

Projektierung einer automatischen Montageanlage für Textilspindeln unter Anwendung der DIN EN ISO 13849-1

Dipl. – Ing. (FH) Sven Barthel, Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz;

Dipl. – Ing. Thomas Koch, Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz;

Dipl. – Ing. (FH) Mark Richter, Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz;

Dipl. – Ing. Peter Blau, Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz;

Kurzfassung

Die Festlegung der Sicherheitsmaßnahmen unter technischen und ökonomischen Randbedingungen stellt in Unternehmen eine Herausforderung dar. Die „*Maschinenrichtlinie 2006/42/EWG*“ [4] in Verbindung mit den weiterführenden Normen, wie beispielsweise die „*DIN ISO 13849-1*“ [2], stellt dem Anwender hierfür eine geeignete Systematik zur Verfügung. Nachfolgend wird am Beispiel einer automatischen Montageanlage für Textilspindeln die Anwendung der Richtlinie aufgezeigt und für die Sicherheitsfunktion „*Not-Halt*“ näher erläutert.

1. Aufbau und Funktion der automatischen Spindelmontageanlage

Auf Grund der mit der Produktivitätssteigerung einhergehenden Erhöhung der Drehzahlen von Textilspindeln steigen die Anforderungen an deren Rundlaufgenauigkeit. Zur Minimierung der Prozesskette und unter dem Anspruch der gleichzeitigen Steigerung von Qualität und Quantität wurde vom Fraunhofer IWU in Zusammenarbeit mit der SIM Automation GmbH & Co. KG eine automatische Fertigungslinie zur Montage von Textilspindeln entwickelt.

Die Textilspindel (Bild 1) ist mit ihrem Spindelblatt in der Ringspinnmaschine gelagert. Der Treibriemen zum Antrieb der Spindel läuft in der unteren Verjüngung des Triebwirtels. Die Spannfedern und die Spannkugeln im Spindelschaft halten und zentrieren den Spulenkörper. Der Zahnkranz wird in Verbindung mit dem Topfmesser zum Durchtrennen des Fadens beim Spulenwechsel genutzt.

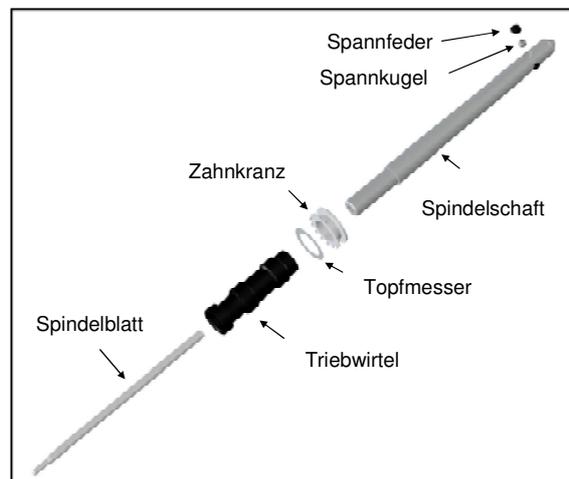


Bild 1: Explosionsdarstellung einer Spindel der Version 7

Die entwickelte Montageanlage besteht aus zwei umzäunten und über eine Transporteinrichtung verbundenen Arbeitszellen (AZ). Der Zugang ins Innere erfolgt über Schutztüren, welche von der Sicherheitssteuerung über Sicherheitsschutzschalter mit Zuhaltung überwacht werden. Die Anlage ist für neun verschiedene Spindeltypen konzipiert und in die Anlagenteile (Bild2) Pressstation, Bearbeitungsstation, Montagestation und Reinigungsstation unterteilt. Die Pressstation befindet sich in AZ 1. Die anderen Unterstationen sind in AZ 2 untergebracht. Die Arbeitszellen können autark oder verkettet betrieben werden. Arbeitet nur eine AZ, werden die vormontierten Spindeln manuell auf das Transportband aufgelegt bzw. entnommen.

In der Pressstation werden die vorgefertigten Einzelteile in mehreren Schritten und abhängig von der zu fertigenden Spindelversion von elektromechanischen Pressmodulen gefügt. In

der Bearbeitungsstation werden die Spindeln anschließend gebohrt und gefräst. Im letzten Arbeitsgang erfolgt die Montage der Spannkugeln bzw. der Spannfedern. Beim Verlassen der Anlage über die Reinigungsstation werden Bearbeitungsrückstände entfernt.

