

Das Kausalitätsmodell



**Ein Risikomodell, dessen Kausalketten unter Anwendung der
Zuverlässigkeitsblockdiagrammanalyse gebildet werden**

Michael Bellair

Copyright © 2018 Michael Bellair.

Jedermann darf dieses Werk unter den Bedingungen der Freien Digital Peer Publishing Lizenz (f-DPPL), Version 3.0 - November 2008 unverändert oder verändert verbreiten und zum Download bereitstellen. Der Lizenztext ist im Internet abrufbar unter der Adresse <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0009-fdpp1-v3-de3>. Das veränderte Werk darf nur unter den Bedingungen der Freien DPPL Lizenz verbreitet werden.

Michael Bellair
Sportplatzstrasse 11
01259 Dresden

E-Mail: bellair@freenet.de
Web: <http://michaelbellair.de/index.html>

Eine deutschsprachige Kopie der Lizenz ist Anhang A entnehmbar.

Zusammenfassung

In diesem Dokument wird ein *Risikomodell* im Sinne der *DIN EN 50 126-2 [11]* beschrieben, welches auf der *Zuverlässigkeitsblockdiagrammanalyse* basiert. Es dient der graphischen Darstellung der kausalen Zusammenhänge zwischen risikoerzeugenden *Ursachen* und *Auslösern*, risikomindernden *Sicherheitsbarrieren* und den resultierenden *Gefährdungen* bzw. *Unfällen*.

Die *Häufigkeit* der *Gefährdung* bzw. des *Unfalls* wird anhand der Eintrittswahrscheinlichkeiten der *Ursachen* und *Auslöser*, sowie der Versagenswahrscheinlichkeiten der wirksamen *Sicherheitsbarrieren* quantifiziert. Die *Schwere* der *Gefährdung* bzw. des *Unfalls* wird anhand definierter Kategorien klassifiziert. Das resultierende *Risiko* wird als Wahrscheinlichkeitsaussage für das Eintreten der definierten Kategorie quantifiziert.

Zur Bewertung der Risikoakzeptanz wird eine *Häufigkeits - Schwere - Matrix* (Risikomatrix) vorgeschlagen, deren Quantifizierung auf dem Risikoakzeptanzprinzip *Minimale Endogene Mortalität (MEM)* basiert.

Dieses Dokument ist der *Freien Digital Peer Publishing Lizenz Lizenz (f-DPPL)* unterstellt. Eine deutschsprachige Kopie der Lizenz ist Anhang A entnehmbar.

— Leerseite —

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
1 Einleitung	7
1.1 Betrachtungsgegenstand	7
1.2 Hinweise zur Typografie	7
2 Zielstellung	7
3 Beschreibung des Verfahrens	8
3.1 Überlegungen zur Ermittlung des Risikos	8
3.2 Die Gefährdungsanalyse, Risikomodell, Konsequenzanalyse	10
3.3 Aufbau der Kausalketten	11
3.4 Die Zuverlässigkeitsblockdiagrammanalyse als Basis	13
3.5 Das Kausalitätsmodell	14
3.5.1 Symbole des Kausalitätsmodells	15
3.5.2 Struktur des Kausalitätsmodells	16
3.5.3 Hinweise zur Modellierung	19
3.5.4 Versagenswahrscheinlichkeit des Abschnitts B (Risikominderung) .	20
3.5.5 Eintrittswahrscheinlichkeit des Abschnitts C (Risikoerzeugung) . .	27
3.5.6 Eintrittswahrscheinlichkeit der Gefährdung bzw. des Unfalls . . .	28
3.5.7 Resultierendes Risiko der Gefährdung bzw. des Unfalls	29
3.5.8 Risikoakzeptanz	30
3.5.9 Eintrittswahrscheinlichkeiten der Elemente des Kausalitätsmodells ermitteln	37
4 Erläuterung des Kausalitätsmodells anhand des Einklemmens an der Fahrgast- raumtür	42
4.1 Funktionale Eigenschaften des betrachteten Fahrzeugs	43
4.2 Erkennen des Einklemmens mittels Grünschleife	44
4.2.1 Das Modell	44
4.2.2 Eintrittswahrscheinlichkeiten der Elemente	48
4.2.3 Risikobeurteilung	51
4.3 Erkennen des Einklemmens mittels Mitschleiferkennung	56
4.3.1 Das Modell	57
4.3.2 Eintrittswahrscheinlichkeiten der Elemente	60
4.3.3 Risikobeurteilung	61
4.4 Erkennen des Einklemmens bei manuell überbrückter Grünschleife	66
4.4.1 Das Modell	66
4.4.2 Eintrittswahrscheinlichkeiten der Elemente	68
4.4.3 Risikobeurteilung	69
5 Schlussfolgerungen und weiterführende Gedanken	73
A Freie DPPL Lizenz (f-DPPL)	77

Glossar	85
Akronyme	97
Symbole	101
Abbildungsverzeichnis	105
Tabellenverzeichnis	107
Anmerkungen	109
Literatur	115

1 Einleitung

1.1 Betrachtungsgegenstand

Betrachtungsgegenstand des vorliegenden Dokumentes ist ein *Risikomodell* für das Bahnsystem, welches die Erfahrungen des Autors bei der Erstellung von *Risikoanalysen* für *Straßenbahnfahrzeuge* berücksichtigen soll.

Das *Risikomodell* wendet die Konzepte der *DIN EN 50 126-1 [10]* und *DIN EN 50 126-2 [11]* an. Es wird am Beispiel der *Straßenbahnfahrzeuge* erläutert, wenngleich es für das gesamte Bahnsystem verwendbar ist.

DIN EN 50 126-1 [10] und *DIN EN 50 126-2 [11]* wurden herausgegeben, um die bestehenden Normen *DIN EN 50 126-1 [9]* und *CLC/TR 50 126-2 [5]* zu ersetzen.

1.2 Hinweise zur Typografie

Im laufenden Text werden Zitate, sowie alle im Glossar erläuterten Begriffe *kursiv* gesetzt. Gesetze, Normen und Richtlinien werden im Glossar durch Voranstellen der Schlüsselwörter „Gesetz —“, „Norm —“ bzw. „Richtlinie —“ gekennzeichnet.

Literaturreferenzen werden in eckigen Klammern [] angegeben.

Anmerkungen (Fußnoten) werden mittels hochgestellter Ziffern (^{1,2,...}) gekennzeichnet.

2 Zielstellung

Sicherheit wird als selbstverständliche Eigenschaft beim Einsatz von *Straßenbahnfahrzeugen* im öffentlichen Verkehrsraum gefordert.

DIN EN 50 126-1 [10] definiert ein Verfahren, welches den sicheren Betrieb von Bahnsystemen unterstützen soll. In dieser Norm wird *Sicherheit* als Zustand definiert, bei dem das *Risiko* auf einem zulässigen (von der Gesellschaft akzeptierten) Niveau liegt. Das *Risikoniveau* resultiert aus der *Häufigkeit* eines konkreten *Unfall(szenarios)*, welches durch eine typische *Schwere* gekennzeichnet ist. Somit tritt die Beherrschung des *Risikos* in das Zentrum der Aktivitäten zum Erreichen der *Sicherheit* im Bahnsystem.

Im Abschnitt 5.8 der *DIN EN 50 126-1 [10]* wird das Konzept der risikobasierten Sichtweise erläutert. Es beruht auf der Kenntnis aller *Risiken*, sowie der Ableitung und Anwendung der notwendigen Maßnahmen, die der Vermeidung oder Beherrschung der *Risiken* dienen. Sie werden als „geplante risikomindernde Maßnahmen“ bezeichnet.¹ Neben den geplanten risikomindernden Maßnahmen, bestehen zufällig wirkende risikomindernde *Situationen*. Die Gesamtheit der geplanten risikomindernden Maßnahmen und der zufällig risikomindernd wirkenden *Situationen* wird als *Sicherheitsbarriere* bezeichnet.

Neben den *Sicherheitsbarrieren* wird das *Risiko* auch von *Auslöser* beeinflusst. *Auslöser* sind zufällig wirkende *Situationen*, die die *Gefährdung* bzw. den *Unfall* bei wirksamer *Ursache* hervorrufen können.

Das von der Gesellschaft akzeptierte *Risiko* wird anhand eines Risikoakzeptanzkriteriums festgelegt².

Die risikobasierte Sichtweise wird seit mehreren Jahren bei der Erstellung von *Risikoanalysen* für *Straßenbahnfahrzeuge* angewendet.

Es hat sich jedoch als Schwierigkeit herausgestellt, den Überblick über den risikomindernden Anteil der einzelnen *Sicherheitsbarrieren* zu behalten. Insbesondere führt der subjektive Einfluss bei der Bewertung der Wirksamkeit von *Sicherheitsfunktionen* zur Ableitung unterschiedlicher *Sicherheits-Integritätslevel (SIL)*.

Das *Risikomodell* soll die folgenden Eigenschaften aufweisen:

1. Anwendung der Konzepte aus *DIN EN 50 126-1 [10]* und *DIN EN 50 126-2 [11]*, die auf der risikobasierten Sichtweise beruhen. Der konzeptionelle Zusammenhang der geplanten risikomindernden Maßnahmen und zufällig risikomindernd wirkenden *Situationen* soll eindeutig erkennbar sein.
2. Erstellen eines *Risikomodells*,³ welches auf den kausalen Zusammenhängen zwischen *Ursache*, *Gefährdung* und *Unfall* für alle *Einsatz- und Umgebungsbedingungen* basiert.⁴ Alle *Sicherheitsbarrieren* und *Auslöser*, die die *Häufigkeit* und/oder *Schwere* beeinflussen, sind als integraler Bestandteil des Modells abzubilden. Instandhaltungsvorgänge wie zum Beispiel *Wartung* und *Reparatur* sind jedoch nicht abzubilden.
3. Die Wirksamkeit der *Sicherheitsbarrieren* ist anhand der ihnen inhärenten Versagenshäufigkeit auszudrücken, die über die sicherheitsrelevante *Ausfallwahrscheinlichkeit*⁵ bzw. die menschliche *Fehlhandlungswahrscheinlichkeit* hergeleitet wird. Die Wirksamkeit der *Auslöser* ist anhand der ihnen inhärenten *Häufigkeit* auszudrücken. Basierend auf dem zulässigen *Risiko* des *Unfalls*, welches durch die typische *Schwere* und die zulässige *Häufigkeit* gekennzeichnet ist, kann die zulässige *Versagenshäufigkeit* auf die beteiligten *Sicherheitsbarrieren* und die zulässige *Häufigkeit* auf die *Auslöser* aufgeteilt werden.
4. Die Risikoakzeptanz ist anhand einer *Häufigkeits - Schwere - Matrix*⁶ (*Risikomatrix*) zu bewerten. Die *Häufigkeit* soll quantitativ bewertet werden.

Ein *Straßenbahnfahrzeug* ist während seiner Nutzungsdauer unterschiedlichen *Einsatz- und Umgebungsbedingungen* (Kapitel 3.2) ausgesetzt. In Abhängigkeit vom Betrachtungszeitpunkt ergeben sich somit unterschiedliche (in diesem Sinn zeitbasierte) *Kausalketten*, die mit derselben *Gefährdung* verbunden sind, oder zum selben *Unfall* führen.

Zeitbasierte *Kausalketten* sollen jedoch nicht abgebildet werden, wenngleich diese Möglichkeit als zukünftige Weiterentwicklung des *Risikomodells* im Blick behalten werden soll.

3 Beschreibung des Verfahrens

3.1 Überlegungen zur Ermittlung des Risikos

Das *Risiko* wird vom Menschen unterschiedlich empfunden und unterliegt somit der subjektiven Bewertung des Einzelnen. Es wird sehr stark vom Verhältnis der Selbstbestimmung und Fremdbestimmung, sowie der Unmittelbarkeit der Nutzempfindung bestimmt.

Die Unmittelbarkeit der Nutzempfindung ist bei Freizeitbeschäftigungen groß. Die Kombination aus unmittelbarer Nutzempfindung und hohem Grad der Selbstbestimmung führt

durchaus zur Akzeptanz hoher *Risiken*, welche zum Beispiel mit dem Klettern, Paragliding oder auch Tauchen verbunden sind.

