

Brauchen sichere Antriebssteuerungen auch sichere Positionsgeber?

Aktualisierung 2017

1 Problemstellung

Für den sicheren Betrieb von Maschinen sind häufig Sicherheitsfunktionen zur Begrenzung von Drehzahlen, Geschwindigkeiten, Achspositionen usw. erforderlich. Hierzu werden Frequenzumrichter mit integrierten Sicherheitsfunktionen eingesetzt oder auch Sicherheits-SPSen (Speicherprogrammierbaren Steuerungen), Drehzahlwächter usw. Für die zugehörige Sensorik zur Erfassung von Achspositionen oder Drehwinkeln an Spindeln werden größtenteils Positionsgeber mit Sin/Cos-Schnittstelle verwendet. Auch bei diesen Produkten gibt es zunehmend sichere Ausführungen, die für den Einsatz in einem bestimmten Performance Level (PL) oder SIL (Safety Integrity Level) vorgesehen sind. Welche Vorteile bietet nun der Einsatz von sicheren Sin/Cos-Positionsgebern gegenüber herkömmlichen Produkten? Was muss berücksichtigt werden, wenn „unsichere“ Geber eingesetzt werden? Diesen Fragen wird am Beispiel einer Sicherheitsfunktion

SF1 „Begrenzung Spindeldrehzahl im Einrichtbetrieb“

nachgegangen, die gemäß DIN EN ISO 13849-1 [1] im Performance Level PL d realisiert werden soll.

2 Realisierung der Sicherheitsfunktion SF1

Die Sicherheitsfunktion SF1 soll durch den Einsatz eines oder zweier Drehgeber für die Bestimmung des Drehwinkels und eines Frequenzumrichters mit der integrierten Teil-Sicherheitsfunktion SLS (Safely Limited Speed, sicher begrenzte Drehzahl) erfolgen. In Bild 1 ist das zugehörige sicherheitsbezogene Blockdiagramm dargestellt – die Betriebsartenwahl ist eine eigene Sicherheitsfunktion und daher hier nicht enthalten. Das Diagramm besteht aus einem Subsystem G (Drehgeber) und einem gekapselten Subsystem T1 (Frequenzumrichter).

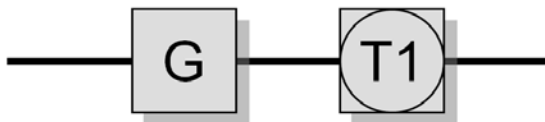


Bild 1: SF1 – Sicherheitsbezogenes Blockdiagramm

Als gekapselte Subsysteme werden Bauteile bezeichnet, für die der Hersteller PL/SIL und die durchschnittliche Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls je Stunde (Probability of a dangerous Failure per Hour, PFH_D) angibt, ggf. verbunden mit Anforderungen zur Anwendung des Produkts. Der Frequenzumrichter T1 verfügt über Schnittstellen für zwei Sin/Cos-Geber und ist in der Lage, fehlererkennende Maßnahmen durchzuführen. Die Gestaltung des Subsystems G ist nicht eindeutig, da sich hierfür verschiedene Architekturen anbieten.

Bevor diese Architekturen betrachtet werden, sind jedoch die Fehlermöglichkeiten von Drehgebern zu ermitteln. Letztlich sind Bauteilfehler und deren Auswirkungen auf die Sicherheitsfunktion die Basis für die Entscheidung darüber, ob ein einziger konventioneller Drehgeber ausreichend ist, um den PL d zu erreichen, ob eventuell zwei konventionelle Drehgeber erforderlich sind oder ob ein sicherer Drehgeber eingesetzt werden muss.

2.1 Fehlermöglichkeiten bei Drehgebern

In Bild 2 ist ein – aufgeschnittener – typischer Drehgeber abgebildet.



Bild 2: Drehgeber (Quelle: Fritz Kübler GmbH)

Es sind die Bestandteile Geberwelle, Lagerung, Codescheibe, Elektronik, Gehäuse und elektrischer Anschluss zu erkennen.

Die funktionale Struktur des Gebers ist in Bild 3 dargestellt.

