



Elektrische Sicherheit durch Automatisierung der fünf Sicherheitsregeln

Sicheres Arbeiten im spannungsfreien Zustand

Abbildung 1: Arbeiten an einer elektrischen Anlage (© Minerva Studio, fotolia.com)

1 Einleitung

Dieser Beitrag stellt ein Verfahren zum automatischen Ablauf der fünf Sicherheitsregeln als Maßnahme zum Schutz gegen den elektrischen Schlag vor. Das Verfahren bezieht sich auf begehbare verfahrenstechnische Anlagen, die mehrmals täglich durch Personal gewartet und gereinigt werden müssen (Abbildung 1). Vor dem Betreten müssen die elektrischen Anlagen freigeschaltet werden, um elektrische Gefährdungen zu vermeiden. Der Ablauf dieser Freischaltung unterliegt den fünf Sicherheitsregeln. Wie man die Freischaltung automatisiert ausführen kann, wird im Folgenden detailliert erläutert.

2 Problembeschreibung

Das automatisierte Verfahren wird beispielhaft an einer verfahrenstechnischen Anlage zur Trennung von Materialien mittels Hochspannung vorgestellt. Die durch ein elektrostatisches Feld getrennten Materialien werden danach separat weiterverarbeitet. Aufgrund der Hochspannung besteht eine Gefährdung für das Wartungspersonal. Auch nach dem Freischalten können elektrische Betriebsmittel noch über signifikante Restladungen verfügen. Um Schutz gegen den elektrischen Schlag (Berührungsschutz) zu gewährleisten, muss die elektrische Anlage vor dem Zutritt korrekt freigeschaltet, entladen und geerdet sein – und zwar nach den fünf Sicherheitsregeln. Ein vereinfachtes elektrisches Prinzipschaltbild der Anlage stellt Abbildung 2 dar.

von elektrischen Anlagen gilt DIN VDE 0105-100. Sie enthält Verhaltensregeln, um eine elektrische Anlage und deren Betriebsmittel im sicheren Zustand zu erhalten und den Personenschutz zu gewährleisten. In Abschnitt 6.2 der Norm sind die folgenden fünf Sicherheitsregeln beschrieben:

1. Freischalten
2. Gegen Wiedereinschalten sichern
3. Spannungsfreiheit feststellen
4. Erden und Kurzschließen
5. Benachbarte, unter Spannung stehende Teile abdecken oder abschranken.

Laut DIN VDE 0105-100 sind die fünf Sicherheitsregeln ausschließlich durch Elektrofachkräfte und elektrotechnisch unterwiesene Personen anzuwenden.

3.1 Spezielle Anforderungen zum Schutz gegen den elektrischen Schlag

Die Anforderungen zum Schutz gegen elektrischen Schlag umfassen einen Basisschutz und einen Fehlerschutz, sodass sich eine Einfehlersicherheit ergibt. In der praktischen Umsetzung bedeutet dies, dass ein Fehler im elektrischen Betriebsmittel oder in einer elektrischen Anlage nicht zu einem elektrischen Schlag führen darf.

Das Prinzip der Einfehlersicherheit als Maßnahme für den Schutz gegen einen elektrischen Schlag kann anhand einer Elektroleitung verdeutlicht werden. Liegt ein Defekt der äußeren Mantelisolierung der Elektroleitung vor, so würde dies als erster Fehler betrachtet werden (siehe Abbildung 3 links). Die Sicherheit gegen einen elektrischen Schlag wäre in diesem Fall immer noch gegeben, da die stromdurchflossenen inneren Adern durch eine zweite Isolierung, die Aderisolierung, geschützt sind (siehe Abbildung 3 rechts). Die in Abbildung 3 dargestellte Elektroleitung genügt somit der Anforderung der Einfehlersicherheit im Berührungsschutz.