Die Unmittelbarkeit der Nutzempfindung bei Fahrten im Bahnsystem ist demgegenüber deutlich geringer. Die Kombination aus geringer unmittelbarer Nutzempfindung und dem geringen Grad der Selbstbestimmung führt somit zur Akzeptanz geringerer *Risiken*, was anhand der großen öffentlichen Resonanz bei Bahnunfällen erkennbar ist⁷.

Eine objektive Bewertung des *Risikos* kann anhand des *individuellen Risikos*, *kollektiven Risikos* und des *empfundene (kollektiven) Risikos* erfolgen. Die Gleichungen zur Quantifizierung der genannten *Risiken* sind Kapitel 3.5.7, bzw. den jeweiligen Begriffsdefinitionen zu entnehmen.

Das *individuelle Risiko*⁸ bezieht sich auf die Gefährdung einer Einzelperson und entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass diese Person einen Gesundheitsschaden erleidet. Das *individuelle Risiko* wird von den Eintrittswahrscheinlichkeiten der gefährlichen *Situationen*, der Wahrscheinlichkeit der Anwesenheit dieser Person in der jeweiligen *Situation* und der Wahrscheinlichkeit des Gesundheitsschadens bestimmt.

Das *kollektive Risiko*⁹ bezieht sich auf die Gefährdung der Allgemeinheit und gibt die Anzahl der geschädigten Personen an, die beim Betrieb des Bahnsystems in einem Betrachtungszeitraum zu erwarten ist. Dieser Wert wird üblicherweise in Unfallstatistiken genannt und ist häufig auf ein Jahr bezogen. Das *kollektive Risiko* wird von den Eintrittswahrscheinlichkeiten der gefährlichen *Situationen* und der Anzahl der Personen bestimmt, die bei der jeweiligen *Situationen* einen Gesundheitsschaden erleiden. Es entspricht der Summe der *individuellen Risiken* der betroffenen Personen.

Das *empfundene (kollektive) Risiko* bezieht sich ebenfalls auf die Gefährdung der Allgemeinheit. Es berücksichtigt aber zusätzlich eine sogenannte Risikoaversion. Mittels Risikoaversionfaktor werden Unfälle mit zunehmender Anzahl geschädigter Personen stärker gewichtet. Das *empfundene (kollektive) Risiko* wird somit von den Eintrittswahrscheinlichkeiten der gefährlichen *Situationen*, der Anzahl der Personen, die einen Gesundheitsschaden in der jeweiligen *Situation* erleiden und der Größe des Aversionfaktors bestimmt.

Ein quantifizierbarer Zusammenhang zwischen dem *individuellen Risiko* und dem *kollektiven Risiko* ist über die Anzahl der geschädigten Personen und den Expositionszeitraum herstellbar. Als Expositionszeitraum wird die Zeitdauer bezeichnet, innerhalb derer die Einzelpersonen der Wahrscheinlichkeit unterliegen, einen Gesundheitsschaden zu erleiden.

Das *kollektive Risiko* entspricht der Summe der *individuellen Risiken* der betroffenen Personen (siehe Begriffsdefinition). Soll also das *kollektive Risiko* eine vorgegebene Anzahl geschädigter Personen nicht übersteigen, so ist das *individuelle Risiko* für eine kleine Anzahl exponierter Personen in einem langen Expositionszeitraum im Vergleich größer, als für eine große Anzahl exponierter Personen in einem kurzen Expositionszeitraum.¹⁰

Das *Risiko* ist somit ein Ausdruck der Wahrscheinlichkeit (*Häufigkeit*) dafür, dass Personen den betrachteten Gesundheitsschaden (*Schwere*) im Betrachtungszeitraum erleiden.

Die Bewertung des *individuellen Risikos* erfolgt anhand eines Referenzwertes, der einem zulässigen Wert in einem vergleichbaren System oder einem Grenzwert (z.B. *Minimale Endogene Mortalität* oder „Für Unfälle geltende Sicherheitsziele“¹¹) entspricht.

Der Referenzwert des *individuellen Risikos* kann nicht unmittelbar zur Bewertung des *kollektiven Risikos* bzw. des *empfundene(n) (kollektiven) Risikos* herangezogen werden.¹² In der Literatur wird eine Bewertung mittels „Grenzkosten“ vorgeschlagen, wobei die „Grenzkosten“ den Geldbetrag repräsentieren, den die Gesellschaft oder das Bahnunternehmen bereit ist auszugeben, um das *kollektive Risiko* um einen vorgegebenen Wert (z.B. einen potentiellen Todesfall) zu reduzieren.¹³

3.2 Die Gefährdungsanalyse, Risikomodell, Konsequenzanalyse

Die *Risikoanalyse*^{14,15} ist ein dreistufiges, iteratives Verfahren, welches aus der *Gefährdungsanalyse*, der *Konsequenzanalyse* und der *Risikobeurteilung* besteht.

Bei der *Gefährdungsanalyse* werden alle *Situationen* zusammengetragen, die zur konkreten *Gefährdung* führen.^{16,17} Möglicherweise wirksame *Sicherheitsbarrieren* und notwendige *Auslöser* werden berücksichtigt. Weiterhin werden alle *Einsatz- und Umgebungsbedingungen* berücksichtigt, unter denen das *Straßenbahnfahrzeug* betrieben wird bzw. denen es ausgesetzt ist (z.B. Normalbetrieb, Notbetrieb, Verhalten bei Komponentendefekten, Verhalten bei vorhersehbarem Missbrauch, Verhalten unter Umwelteinflüssen).¹⁸ Die betroffenen (gefährdeten) Personengruppen (z.B. Fahrer, Fahrgäste, Reinigungs-, Rettungs-, Instandhaltungspersonal, außenstehende Personen) werden benannt.

Bei der *Konsequenzanalyse* werden alle *Situationen* zusammenzutragen, die von der konkreten *Gefährdung* zum *Unfall* führen. Möglicherweise wirksame *Sicherheitsbarrieren* und notwendige *Auslöser* werden berücksichtigt. Die *Konsequenzanalyse* sollte auf einem *Risikomodell* basieren (Kapitel 3.5).

Als Ausgangspunkt der *Gefährdungsanalyse* kann eine allgemeingültige Liste der *Gefährdungen* verwendet werden, die mit *Straßenbahnfahrzeugen* verbunden sind.¹⁹ Als Grundlage kann *DIN EN 62 267 [18], Abschnitt 7, DIN EN ISO 12 100 [21], Anhang B* oder *Universelle Gefahrenanalyse für Stadtbahnfahrzeuge [4]* verwendet werden. Typische, der *Gefährdung* ausgesetzte Personengruppen können *DIN EN 62 267 [18], Abschnitt 6* entnommen werden.

Aus der allgemeingültigen Liste werden alle *Gefährdungen* entfernt, die nicht mit dem betrachteten *Straßenbahnfahrzeug* verbunden sind. Weiterhin werden alle *Gefährdungen* systematisch ergänzt, die aus den technischen Eigenschaften und den speziellen *Einsatz- und Umgebungsbedingungen* des betrachteten *Straßenbahnfahrzeugs* resultieren.

Übliche Verfahren zur systematischen *Gefährdungsanalyse* sind die *Vorläufige Gefahrenanalyse (PHA)*, die *HAZOP-Studie (HAZOP)*, das *Brainstorming* und das *Was-Wenn-Verfahren*.

Die *Ausfallbedeutungsanalyse (FMECA)* stellt ebenfalls ein *Gefährdungsanalyseverfahren* dar. Es beschränkt sich aber auf die Ermittlung der *Gefährdungen*, die mit einer konkreten technischen Lösung und deren Ausfallverhalten verbunden sind. *Gefährdungen*, die nicht aus dem Ausfallverhalten resultieren, werden nicht systematisch erfasst.

Als typische Verfahren zur Durchführung einer *Konsequenzanalyse* haben sich die *Ereignisbaumanalyse (ETA)*, *Fehlzustandsbaumanalyse (FTA)*, die *Ursache-Folgen-Analyse*, die *Ursache-Wirkung-Analyse*, die *Deductive Cause-Consequence Analysis (DCCA)* und die *FMECA* durchgesetzt, wobei das letzte Verfahren auch zur *Gefährdungsanalyse* verwendet wird.

Die Methodik der Erkenntnisgewinnung der Analyseverfahren folgt einerseits dem Top-down Prinzip (Deduktion) oder dem Bottom-up Prinzip (Induktion). *Top-down geht vom Abstrakten, Allgemeinen, Übergeordneten schrittweise hin zum Konkreten, Speziellen, Untergeordneten. Bottom-up folgt der umgekehrten Richtung.*²⁰

Eine Auflistung üblicher Analyseverfahren ist im *Anhang F* der *DIN EN 50 126-2 [11]*, *Anhang B* der *DIN EN 31 010 [8]* und *Anhang A* der *DIN EN 60 300-3-1 [12]* zu finden. Weiterhin wird der Bezug auf weiterführende Literatur (z.B. Normen) hergestellt. Den beiden letztgenannten Normen, ist eine Kurzbeschreibung der Analyseverfahren zu entnehmen.

3.3 Aufbau der Kausalketten

Die Benennung „*Kausalitätsmodell*“ weist auf das Prinzip der Modellierung der **kausalen Zusammenhänge** zwischen *Ursachen, Auslösern, Sicherheitsbarrieren, Gefährdungen* und *Unfällen* hin.

Es werden *Ursache - Wirkung - Beziehungen* dargestellt, die in einer unmittelbaren zeitlichen bzw. logischen Abfolge stehen. Sie stellen *Kausalketten* dar, die die Eigenschaften der *Monokausalität* oder *Multikausalität* aufweisen.

Erfahrungsgemäß treten die Elemente der *Kausalketten* in einer seriellen oder vernetzten Struktur auf. Die Reihenfolge der Elemente ist nicht vertauschbar:

Ursache → *Auslöser* → *Sicherheitsbarriere* → **Gefährdung**
→ *Auslöser* → *Sicherheitsbarriere* → **Unfall**

Im Gegensatz zur *Sicherheitsbarriere* und zum *Auslöser* sind die Elemente *Ursache, Gefährdung* bzw. *Unfall* in jeder *Kausalkette* vorhanden.

Die *Gefährdung* benennt das Szenario eines **möglichen** Gesundheitsschadens für die betroffene Personengruppe, welcher von mindestens einer *Ursache* hervorgerufen wird. Der Gesundheitsschaden ist aber noch nicht eingetreten.

Der *Unfall* benennt den Gesundheitsschaden bei der betroffenen Personengruppe, welcher als Folge der vorhandenen *Gefährdung* und mindestens eines wirksamen *Auslösers* oder versagender *Sicherheitsbarrieren* eingetreten ist.

Auslöser und *Sicherheitsbarrieren* beeinflussen die

- *Häufigkeit* und / oder potentielle *Schwere* der *Gefährdung* bzw.
- *Häufigkeit* und / oder *Schwere* des *Unfalls*

bei wirksamer *Ursache*. Sie unterscheiden sich jedoch in der Wirkweise ihres Einflusses auf die *Häufigkeit* und *Schwere*.

Der Eintritt einer *Gefährdung* (eines *Unfalls*) wird mit wirksamer (intakter) *Sicherheitsbarriere* verhindert, während der wirksame (intakte) *Auslöser* die Voraussetzung für den Eintritt ist.

Dieser Zusammenhang gilt analog für die potentielle *Schwere* einer *Gefährdung* bzw. resultierende *Schwere* eines *Unfalls*.