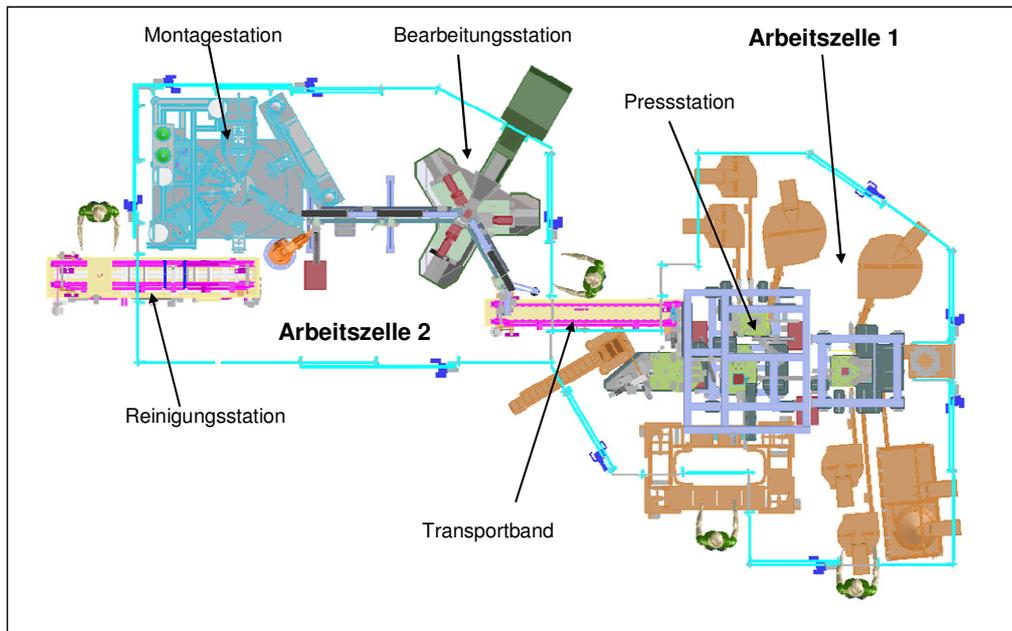


Bild 2: Übersicht der Spindelmontageanlage

2. Anzuwendende Normen und Richtlinien

Die rechtliche Grundlage zur Maschinensicherheit in Europa bilden die Maschinen- und die Arbeitsmittel-Benutzungs-Richtlinien. Die „*Maschinenrichtlinie 2006/42/EG*“ [4] wendet sich an die Hersteller von Maschinen und Anlagen. Für die Betreiber von Maschinen ist die „*Arbeitsmittel-Benutzungs-Richtlinie 89/655/EWG*“ [5] bindend. Die Maschinenrichtlinie verpflichtet Hersteller von Maschinen und Anlagen bereits in der Planungs- und Entwurfsphase eine Gefahrenanalyse durchzuführen und diese zu dokumentieren. In der Gefahrenanalyse werden alle von der Maschine ausgehenden Gefahren ermittelt, analysiert und durch die Anwendung geeigneter Sicherheitsmaßnahmen beseitigt oder zumindest verringert. In der Maschinenrichtlinie sind die festgelegten Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen sehr allgemein formuliert. Aus diesem Grund werden diese Anforderungen durch harmonisierte europäische Normen konkretisiert. Es gibt drei Normentypen: Grund- (Typ A), Gruppen- (Typ B) und Produktnormen (Typ C). Im Gegensatz zu den Richtlinien sind die Normen nicht verbindlich. Bei Nichtanwendung, muss der Hersteller nachweisen, dass seine Maßnahmen konform zu den Richtlinien sind. Auf Grund des zu erwartenden Arbeitsumfanges sollten vorzugsweise die harmonisierten Normen

angewendet werden, da nur diese eine Konformität mit den grundlegenden Richtlinien vermuten lassen. Diese Bedingung erfüllen nur Normen vom Typ C (Vermutungsprinzip). Im Fall der zu beurteilenden automatischen Spindelmontageanlage existiert keine Typ C-Norm. Folglich ist wie bei Typ A und Typ B eine Gefahrenanalyse durchzuführen.