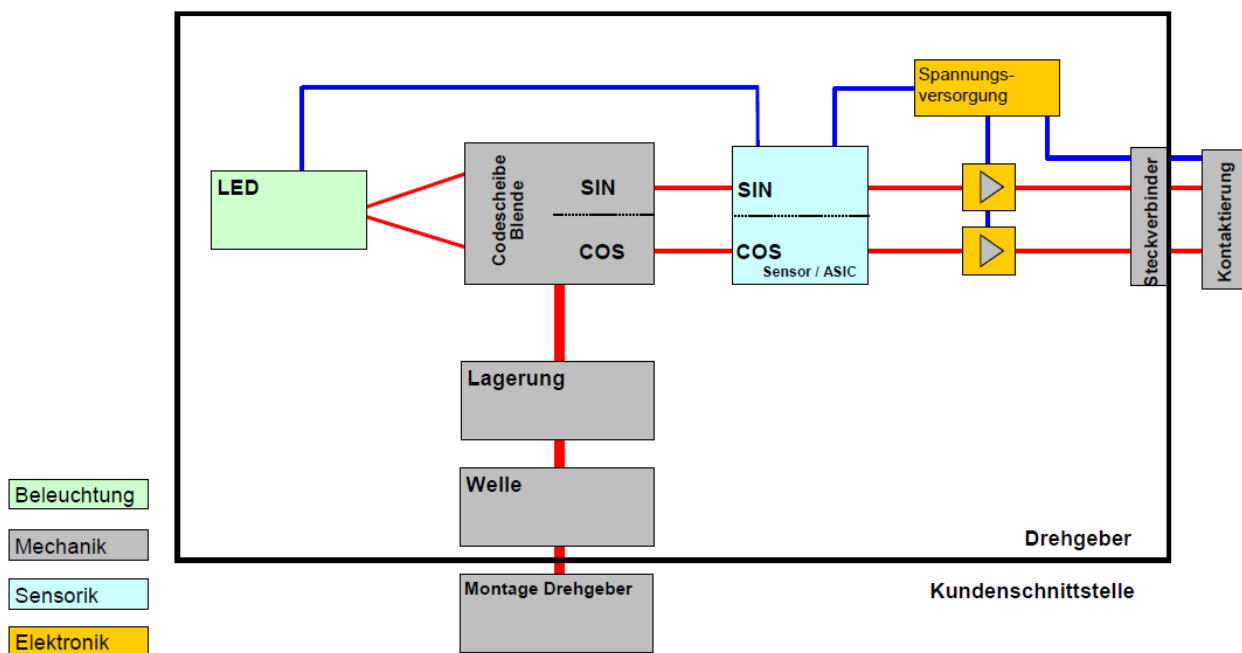


Bild 3: Strukturaufbau Sin/Cos-Drehgeber (Quelle: Fritz Kübler GmbH)

In dieser Darstellung wird deutlich, dass die Funktionselemente des Drehgebers teilweise einkanlig sind, während andere Teile zweikanlig ausgeführt werden – vorausgesetzt, man betrachtet Sin und Cos als zwei separate Kanäle¹, dazu später mehr. Es ist direkt erkennbar, dass mechanische Fehler an Welle, Lagerung und Codescheibe Auswirkungen auf den Sin- und den Cos-Kanal gleichzeitig haben können. Löst sich zum Beispiel die Geberwelle von der Motorwelle, so führen Positionsänderungen am Motor nicht zu einer – korrekten – Änderung der Sin/Cos-Signale. Die Erkennung dieses Fehlers im angeschlossenen Frequenzumrichter ist ohne zusätzliche Maßnahmen² nicht möglich, da die Ausgangssignale des Gebers weiterhin im zulässigen Bereich liegen. Andere Bauteilfehler führen zu einer Verfälschung von Sin- und/oder Cos-Ausgangssignal (siehe [2], Tabelle D.8), was ggf. durch die Überprüfung der Zeigerlänge auf $\sin^2(\varphi) + \cos^2(\varphi) = 1$ im Frequenzumrichter aufgedeckt werden kann. Je nach Ausführung des Gebers kann es jedoch auch zur Vertauschung von Sin und Cos kommen, z. B. durch Multiplexer, was durch die Zeigerlängenüberprüfung nicht aufgedeckt werden kann.

2.2 SF1 unter Verwendung konventioneller Drehgeber

Der für die gewünschte Sicherheitsfunktion SF1 „Begrenzung Spindeldrehzahl im Einrichtbetrieb“ erforderliche Performance Level ist PL d, das Subsystem Geber muss daher ebenfalls mindestens PL d erfüllen. PL d ist möglich in den vorgesehenen Architekturen Kategorie 2 und Kategorie 3 nach [1], siehe Tabelle 1.

Da beim Einsatz konventioneller Geber in der Regel keine sicherheitsrelevanten Produktdaten vom Hersteller verfügbar sind, tragen Anwendende die Verantwortung dafür, die in Tabelle 1 für unser Beispiel zusammengefassten Anforderungen an das Subsystem Geber nachzuweisen [3]. Hierbei ist der Prüfgrundsatz GS-IFA-M21 [4] sehr hilfreich, in dem die in Tabelle 1 als allgemeine Zielvorgabe enthaltenen Anforderungen für Sin/Cos-Geber detailliert werden. An dieser Stelle werden die ersten Schwierigkeiten deutlich, denn die zur Beurteilung erforderlichen Unterlagen wie Schaltplan, Stückliste, Ausfalldaten der verwendeten Bauteile, FMEA (Failure Mode and Effects Analysis, Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse) usw. liegen Anwendenden vermutlich nicht vollständig vor. Es ist daher i. d. R. eine Unterstützung durch den Geberhersteller notwendig. Ein wesentlicher Aspekt ist das Verhalten des Subsystems Geber beim Auftreten von Bauteilfehlern sowie bei deren Erkennung. Dies wird im Folgenden näher untersucht.