Die Elemente einer *Kausalkette* können in folgenden, ggf. vernetzten Kombinationen auftreten:²¹

- Eine *Ursache* führt unmittelbar zur *Gefährdung* und zum *Unfall* (es wirken keine *Auslöser* und *Sicherheitsbarrieren*, d.h. *Gefährdung* und *Unfall* fallen unmittelbar zusammen). Somit ergibt sich die kleinste mögliche *Kausalkette*.
Beispielsweise führt das Betreten der Gleisanlage unmittelbar vor dem heranfahrenden *Straßenbahnfahrzeug* zur *Gefährdung* des Gesundheitsschadens infolge Krafteinwirkung auf den Körper und dem *Unfall* als Folge der unvermeidbaren Kollision.
- Zwischen *Ursache* und *Gefährdung* wirken *Auslöser*, die
 - die *Häufigkeit* bestimmen (z.B. das Eintreten des Niederschlages bestimmt die *Häufigkeit* der Kollisionsgefahr infolge fehlender Sicht bei inaktiver Scheibenwisch- / waschanlage) oder
 - die *Schwere* des potentiellen *Unfalls* bestimmen (z.B. das Vorhandensein von Laub und Nässe bestimmt die Kollisionsgeschwindigkeit bei Gefahrenbremsung infolge reduziertem Kraftschluß).
- Zwischen *Ursache* und *Gefährdung* wirken *Sicherheitsbarrieren*, die
 - die *Häufigkeit* reduzieren (z.B. das Sicherheitsventil der Druckluftanlage reduziert die *Häufigkeit* der Explosionsgefahr) oder
 - die *Schwere* des potentiellen *Unfalls* reduzieren (z.B. reduziert die Materialeigenschaft der geringen Toxizität im Brandfall die *Schwere* der Atemwegsverletzungen).
- Zwischen *Gefährdung* und *Unfall* wirken *Auslöser*, die
 - die *Häufigkeit* bestimmen (z.B. das Anfahren bestimmt die *Häufigkeit* des Mitschleifens eines in der Fahrgastraumtür eingeklemmten Fahrgastes) oder
 - die *Schwere* des *Unfalls* bestimmen (z.B. das Aufprallen mit geringer Geschwindigkeit bestimmt den Gesundheitsschaden infolge Krafteinwirkung).
- Zwischen *Gefährdung* und *Unfall* wirken *Sicherheitsbarrieren*, die
 - die *Häufigkeit* reduzieren (z.B. reduziert die Einklemmerkennung die *Häufigkeit* des Mitschleifens eines in der Fahrgastraumtür eingeklemmten Fahrgastes) oder
 - die *Schwere* des *Unfalls* reduzieren (z.B. reduzieren Crashabsorber die Verformung des Fahrerraums und somit die *Schwere* des Gesundheitsschadens infolge des Einklemmens von Körperteilen).
- Eine *Ursache* ruft unterschiedliche, gleichzeitig wirkende *Gefährdungen* hervor (z.B. das Durchtrennen der Fahrleitung führt zur *Gefährdung* des Stromschlages und der mechanischen Krafteinwirkung infolge der mechanischen Vorspannung der Fahrleitung).
- Eine *Gefährdung* ist die *Ursache* für weitere, in Folge wirkende *Gefährdungen* (z.B. die Brandgefahr ruft die Gefahr der Panik hervor).

- Eine *Gefährdung* führt zu unterschiedlichen *Unfällen* (z.B. die Brandgefahr führt zur Verbrennung, zum Sauerstoffmangel, zur Vergiftung, usw.).
- Ein *Unfall* ist die *Ursache* für weitere *Gefährdungen* (z.B. ein entgleistes Fahrzeug befindet sich im Fahrweg des Gegengleises und führt somit zur Kollisionsgefahr), die ihrerseits zu weiteren *Unfällen* führen (z.B. die Kollisionsgefahr führt zur Kraftweinswirkung auf den Fahrer bzw. die Fahrgäste).
- Das Versagen einer *Sicherheitsbarriere* ist die *Ursache* für weitere *Gefährdungen* (z.B. das ungewollte Öffnen einer Fahrgastraumtür während der Fahrt führt zur *Gefährdung* des Herausfallens — diese *Gefährdung* soll primär gemindert werden — und zur *Gefährdung* der Hüllkurvenverletzung).
- Das Eintreten eines *Auslösers* ist die *Ursache* für weitere *Gefährdungen* (z.B. Niederschlag führt zur Kollisionsgefahr infolge fehlender Sicht und zur Kollisionsgefahr infolge Bremswegverlängerung).

3.4 Die Zuverlässigkeitsblockdiagrammanalyse als Basis

Das *Kausalitätsmodell* soll auf einem bekannten Analyseverfahren basieren. Zur Auswahl des geeigneten Verfahrens, wurden häufig verwendete Analyseverfahren anhand ihrer Beschreibungen in den gültigen Normen / Richtlinien untersucht.

Die häufig verwendeten Verfahren *FMECA*²², *ETA*²³ und *FTA*²⁴ wurden ausgeschlossen, da sie nicht zur Analyse vernetzter Elemente geeignet sind.

Bei der Durchführung der *FMECA* und der *FTA* sind die Wirkzustände der Elemente in Fehlerzustände umzuwandeln. Auf diesen zusätzlichen Analyseschritt soll beim *Kausalitätsmodell* verzichtet werden.

Es wurden untersucht:

- *Petrinetze*,
- *Markoffanalyse* und
- *Zuverlässigkeitsblockdiagrammanalyse*.

Die Verfahren *Petrinetze*²⁵ und *Markoffanalyse*²⁶ erlauben die Modellierung zeitbasierter *Kausalketten* für vernetzte Systeme. Die Struktur der logisch vernetzten Elemente wird bei beiden Verfahren graphisch dargestellt und ist somit unmittelbar erkennbar.

*Petrinetze*²⁷ erlauben die Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeiten ebenso, wie die *Markoffanalyse*²⁸. Hinweise zu den Einschränkungen dieser Verfahren sind Abschnitt 4 der *DIN EN 62 551 [20]* und Abschnitt 6 der *DIN IEC 61 165 [16]* zu entnehmen.

Der Aufwand zur Durchführung dieser Analysen ist größer als bei der *Zuverlässigkeitsblockdiagrammanalyse*. Deshalb wurde keines der Verfahren als Basis des *Kausalitätsmodells* ausgewählt. Sollte sich jedoch die Modellierung zeitbasierter *Kausalketten* als sinnvoll erweisen, sollte das Verfahren der *Petrinetze* verwendet werden, da es im Vergleich zur *Markoffanalyse* über eine höhere Modellierungsmächtigkeit verfügt.²⁹

Das Verfahren der *Zuverlässigkeitsblockdiagrammanalyse* wurde als Basis für das *Kausalitätsmodell* ausgewählt. Neben dem geringeren Analyseaufwand (verglichen mit *Petrinetzen*

und der *Markoffanalyse*), stellt die Möglichkeit der Transformation von Zuverlässigkeitsblockdiagrammen in *Petrisetze* eine Grundlage zur Weiterentwicklung des *Kausalitätsmodells* dar.³⁰

Die *Zuverlässigkeitsblockdiagrammanalyse* erlaubt die Modellierung von *Kausalketten* für vernetzte Systeme. Die Struktur der logisch vernetzten Elemente wird graphisch dargestellt und ist somit unmittelbar erkennbar.^{31,32} Mittels *Zuverlässigkeitsblockdiagrammanalyse* sind die Systemüberlebenswahrscheinlichkeiten und somit die Eintrittswahrscheinlichkeiten ermittelbar.

Für das *Kausalitätsmodell* gelten folglich die Einschränkungen der *Zuverlässigkeitsblockdiagrammanalyse*:

1. Die Elemente verfügen nur über die Wirkzustände „intakt“ (wirksam sein) oder „defekt“ (unwirksam sein).³³ Sie entsprechen den *Situationen* im Sinne des *Kausalitätsmodells*.
2. Die Eintrittswahrscheinlichkeit einer *Situation* wird nicht von der Eintrittswahrscheinlichkeit einer anderen, im modellierten System vorhandenen *Situation* beeinflusst (die *Situationen* sind voneinander unabhängig - *disjunkt*).³⁴ Die mehrfache Verwendung eines Elementes ist dann möglich, wenn ein gleichzeitiges Eintreten der vom Element hervorgerufenen *Situation* modelliert werden soll.³⁵
3. Die Reihenfolge des Eintritts der *Situationen* kann nicht unterschieden werden.³⁶
4. Zeitbasierte *Kausalketten* sind nicht modellierbar.³⁷ Folglich ist für jede *Einsatz- und Umgebungsbedingung* eine unabhängige *Kausalkette* zu bilden.
5. *Kausalketten* mit nicht funktionsbeteiligter Redundanz (Standby-Redundanz) sollten nicht modelliert werden, da die redundant angeordneten Elemente voneinander abhängig sind.³⁸

3.5 Das Kausalitätsmodell

Zur Charakterisierung des *Kausalitätsmodells* wird die folgende Begriffsdefinition verwendet:

Das *Kausalitätsmodell* ist ein *Risikomodell* im Sinne der *DIN EN 50 126-2 [11]*, welches zur *Risikoanalyse* im Bahnsystem eingesetzt werden kann.

Mittels *Kausalketten* wird der vernetzte Zusammenhang zwischen *Ursachen, Auslösern, Sicherheitsbarrieren, Gefährdungen* und *Unfällen* hergestellt.

Die Modellierung der *Kausalketten* basiert auf der *Zuverlässigkeitsblockdiagrammanalyse*.

3.5.1 Symbole des Kausalitätsmodells

In diesem Abschnitt werden die Symbole des *Kausalitätsmodells* beschrieben. Die Vernetzung der Elemente wird in Kapitel 3.5.2 erläutert. Der Aufbau des *Kausalitätsmodells* ist den Abbildungen 4, 5 und 6 zu entnehmen.

Die Symbole des *Kausalitätsmodells* bestehen aus Ellipsen, Kreisen, Punkten, Dreiecken, Rauten, Rechtecken, Quadraten und Verbindungslinien mit Richtungspfeil.

Ellipsen werden für die Darstellung von *Ursachen* verwendet, während Kreise die *Auslöser* darstellen. Technische *Sicherheitsbarrieren* werden mittels Rechteck und menschliche *Sicherheitsbarrieren* mittels Quadrat dargestellt. Dreiecke werden für die Darstellung der *Gefährdungen* und *Unfälle* verwendet. Mittels Punkt wird der Abschnitt C „Risikoerzeugung“ und mittels Raute der Abschnitt B „Risikominderung“ (Kapitel 3.5.2) abgeschlossen.

Oberhalb der Symbole wird die *Schwere* angegeben, die bei *Ursachen*, *Auslösern* und *Sicherheitsbarrieren* aus der Wirkung des jeweiligen Elementes resultiert.

Bei den eingetretenen *Gefährdungen* bzw. *Unfällen* wird die resultierende *Schwere* aller *Kausalketten* angegeben, die zu ihnen führen (Kapitel 3.5.2). Bei den vermiedenen *Gefährdungen* bzw. *Unfällen* und den Abschnittskennzeichen (Punkt, Raute) wird die *Schwere* nicht angegeben.

Unterhalb der Symbole wird eine eindeutige Identifikation und die Kurzinformation zur jeweiligen *Ursache*, *Auslöser*, *Sicherheitsbarriere*, *Gefährdung* oder *Unfall* angeordnet. Die Abschnittskennzeichen sind von dieser Regel ausgenommen.

Der kausale Zusammenhang zwischen den wirksamen *Sicherheitsbarrieren* und der vermiedenen *Gefährdung* bzw. des vermiedenen *Unfalls* wird mit gestrichelten Verbindungslinien dargestellt.

Der kausale Zusammenhang zwischen den *Ursachen*, *Auslösern* und der eingetretenen *Gefährdung* bzw. des eingetretenen *Unfalls* wird mit durchgezogenen Verbindungslinien dargestellt.

Das Abschnittsabschlussymbol B „Risikominderung“ (Raute) trennt die *Kausalketten* der vermiedenen *Gefährdung* bzw. des vermiedenen *Unfalls* („*Sicherheitsbarrieren* wirksam“) von den *Kausalketten* der eingetretenen *Gefährdung* bzw. des eingetretenen *Unfalls* („*Sicherheitsbarrieren* nicht wirksam“).

Die inhärente Eintrittswahrscheinlichkeit der *Ursache*, des *Auslösers* und der *Sicherheitsbarriere* wird als Füllung des entsprechenden Symbols mit der Farbe „Blau“ ausgedrückt. Der Wert der Eintrittswahrscheinlichkeit ist entgegengesetzt proportional zur Transparenz der Füllung. Der Farbton variiert zwischen der Farbe Weiß, die eine Eintrittswahrscheinlichkeit von Null (100 % Transparenz) repräsentiert und Dunkelblau, die eine Eintrittswahrscheinlichkeit von Eins (0 % Transparenz) repräsentiert.