4 Methode und Realisierung der Automatisierung

Die beabsichtigte Automatisierung der fünf Sicherheitsregeln führt zur Anwendung von steuerungstechnischen Sicherheitsfunktionen, für die nach DIN EN ISO 13849-1 bestimmte

Anforderungen bestehen [4]. Auch in der Steuerungstechnik ist die Einfehlersicherheit ein gängiges Kriterium für die Bewertung der Sicherheit. Die für den Schutz gegen elektrischen Schlag geforderte Einfehlersicherheit entspricht in der Steuerungstechnik den Anforderungen an Sicherheitsfunktionen in Kategorie 3 und Performance Level d.

In Tabelle 1 werden die Zusammenhänge zwischen dem Schutz gegen elektrischen Schlag (Berührungsschutz) und der Steuerungstechnik gegenübergestellt.

In der Steuerungstechnik werden Sicherheitsfunktionen neben ihrer Architektur auch über die Wahrscheinlichkeit für einen gefährlichen Ausfall pro Stunde charakterisiert (*PFH*: Probability of Failure per Hour). Im vorliegenden Fall ist ein *PFH*-Wert einzuhalten, der Performance Level d entspricht.

Die Einfehlersicherheit kann durch zweikanalige schaltungstechnische Strukturen erreicht werden. Bei der hier zugrunde gelegten Kategorie 3 führt ein einzelner Fehler nicht zum Ausfall der Sicherheitsfunktion. Zusätzlich wird der Nachweis über die in der Steuerungstechnik geforderte Sicherheit über die Berechnung der mittleren Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls pro Stunde (Performance Level, PL) geführt. Das Schutzniveau des automatisierten Verfahrens ist daher vergleichbar mit dem des manuellen Freischaltprozesses.

Tabelle 1: Gegenüberstellung Berührungsschutz und Steuerungstechnik

Berührungsschutz	Steuerungstechnik
Einfehlersicherheit aus Basisschutz und Fehlerschutz 1. (Basisschutz) z. B. Aderisolierung 2. (Fehlerschutz) z. B. Mantelisolierung	Einfehlersicherheit: Ein Fehler in einem Bauteil führt nicht zum Verlust der Sicherheitsfunktion Kategorie-3-Architektur mit Kanal 1 und Kanal 2
DIN EN 61140 (DIN VDE 0140-1) „Schutz gegen elektrischen Schlag“ [5]	DIN EN ISO 13849-1 „Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen“ Kategorie 3: redundante Steuerungsarchitektur PLr = d: erforderlicher Performance Level <i>PFH</i> : mittlere Häufigkeit eines gefährlichen Ausfalls je Stunde

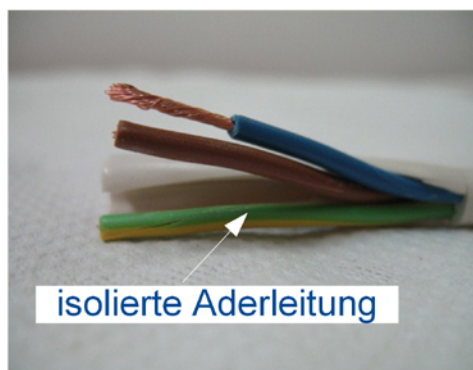


Abbildung 3: Elektroleitung mit weißer Mantelisolierung und isolierten Aderleitungen

Übertragen auf den elektrischen Berührungsschutz heißt das, dass **ein Fehler** in der elektrischen Anlage oder an einem elektrischen Betriebsmittel nicht zu einer elektrischen Gefährdung führen darf. Die Fehleraufdeckung geschieht durch die regelmäßigen Wiederholungsprüfungen nach DGUV Vorschrift 3 [3].

Der Schutz gegen elektrischen Schlag wird im vorliegenden Beispiel der verfahrenstechnischen Anlage mithilfe einer Sicherheits-SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) realisiert. Dabei werden sicherheitsrelevante Signale der Steuerung logisch verarbeitet. Bei Anforderung der Sicherheitsfunktion oder bei Erkennen eines Fehlers wird der sichere Zustand herbeigeführt (siehe Abschnitt 4.4).