¹ Sin und Cos werden im selben opto-elektronischen ASIC (Application-Specific Integrated Circuit = anwendungsspezifische integrierte Schaltung) erzeugt. Aufgrund von Signalform und Phasenverschiebung können sie dennoch als separate Kanäle betrachtet werden, alle gefährlichen Bauteilfehler werden durch die „Ideale Fehlererkennung“ (siehe 2.5) erkannt.

² Als zusätzliche Maßnahme ist z. B. ein Plausibilitätscheck im Frequenzumrichter möglich – falls keine externen Kräfte wirken, wie bei Vertikalachsen. Wenn die Ansteuerung des Motors bekannt ist und eine entsprechende Motorbewegung erwartet wird, kann ein Vergleich mit der vom Positionsgeber gemeldeten Motorlage eine Abweichung und damit einen Fehler feststellen. Dieses Verfahren ist in der Praxis schwer anwendbar und wird an dieser Stelle nicht weiter betrachtet, da detaillierte Kenntnisse über Frequenzumrichter, Regelkreis, Motorverhalten usw. erforderlich sind.

Tabelle 1: Anforderungen an Subsysteme der Kategorien 2 und 3 bei Einsatz in PL d

Anforderungen für PL d	Kategorie 2	Kategorie 3
Grundlegende Prinzipien ([5], Tab A.1, D.1)	müssen verwendet werden	
Bewährte Prinzipien ([5], Tab A.2, D.2)	müssen verwendet werden	
MTTF_D jedes Kanals	hoch	mittel bis hoch
Bauteilfehler	Testung in geeigneten Zeitabständen	<ul style="list-style-type: none"> ein einzelner Fehler darf nicht zum Verlust der Sicherheitsfunktion führen, und wenn immer in angemessener Weise durchführbar, wird der einzelne Fehler erkannt
DC_{avg}	niedrig bis mittel	
CCF	Maßnahmen erforderlich, siehe Anhang F in DIN EN ISO 13849-1	
Systematischer Ausfall	Maßnahmen erforderlich, siehe Anhang G in DIN EN ISO 13849-1	
PFH_D	$10^{-7} \leq PFH_D < 10^{-6}$ pro Stunde	
Software	Maßnahmen erforderlich, siehe Anhang 4.6.2 und ggf. 4.6.4 in DIN EN ISO 13849-1	

- MTTF_D Mean Time to Failure = mittlere Zeit bis zu einem gefahrbringenden Ausfall
 DC_{avg} Diagnostic Coverage = Diagnosedeckungsgrad
 CCF Common Cause Failure = Ausfall aufgrund gemeinsamer Ursache
 PFH_D Probability of a dangerous Failure = Durchschnittliche Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls je Stunde

2.2.1 Kategorie 3, zwei konventionelle Geber

In Bild 4 sind das Prinzipschaltbild und das sicherheitsbezogene Blockdiagramm abgebildet. Das Subsystem Geber wird von zwei konventionellen Drehgebern gebildet. Die Sin/Cos-Ausgangssignale von Geber 1 werden in Kanal 1 des Frequenzumrichters verarbeitet, Kanal 2 bearbeitet entsprechend die Signale von Geber 2. Zur Erkennung von Geberfehlern erfolgt jeweils eine Überwachung auf $\sin^2(\varphi) + \cos^2(\varphi) = 1$, bei Ungleichheit wird eine Fehlerreaktion eingeleitet. Die Ermittlung der Drehzahl aus den Gebersignalen erfolgt zweikanalig in Kanal 1 und Kanal 2, durch den kreuzweisen Datenvergleich (KDV) werden Fehler im Frequenzumrichter, teilweise auch Fehler im Geber aufgedeckt.