Die Füllung kann als Ausdruck der Wirksamkeit des jeweiligen Elementes interpretiert werden. Ein weißes Symbol entspricht einem unwirksamen Element, welches die *Kausalkette* unterbricht. Ein dunkelblaues Symbol entspricht einem uneingeschränkt wirksamen Element, welches die *Kausalkette* schließt. Ein farblich abgestuftes Symbol entspricht einem eingeschränkt wirksamen Element.

Das *Risiko* wird als Füllung der Symbole „Gefährdung“ bzw. „Unfall“ mit den Farben „Grün“, „Gelb“, „Orange“ und „Rot“ ausgedrückt.

Angewendet auf die Risikomatrix (Kapitel 3.5.8) reicht somit das *Risiko* von „Grün“ („vernachlässigbar“) bis „Rot“ („untragbar“).

3.5.2 Struktur des Kausalitätsmodells

Die Struktur des *Kausalitätsmodells* stellt den Aufbau der ggf. vernetzten *Kausalketten* im Bahnsystem dar, deren Elemente die beiden Zustände „wirksam“ und „unwirksam“ aufweisen.

Es wird festgelegt:

Der kausale Zusammenhang der Vermeidung der Gefährdung bzw. des Unfalls infolge wirksamer Sicherheitsbarrieren bei wirksamen Ursachen bzw. Auslösern, wird mittels Kausalitätsmodell graphisch dargestellt.

Die Häufigkeit der Gefährdung bzw. des Unfalls wird anhand einer Wahrscheinlichkeit quantifiziert, die aus den Eintrittswahrscheinlichkeiten der Ursachen bzw. Auslöser und den Versagenswahrscheinlichkeiten der Sicherheitsbarrieren resultiert.

Die Ursachen, Auslöser und Sicherheitsbarrieren müssen disjunkt sein. Folglich wird die Wahrscheinlichkeit eines Elementes von der Wahrscheinlichkeit eines anderen Elementes nicht, bzw. nicht wesentlich beeinflusst.

Erfahrungsgemäß entspricht somit die kausale Struktur der *Sicherheitsbarrieren* weitgehend der technisch / funktionalen Fahrzeugstruktur bzw. den betrieblichen Handlungsvorschriften. Die *Kausalketten* sind somit intuitiv und ohne signifikanten Interpretationsaufwand erstellbar, weshalb eine geringe Fehlerquote bei der Modellierung zu erwarten ist.

Kohärenz

Die Auswertung der vernetzten *Kausalketten* erfolgt mittels *Minimalpfaden* und der daraus abgeleiteten *Strukturfunktion* (Kapitel 3.5.4 und 3.5.5). Folglich muss ein **kohärentes** Modell vorliegen.

Die Anwendung der *Strukturfunktion* im Sinne der Zuverlässigkeitstheorie erfordert ein technisches System, dessen Kohärenz durch die Erfüllung der folgenden Bedingungen gegeben ist³⁹:

1. Das System ist **intakt**, wenn **alle** Komponenten intakt sind.
2. Das System ist **defekt**, wenn **alle** Komponenten defekt sind.

Demgegenüber ist das *Kausalitätsmodell* kohärent, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

1. Die *Gefährdung* bzw. der *Unfall* **tritt ein**, wenn **alle** *Ursachen* bzw. *Auslöser* wirksam sind und **alle** *Sicherheitsbarrieren* unwirksam sind.

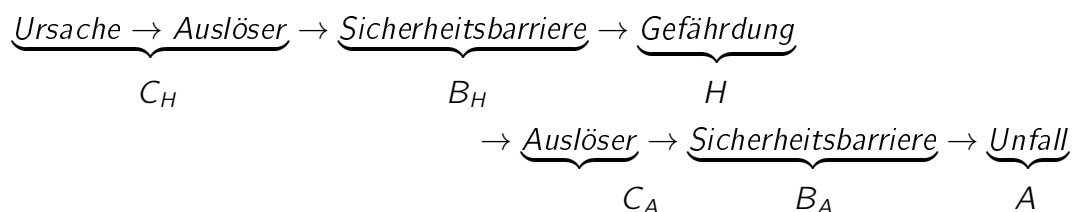
- Die *Gefährdung* bzw. der *Unfall* **tritt nicht ein**, wenn **alle Ursachen** bzw. *Auslöser* und *Sicherheitsbarrieren* wirksam sind oder **alle Ursachen** bzw. *Auslöser* unwirksam sind, unabhängig von der Wirksamkeit der *Sicherheitsbarrieren*.

Diese Kohärenzbedingungen entsprechen offensichtlich nicht den Kohärenzbedingungen der *Strukturfunktion* im Sinne der Zuverlässigkeitstheorie. Sie kann somit nicht auf das gesamte *Kausalitätsmodell* angewendet werden.

Zur Herstellung der Kohärenz werden die *Kausalketten* in drei kausal abhängige Abschnitte gegliedert:

- C „Risikoerzeugung“ (Synonym „Cause“ — umfasst die *Ursachen* und *Auslöser*),
 B „Risikominderung“ (Synonym „Barrier“ — umfasst die *Sicherheitsbarrieren*), sowie
 H/A „resultierendes Risiko“ (Synonyme „Hazard“ / „Accident“ — umfasst die *Gefährdung* bzw. den *Unfall*)

Die Reihenfolge der Abschnitte lautet:



Die Kohärenz kann nun innerhalb der Abschnitte *C* und *B* gewährleistet werden.

Die Elemente des Abschnitts *C* sind kohärent, wenn die folgenden Kohärenzbedingungen erfüllt sind:

- Die *Gefährdung* bzw. der *Unfall* **kann eintreten**, wenn **alle Ursachen** bzw. *Auslöser* wirksam sind.
- Die *Gefährdung* bzw. der *Unfall* **kann nicht eintreten**, wenn **alle Ursachen** bzw. *Auslöser* unwirksam sind.

Die Elemente der Abschnittes Abschnitt *B* sind kohärent, wenn die folgenden Kohärenzbedingungen erfüllt sind:

- Die *Gefährdung* bzw. der *Unfall* **wird nicht verhindert**, wenn **alle Sicherheitsbarrieren** unwirksam sind.
- Die *Gefährdung* bzw. der *Unfall* **wird verhindert**, wenn **alle Sicherheitsbarrieren** wirksam sind.

Logische Struktur der Kausalketten

Zur Bildung der *Kausalketten* werden die Elemente des *Kausalitätsmodells* im Sinne der Graphentheorie mittels gerichteter Kanten verbunden. Einige Beispiele für die graphische Darstellung verschiedener *Kausalitätsmodelle* sind den Abbildungen 4, 5 und 6 zu entnehmen.

Die kausal abhängigen Abschnitte $C_H - B_H - H - C_A - B_A - A$ sind stets in einer seriellen Reihenfolge angeordnet.

Demgegenüber können die Elemente der Abschnitte C und B in serieller, paralleler oder vermaschter Reihenfolge angeordnet sein⁴⁰.

Bei einer seriellen Anordnung der Elemente im Abschnitt C „Risikoerzeugung“ wird eine *Gefährdung* bzw. ein *Unfall* nur dann hervorgerufen, wenn **alle** Elemente gleichzeitig wirksam sind (die Eintrittswahrscheinlichkeit **sinkt** mit der Anzahl der wirksamen Elemente). Bei Unwirksamkeit mindestens eines Elementes wird die *Gefährdung* bzw. der *Unfall* nicht hervorgerufen.

Bei einer seriellen Anordnung der Elemente im Abschnitt B „Risikominderung“ werden *Gefährdung* bzw. *Unfall* nur dann verhindert, wenn **alle** Elemente gleichzeitig wirksam sind (die Versagenswahrscheinlichkeit **steigt** mit der Anzahl der wirksamen Elemente). Bei Unwirksamkeit mindestens eines Elementes wird die *Gefährdung* bzw. der *Unfall* nicht verhindert.

Bei einer parallelen (vermaschten) Anordnung der Elemente im Abschnitt C „Risikoerzeugung“ wird bereits dann eine *Gefährdung* bzw. ein *Unfall* hervorgerufen, wenn **mindestens ein** Element wirksam ist (die Eintrittswahrscheinlichkeit **steigt** mit der Anzahl der wirksamen Elemente). Erst bei Unwirksamkeit aller Elemente wird die *Gefährdung* bzw. der *Unfall* nicht hervorgerufen.

Bei einer parallelen (vermaschten) Anordnung der Elemente im Abschnitt B „Risikominderung“ werden *Gefährdung* bzw. *Unfall* solange verhindert, wie **mindestens ein** Element wirksam ist (die Versagenswahrscheinlichkeit **sinkt** mit der Anzahl der wirksamen Elemente). Erst bei Unwirksamkeit aller Elemente, wird die *Gefährdung* bzw. der *Unfall* nicht verhindert.

Schwere der Kausalketten

Die *Kausalketten* repräsentieren neben der *Häufigkeit* auch die potentielle *Schwere* der *Gefährdung* bzw. die resultierende *Schwere* des *Unfalls*.

Die potentielle *Schwere* wird von den *Ursachen* und *Auslösern* festgelegt. Die resultierende *Schwere* wird von den *Sicherheitsbarrieren* festgelegt, da sie die *Schwere* der *Ursachen* bzw. des *Auslösers* reduzieren können.

Die potentielle *Schwere* der *Gefährdung* entspricht somit der *Schwere* der wirksamen *Sicherheitsbarrieren* bzw. der *Schwere* der *Ursachen* bzw. *Auslöser* bei unwirksamen *Sicherheitsbarrieren*. Die tatsächliche *Schwere* des *Unfalls* wird analog bestimmt.

Eine **exakte** Ermittlung der *Schwere*, die die Versagenswahrscheinlichkeiten oder die vermaschte Anordnung der *Sicherheitsbarrieren* berücksichtigt, ist mittels *Kausalitätsmodell* nicht möglich. In beiden Fällen ist die **repräsentative** *Schwere* auszuwählen und der *Gefährdung* bzw. dem *Unfall* zuzuordnen.

Sollten mehrere, repräsentative *Schwereniveaus* zugeordnet werden, ist das *Risiko* unter Verwendung der Eintrittswahrscheinlichkeiten V_H bzw. V_A des repräsentativen *Schwereniveaus* zu ermitteln (Kapitel 3.5.7).

3.5.3 Hinweise zur Modellierung

In diesem Kapitel werden Hinweise zur Modellierung gegeben. Die Hinweise zur Ermittlung der Eintritts- bzw. Versagenswahrscheinlichkeiten sind dagegen Kapitel 3.5.9 zu entnehmen.

Bei der Modellierung ist grundsätzlich zu beachten, dass die *Ursachen*, *Auslöser* und *Sicherheitsbarrieren* über eine inhärente Eintrittswahrscheinlichkeit verfügen. Weiterhin besitzen die Elemente *Ursache* und *Auslöser* eine ihnen inhärente *Schwere*. Die *Sicherheitsbarrieren* hingegen, reduzieren die *Schwere* auf das ihnen inhärente Niveau.

Die Elemente *Unfall* und *Gefährdung* besitzen hingegen keine inhärente Eintrittswahrscheinlichkeit und keine inhärente *Schwere*. Ihnen wird die resultierende Eintrittswahrscheinlichkeit und *Schwere* der zu ihnen führenden *Kausalketten* zugeordnet (von Links nach Rechts).

Bei der Modellierung sind Bezeichnung, Eintrittswahrscheinlichkeit und *Schwere* der Elemente des *Kausalitätsmodells* so zu wählen, dass

- wirksame *Ursachen* und *Auslöser* eine *Situation* beschreiben, die das **Eintreten** des *Unfalls* bzw. der *Gefährdung* zur Folge hat („Eingeklemmte Person“, „Stillstand soll verlassen werden“). Ihnen ist die inhärente Eintrittswahrscheinlichkeit und *Schwere* zuzuordnen.
- wirksame *Sicherheitsbarrieren* eine *Situation* beschreiben, die das **Vermeiden** des *Unfalls* bzw. der *Gefährdung* zur Folge hat („Selbstbefreiung“, „Sichtbar im Rückspiegel“). Ihnen ist die inhärente Versagenswahrscheinlichkeit und das von ihnen erreichbare Niveau der *Schwere* zuzuordnen.
- *Unfall* und *Gefährdung* einerseits eine *Situation* beschreiben, die deren **Vermeidung** darstellt („Person ist befreit bzw. Anfahrt wird verhindert“, „Mitschleifen mit geringer Geschwindigkeit über eine kurze Wegstrecke“) aber auch andererseits eine *Situation* beschreiben, die deren **Eintritt** darstellt („Person ist eingeklemmt. Der Stillstand kann verlassen werden.“, „Mitschleifen der eingeklemmten Person“). Beide Elemente besitzen keine inhärente Eintrittswahrscheinlichkeit und *Schwere*.