Weitere wichtige anzuwendenden Normen und Richtlinien sind:

- „EMV Richtlinie 2004/108/EG“,
- „Niederspannungsrichtlinie 2006/95/EG“,
- „DIN EN ISO 13849-1 – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen“ [2]
- „DIN EN 418: Not-Aus-Einrichtungen, funktionelle Aspekte, Gestaltungsleitsätze“

Die Spindelmontageanlage muss auf mögliche Gefährdungen des Bedienpersonals und auf weitere Risiken beim Transport, bei der Inbetriebnahme, beim Betrieb, bei der Wartung und der Inspektion hin untersucht werden. Die Risikobeurteilung ist nach der Norm „DIN EN 13849-1“ durchzuführen.

Zur Anwendung der Normen und Richtlinien ist es zwingend erforderlich, zunächst den Anwendungsbereich der zu beurteilenden Anlage zu definieren.

Die Spindelmontageanlage ist als eine geschlossene Anlage zu betrachten. Sie besteht aus zwei Arbeitszellen, die jeweils mit einer Schutzabspernung umzäunt sind. Der bestimmungsgemäße Gebrauch der Anlage besteht im automatischen Fügen, Bearbeiten und Montieren von Textilspindeln. Ein nahe liegender Fehlgebrauch der Anlage ist nicht möglich. Die zeitliche Lebensdauer der Anlage wird auf 20Jahre veranschlagt. Die Anlage wird in den Betriebsarten Automatik und Einrichten betrieben. Das die Arbeitszellen verbindende Transportband und die Beschickung der Reinigungsstation werden stets mit sicher reduzierter Geschwindigkeit betrieben.

3. Sicherheitsbetrachtung nach DIN EN ISO 13849

3.1 Allgemeine Betrachtungen

Die Normen „DIN EN ISO 13849-1“ und „DIN EN ISO 13849-2“ beschreiben die erforderliche Risikominderung bei der Konstruktion, dem Aufbau und der Integration von sicherheitsbezogenen Steuerungsteilen. Ein wesentliches Merkmal ist die Betrachtung von Bauteilen verschiedener Technologien innerhalb eines Verfahrens. Die Normenreihe nutzt das in der Norm „DIN EN ISO 14121-1“ [6] beschriebene Verfahren zur Identifizierung von Gefährdungen, zur Risikoeinschätzung und Risikobewertung. Die „DIN EN 13849-1“

beinhaltet eine allgemein anwendbare Systematik für die Beurteilung von Maschinensteuerungen und deren Schutzeinrichtungen. Das Struktogramm des iterativen Verfahrens ist in Kapitel 4.2.2 der „DIN EN ISO 13849-1“ abgebildet. Zur Beurteilung und Auslegung der sicherheitstechnischen Komponenten wird deren Ausfallwahrscheinlichkeit nach dem Ansatz der „DIN EN/IEC 61508“ [7] berücksichtigt. Die in der „DIN EN 954-1“ verwendeten Kategorien wurden um das umfassendere Konzept der Performance Level (PL) erweitert, was eine flexiblere Einsetzbarkeit der sicherheitstechnischen Architekturen ermöglicht.

Für die Montageanlage wurde dieses Verfahren mit Hilfe des vom Institut für Arbeitsschutz (IFA) als Freeware zur Verfügung gestellten Software-Assistenten SISTEMA angewandt.

3.2 Identifikation und Festlegen der Eigenschaften der Sicherheitsfunktion „Not-Halt“

Die Vorgehensweise bei der Identifikation der Sicherheitsfunktionen (SF) wird nachfolgend am Beispiel der SF „Not-Halt“ erläutert. Zuerst wird für jede SF der erforderliche Performance Level durch die Bewertung der drei **Risikoparameter** „Schwere der Verletzung“ (**S**), „Häufigkeit und/oder Dauer der Gefährdungsexposition“ (**F**) und „Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung“ (**P**) ermittelt (Bild 3). Dabei werden die in der Anlage auftretenden Gefahren und Gefährdungen separat für jede Betriebsart unter Anwendung der „DIN EN 12100-1“ und „DIN EN 12100-2“ berücksichtigt.