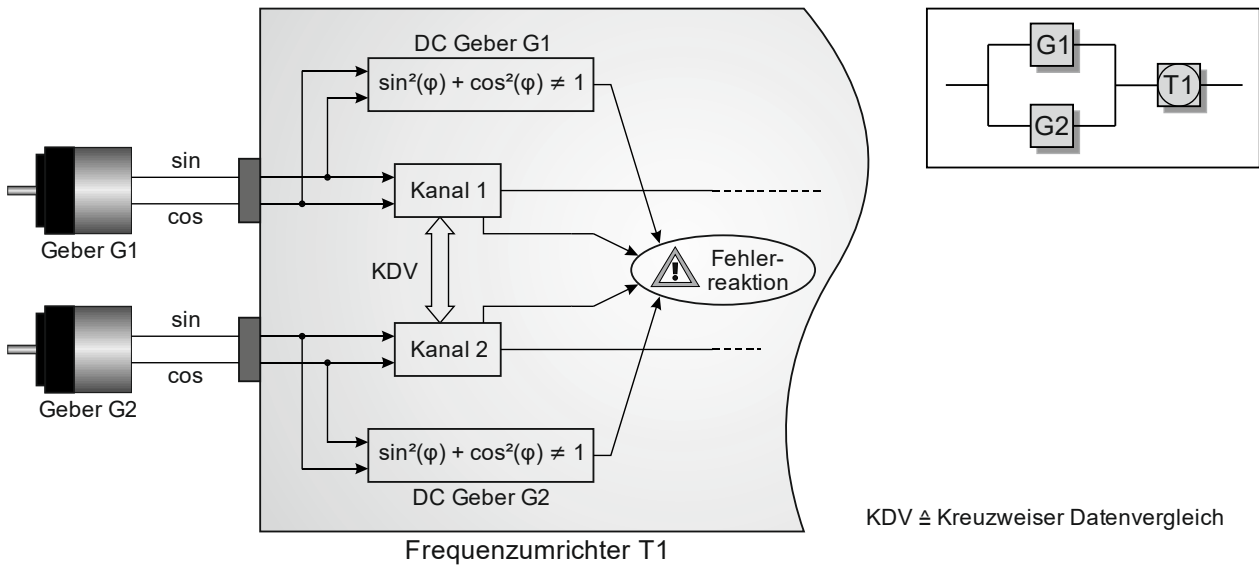


Bild 4: Zwei konventionelle Drehgeber und Signalverarbeitung im sicheren Frequenzumrichter T1

In der Kategorie 3 wird die Einfehlersicherheit gefordert („Ein einzelner Fehler führt nicht zum Verlust der Sicherheitsfunktion“). Die hier betrachtete Architektur ist durchgehend zweikanalig aufgebaut, sodass die Erfüllung der Einfehlersicherheit kein Problem sein sollte. Es ist jedoch Augenmerk auf die mechanische Kopplung der Geber an die zu überwachende Bewegung in der Maschine zu richten. Ein einzelner Fehler darf nicht gleichzeitig gefährliche Auswirkungen auf Geber 1 und Geber 2 haben. Alternativ kann eine gemeinsame Montage erfolgen, wenn für mindestens einen der beiden Geber ein Fehlerausschluss für die Kopplung Bewegung/Geber begründet werden kann (siehe Tabelle D.8 in [2] oder Tabelle A.1 in [4]).

2.2.2 Kategorie 3, ein einzelner konventioneller Geber

Das Subsystem Geber muss mindestens den PL erfüllen, der für die Sicherheitsfunktion als PL_r festgelegt wurde. In unserem Beispiel gilt für SF1 ein PL_r von d. Da im Subsystem G nur ein einzelner Geber eingesetzt werden soll, muss für diesen nachgewiesen werden, dass er die Anforderungen von PL d erfüllt. Hierzu können die vom IFA veröffentlichten „Grundsätze für die Prüfung und Zertifizierung von Winkel- und Wegmesssystemen für die Funktionale Sicherheit“ [4] verwendet werden. Für universell einsetzbare Sin-/Cos-Geber muss grundsätzlich unterstellt werden, dass sie einkanalig sind, denn für einige Sicherheitsfunktionen werden das Sin- UND das Cos-Signal benötigt, z. B. für die Bestimmung der Drehrichtung. Um trotzdem die Anforderung der Einfehlersicherheit in Kategorie 3 zu erfüllen, ist eine „Ideale Fehlererkennung“ erforderlich (siehe Abschnitt 2.5). In unserem konkreten Beispiel wird der Geber ausschließlich für die Bestimmung der Drehzahl eingesetzt und dafür ist die Drehrichtung unerheblich. In diesem Fall kann ggf. unter Anwendung von Fehlerausschlüssen im mechanischen Teil die Zweikanaligkeit im Geber nachgewiesen werden und die Anforderung der „Idealen Fehlererkennung“ könnte entfallen.

Eine kritische Stelle dieser Architektur ist in Bild 5 leicht erkennbar. Ein Bruch der Verbindung zwischen Geberwelle und Antriebswelle führt sofort zu einem unerkannten gefährlichen Ausfall der Sicherheitsfunktion, sofern im Frequenzumrichter keine zusätzlichen Maßnahmen (z. B. Vergleich mit Erwartungshaltung) greifen.