Die *Kausalketten* sind so zu gestalten, dass sie über die folgenden Eigenschaften verfügen:

- Mit Eintreten einer *Ursache* werden alle von ihr ausgehenden *Kausalketten* wirksam. Sie repräsentieren die kausalen Abhängigkeiten der miteinander verbundenen Elemente im Expositionszeitraum. Folglich muss sichergestellt sein, dass dieser Teil der *Kausalkette* im Expositionszeitraum gültig ist (zum Beispiel dürfen Elemente, die nur im Stillstand wirksam sind, nicht in derselben *Kausalkette* wirken, die während der Fahrt auftritt).

Es ist nicht auszuschließen, dass einzelne Elemente in sich gegenseitig ausschließenden *Kausalketten* wirksam sind (z.B. ist die *Ursache* „Eingeklemmte Person“ im Stillstand und während der Fahrt gültig). In diesem Fall ist das jeweilige Element zu duplizieren. Es ist dieselbe Bezeichnung und dieselbe Eintrittswahrscheinlichkeit, jedoch unterschiedliche Identifikationsnummern zu verwenden. Somit bleiben einander ausschließende *Kausalketten* entkoppelt und beeinflussen sich nicht gegenseitig.

- Die Vermaschung stellt eine Kombination aus Reihen- und Parallelanordnung dar, bei der mehrere *Kausalketten* in Parallelanordnung zu einem gemeinsamen Element geführt werden (zum Beispiel *Sicherheitsbarriere* „Wird vom Fahrer erkannt und befreit“ in Abbildung 4).
Die vermaschte Anordnung in Abbildung 4 wurde gewählt, da nur **ein** Fahrer vorhanden ist, der die eingeklemmte Person mittels Rückspiegel oder Anzeige der nicht geschlossenen Grünschleife erkennen kann.
Erst mit Einsatz eines **zweiten** Fahrers könnte die vermaschte Anordnung in eine Parallel-Reihenordnung aufgelöst werden.
- Die *Kausalketten* sollen nur so viele Elemente enthalten, wie zur Beschreibung des kausalen Zusammenhanges nötig sind. Somit wird die Komplexität reduziert, woraus eine Erleichterung der Plausibilitätsprüfung und eine Reduktion der Modellierungsfehler resultiert.
Das bedeutet, dass alle sinnvoll zusammenfassbaren *Situationen* in einem resultierenden Element zusammenzufassen sind. Ihm wird die Gesamteintrittswahrscheinlichkeit entsprechend Kapitel 3.5.4 und 3.5.5, sowie die gemeinsame *Schwere* zugeordnet (es ist zum Beispiel sinnvoll, alle *Ursachen* gleicher *Schwere* zusammenzufassen, die nicht an unterschiedlichen Stellen im *Kausalitätsmodell* auftreten).
- Die *Kausalketten* müssen kohärent sein. Sie sind mit Abschluss der Modellierung anhand der Erläuterungen in Kapitel 3.5.2 zu überprüfen. Bei dieser Überprüfung hilft die Überlegung, dass die *Kausalketten* immer dann unterbrochen werden, wenn ein Element den Zustand „nicht wirksam“ annimmt.

3.5.4 Versagenswahrscheinlichkeit des Abschnitts B (Risikominderung)

Die Akzeptanz der *Gefährdungen* bzw. *Unfälle* basiert auf der Kenntnis ihres *Risikos*. Das *Risiko* resultiert aus der *Häufigkeit* und *Schwere* der *Gefährdungen* bzw. *Unfälle*. Die *Häufigkeit* wird mittels Eintrittswahrscheinlichkeit ausgedrückt.

In Kapitel 3.5.2 wurde auf den entgegengesetzten Einfluss der *Ursachen* bzw. *Auslöser* und der *Sicherheitsbarrieren* auf die *Häufigkeit* von *Gefährdung* bzw. *Unfall* hingewiesen. Zur Sicherstellung der Kohärenz wurden die Abschnitte *C* „Risikoerzeugung“ und *B* „Risikominderung“ eingeführt. In diesem Abschnitt wird die quantitative Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit des Abschnitts *B* „Risikominderung“ erläutert.

Die quantitative Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit des Abschnitts *B* „Risikominderung“ kann recht umfangreich sein. Der Autor hat deshalb eine Analysesoftware `kausalitaetsmodell.py` erstellt, die in der Interpretersprache Python implementiert wurde. Sie dient der Analyse eines *Kausalitätsmodell*, welches als Textdatei im GRAPHML- oder JSON Graphenbeschreibungsformat vorliegt. Die Textdatei kann aus beliebigen Datenquellen erzeugt werden, wobei der Autor die Open-Source Graphenmodellierungs- und Analysesoftware `visone` verwendet hat.

Der Algorithmus zur quantitativen Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit des Abschnitts *B* „Risikominderung“ basiert auf der Ableitung der *Strukturfunktion* anhand der *Minimalpfade*.⁴¹ Er wird am Beispiel der Brückenschaltung (Abbildung 1) im Sinne der Zuverlässigkeitstheorie erläutert. Der Algorithmus basiert auf der Stochastik und der Schaltalgebra⁴², welche ein Spezialfall der Booleschen Algebra ist.

Eine allgemeingültige Herleitung der *Strukturfunktion* wird hier nicht vorgenommen. Ein gutes Verständnis kann bei Verwendung von [34] gewonnen werden. Die dort beschriebenen Zusammenhänge führen zum selben Formelwerk, welches auch in [33] und [15] verwendet wird.

Strukturfunktion

Mittels *Strukturfunktion* wird eine formale Beschreibung des logischen Zusammenhangs der binären Wirkzustände (intakt / defekt) der vernetzten Komponenten und der resultierenden Auswirkung auf das gesamte System (intakt / defekt) bereitgestellt.

Zur Anwendung der *Strukturfunktion* muss das zu analysierende System kohärent und die Ausfälle der Komponenten müssen statistisch unabhängig (*disjunkt*) sein⁴³. Beide Bedingungen können innerhalb des *Kausalitätsmodells* erfüllt werden (Kapitel 3.4).

Im Sinne der Zuverlässigkeitstheorie wird zur Auswertung der *Strukturfunktion* das Verfahren für nichtreparierbare Systeme angewendet. Die *Systemausfallwahrscheinlichkeit* h entspricht dann der Versagenswahrscheinlichkeit des Abschnitts B „Risikominderung“.

Negativ-Logik

Bei der Anwendung der *Strukturfunktion* wird davon ausgegangen, dass die Elemente des untersuchten Systems und somit das Verhalten des gesamten Systems, exakt zwei Wirkzustände aufweisen:

0 die Komponente bzw. das System ist intakt, oder

1 die Komponente bzw. das System ist defekt.

Diese Zuordnung wird als „Negativ-Logik“⁴⁴ bezeichnet.

Im Abschnitt B „Risikominderung“ entspricht der Wirkzustand „Komponente intakt“ (0) dem Wirkzustand „*Sicherheitsbarriere* wirksam“. Analog entspricht der Wirkzustand „Komponente defekt“ (1) dem Wirkzustand „*Sicherheitsbarriere* nicht wirksam“.

Minimalpfade

Der Algorithmus wird anhand der Brückenschaltung (Abbildung 1) erläutert. Zur Ermittlung der *Strukturfunktion* sind alle *Minimalpfade*⁴⁵ durch Überlegung zusammenzustellen. Zur Vermeidung der Überlagerung von Pfaden ist die Begriffsdefinition des *Minimalpfades* zu beachten, wonach ein *Minimalpfad* nur dann vorliegt, wenn er keine anderen Pfade als echte Teilmengen enthält.

Die *Minimalpfade* M_i der Brückenschaltung sind in Abbildung 1 eingezeichnet:

$$M_1 : K_1 \rightarrow K_3$$

$$M_2 : K_2 \rightarrow K_4$$

$$M_3 : K_1 \rightarrow K_5 \rightarrow K_4$$

$$M_4 : K_2 \rightarrow K_5 \rightarrow K_3$$

Es ist zu beachten, dass die Pfade $K_1 \rightarrow K_5 \rightarrow K_3$ und $K_2 \rightarrow K_5 \rightarrow K_4$ **keine Minimalpfade** M_i sind, da sie M_1 bzw. M_2 als Teilmenge enthalten.

Minimalpfade
Netzwerk

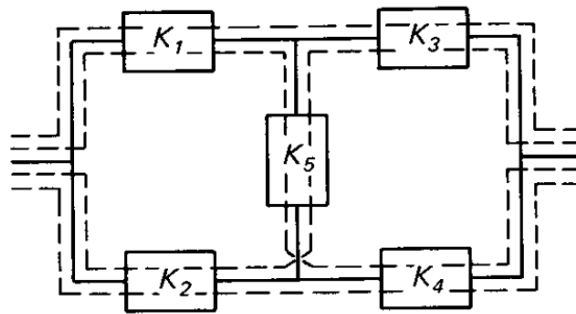


Abbildung 1: *Minimalpfade* M_i einer Brückenschaltung ([34, Abschnitt 2.3, Bild 3])

Die Strukturfunktion $\beta(\mathbf{x}^{M_i})$ des Minimalpfades M_i wird als *Disjunktion* der Zustandsvariablen x_i der im Pfad enthaltenen Komponenten K_i gebildet (vgl. [34, Abschnitt 2.13, Glg. 2.16]), wobei \mathbf{x} der Vektor der Zustandsvariablen $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ist.

Diese Festlegung kann unter Anwendung der Negativ-Logik (*intakt* $\equiv 0$) leicht nachvollzogen werden. Ein *Minimalpfad* M_i ist nur dann intakt, wenn **alle** Komponenten K_i intakt sind. Folglich darf sich der logische Wert 0 (intakt) ausschließlich dann ergeben, wenn die Werte der Zustandsvariablen x_i aller Komponenten K_i gleich 0 sind. Nur die Verknüpfung mittels logischem ODER (*Disjunktion*) erfüllt diese Bedingung (eine gemischte Verknüpfung von 0 und 1 führt stets zu 1).

Den *Minimalpfaden* M_i der Brückenschaltung (Abbildung 1) werden die folgenden *Strukturfunktionen* zugeordnet:

$$\begin{aligned}\beta(\mathbf{x}^{M_1}) &= x_1 \vee x_3 \\ \beta(\mathbf{x}^{M_2}) &= x_2 \vee x_4 \\ \beta(\mathbf{x}^{M_3}) &= x_1 \vee x_5 \vee x_4 \\ \beta(\mathbf{x}^{M_4}) &= x_2 \vee x_5 \vee x_3\end{aligned}$$

Die *Systemstrukturfunktion* $\varphi(\mathbf{x})$ wird als *Konjunktion* der *Strukturfunktionen* der *Minimalpfade* $\beta(\mathbf{x}^{M_i})$ gebildet (vgl. [34, Abschnitt 2.13, Glg. 2.18]), da das System so lange intakt ist, wie **mindestens ein** *Minimalpfad* intakt ist.

Auch diese Festlegung kann unter Anwendung der Negativ-Logik (*defekt* $\equiv 1$) leicht nachvollzogen werden. Das System ist nur dann defekt, wenn **alle** *Minimalpfade* M_i defekt sind. Folglich darf sich der logische Wert 1 (defekt) ausschließlich dann ergeben, wenn die Zustandswerte aller *Minimalpfade* M_i gleich 1 sind. Nur die Verknüpfung mittels logischem UND (*Konjunktion*) erfüllt diese Bedingung (eine gemischte Verknüpfung von 0 und 1 führt stets zu 0).