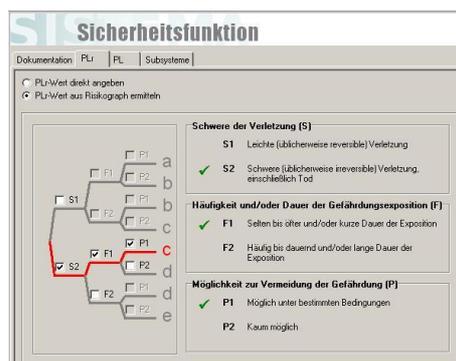


Bild 3: Risikograph für SF „Not-Halt Pressstation“, erstellt mit dem Programm SISTEMA

Auf Grund der im Einrichtbetrieb an den Fügemodulen, den Rundtischen und der Bearbeitungsstation zu erwartenden Gefährdungen wurde abgeleitet, dass schwere irreversible Verletzungen auftreten können. In Folge dessen ist der Risikoparameter **S** mit **S2** zu bewerten. Damit müssen alle SF für diese Komponenten mindestens dem PL "c" entsprechen. Anhand der Vielzahl der Komponenten in der Anlage kann dies nur durch die

Aufsplittung – aus sicherheitstechnischer Sicht – der SF „Not-Halt“ in mehrere Teilfunktionen erreicht werden. Hard- und softwaretechnisch existiert nur eine Not-Halt Funktion, d. h. das Drücken eines Not-Aus-Taster stoppt alle gefahrbringenden Bewegungen. Voraussetzung für diese Verfahrensweise ist, dass die Gefährdungen örtlich begrenzt sind, d. h. es verursachen nur die Komponenten Gefährdungen, in deren Arbeitsraum der Bediener von seinem jeweiligen Standort aus eingreifen kann. Daher müssen in den einzelnen Not-Halt-SF nur die Komponenten berücksichtigt werden, die in Reichweite des Bedieners liegen. In Anbetracht des anzustrebenden Performance Levels und des Projektierungsaufwandes wurde die Not-Halt-Funktion der Gesamtanlage in fünf Teilfunktionen, eine pro Unterstation und je eine für die Transportbänder, unterteilt. Laut BGIA Report [3] ist die Unterteilung in mehrere SF nicht erforderlich. Es muss nur der Ort mit der größten Gefährdung bewertet werden. Diese Betrachtungsweise birgt aber das Risiko, den Ort mit der größten Gefährdung falsch einzuschätzen bzw. zu übersehen. Mit der Unterteilung in mehrere SF besteht dieses Risiko nicht, da alle gefahrbringenden Komponenten berücksichtigt werden. Im nächsten Schritt wird der Risikoparameter **F** bewertet. Die Grenze bei der Auswahl zwischen F1 und F2 wird in der Norm nicht konkret genannt. Sie wird lediglich durch den Hinweis, "Wenn Eingriffe häufiger als einmal pro Stunde durchzuführen sind, sollte F2 gewählt werden, andernfalls F1." [2], definiert. Für die Bewertung ist das Verhältnis zwischen der Gesamtnutzungsdauer der Maschine und der Dauer der Gefährdung zu berücksichtigen. Das Konzept der Spindelmontageanlage ist so ausgelegt, dass die Zeitdauer für die Einrichtarbeiten gegenüber der Zeit, in der sich die Anlage im Automatikbetrieb befindet, sehr kurz ist. Im Normalfall wird die Anlage auf einen Spindeltyp eingerichtet und läuft dann mehrere Stunden bis Tage durch. Da im Automatikbetrieb keinerlei Eingriffe in gefährlichen Bereichen durchzuführen sind, wird die Häufigkeit der Gefährdungsexposition mit **F1** bewertet. Zum Abschluss erfolgt die Bewertung des Risikoparameters **P**. Im Einrichtbetrieb ist die Geschwindigkeit der elektrischen Achsen auf die sicher reduzierte Geschwindigkeit von 2 m/min eingestellt, wodurch es möglich ist, den Gefahrenbereich rechtzeitig zu verlassen. Es kann **P1** gewählt werden, weil der Bediener durch die Anordnung der Taster gezwungen wird zur Initiierung eines Verfahrbefehles das Bedienpanel mit beiden Hände zu betätigen.

3.3. Realisierung der Sicherheitsfunktion am Beispiel „Not-Halt Presstation“

Zunächst wird das in Anhang B.2 der Norm „DIN EN ISO 13849-1“ beschriebene sicherheitsbezogene Blockdiagramm (siehe Bild 4) mit allen sicherheitsrelevanten Bauteilen entworfen. Dabei wird jede Sicherheitsfunktion in die Teilfunktionen **Erfassen**, **Auswerten**, **Reagieren** und **Testen** unterteilt.