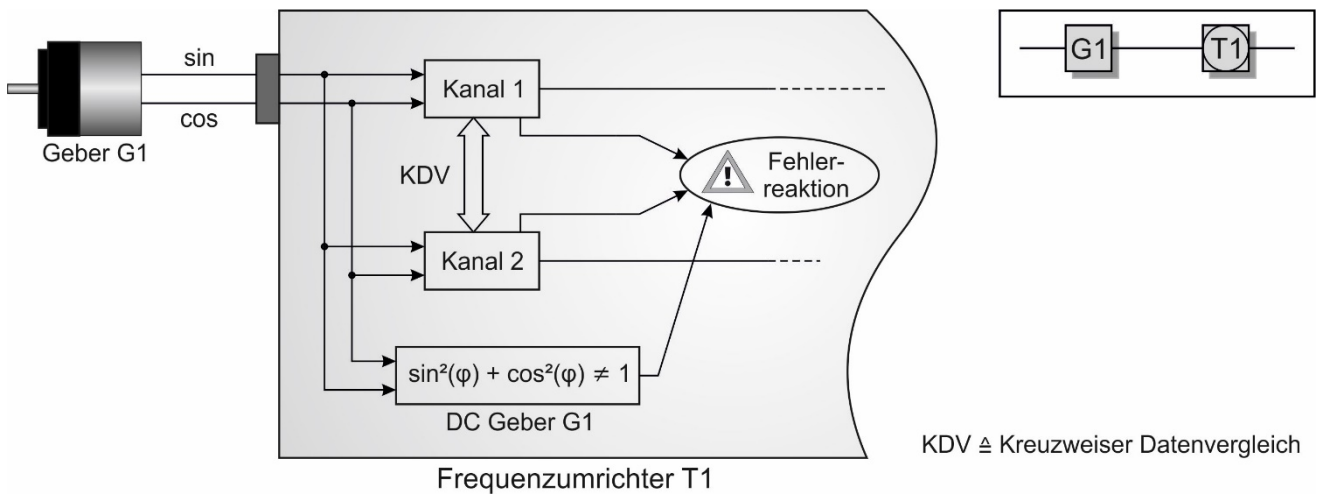


Bild 5: Subsystem G1 in Kategorie 3 mit individuellem konventionellen Drehgeber und Signalverarbeitung im sicheren Frequenzumrichter T1

Ein Fehlerausschluss für die mechanische Verbindung Bewegung/Geber ist daher unabdingbar. Hierzu ist durch den Geberhersteller ein Nachweis der hinreichenden Festigkeit zu führen. Das Mitdrehen des Gebergehäuses bei Versagen der Befestigung kann ebenfalls Auswirkungen auf die Sicherheitsfunktion haben und muss berücksichtigt werden (siehe Tabelle D.8 in [2], bzw. Tabelle A.1 in [4]).

Hinweis: In der Vergangenheit konnte man davon ausgehen, dass bei Geberfehlern wegen fehlerhafter Kommutierung des Motors auch eine „Fehlererkennung über den Prozess“ erfolgt, sofern der Geber im Regelkreis des Motors eingebunden ist. Moderne Regelalgorithmen können jedoch auch bei angeschlossenem Geber zeitweise im geberlosen Betrieb arbeiten, sodass eine schnelle Fehlererkennung durch Betriebsstörungen an der Maschine nicht sichergestellt ist.

2.2.3 Kategorie 2, ein konventioneller Geber

Wenn das Subsystem Geber nur mit einem einzigen Geber realisiert wird und die „Ideale Fehlererkennung“ nicht erfolgen kann, ist ggf. eine Kategorie-2-Lösung möglich. In Bild 6 sind Prinzipschaltbild und sicherheitsbezogenes Blockdiagramm dargestellt.

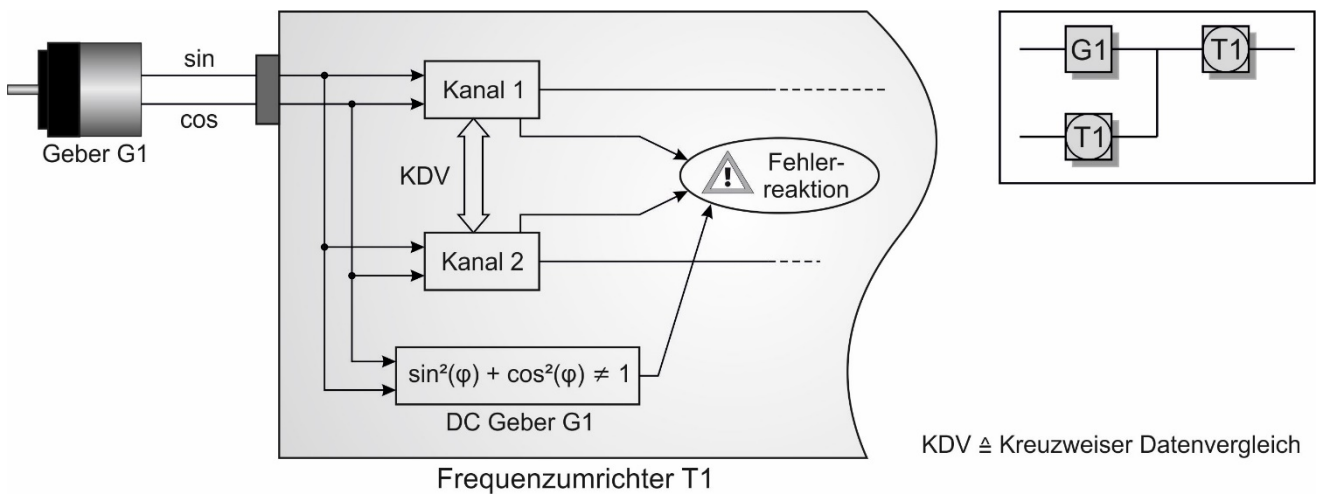


Bild 6: Subsystem G1 in Kategorie 2 mit individuellem konventionellen Drehgeber und Signalverarbeitung im sicheren Frequenzumrichter T1