Der Brückenschaltung (Abbildung 1) wird die folgende *Strukturfunktion* zugeordnet:

$$\varphi(\mathbf{x}) = \beta(\mathbf{x}^{M_1}) \wedge \beta(\mathbf{x}^{M_2}) \wedge \beta(\mathbf{x}^{M_3}) \wedge \beta(\mathbf{x}^{M_4})$$

Übergang von der Schaltalgebra zur Stochastik

Die *Systemstrukturfunktion* $\varphi(\mathbf{x})$ ist ein Ausdruck der Schaltalgebra (booleschen Algebra). Den Zustandsvariablen x_i und somit der *Systemstrukturfunktion* $\varphi(\mathbf{x})$, können nur die booleschen Werte (Wahr / Falsch, Defekt / Intakt, 1 / 0, usw.) zugeordnet werden.

Der Übergang von der Schaltalgebra zur Algebra mit reellen Zahlen wird über den folgenden Satz hergestellt:

Jeder Ausdruck der Schaltalgebra kann auch als ein Ausdruck mit reellen Variablen geschrieben werden, wobei Addition, Multiplikation, Subtraktion verwendet werden. Dabei wird vorausgesetzt, dass nur die reellen Zahlen 0, 1 zugelassen sind, und alle Variablen nur linear auftreten. [34, Abschnitt 2.3, Glg. 2.10 - 2.12]

Den Operatoren *Negation*, *Konjunktion*, *Disjunktion* werden nun die folgenden Ausdrücke zugewiesen, wobei zu beachten ist, dass für x_i nur die reellen Zahlen 0, 1 zugelassen sind (vgl. [34, Abschnitt 2.13, Glg. 2.10 - 2.12]):

$$1 - x \equiv \bar{x} \quad (\text{Negation} - \text{logisches NICHT})$$

$$xy \equiv x \wedge y \quad (\text{Konjunktion} - \text{logisches UND})$$

$$\prod_{i=1}^n x_i \equiv \bigwedge_{i=1}^n x_i$$

$$x + y - xy \equiv x \vee y \quad (\text{Disjunktion} - \text{logisches ODER})$$

$$1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_i) \equiv \bigvee_{i=1}^n x_i$$

Gleichungen, die diese Ausdrücke verwenden, werden als „Multilinearformen“ bezeichnet. Die Multilinearform der *Systemstrukturfunktion* $\varphi(\mathbf{x})$ der Brückenschaltung (Abbildung 1) lautet:

$$\begin{aligned} \varphi(\mathbf{x}) &= \beta(\mathbf{x}^{M_1})\beta(\mathbf{x}^{M_2})\beta(\mathbf{x}^{M_3})\beta(\mathbf{x}^{M_4}) \\ &= [1 - (1 - x_1)(1 - x_3)] \\ &\quad \times [1 - (1 - x_2)(1 - x_4)] \\ &\quad \times [1 - (1 - x_1)(1 - x_5)(1 - x_4)] \\ &\quad \times [1 - (1 - x_2)(1 - x_5)(1 - x_3)] \end{aligned}$$

Das Verfahren für nichtreparierbare Systeme basiert auf einer *Zufallsvariable* (*Indikatorvariable* X_i), die den Wert 0 (intakt) bzw. 1 (defekt) annehmen kann. Der Erwartungswert⁴⁶ $E(X_i)$ der Indikatorvariable drückt die Wahrscheinlichkeit aus, dass die Komponente defekt ist:

$$P\{X_i = 1\} = p_i = E(X_i) \quad (1)$$

Somit wird der Bezug zur Stochastik hergestellt (vgl. [34, Abschnitt 3.2]).

Versagenswahrscheinlichkeit des Abschnitts B „Risikominderung“

In Analogie zur Ausfallwahrscheinlichkeit einer Komponente (Gleichung 1), kann die *Systemausfallwahrscheinlichkeit* $h(\mathbf{p})$ aus dem Wert der *Systemstrukturfunktion* $\varphi(\mathbf{x})$, der ja ebenfalls eine *Zufallsvariable* (Indikatorvariable) ist, ermittelt werden:

$$h(\mathbf{p}) = P\{\varphi(\mathbf{x}) = 1\} = E(\varphi(\mathbf{x}))$$

\mathbf{p} ist der Vektor der Komponentenausfallwahrscheinlichkeiten $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_n)$.

\mathbf{x} ist der Vektor der Zustandsvariablen $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Es besteht eine Analogie im Aufbau der Gleichungen der *Systemstrukturfunktion* $\varphi(\mathbf{x})$ und *Systemausfallwahrscheinlichkeit* $h(\mathbf{p})$ für das Parallelsystem und das Seriensystem:

$$\varphi(\mathbf{x}) = \bigwedge_{i=1}^n x_i \equiv \prod_{i=1}^n x_i \quad (\text{Parallelsystem}) \quad (2)$$

$$h(\mathbf{p}) = \prod_{i=1}^n p_i \quad (3)$$

$$\varphi(\mathbf{x}) = \bigvee_{i=1}^n x_i \equiv 1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_i) \quad (\text{Seriensystem}) \quad (4)$$

$$h(\mathbf{p}) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \quad (5)$$

Für Serien- und Parallelsysteme kann die *Komponentenausfallwahrscheinlichkeit* p_i sofort in die Multilinearform der *Strukturfunktion* eingesetzt werden ($x_i = p_i$).

Bei vermaschten Systemen, wie zum Beispiel der Brückenschaltung, ist dies jedoch nicht möglich. Einzelne Komponenten K_i treten in mehreren *Minimalpfaden* M_i gleichzeitig auf, woraus eine Überlappung (unzulässige Mehrfachzählung) der Ausfallwahrscheinlichkeiten resultieren würde.

Zum Vermeiden von Überlappungen der Ausfallwahrscheinlichkeiten in einem allgemeinen System müssen die Terme der *Systemstrukturfunktion* $\varphi(\mathbf{x})$ *disjunkt* gestellt werden. Die *Systemausfallwahrscheinlichkeit* $h(\mathbf{p})$ kann dann aus der Addition der Komponentenausfallwahrscheinlichkeiten p_i der *disjunkten* Terme ermittelt werden⁴⁷.

In [34, Abschnitt 3.3] wird das „Inklusions-Exklusions-Prinzip“ erläutert, welches hier jedoch nicht verwendet wird.

Stattdessen wird die *Systemausfallwahrscheinlichkeit* $h(\mathbf{p})$ unter Nutzung der Boole'schen Wahrheitstabelle des Systems und der Ableitung der *disjunktiven Normalform* der *Strukturfunktion* ermittelt. Wenngleich die Methodik in [15, Abschnitt 8.1.3] beschrieben ist, werden die Erläuterungen aus [2, Abschnitt 1] verwendet.

In die Kopfzeile der Boole'schen Wahrheitstabelle werden die Zustandsvariablen x_i aller Komponenten K_i eingetragen. Zusätzlich werden drei Spalten hinzugefügt, die für jede

Wertekombination der Zustandsvariablen x_i den resultierenden booleschen Wert der Systemstrukturfunktion $\varphi(\mathbf{x})$, die boolesche Gleichung der Minterme (siehe disjunktive Normalform) und die Gleichung der Systemausfallwahrscheinlichkeit $h(\mathbf{p})$ aufnehmen.

Jede Zeile in der Wahrheitstabelle entspricht einem Minterm, wenn der Wert der Systemstrukturfunktion $\varphi(\mathbf{x}) = 1$ ist. Die Disjunktion aller Minterme führt zur disjunktiven Normalform der Systemstrukturfunktion $\varphi(\mathbf{x})$.

Die Gleichungen der Minterme werden aus der Konjunktion der Zustandsvariablen x_i gebildet, wobei für $x_i = 1 \equiv x_i$ und $x_i = 0 \equiv (1 - x_i)$ verwendet werden. Daher p_i die Ausfallwahrscheinlichkeit der Komponente i repräsentiert und 1 dem Zustand „defekt“ entspricht, darf für die Bildung der Gleichung der Systemausfallwahrscheinlichkeit $h(\mathbf{p})$ für $x_i = 1 \equiv p_i$ verwendet werden. Analog ist für $x_i = 0 \equiv (1 - x_i) \equiv (1 - p_i)$ zu verwenden (Zustand „intakt“)⁴⁸.

Die Boole'sche Wahrheitstabelle der Brückenschaltung (Abbildung 1) lautet somit:

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	$\varphi(\mathbf{x})$	Minterme	$h_{Min}(\mathbf{p})$
0	0	0	0	0	0	$(1 - x_1)(1 - x_2)(1 - x_3)(1 - x_4)(1 - x_5)$	$(1 - p_1)(1 - p_2)(1 - p_3)(1 - p_4)(1 - p_5)$
0	0	0	0	1	0	$(1 - x_1)(1 - x_2)(1 - x_3)(1 - x_4)x_5$	$(1 - p_1)(1 - p_2)(1 - p_3)(1 - p_4)p_5$
0	0	0	1	0	0	$(1 - x_1)(1 - x_2)(1 - x_3)x_4(1 - x_5)$	$(1 - p_1)(1 - p_2)(1 - p_3)p_4(1 - p_5)$
0	0	0	1	1	0	$(1 - x_1)(1 - x_2)(1 - x_3)x_4x_5$	$(1 - p_1)(1 - p_2)(1 - p_3)p_4p_5$
0	0	1	0	0	0	$(1 - x_1)(1 - x_2)x_3(1 - x_4)(1 - x_5)$	$(1 - p_1)(1 - p_2)p_3(1 - p_4)(1 - p_5)$
0	0	1	0	1	0	$(1 - x_1)(1 - x_2)x_3(1 - x_4)x_5$	$(1 - p_1)(1 - p_2)p_3(1 - p_4)p_5$
0	0	1	1	0	1	$(1 - x_1)(1 - x_2)x_3x_4(1 - x_5)$	$(1 - p_1)(1 - p_2)p_3p_4(1 - p_5)$
0	0	1	1	1	1	$(1 - x_1)(1 - x_2)x_3x_4x_5$	$(1 - p_1)(1 - p_2)p_3p_4p_5$
0	1	0	0	0	0	$(1 - x_1)x_2(1 - x_3)(1 - x_4)(1 - x_5)$	$(1 - p_1)p_2(1 - p_3)(1 - p_4)(1 - p_5)$
0	1	0	0	1	0	$(1 - x_1)x_2(1 - x_3)(1 - x_4)x_5$	$(1 - p_1)p_2(1 - p_3)(1 - p_4)p_5$
0	1	0	1	0	0	$(1 - x_1)x_2(1 - x_3)x_4(1 - x_5)$	$(1 - p_1)p_2(1 - p_3)p_4(1 - p_5)$
0	1	0	1	1	0	$(1 - x_1)x_2(1 - x_3)x_4x_5$	$(1 - p_1)p_2(1 - p_3)p_4p_5$
0	1	1	0	0	0	$(1 - x_1)x_2x_3(1 - x_4)(1 - x_5)$	$(1 - p_1)p_2p_3(1 - p_4)(1 - p_5)$
0	1	1	0	1	1	$(1 - x_1)x_2x_3(1 - x_4)x_5$	$(1 - p_1)p_2p_3(1 - p_4)p_5$
0	1	1	1	0	1	$(1 - x_1)x_2x_3x_4(1 - x_5)$	$(1 - p_1)p_2p_3p_4(1 - p_5)$
0	1	1	1	1	1	$(1 - x_1)x_2x_3x_4x_5$	$(1 - p_1)p_2p_3p_4p_5$