Beim Schutz gegen elektrischen Schlag ist der sichere Zustand der spannungsfreie Zustand. Es dürfen selbstverständlich auch keine gefährlichen (Rest-)Ladungen vorhanden sein. Dies wird durch einen sicheren Steuerungsablauf realisiert, eine zeitliche und logische Abfolge von einzelnen programmierten Softwarebefehlen in einer Sicherheits-SPS zur Erreichung des sicheren Zustands.

4.1 Sicherheitsregeln und Sicherheitsfunktionen

Als erster Schritt wird eine Sicherheitsfunktion „Herstellen des spannungsfreien Zustands“ definiert, die das Schutzziel der fünf Sicherheitsregeln der Elektrotechnik umfasst und diese in

einer Sicherheitsfunktion (SF) zusammenfasst. Von den fünf treffen bei der betrachteten Anlage nur vier zu (Abbildung 4). **Hinweis:** Regel 5 entfällt, da in diesem Beispiel stets die gesamte Anlage freigeschaltet wird.

Das automatische Verfahren eignet sich nur, wenn eine Anlage komplett freigeschaltet wird. Müssen „benachbarte, unter Spannung stehende Teile manuell abgedeckt oder abgeschrankt“ werden, muss eine Elektrofachkraft eingesetzt oder das Verfahren angepasst werden.

Die Anwendung der Sicherheitsregeln reduziert das Risiko eines elektrischen Schlags auf ein akzeptables Maß. Der Risikostrahle (Abbildung 5) verdeutlicht die Risikominderung.

Bei der *PFH*-Berechnung der Sicherheitsfunktion stellen die für die Durchführung jeder Regel verwendeten Komponenten jeweils ein Subsystem entsprechend Kategorie 3 und Performance Level d dar. **Hinweis:** Sofern in diesen Subsystemen teilweise identische Komponenten verwendet werden, kann durch Zusammenfassung eine Mehrfachberechnung verhindert werden [6, Abs. 3.2, Schritt 9].

Der *PFH*-Wert der gesamten Sicherheitsfunktion „Herstellen des spannungsfreien Zustands“ wird durch Addition der *PFH*-Werte der einzelnen Subsysteme gebildet. Er muss auch in der Summe den Performance Level d erreichen.

Abbildung 4: Sicherheitsfunktion 1 fasst vier zutreffende Sicherheitsregeln zusammen