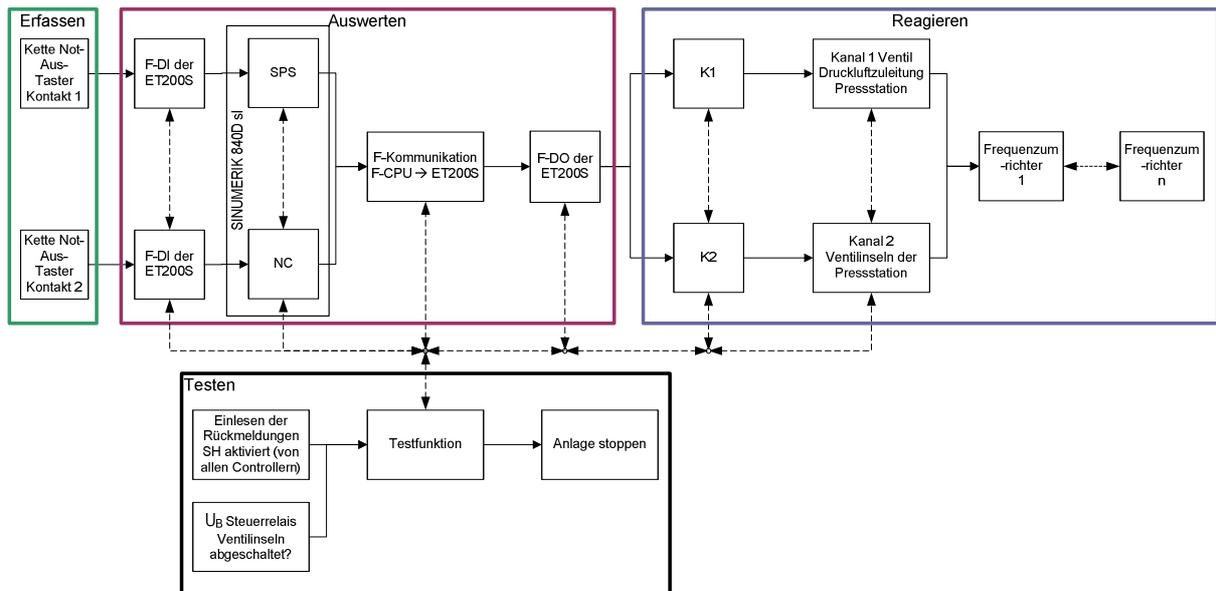


Bild 4: Sicherheitsbezogenes Blockdiagramm der Sicherheitsfunktion „Not-Halt Presstation“

Die Not-Aus-Taster, die der Teilfunktion **Erfassen** zugeordnet sind, sind zweikanalig ausgelegt. Die Kontakte jedes Not-Aus-Tasters werden einzeln über fehlersichere digitale Eingänge mit der Sicherheitssteuerung verbunden. Im Gegensatz zu den Kontakten ist der mechanische Betätigungselement der Not-Aus-Taster nur einkanalig ausgelegt, d. h. bricht das Betätigungselement ab, fallen beide Kanäle aus. Aufgrund der implementierten Testfunktion und der Verwendung bewährter Bauteile kann dieser Fehler als unwahrscheinlich eingestuft werden.

Zur Teilfunktion **Auswerten** gehören die fehlersichere Steuerung (F-CPU) mit entsprechenden digitalen Ein- und Ausgangsbaugruppen (F-DI, F-DO) sowie die Anwendung des fehlersicheren Kommunikationsprotokolls (Profisafe). Alle Komponenten besitzen vom Hersteller integrierte dynamische Testfunktionen.

Die Teilfunktion **Reagieren** wird aus den Komponenten Steuerschütze, Ventilinseln/Wegeventile und den Frequenzumrichtern der Atriebe gebildet. Pro Kanal wird ein Schütz von einem fehlersicheren Ausgang angesteuert. Dieser steuert über die Schütze der Kontakterweiterung die fehlersicheren Eingänge der Frequenzumrichter und schaltet im Fehlerfall die Spannungsversorgung der Steuerrelais der Wegeventile bzw. die Druckluftzufuhr der pneumatischen Achsen ab. Die eingesetzten 5/3 Wegeventile sind bei der Bewertung der SF mit zu berücksichtigen. Ein Ausfall des Rückführmechanismus der Ventile kann ausgeschlossen werden, da er durch den Prozess sofort erkannt wird. Alle Frequenzumrichter sind mit einer integrierten Sicherheitsfunktion (inklusive dynamischer Testfunktion) ausgerüstet, welche eine Stoppfunktion nach Kategorie 1 der