Tabelle wird fortgesetzt

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	$\varphi(\mathbf{x})$	<i>Minterme</i>	$h_{Min}(\mathbf{p})$
1	0	0	0	0	0	$x_1(1-x_2)(1-x_3)(1-x_4)(1-x_5)$	$p_1(1-p_2)(1-p_3)(1-p_4)(1-p_5)$
1	0	0	0	1	0	$x_1(1-x_2)(1-x_3)(1-x_4)x_5$	$p_1(1-p_2)(1-p_3)(1-p_4)p_5$
1	0	0	1	0	0	$x_1(1-x_2)(1-x_3)x_4(1-x_5)$	$p_1(1-p_2)(1-p_3)p_4(1-p_5)$
1	0	0	1	1	1	$x_1(1-x_2)(1-x_3)x_4x_5$	$p_1(1-p_2)(1-p_3)p_4p_5$
1	0	1	0	0	0	$x_1(1-x_2)x_3(1-x_4)(1-x_5)$	$p_1(1-p_2)p_3(1-p_4)(1-p_5)$
1	0	1	0	1	0	$x_1(1-x_2)x_3(1-x_4)x_5$	$p_1(1-p_2)p_3(1-p_4)p_5$
1	0	1	1	0	1	$x_1(1-x_2)x_3x_4(1-x_5)$	$p_1(1-p_2)p_3p_4(1-p_5)$
1	0	1	1	1	1	$x_1(1-x_2)x_3x_4x_5$	$p_1(1-p_2)p_3p_4p_5$
1	1	0	0	0	1	$x_1x_2(1-x_3)(1-x_4)(1-x_5)$	$p_1p_2(1-p_3)(1-p_4)(1-p_5)$
1	1	0	0	1	1	$x_1x_2(1-x_3)(1-x_4)x_5$	$p_1p_2(1-p_3)(1-p_4)p_5$
1	1	0	1	0	1	$x_1x_2(1-x_3)x_4(1-x_5)$	$p_1p_2(1-p_3)p_4(1-p_5)$
1	1	0	1	1	1	$x_1x_2(1-x_3)x_4x_5$	$p_1p_2(1-p_3)p_4p_5$
1	1	1	0	0	1	$x_1x_2x_3(1-x_4)(1-x_5)$	$p_1p_2p_3(1-p_4)(1-p_5)$
1	1	1	0	1	1	$x_1x_2x_3(1-x_4)x_5$	$p_1p_2p_3(1-p_4)p_5$
1	1	1	1	0	1	$x_1x_2x_3x_4(1-x_5)$	$p_1p_2p_3p_4(1-p_5)$
1	1	1	1	1	1	$x_1x_2x_3x_4x_5$	$p_1p_2p_3p_4p_5$

Tabelle 1: Wahrheitstabelle der Brückenschaltung

Da die *Minterme* und somit auch die zugeordneten Terme der *Systemausfallwahrscheinlichkeit* $h_{Min}(\mathbf{p})$ *disjunkt* sind, darf die Multilinearform der *Systemstrukturfunktion* $\varphi(\mathbf{x})$ und die *Systemausfallwahrscheinlichkeit* $h(\mathbf{p})$ aus der Summe der *Minterme* bzw. $h_{Min}(\mathbf{p})$ ermittelt werden⁴⁹

Die *disjunktive Normalform* der *Systemstrukturfunktion* $\varphi(\mathbf{x})$ als Multilinearform und die Gleichung der *Systemausfallwahrscheinlichkeit* $h(\mathbf{p})$ lauten somit für die Brückenschaltung (Abbildung 1):

$$\begin{aligned}
\varphi(\mathbf{x}) = & (1-x_1)(1-x_2)x_3x_4(1-x_5) + (1-x_1)(1-x_2)x_3x_4x_5 \\
& + (1-x_1)x_2x_3(1-x_4)x_5 + (1-x_1)x_2x_3x_4(1-x_5) \\
& + (1-x_1)x_2x_3x_4x_5 + x_1(1-x_2)(1-x_3)x_4x_5 \\
& + x_1(1-x_2)x_3x_4(1-x_5) + x_1(1-x_2)x_3x_4x_5 \\
& + x_1x_2(1-x_3)(1-x_4)(1-x_5) + x_1x_2(1-x_3)(1-x_4)x_5 \\
& + x_1x_2(1-x_3)x_4(1-x_5) + x_1x_2(1-x_3)x_4x_5 \\
& + x_1x_2x_3(1-x_4)(1-x_5) + x_1x_2x_3(1-x_4)x_5 \\
& + x_1x_2x_3x_4(1-x_5) + x_1x_2x_3x_4x_5
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
h(\mathbf{p}) = & (1 - p_1)(1 - p_2)p_3p_4(1 - p_5) + (1 - p_1)(1 - p_2)p_3p_4p_5 \\
& + (1 - p_1)p_2p_3(1 - p_4)p_5 + (1 - p_1)p_2p_3p_4(1 - p_5) \\
& + (1 - p_1)p_2p_3p_4p_5 + p_1(1 - p_2)(1 - p_3)p_4p_5 \\
& + p_1(1 - p_2)p_3p_4(1 - p_5) + p_1(1 - p_2)p_3p_4p_5 \\
& + p_1p_2(1 - p_3)(1 - p_4)(1 - p_5) + p_1p_2(1 - p_3)(1 - p_4)p_5 \\
& + p_1p_2(1 - p_3)p_4(1 - p_5) + p_1p_2(1 - p_3)p_4p_5 \\
& + p_1p_2p_3(1 - p_4)(1 - p_5) + p_1p_2p_3(1 - p_4)p_5 \\
& + p_1p_2p_3p_4(1 - p_5) + p_1p_2p_3p_4p_5
\end{aligned}$$

Die Summe aus *Systemausfallwahrscheinlichkeit* $h(\mathbf{p})$ und Systemüberlebenswahrscheinlichkeit $\bar{h}(\mathbf{p})$ ist Eins⁵⁰, somit gilt:

$$h(\mathbf{p}) + \bar{h}(\mathbf{p}) = 1$$

Im Abschnitt *B* „Risikominderung“ entsprechen die Zustandsvariablen x_i dem Wirkzustand der einzelnen *Sicherheitsbarrieren* i . Somit entsprechen die Komponentenausfallwahrscheinlichkeiten p_i den Versagens- / Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten $F_{Bi}(t)$ der einzelnen *Sicherheitsbarrieren* i :

$$p_i = F_{Bi}(t)$$

Die *Systemausfallwahrscheinlichkeit* $h(\mathbf{p})$ entspricht der Versagenswahrscheinlichkeit des gesamten Abschnitts *B* „Risikominderung“:

$$F_{BH}(t) = h(\mathbf{p}) \quad \text{für die } \textit{Sicherheitsbarrieren}, \text{ deren Versagen zur } \textit{Gefährdung} \text{ führt} \quad (6)$$

$$F_{BA}(t) = h(\mathbf{p}) \quad \text{für die } \textit{Sicherheitsbarrieren}, \text{ deren Versagen zum } \textit{Unfall} \text{ führt} \quad (7)$$

3.5.5 Eintrittswahrscheinlichkeit des Abschnitts C (Risikoerzeugung)

Auf die Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit des Abschnitts *C* „Risikoerzeugung“ wird das Konzept der Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit des Abschnitts *B* „Risikominderung“ (Kapitel 3.5.4) angewendet.

Strukturfunktion

Es gelten die in Kapitel 3.5.4 formulierten Randbedingungen zur Anwendung der *Strukturfunktion* (binäre Wirkzustände der vernetzten Komponenten, Kohärenz des Systems, *disjunkte* Komponentenausfälle, Anwendung des Verfahrens für nichtreparierbare Systeme).

Im Sinne der Zuverlässigkeitstheorie entspricht die Systemüberlebenswahrscheinlichkeit der Eintrittswahrscheinlichkeit des Abschnitts *C* „Risikoerzeugung“.

Negativ-Logik

Die Wirkzustände der *Ursachen* bzw. *Auslöser* werden mittels Negativ-Logik beschrieben (Kapitel 3.5.4).

Im Abschnitt *C* „Risikoerzeugung“ entspricht der Wirkzustand „Komponente defekt“ (1) dem Wirkzustand „*Ursache* bzw. *Auslöser* nicht wirksam“. Analog entspricht der Wirkzustand „Komponente intakt“ (0) dem Wirkzustand „*Ursache* bzw. *Auslöser* wirksam“.

Minimalpfade

Es gelten die Erläuterungen in Kapitel 3.5.4.

Übergang von der Schaltalgebra zur Stochastik

Es gelten die Erläuterungen in Kapitel 3.5.4.

Eintrittswahrscheinlichkeit des Abschnitts C „Risikoerzeugung“

Zur Ermittlung der *Systemausfallwahrscheinlichkeit* $h(\mathbf{p})$ bzw. Systemüberlebenswahrscheinlichkeit $\bar{h}(\mathbf{p})$ ist den Erläuterungen in Kapitel 3.5.4 zu folgen.

Im Abschnitt C „Risikoerzeugung“ entsprechen die Zustandsvariablen x_i dem Wirkzustand der einzelnen *Ursachen* bzw. *Auslöser* i . Somit entsprechen die Komponentenausfallwahrscheinlichkeiten p_i den Wahrscheinlichkeiten, dass die einzelnen *Ursachen* i bzw. *Auslöser* i nicht wirksam sind. Zur Charakterisierung des Ausfallverhaltens werden jedoch die Eintrittswahrscheinlichkeiten $S_{C_i}(t)$ verwendet:

$$p_i = 1 - S_{C_i}(t)$$

Die Systemüberlebenswahrscheinlichkeit $\bar{h}(\mathbf{p})$ entspricht der Eintrittswahrscheinlichkeit des gesamten Abschnitts C „Risikoerzeugung“:

$$S_{CH}(t) = \bar{h}(\mathbf{p}) = 1 - h(\mathbf{p}) \quad \text{für die Ursachen, Auslöser die zur Gefährdung führen} \quad (8)$$

$$S_{CA}(t) = \bar{h}(\mathbf{p}) = 1 - h(\mathbf{p}) \quad \text{für die Ursachen, Auslöser die zum Unfall führen} \quad (9)$$

3.5.6 Eintrittswahrscheinlichkeit der Gefährdung bzw. des Unfalls

In diesem Abschnitt wird die quantitative Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit der *Gefährdung* bzw. des *Unfalls* erläutert und der Bezug zum *Risiko* hergestellt.

Den Erläuterungen in Kapitel 3.5.2 kann die Struktur des *Kausalitätsmodells* entnommen werden. Offensichtlich stellt es ein Seriensystem der Abschnitte C_H „Risikoerzeugung (*Gefährdung*)“, B_H „Risikominderung (*Gefährdung*)“, C_A „Risikoerzeugung (*Unfall*)“ und B_A „Risikominderung (*Unfall*)“ dar.

Aus den Erläuterungen zur Kohärenz (Kapitel 3.5.2) ist ableitbar, dass die *Gefährdung* bzw. der *Unfall* nur dann eintritt, wenn die Abschnitte C_H bzw. C_A („Risikoerzeugung“) **wirksam** sind **UND** die Abschnitte B_H bzw. B_A („Risikominderung“) **nicht wirksam** sind. Im Sinne der Zuverlässigkeitstheorie kann das *Kausalitätsmodell* als Seriensystem aufgefasst werden, bei dem der Systemerfolg mit Eintritt der *Gefährdung* bzw. des *Unfalls* gegeben ist.

Die Eintrittswahrscheinlichkeiten $S_{CH}(t)$ bzw. $S_{CA}(t)$ der Abschnitte C_H bzw. C_A (Gleichungen 8 und 9) und die Versagenswahrscheinlichkeiten $F_{BH}(t)$ bzw. $F_{BA}(t)$ der Abschnitte B_H bzw. B_A (Gleichungen 6 und 7) entsprechen den Überlebenswahrscheinlichkeiten der Komponenten im Sinne der Zuverlässigkeitstheorie.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit der *Gefährdung* bzw. des *Unfalls* entspricht folglich der

Systemüberlebenswahrscheinlichkeit. Es gilt die Gleichung für Seriensysteme⁵¹:

$$S_H(t) = S_{CH}(t) \cdot F_{BH}(t) \quad (10)$$

$$S_A(t) = S_{CH}(t) \cdot F_{BH}(t) \cdot S_{CA}(t) \cdot F_{BA}(t) \quad (11)$$

3.5.7 Resultierendes Risiko der Gefährdung bzw. des Unfalls

Die Bewertung des *Risikos* kann anhand des *individuellen Risikos* R_i , des *kollektiven Risikos* R_o und des *empfundenen (kollektiven) Risikos* R_e erfolgen (Kapitel 3.1).

Die Eintrittswahrscheinlichkeiten der *Risikoparameter* sind *disjunkt*. Folglich wird das *Risiko* aus der Summe der im Expositionszeitraum wirkenden Eintrittswahrscheinlichkeiten ermittelt⁵².