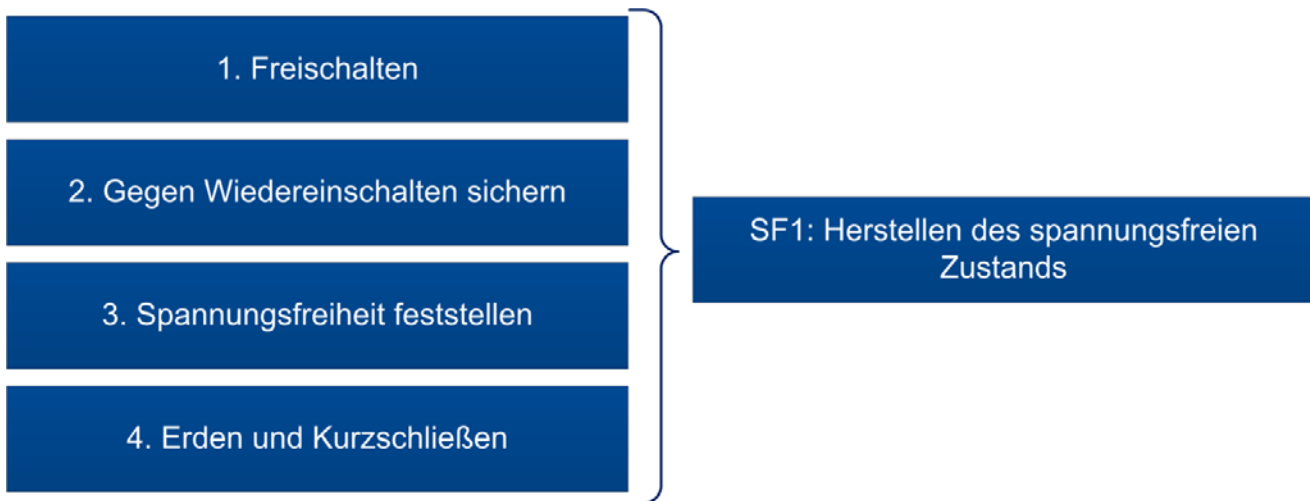


Abbildung 5: Risikominderung durch eine Sicherheitsfunktion

Sollten bei der Umsetzung der Regeln organisatorische Maßnahmen erforderlich sein, so sind betrieblich entsprechende Anweisungen festzulegen (siehe Abschnitt 4.5). Organisatorische Maßnahmen können in der PFH-Berechnung nicht berücksichtigt werden.