Die Einfehlersicherheit ist keine Forderung der Kategorie 2, sodass auch der Ausschluss der mechanischen Fehler nicht zwingend erforderlich ist. Allerdings werden für PL d in Kategorie 2 hohe Anforderungen an die $MTTF_D$ und den DC_{avg} gestellt. Im vorherigen Beispiel zur Kategorie 3 mit einem einzelnen Geber wurde für den Bruch der Kopplung Bewegung/Geber ein Fehlerausschluss angenommen. Nur dadurch konnte die Einfehlersicherheit erreicht werden, da keinerlei Maßnahmen zur Fehlererkennung verfügbar sind. Auch in der Kategorie 2 ist die Erkennung dieses mechanischen Fehlers normalerweise nicht praktikabel, da er mit Auswirkungen auf den Fertigungsprozess verbunden ist. Es ist jedoch das Prinzip der Kategorie 2, alle Bauteile zu testen (Anmerkung 1 in [1], Abschnitt 6.2.5) und eine Testung der Sicherheitsfunktion in „angemessenen Zeitabständen“ durchzuführen. Diese Bedingung kann mangels praktikabler Testmöglichkeit nicht erfüllt werden. Das Subsystem „Einzelner Geber“ lässt sich also auch in Kategorie 2 ohne den Fehlerausschluss für die Kopplung Bewegung/Geber i. d. R. nicht realisieren.

2.3 SF1 unter Verwendung eines sicheren Drehgebers

Für sichere Geber werden vom Hersteller alle notwendigen sicherheitsrelevanten Daten angegeben, sie stellen also ein gekapseltes Subsystem dar (siehe Bild 7).

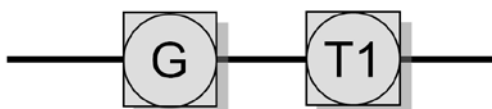


Bild 7: SF1 – Sicherheitsbezogenes Blockdiagramm

Für unsere Sicherheitsfunktion SF1 ist nur noch folgendes zu tun:

- Geber auswählen, der mindestens für den Einsatz in PL d geeignet ist
- $PFH_{D, SF1}$ berechnen: $PFH_{D, SF1} = PFH_{D, Geber} + PFH_{D, T1}$
- Überprüfen, ob die im Datenblatt vorgeschriebene Fehlererkennung für den Geber vom Frequenzumrichter T1 durchgeführt wird und ausreichend häufig erfolgt.

2.4 Was ändert sich bei PL e?

Soll die im Beispiel angenommene Sicherheitsfunktion SF1 den Performance Level e erfüllen, so ändern sich für das Subsystem Geber gegenüber PL d die folgenden Anforderungen:

- $MTTF_D$: mittel/hoch → hoch
- DC_{avg} : niedrig/mittel → mittel/hoch
- Bei Realisierung in Kategorie 4 ist die mögliche Anhäufung von unentdeckten Fehlern zu berücksichtigen.
- Die Softwareanforderungen für PL e sind einzuhalten
- Die Anwendung von Fehlerausschlüssen findet in PL e/SIL 3 besondere Beachtung. Im „Leitfaden zur Anwendung von ISO 13849-1 und IEC 62061 bei der Gestaltung von sicherheitsbezogenen Steuerungen für Maschinen (ISO/TR 23849:2010) [6] heißt es im Abschnitt 7.2.2.3 hierzu: „ ... ist es im Allgemeinen nicht die Regel, sich auf Fehlerausschlüsse allein zu verlassen ...“ und es wird die Abhängigkeit von der verwendeten Technologie und den vorgesehenen Betriebsbedingungen herausgestellt. Fehlerausschlüsse werden also insbesondere im PL e sehr restriktiv verwendet und müssen fundiert begründet werden.

Eine ausreichend hohe $MTTF_D$ kann – wie immer – nur durch den Einsatz eines geeigneten Gebers erfüllt werden.

Fehler erkennende Maßnahmen werden i. d. R. nicht überwacht. Bei unbemerktem Ausfall der Diagnose kann der nächste Fehler zu einem gefährlichen Ausfall der Sicherheitsfunktion führen. Dies ist in der Kategorie 4 nicht zulässig, daher sind weitere Maßnahmen erforderlich, wie z. B. redundante Ausführung der Überprüfung, Wirksamkeitstest der Überprüfung, Verwendung von zwei Gebern o. Ä.

Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, ist für Eingebersysteme ein Fehlerausschluss für die Kopplung Bewegung/ Geber erforderlich. Trotz der Einschränkung von Fehlerausschlüssen in [6] für PL e und SIL 3 ist dies aufgrund der Überdimensionierung der mechanischen Konstruktion entsprechend [2], Tabelle D.8 zulässig.

2.5 Ideale Fehlererkennung

Universelle inkrementelle Sin-/Cos-Geber können ohne Einschränkung für alle Sicherheitsfunktionen eingesetzt werden. Hierzu gehört u.a. die Bestimmung der Dreh- bzw. Bewegungsrichtung, wie sie für alle Sicherheitsfunktionen notwendig ist, die Positionen von Maschinenteilen überwachen. Zur Richtungsbestimmung wird die Phasenverschiebung zwischen Sin und Cos ausgenutzt. Es werden also der Sin-Kanal *und* der Cos-Kanal benötigt und damit liegt keine Zweikanaligkeit vor – die für Kategorie 3 und Kategorie 4 erforderliche Einfehlersicherheit ist infrage gestellt. Diese Problematik besteht auch in den Fällen, in denen aus Sin *und* Cos durch Interpolation Zwischenwerte gebildet werden, z. B. um die Auflösung zu erhöhen.