„DIN EN ISO 60204-1“ [8] – gesteuertes Stillsetzen, Energieabschaltung erst nach Stillstand – realisiert. Die Komponenten der Teilfunktion **Reagieren** werden auch von den SF zur Überwachung der Schutztüren genutzt und in regelmäßigen Abständen getestet. Die Tests erfolgen in der Betriebsart **Einrichten**, im Regelfall einmal pro Schicht. Beim Umschalten in die Betriebsart Einrichten werden die elektrischen und pneumatischen Antriebe immer in den sicheren Zustand überführt. Für den Fall, dass eine Arbeitszelle über mehrere Schichten im Automatikbetrieb durchläuft, darf die festgelegte Zeit bis zum nächsten Test überschritten werden. Beim nächsten Stopp der Anlage wird der Bediener aufgefordert, einen Test der Not-Aus-Funktion durchzuführen. Hierbei wird von der Steuerung vorgegeben, welcher Not-Aus-Taster zu betätigen ist, wodurch in regelmäßigen Abständen jeder Taster überprüft wird. Der Automatikbetrieb lässt sich erst nach erfolgtem fehlerfreiem Test der Not-Aus-Funktion starten.

3.4 Bewertung der Sicherheitsfunktion „Not-Halt Pressstation“ mit dem Softwareassistenten SISTEMA

Die Bewertung der SF erfolgte mit dem Softwareassistenten SISTEMA (Sicherheit von Steuerungen und Maschinen). Das Programm unterstützt den Nutzer bei der Nachbildung der Struktur der sicherheitsrelevanten Steuerungsteile (Safety-Related Parts of Control System – SRP/CS). Anhand dieser Strukturen berechnet das Tool automatisch die resultierenden Werte der Parameter von jedem einzelnen SRP/CS bis zur gesamten SF. Über Masken erfolgt die Eingabe von relevanten Parametern zum Bestimmen verschiedener Kennzahlen:

- erforderlicher PL
- Kategorie des SRP/CS
- PFH → Probability of a dangerous Failure per Hour (durchschnittliche Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls je Stunde)
- CCF → Common Cause Failure (Ausfälle in Folge gemeinsamer Ursache)
- MTTF_d → Mean Time Io Dangerous Failure (mittlere Dauer bis zum gefahrbringenden Ausfall)
- DC_{avg} → durchschnittlichen Diagnosedeckungsgrad (avg = average)

Das Programm verrechnet die Werte sofort nach der Eingabe und der Anwender kann anhand der Ergebnisse die Auswirkung der einzelnen Parameter ablesen.

Die SF „Not-Halt Pressstation“ setzt sich aus 22 Subsystemen zusammen. Die Eingabe der notwendigen Parameter kann prinzipiell in drei verschiedenen Varianten erfolgen.

Variante 1:

Für die Subsysteme „F-DI“, „F-DO“, „SINUMERIK 840D sl“, „F-Kommunikation“, „Rundtische“, „elektrische Y- und Z-Achsen“ und „Transportband“ wurden vom Hersteller jeweils PL, PFH und Kategorie angegeben. Mit diesen Angaben können diese Komponenten als ein gekapseltes Subsystem betrachtet werden.

Variante 2:

Zur Bewertung der Fügemodule wurden die Parameter Kategorie, $MTTF_d$, und DC_{avg} aus der Herstellerdokumentation entnommen.

Variante 3:

Die Struktur der Subsysteme „Not-Aus-Taster“, „Steuerschütze“ und „Pneumatischen Ventile“ entspricht der Kategorie 3. Die Hersteller geben nur die Anzahl der Schaltspiele als B_{10d} - Wert an. Mit dem B_{10d} - Wert und den Parametern Produktionstage pro Jahr (d_{op}), Produktionsstunden pro Tag (h_{op}) und Zykluszeit der Anforderung (t_{zyklus}) wird mittels der in der „DIN EN ISO 13849-1“ angegebenen Formeln (1), (2) der $MTTF_d$ - Wert berechnet (Beispielrechnung mit Werten für die Not-Aus-Taster).