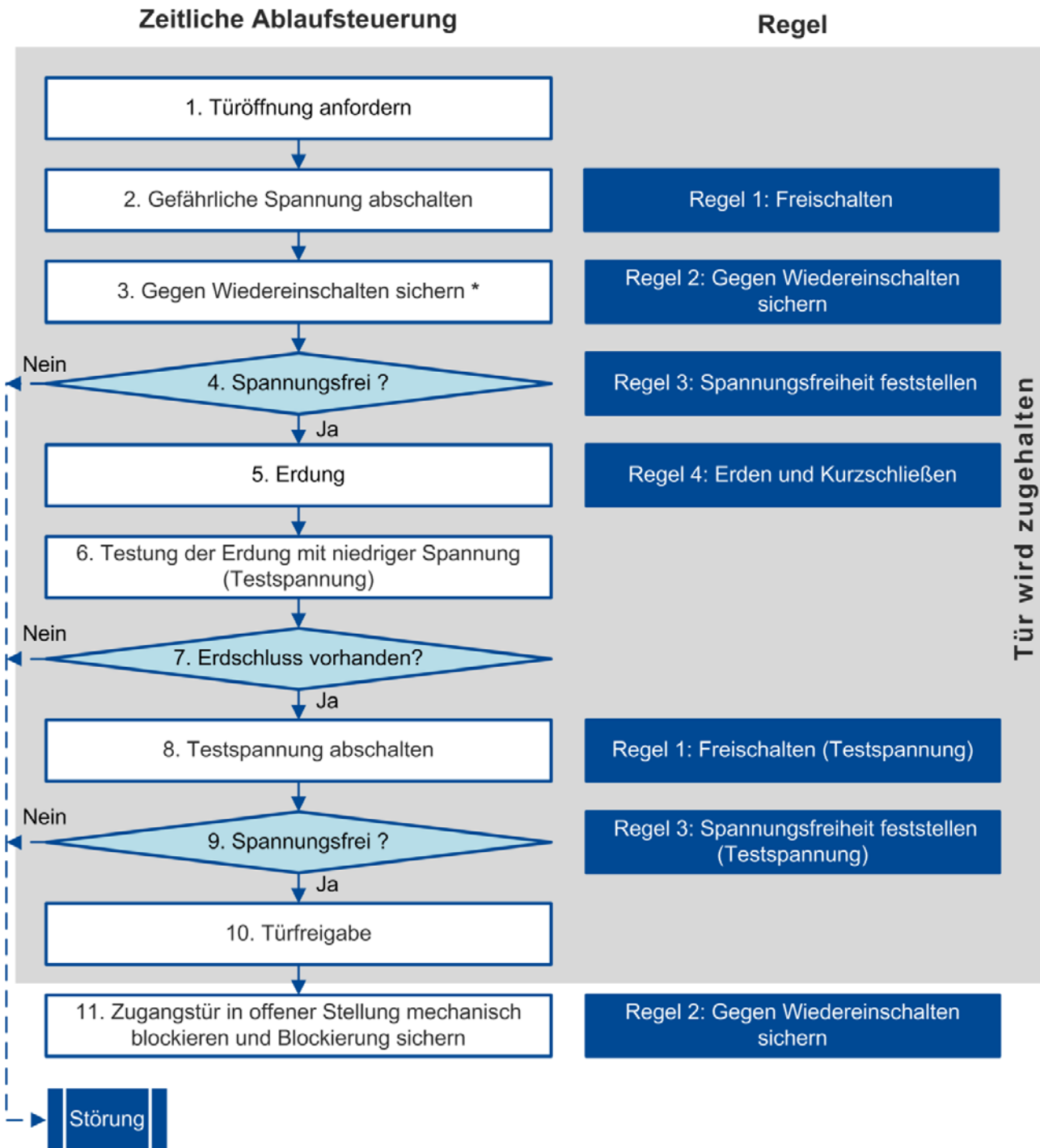
4.2 Automatisiertes Verfahren

Wie in Abschnitt 2 "Problembeschreibung" erwähnt, wird das automatisierte Verfahren beispielhaft an einer verfahrenstechnischen Anlage zur Trennung von Materialien mittels

Hochspannung eingesetzt. Ein vereinfachtes Prinzipschaltbild zeigt Abbildung 2.

Die Ablaufsteuerung in der Sicherheits-SPS wird durch ein Ablaufdiagramm (Abbildung 6) beschrieben. Die steuerungstechnischen Schritte und die jeweils zugehörige Regel nach DIN VDE 0105-100 sind erkennbar. Der gesamte Ablauf besteht aus elf Schritten. Im ersten und elften Schritt müssen die Bedienpersonen in diesem Beispiel organisatorische Maßnahmen willensabhängig ausführen. Die Schritte zwei bis zehn laufen nacheinander in der Sicherheits-SPS ab.

Abbildung 6: Ablaufdiagramm



* Hinweis: „3. Gegen Wiedereinschalten sichern“ erfolgt durch die Software in der Sicherheits-SPS. Für die gesamte Ablaufsteuerung gelten die Softwareanforderungen der DIN EN ISO 13849-1 für Performance Level d. Das Wiedereinschalten ist erst nach dem Verschließen der Tür und manueller Quittierung möglich.

