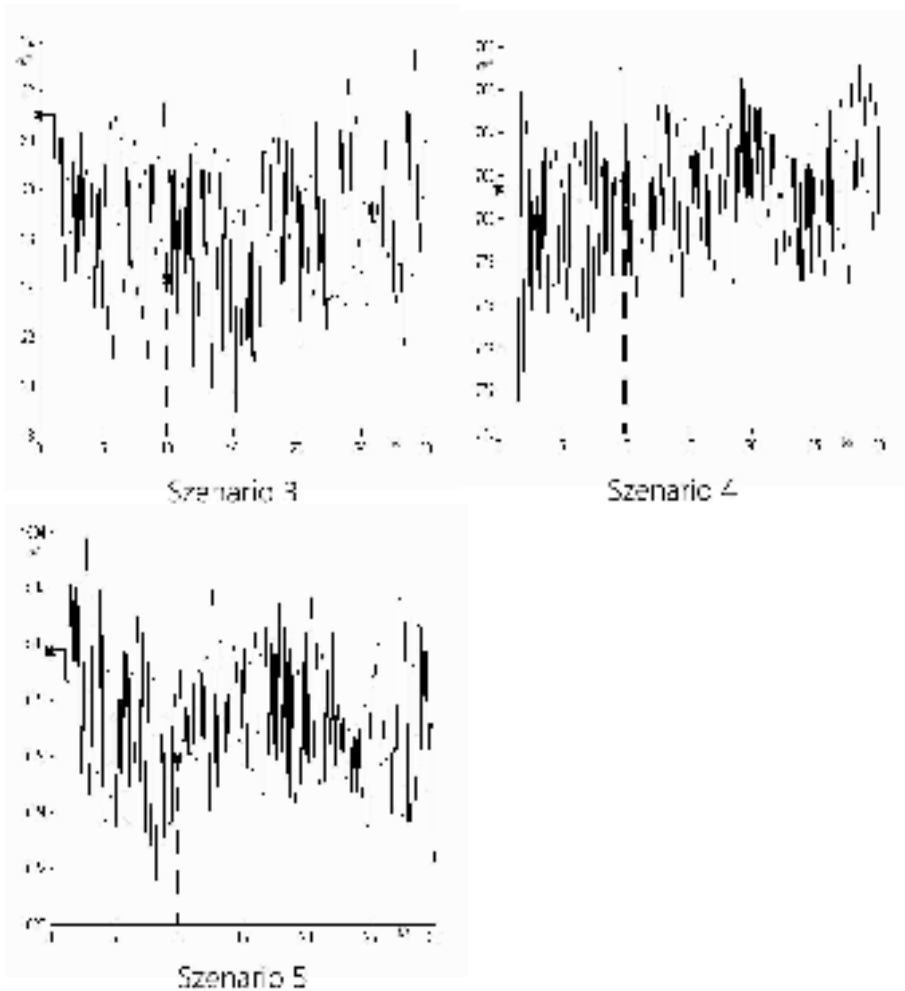


Bild 4: Szenarien 3, 4 und 5 für Drehbewegungen der Lenksäule mit den Zeitpunkten, an denen die Fehler aktiviert werden.

- Es zeigt sich, dass die Szenarien 3, 4 und 5 für die Fehlererkennung und Fehlerdiagnose ungeeignet sind.

Da die obigen Situationen (iii) und (iv) aufgetreten sind, müssen insbesondere für die Initialisierungsphase weitergehende Untersuchungen erfolgen.

t_i		Sensor	13 AMR Fehler	5 opt. Fehler
Szenario				
1	0.0	1		
		2		
2	0.0	1		
		2		
3	0.0	1		
		2		
4	0.0	1		
		2		
5	0.0	1		
		2		
1	5.0	1		
	17.5	2		
2	7.5	1		
	20.0	2		
3	10.0	1		
		2		
4	10.0	1		
		2		
5	10.0	1		
		2		

(i)
Fehler diagnostiziert;
Lenkwinkel korrekt

(ii)
Fehler erkannt, aber nicht
lokalisiert; Lenkwinkel
korrekt

(iii)
Fehler diagnostiziert;
Lenkwinkel nicht korrekt

(iv)
Fehler nicht erkannt;
Lenkwinkel nicht korrekt

Tabelle 2: Ergebnisse der Fehlersimulation: die Grauskalen der Einträge korrespondieren mit den fehlerdiagnostizierenden und fehlertolerierenden Situationen (i) – (iv) im Abschnitt 5.2

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Bestimmung des Lenkradwinkels werden magneto-resistive und optische Sensoren angewendet. Mit Hilfe eines Sensorpaares kann der Lenkradwinkel im gesamten Lenkbereich mit der erforderlichen Genauigkeit und Robustheit berechnet werden. Durch Erweiterung zu einem diversitären Vier-Sensor-System wird der Lenkwinkelgeber fehlertolerant. Er ist in der Lage, den Ausfall von bis zu zwei Sensorelementen zu tolerieren und die ausgefallenen Sensorelemente zu diagnostizieren. Durch Simulation und Fehlersimulation sowie am Hardware-Prototyp des Vier-Sensor-Systems wurden die analytisch ermittelten Ergebnisse bestätigt.

Weitere Untersuchungen richten sich auf folgende Probleme:

- Verbessern der Fehlererkennung und Fehlerdiagnose zu Beginn der Initialisierung
- Entwickeln eines Verfahrens zur Nachführung der Genauigkeit für optische Sensoren zur Eliminierung systematischer Fehler

- Weitere Fehlerinjektion, insbesondere an hardware-nahen Schaltungsmodellen.

Literatur

- [Br98] H. Braun, M. Lambke, J. Marek und M. Mörbe: Kraftfahrzeugsensorik. 3. ITG/GMA Fachtagung Sensoren und Meßsysteme, Bad Nauheim, 9. - 11. 3. 1998.
- [DM03] E. Dilger and B. Mueller: Device and Method for Detecting the relative Position of a Rotatable Body, United States Patent US6507188, Jan. 14, 2003
- [DW00] K. Dietmayer and M. Weser: Contactless Angle Measurement using KMZ41 and UZZ9001. Application Note AN00004, Philips Semiconductors, January 17, 2000
- [KM00] KMZ41, Magnetic field sensor, Objective specification, Data Sheet, Philips Semiconductors, April 18, 2000
- [Kr01] D. Kraft: Das vernetzte Fahrzeug - Informationsverteilung - Sicherheit - Architektur; VDA Technischer Kongress 2001, Bad Homburg, 26.-27. Mai 2001.
- [US01] US Digital Corporation: Data Sheet E4 Miniature Optical Kit Encoder, Rev. 09.24.01, Sept. 2001
- [Za96] E. Zabler, R. Dietz, A. Dukart, F. Jost und K. Marx: Berührungslose Weg- und Winkelsensoren für das Kraftfahrzeug auf magnetischer Basis. ITG/GMA Fachtagung Sensoren und Meßsysteme, Bad Nauheim, 11. - 13. 3. 1996.