Lässt sich also mit einem einzigen Geber die für die Kategorien 3 und 4 erforderliche Einfehler-sicherheit überhaupt realisieren? In bestimmten Fällen ist dies trotz der Einkanaligkeit möglich, nämlich wenn

- alle Fehler erkannt werden (100 %); Nachweis durch FMEA und
- die Fehlererkennung und -reaktion so schnell (in Prozesssicherheitszeit) erfolgt, dass ein gefährlicher Zustand vermieden wird (siehe [7], Abschnitt 6.2.6).

Dies wird im Prüfgrundsatz GS-IFA-M21 [4] mit „Ideale Fehlererkennung“ bezeichnet. Hierzu wird auch ein Tool „Statische Analyse“ angeboten, mit dessen Hilfe beliebige Verfahren der Fehlererkennung simuliert werden können, um zu prüfen, ob damit ein DC von 100% erreicht werden kann.

Hinweis 1: Für die Berechnung der PFH_D wird trotzdem konservativ mit $DC = 99\%$ gerechnet.

Hinweis 2: Diese Struktur entspricht nicht den vorgesehenen Architekturen der ISO 13849-1, sodass die vereinfachte Methode der PFH_D -Berechnung aus der Norm und damit die Software SISTEMA nicht ohne weiteres eingesetzt werden können.

Ist die Ideale Fehlererkennung beim Einsatz einzelner Sin/Cos-Geber in Kategorie 3 oder 4 immer erforderlich? Nein, es gibt eine Ausnahme, bei der drei Bedingungen erfüllt sein müssen:

- die Dreh-/Bewegungsrichtung ist für die Sicherheitsfunktion unerheblich, und
- es erfolgt keine Interpolation von Sin und Cos, und
- im angeschlossenen zweikanaligem Auswertegerät wird in jedem Kanal die Drehzahl durchgängig unabhängig vom anderen Kanal ermittelt.

Die Auswertung der Gebersignale erfolgt jedoch in Frequenzumrichtern und Überwachungsgeräten häufig mit „Quadraturdecoder“-ICs (Integrated Circuits, integrierte Schaltungen), die für die Erzeugung der zur Drehzahlbestimmung erforderlichen Ausgangssignale sowohl das Sin- als auch das Cos-Signal verwenden (siehe Bilder 5 und 6). Es findet in diesem Fall also keine unabhängige Auswertung der beiden Gebersignale statt. Selbst wenn in jedem Kanal des Auswertegeräts ein separates IC eingesetzt wird, führt ein Fehler von Sin oder Cos zu identischen falschen Ergebnissen in beiden Kanälen. Ein Kreuzvergleich der beiden Drehzahlwerte innerhalb des Auswertegeräts kann also keine Geberfehler aufdecken.

3 Entscheidungshilfe

Die Konsequenzen aus den Überlegungen des vorherigen Abschnitts sind in Bild 8 grafisch dargestellt. Das Flussdiagramm soll helfen, über den Einsatz sicherer oder konventioneller Geber zu entscheiden, indem es die jeweils verschiedenen erforderlichen Maßnahmen aufzeigt.