Tabelle 2: Schrittweise Beschreibung des Ablaufs

Berührungsschutz	Steuerungstechnik
1. Türöffnung anfordern	Die Bedienperson fordert die Türfreigabe durch manuelle Betätigung des Tasters S1 an. Zu diesem Zeitpunkt ist ein Betreten der Anlage nicht möglich, da die Tür bis zur sicheren Freigabe durch die Zuhaltung B2 zugehalten wird.
2. Gefährliche Spannung abschalten	Die gefährliche Hochspannung (HS) wird durch den HS-Erzeuger in die Anlage gespeist. Die Abschaltung der Spannungsversorgung des HS-Erzeugers wird durch zwei LS-Schalter QF1 und QF2 realisiert. Die LS-Schalter sind für die Freischaltung geeignet, da sie laut DIN VDE 0100-530 [6], Tabelle B.1 Trenneigenschaften besitzen. Das bedeutet in diesem Fall, dass die Spannungsversorgung (400 V) des HS-Erzeugers mit ferngeschalteten LS-Schaltern [7] automatisch ein- und ausgeschaltet wird. Zur Fehlererkennung der LS-Schaltern wird deren Schaltstellung mithilfe von Überwachungskontakten in die Sicherheits-SPS geführt. Bei einer Diskrepanz schaltet die Anlage in Störung und der Zugang zur Anlage wird verhindert.
3. Gegen Wiedereinschalten sichern	Die Maßnahme „Gegen Wiedereinschalten sichern“ übernimmt die Software in der Sicherheits-SPS zusammen mit der im 11. Schritt aufgeführten Maßnahme der Türabsicherung.
4. Spannungsfrei?	In diesem Schritt überprüfen die integrierten Spannungsprüfer die Spannungsfreiheit durch zwei unabhängige Spannungsmesseinrichtungen im HS-Erzeuger (Testeinrichtung 1) und in der Erdungseinrichtung (Testeinrichtung 2). Die beiden Messwerte (V1 und V2) werden in der Sicherheits-SPS verglichen. Liegt eine Diskrepanz der Messwerte vor, meldet die Sicherheits-SPS eine Störung und verhindert das Entsperren der Zuhaltung.
5. Erdung	Anschließend wird die Hochspannungsseite der Anlage geerdet. In den nächsten drei Schritten erfolgen die korrekte Erdung und die Überprüfung der Erdung. Dies ist erforderlich, weil die Kontaktierung der Erdung nicht im Ruhestromprinzip und nur einkanalig über einen einzigen Erdungsschalter B1 erfolgt. Dennoch bietet das Verfahren die geforderte Sicherheit, da der Erdungsschalter B1 mit hoher Diagnosedeckung und unmittelbar vor Zutritt redundant getestet wird.
6. Testung der Erdung mit niedriger Spannung	Um die korrekte Kontaktierung des Erdungsschalters B1 zu überprüfen, wird eine Testung der Erdung mit geringer Testspannung bzw. geringem Teststrom durchgeführt. Dazu wird der HS-Erzeuger über die LS-Schalter QF1 und QF2 wieder eingeschaltet.
7. Erdschluss vorhanden?	Erst wenn die zweikanalige Strommessung A1 und A2 die Erdung erkennt, ist die korrekte Kontaktierung der Anlage mit der Erde sichergestellt. 1. Kanal: R1 → fehlersichere Eingangsbaugruppe → Sicherheits-SPS → A1 2. Kanal: Testeinrichtung 2 → A2 Die Plausibilitätsprüfung von A1 und A2 findet in der Sicherheits-SPS statt.
8. Testspannung abschalten	In diesem Schritt wird u. a. die niedrige Testspannung zweikanalig durch zwei Abschalteinrichtungen (LS-Schalter QF1 und QF2) abgeschaltet. Dies ist gleichzeitig eine Maßnahme gegen Wiedereinschalten. Es ist jedoch ein erneutes manuelles Einschalten der Anlage möglich. Daher ist im Schritt 11 die manuelle Blockierung der Tür erforderlich.
9. Spannungsfrei?	In Schritt 9 wird die Abschaltung der Testspannung (V1, V2) durch Testeinrichtung 1 und Testeinrichtung 2 überprüft. Erst wenn beide Messeinrichtungen keine Spannung feststellen, geht die Ablaufsteuerung zum nächsten Schritt.
10. Türfreigabe	Ist der spannungslose Zustand in beiden Kanälen sichergestellt, wird die Zugangstür durch die Ansteuerung des Magneten der Zuhaltung B2 über die Sicherheits-SPS freigegeben.
11. Zugangstür in offener Stellung mechanisch blockieren und Blockierung sichern	Im letzten Schritt muss die Forderung nach Abschnitt 6.2.2 der DIN VDE 0105-100 zur Sperrung des Betätigungsmechanismus erfüllt werden. Sie verlangt, dass die Zugangstür mit einer Vorrichtung in Offenstellung gesichert werden muss, damit nicht bei irrtümlich zugefallener Tür erneut eingeschaltet werden kann. Erfüllt wird die Forderung beispielsweise durch ein Vorhängeschloss oder durch eine vergleichbare Maßnahme, die die Tür so lange offenhält, bis eine Bedienperson diese Sperrung bewusst nach getätigter Arbeit in der Anlage aufhebt. Diese Maßnahme kann organisatorisch, z. B. per Vorhängeschloss, oder steuerungstechnisch, z. B. durch eine weitere Zuhaltung, realisiert werden.