$$n_{op} = \frac{d_{op} \cdot h_{op} \cdot 3.600 \frac{s}{h}}{t_{Zyklus}} = \frac{312 \frac{Tage}{a} \cdot 20 \frac{h}{Tag} \cdot 3.600 \frac{s}{h}}{3.600 \frac{s}{Zyklus}} = 6.240 \frac{Zyklus}{a} \quad (1)$$

$$MTTF_d = \frac{B_{10d}}{0,1 \cdot n_{op}} = \frac{1.000.000 \text{Zyklus}}{0,1 \cdot 6240 \frac{Zyklus}{a}} = \underline{\underline{1.602,56a}} \quad (2)$$

Die Zykluszeiten für die Anforderungen der Not-Aus-Taster, Steuerschütze und des Sicherheitsventils wurden mit einer Stunde angenommen, wobei in der Praxis von deutlich höheren Zykluszeiten ausgegangen werden kann.

Für die Wegeventile im Kanal 2 des Subsystems "Pneumatische Ventile" garantiert der Hersteller 20 Millionen Schaltspiele. Bei einer Zykluszeit von 9 s ergibt sich ein $MTTF_d$ von 8 Jahren. Das bedeutet, in der Herstellerdokumentation für die Spindelmontageanlage ist anzugeben, dass die Wegeventile nach 8 Jahren verschlissen und durch baugleiche Ersatzteile zu ersetzen sind.

Der Diagnosedeckungsgrad (DC) für die Kontakte der Not-Aus-Taster beträgt aufgrund des Kreuzvergleichs der F-DI's 99%. Bei den Wegeventilen beträgt der DC mindestens 90%, weil ein fehlerhafter Ausfall sicher durch den Prozess erkannt wird.

Die Maßnahmen gegen Ausfälle in Folge gemeinsamer Ursache werden aus einer Bibliothek (nach Tabelle F.1 der „DIN EN ISO 13849-1“) entnommen. Die Mindestpunktzahl für jedes Subsystem beträgt 65.

Die SF „Not-Halt Pressstation“ erreicht den geforderten PL "c", der sich aus den Eigenschaften der Subsysteme zusammen setzt. Grundlage hierfür bildet die Tabelle K1 im Anhang K der „DIN EN ISO 13849-1“. Zur Bestimmung des Gesamt-PL werden die PFH-Werte der Subsysteme zum Gesamt-PFH-Wert addiert. Die Sicherheitsfunktion kann maximal den Performance Level des Subsystems mit dem niedrigsten PL erreichen, im betrachteten Fall erreichen alle einen PL von "d" oder "e".

4. Zusammenfassung

Die Festlegung von Sicherheitsmaßnahmen sowohl nach technischen als auch ökonomischen Kriterien stellt für Hersteller von Maschinen und Anlagen eine Herausforderung dar. Auf den ersten Blick scheinen die gesetzlichen Bestimmungen den Aufwand zu vergrößern. Die beschriebene Anwendung der Richtlinien und Normen zeigt, dass dem Anwender vom Gesetzgeber eine praktikable Systematik zur Konstruktion von sicheren Maschinen zur Verfügung gestellt wird, die bei konsequenter Umsetzung das Risiko der Nichterkennung von möglichen Gefahren für den Anwender minimiert. Somit steigt für Hersteller und Betreiber von Maschinen und Anlagen die Gewissheit, dass alle notwendigen Sicherheitsmaßnahmen zum Schutz für Mensch und Material ergriffen wurden.

Literaturangaben

- [1] Barthel S.: Diplomarbeit „Entwicklung eines Steuerungs- und Antriebskonzeptes für die automatisierte Montage von Textilspindeln“; Chemnitz
- [2] DIN EN ISO 13849-1: „Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze“, Beuth, Berlin 2007
- [3] BGIA: BGIA – Report: „Funktionale Sicherheit von Maschinensteuerungen“, 2008
- [4] Richtlinie: „2006/42/EG“, 2006
- [5] Arbeitsmittel-Benutzungs-Richtlinie „89/655/EWG“, 1989
- [6] DIN EN 14121-1: "Sicherheit von Maschinen – Risikobeurteilung", Beuth, Berlin 2007
- [7] DIN EN IEC 61508: „Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer / elektronischer / programmierbarer elektronischer Systeme“, Beuth, Berlin 2006
- [8] DIN EN 60204-1: „Sicherheit von Maschinen - Elektrische Ausrüstung von Maschinen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen“, Beuth, Berlin 2006