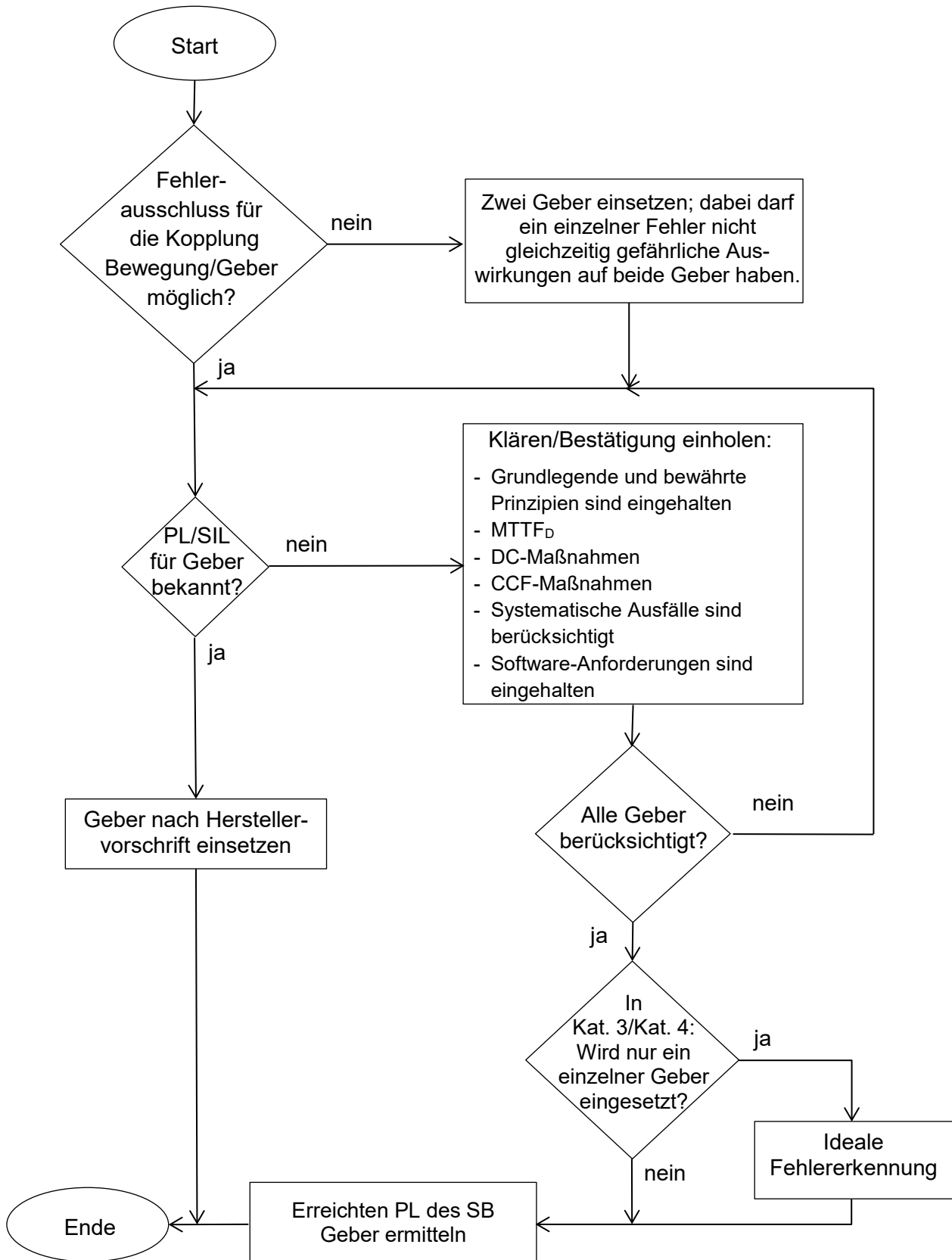


Bild 8: Vorgehen beim Einsatz sicherer oder konventioneller Geber in PL c, d und e

4 Zusammenfassung

Der Einsatz konventioneller Geber in Sicherheitsfunktionen ist prinzipiell möglich, es ist jedoch jeweils der Nachweis zu führen, dass der erforderliche Performance Level erfüllt wird. Dazu sind Detailkenntnisse des Produktes erforderlich, die i. d. R. eine Unterstützung durch den Geberhersteller erfordern. Kritisch ist insbesondere der für Eingebersysteme erforderliche Fehlerausschluss für die Kopplung Bewegung/Geber. Der Einsatz sicherer Geber gestaltet sich demgegenüber erheblich einfacher, da alle notwendigen sicherheitsrelevanten Informationen vorliegen.

Literatur

- [1] DIN EN ISO 13849-1: Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze (06.16). Beuth, Berlin 2016
- [2] DIN EN 61800-5-2 (VDE 0160-150-2): Elektrische Leistungsantriebssysteme mit einstellbarer Drehzahl – Teil 5-2: Anforderungen an die Sicherheit – Funktionale Sicherheit (11.17). Beuth, Berlin 2017
- [3] Bömer, T.; Schaefer, M.: Unterschiede bei der Verwendung von fertigen Sicherheitsbauteilen und Standardbauteilen für die Realisierung von Sicherheitsfunktionen an Maschinen. Hrsg.: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin 2011.
<http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/standardkomponenten.pdf>
- [4] Prüfgrundsatz GS-IFA-M21. Grundsätze für die Prüfung und Zertifizierung von Winkel- und Wegmesssystemen für die Funktionale Sicherheit. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin 2015.
<http://www.dguv.de/webcode/d11973>
(hier steht auch das Tool „Statische Analyse“ zur Verfügung)
- [5] DIN EN ISO 13849-2: Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 2: Validierung (02.13). Beuth, Berlin 2013
- [6] DIN ISO/TR 23849: Leitfaden zur Anwendung von ISO 13849-1 und IEC 62061 bei der Gestaltung von sicherheitsbezogenen Steuerungen für Maschinen (12.14). Beuth, Berlin 2014
- [7] Hauke, M.; Schaefer, M.; Apfeld, R.; Bömer, T.; Huelke, M.: Funktionale Sicherheit von Maschinensteuerungen – Anwendung der DIN EN ISO 13849. IFA Report 2/2017. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin 2017.
<http://www.dguv.de/webcode/d18471>

Autor: Ralf Apfeld
Fachbereich 5: Unfallverhütung/Produktsicherheit
Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA)
Sankt Augustin
(Seit dem 1.1.2017 im Ruhestand und Convenor der IEC 61800-5-3 Functional Safety of Encoders)