4.3 Hinweise für die Umsetzung

Die Sicherheitsfunktion lässt sich mit den Methoden der DIN EN ISO 13849-1 und beispielsweise mithilfe der Software SISTEMA berechnen [8]. Man setzt die Kennwerte der verwendeten Bauteile ein, um die *PFH* für die Sicherheitsfunktion zu berechnen.

Neben der Berechnung müssen auch die grundlegenden und bewährten Prinzipien der Norm DIN EN ISO 13849-1 eingehalten werden. Steuerleitungen müssen z. B. so gestaltet sein, dass Beschädigungen der Leitungen keine Schalt- und Steuervorgänge hervorrufen. Es können ggf. Fehlerausschlüsse für die Kabelverlegung nach DIN EN ISO 13849-2 [9] angewendet werden.

Das automatisierte Verfahren verfügt über zwei integrierte Spannungsprüfer zur Spannungsmessung. Spannungsprüfer müssen laut Norm vor und nach der Verwendung auf korrekte Funktion überprüft werden. Sollte ein Spannungsprüfer einen falschen Messwert liefern, wird dies durch die Sicherheits-SPS in Form einer Plausibilitätsprüfung aufgedeckt. Dies kann als vergleichbar sichere Maßnahme angesehen werden, da ein gleichzeitiges Auftreten von Fehlern der Spannungsprüfer an den zwei unabhängigen Messstellen nicht unterstellt wird.

4.4 Störungen

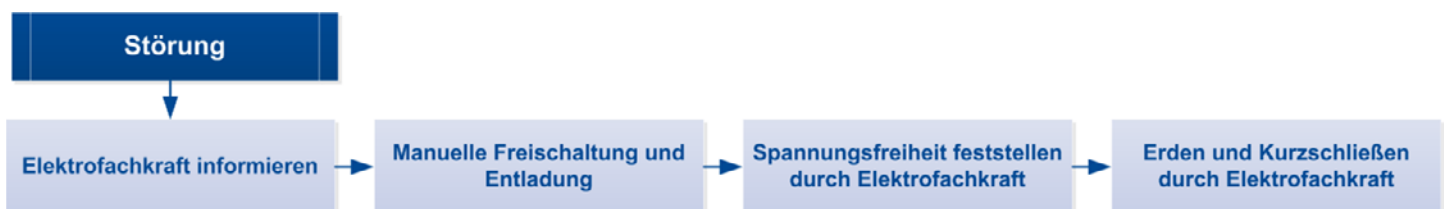
Tritt zu einem beliebigen Zeitpunkt im Ablauf des Verfahrens eine Störung im System auf, wird automatisch eine Elektrofachkraft informiert und der Zustand der Anlage über eine Signalsäule angezeigt. Die Zugangstür wird weiterhin zugehalten, die rote und gelbe Signalleuchte angesteuert und eine Meldung weitergeleitet.

Eine Störung unterbricht immer das in Abbildung 6 dargestellte automatisierte Verfahren. Bevor es sich wieder in Gang setzen lässt, muss die Ursache durch manuelles Eingreifen einer Elektrofachkraft entsprechend Abbildung 7 beseitigt werden.

4.5 Organisatorische Maßnahmen

Die Sicherheit beim Betrieb der elektrischen Anlage hängt in diesem Beispiel von steuerungstechnischen Maßnahmen nach DIN EN ISO 13849-1 und organisatorischen Maßnahmen nach DIN VDE 0105-100 ab.

Abbildung 7: Ablauf im Störfall



Die zusätzlichen organisatorischen Maßnahmen entsprechend der Norm DIN VDE 0105-100 sind:

- Falls die Blockierung der Zugangstür in der offenen Stellung nicht automatisiert erfolgt, muss diese Sicherung manuell, z. B. mittels Vorhängeschloss, erfolgen.
- Bei Störungen darf Spannungsfreiheit nur durch Elektrofachkräfte festgestellt werden. Die Personen, die zur Störungsbeseitigung in die Anlage eintreten, müssen regelmäßig unterwiesen werden.
- Eine Kalibrierung der Messeingänge einschließlich der Signalverarbeitung muss mindestens im Rahmen der vorgeschriebenen Wiederholungsprüfung nach DGUV Vorschrift 3 [3] stattfinden.

Falls erforderlich, sind geeignete Werkzeuge, Schutz- und Hilfsmittel sowie Ausrüstungen zu benutzen.

Die zutreffenden organisatorischen Maßnahmen müssen zusätzlich zu den steuerungstechnischen Maßnahmen ausgeführt werden. Erst wenn beide erfüllt sind, kann von einer vergleichbaren Sicherheit zu dem manuellen Vorgehen nach der DIN VDE 0105-100 Abschnitt 6.2 ausgegangen werden.

4.6 Warnhinweise

Laut DIN EN 60204-1 [10] müssen elektrische Anlagen, bei denen nicht klar zu erkennen ist, dass sie eine Gefährdung durch elektrischen Schlag darstellen, ein grafisches Symbol nach IEC 604171-1 (Symbol Nr. 5036, siehe Abbildung 8) [11] tragen. Das Warnschild muss deutlich sichtbar auf der Gehäusetür oder Abdeckung angebracht werden.

5 Zusammenfassung

Das automatisierte Verfahren stellt für bestimmte Anlagen eine Erleichterung der Arbeitsabläufe dar, insbesondere wenn häufige Reinigungs- und Wartungsarbeiten eine Freischaltung erforderlich machen. Es kann dort das Freischalten durch eine Elektrofachkraft ersetzen. Die angewendeten steuerungstechnischen Maßnahmen bilden zusammen mit den organisatorischen Maßnahmen einen gleichwertigen Schutz gegenüber dem manuellen Herstellen der Spannungsfreiheit durch eine Elektrofachkraft



Abbildung 8: Warnsymbol 5036

Literatur

- [1] DIN VDE 0105-100: Betrieb von elektrischen Anlagen – Teil 100: Allgemeine Festlegungen. (06.2017). DIN Media, Berlin 2017
- [2] DIN 31000 (VDE 1000): Allgemeine Leitsätze für das sicherheitsgerechte Gestalten von Produkten. (04.2017). DIN Media, Berlin 2017
- [3] DGUV Vorschrift 3: Elektrische Anlagen und Betriebsmittel (bisher: BGV A3) vom 1. April 1979 in der Fassung vom 1. Januar 1997. Hrsg.: Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse, Köln
- [4] DIN EN ISO 13849-1: Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze. (12.2023). DIN Media, Berlin 2023
- [5] DIN EN 61140 (DIN VDE 0140-1): Schutz gegen elektrischen Schlag (11.2016). DIN Media, Berlin 2016
- [6] DIN VDE 0100-530: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Schalt- und Steuergeräte. (06.2018). DIN Media, Berlin 2018
- [7] DIN EN 60947-2: Niederspannungsschaltgeräte – Teil 2: Leistungsschalter (11.2020). DIN Media, Berlin 2020
- [8] Software-Assistent SISTEMA. Hrsg.: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin. www.dguv.de/webcode/d11223
- [9] DIN EN ISO 13849-2: Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 2: Validierung. (02.2013). DIN Media, Berlin 2013
- [10] DIN EN 60204-1: Sicherheit von Maschinen – Elektrische Ausrüstung von Maschinen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen. (06.2019). DIN Media, Berlin 2019
- [11] IEC 60417:2002 DB (Database) Ed. 1.0. Graphical symbols for use on equipment (Internet-Datenbank). <https://www.vde-verlag.de>

Verfasst von:

Paul Rempel
Institut für Arbeitsschutz der Deutschen
Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA)
Alte Heerstr. 111
53757 Sankt Augustin
Telefon: 030 13001-38600
E-Mail: paul.rempel@dguv.de
Internet: www.dguv.de, p022877

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV)

Glinkastr. 40
10117 Berlin
Telefon: 030 13001-0 (Zentrale)
E-Mail: info@dguv.de
www.dguv.de