Die Gleichungen zur Ermittlung des *Risikos* werden in [30, Abschnitt 3.4] angegeben. Sie lauten ⁵³:

$$r_i = \sum_j w_j \cdot v_{ij} \cdot \lambda_{ij} \quad \text{individuelles Risiko}$$

$$R_o = \sum_j w_j \cdot A_j = \sum_i r_i \quad \text{kollektives Risiko}$$

$$R_e = \sum_j w_j \cdot A_j \cdot \varphi(A_j) \quad \text{empfundenes (kollektives) Risiko}$$

Der Parameter w_j entspricht der Eintrittswahrscheinlichkeit der risikoerzeugenden *Situation* j . Die Parameter v_{ij} und λ_{ij} entsprechen jeweils der Wahrscheinlichkeit, dass eine Person i dieser *Situationen* j ausgesetzt ist und getötet wird.

Der Parameter A_j entspricht der Anzahl Todesopfer beim Eintreten der *Situation* j . Mittels Aversionsfaktor $\varphi(A_j)$ werden *Unfälle mit zunehmender Anzahl Opfer stärker gewichtet. Insbesondere wird dadurch Katastrophenunfällen mit sehr vielen Todesopfern eine überproportionale Bedeutung zugeordnet.* [30, Abschnitt 3.4].

Die Bezeichnungen der Parameter in den zitierten Gleichungen entsprechen nicht den Definitionen dieses Dokumentes. Sie werden im Folgenden umbenannt.

Beim *Kausalitätsmodell* wird die Anwesenheit mindestens einer Person für das Eintreten einer *Gefährdung* bzw. eines *Unfalls* vorausgesetzt. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten der *Ursache* bzw. des *Auslösers* umfassen somit die Wahrscheinlichkeit, dass eine Person i beim Auftreten der risikoerzeugenden *Situation* j anwesend ist. Folglich wird der Parameter $v_{ij} = 1$ gesetzt.

Die Gesamtheit der *Situationen* j , die zur *Gefährdung* bzw. zum *Unfall* führen, entspricht im *Kausalitätsmodell* den unterschiedlichen *Ursachen*, *Auslösern* und versagenden *Sicherheitsbarrieren*. Die Wahrscheinlichkeiten w_j der risikoerzeugenden *Situationen* werden somit durch die Wahrscheinlichkeiten $S_H \equiv w_j$ bzw. $S_A \equiv w_j$ für das Eintreten der *Gefährdung* bzw. des *Unfalls* ausgedrückt. Der Summenausdruck in den Gleichungen zur Berechnung des *Risikos* ist somit nicht notwendig.

Die *Schwere* der *Gefährdung* bzw. des *Unfalls* wird für das *Kausalitätsmodell* nicht ausschließlich auf den Todesfall beschränkt. Mittels des Parameters $V_H \equiv \lambda_{ij}$ wird die Ein-

trittswahrscheinlichkeit für die *Gefährdung* ausgedrückt, dass eine Person i als Folge der risikoezeugenden *Situation* j den betrachteten Gesundheitsschaden erleiden könnte. Analog wird mittels $V_A \equiv \lambda_{ij}$ die Eintrittswahrscheinlichkeit für das Eintreten des betrachteten Gesundheitsschadens beim *Unfall* ausgedrückt.

Die Anzahl der Personen die bei Eintreten der *Gefährdung* geschädigt werden könnten, wird mittels N_H ausgedrückt. Die Anzahl der geschädigten Personen bei Eintreten des *Unfalls* mittels N_A ausgedrückt. Analog gelten die Aversionsfaktoren $k_H(N_H) \equiv \varphi(A_j)$ für die *Gefährdung* und $k_A(N_A) \equiv \varphi(A_j)$ für den *Unfall*.

Die Gleichungen zur Ermittlung des *Risikos* der *Gefährdung* lauten somit ($R_{iH} \equiv r_i$ bzw. $R_{iA} \equiv r_i$):

$$R_{iH} = S_H \cdot V_H \quad \text{individuelles Risiko der Gefährdung} \quad (12)$$

$$R_{oH} = S_H \cdot N_H = \sum_i R_{iH} \quad \text{kollektives Risiko der Gefährdung} \quad (13)$$

$$R_{eH} = S_H \cdot N_H \cdot k_H(N_H) \quad \text{empfundenes (kollektives) Risiko der Gefährdung} \quad (14)$$

Zur Ermittlung des *Risikos* des *Unfalls* (R_{iA} , R_{oA} , R_{eA}) sind S_H mittels S_A , V_H mittels V_A , N_H mittels N_A und $k_H(N_H)$ mittels $k_A(N_A)$ zu ersetzen.

3.5.8 Risikoakzeptanz

Im Kapitel 3.5.7 wurden die Gleichungen zur Ermittlung des *Risikos* erläutert.

Die Akzeptanz des ermittelten *Risiko(wertes)* ist zu überprüfen. Als Prinzipien zur Darstellung der Risikoakzeptanz im Bahnsystem haben sich neben *As Low As Reasonably Practicable (so niedrig wie vernünftigerweise in der Praxis umsetzbar) (ALARP)*, *Globalement Au Moins Aussi Bon (GAMAB)* und *Minimale Endogene Mortalität (MEM)*, auch die Anwendung einer Risikomatrix oder die explizite Vorgabe zulässiger Eintrittswahrscheinlichkeiten durchgesetzt.

In diesem Kapitel wird die Akzeptanz des *individuellen Risikos* R_i anhand der Zuordnung zulässiger *Häufigkeiten* zur Risikomatrix unter Verwendung der *MEM* erläutert.

Minimale Endogene Mortalität (MEM)

*MEM*⁵⁴ ist ein Verfahren zur Ableitung von absoluten Werten für die Risikoakzeptanz basierend auf der natürlichen Sterblichkeitsrate von Menschen einer festgelegten jugendlichen Altersgruppe. ... *MEM* integriert die niedrigste natürliche Sterblichkeitsrate und stellt anhand dieser sicher, dass das gesamte zusätzliche technische Risiko für ein Individuum einen Wert nicht überschreitet, der diesem natürlichen Risiko gleichwertig ist. Die natürliche Sterblichkeitsrate fokussiert nur auf natürliche Todesursachen ohne irgendwelche Arten von Unfällen und die Einflüsse angeborener Fehlbildungen. [11, Anhang A.4]

Die Altersgruppe der Fünf- bis Fünfzehnjährigen weist in Industriestaaten die niedrigste natürliche Sterblichkeitsrate auf. Dieser Wert entspricht somit dem niedrigsten natürlichen *Risiko* des Eintritts des Todesfalles. Er wird mit R_m bezeichnet:

$$R_m = 2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Todesfälle}}{\text{Person} \cdot \text{Jahr}} \quad (15)$$

Das zulässige *individuelle Risiko* R_i , welchem die Menschen bei Betrieb eines technischen System ausgesetzt sind, entspricht jedoch nicht unmittelbar R_m . Stattdessen fordert *MEM*, dass das Betreiben eines technischen Systems keine nennenswerte Erhöhung von R_m hervorrufen darf und nimmt deshalb an, dass ein Mensch im Expositionszeitraum maximal zwanzig gleichzeitig wirkenden unterschiedlichen technischen Systemen ausgesetzt ist. Somit darf jedes System mit $\frac{1}{20}R_m$ am *individuellen Risiko* beitragen:

$$R_i \leq \frac{1}{20}R_m = 10^{-5} \frac{\text{Todesfälle}}{\text{Person} \cdot \text{Jahr}} \quad (16)$$

MEM führt weiterhin einen Faktor „differential risk aversion“ für solche *Unfälle* ein, die in einer großen Anzahl gleichzeitig betroffener Personen resultieren. Ab einer Maximalzahl von einhundert gleichzeitig betroffenen Personen wird das zulässige *individuelle Risiko* linear auf $R_i \leq 10^{-9} \frac{\text{Todesfälle}}{\text{Person} \cdot \text{Jahr}}$ für eine Anzahl von einer Million gleichzeitig betroffener Personen abgesenkt.

Zur Risikoakzeptanz ist die Annahme über die Anzahl der gleichzeitig wirkenden Systeme und die Maximalzahl der gleichzeitig betroffenen Personen im Expositionszeitraum stets zu prüfen. Beim Betrieb von *Straßenbahnfahrzeugen* werden diese Annahmen erfahrungsgemäß nicht überschritten.

Wenngleich die *MEM* grundsätzlich den Todesfall betrachtet, wird ein quantifizierter Zusammenhang zu Schwer- und Leichtverletzten hergestellt, indem die zulässige Eintrittswahrscheinlichkeit des Schwerverletzten dem Zehnfachen der Eintrittswahrscheinlichkeit des Todesfalles und die zulässige Eintrittswahrscheinlichkeit des Leichtverletzten dem Hundertfachen der Eintrittswahrscheinlichkeit des Todesfalles entspricht⁵⁵.

Zusammenhang zwischen MEM und Sterbetafel⁵⁶

Der Wert der niedrigsten natürlichen Sterblichkeitsrate R_m soll anhand der *Sterbetafel 2001/2003 für Deutschland* [22, Anhang „Anhangtabelle“] nachvollzogen werden. Die Sterbetafel enthält die altersspezifischen Sterbewahrscheinlichkeiten, die als Wahrscheinlichkeiten definiert sind, *im Alter x vor Vollendung des nächsten Lebensjahres x + 1 zu sterben* [22, Abschnitt „Aufbau der Sterbetafel 2001/2003“]. Der Verlauf der dort zusammengestellten Sterbewahrscheinlichkeiten $q(x)$ ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die in *MEM* verwendete dimensionsbehaftete Sterblichkeitsrate R_m kann nicht unmittelbar in Abbildung 2 abgelesen werden, da dort dimensionslose Wahrscheinlichkeiten dargestellt sind. Gemeinsam mit der *Ausfallrate* und der *Gefährdungsrate*⁵⁷ entspricht sie der Hazardfunktion bzw. Hazardrate $\lambda(t)$ im Sinne der *Ereignisanalyse* (Kapitel 3.5.9).

Eine auf ein Jahr bezogene Hazardrate wird in eine Hazardrate pro Stunde umgerechnet:

$$\lambda \frac{1}{\text{Jahr}} \cdot \frac{1 \text{ Jahr}}{365 \text{ Tag}} \cdot \frac{1 \text{ Tag}}{24 \text{ Stunde}} = \lambda \cdot 1,14 \cdot 10^{-4} \text{ h}^{-1}$$

Der Faktor $1,14 \cdot 10^{-4} \text{ h}^{-1}$ wird zur einfacheren Lesbarkeit auf 10^{-4} h^{-1} gerundet.

Wahrscheinlichkeitsaussagen werden nicht für einen festen Punkt, sondern für vorgegebene Intervalle getroffen (Kapitel 3.5.9). In der Sterbetafel beträgt das Betrachtungsintervall der Sterbewahrscheinlichkeiten ein Lebensjahr. Zur einfachen Handhabung wird für die

Wahrscheinlichkeitsaussagen ein Intervall von $t = 10^4 h$ verwendet, welches knapp über dem exakten Jahresintervall liegt ($t = 1 \text{ Jahr} \cdot \frac{365 \text{ Tag}}{\text{Jahr}} \cdot \frac{24 h}{\text{Tag}} = 8760 h$).

Die natürlichen Sterbewahrscheinlichkeiten werden als „rein zufällig“ auftretende *Situationen* betrachtet, die nach Kapitel 3.5.9 mittels Exponentialfunktion modelliert werden.

Die Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Todesfalles wird beispielhaft für eine Sterblichkeitsrate von $\lambda = \frac{1}{\text{Jahr}} \equiv \frac{1}{10^4 h}$ dargestellt:

$$\begin{aligned} W(t) &= F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \\ W(t = 10^4 h) &= 1 - e^{-\lambda \cdot 10^4 h} \\ W(t = 10^4 h) &= 1 - e^{-\frac{10^4 h}{10^4 h}} \\ W(t = 10^4 h) &= 1 - e^{-1} \\ W(t = 10^4 h) &= \mathbf{0,632121} \\ W(t = 10^4 h) &= 63,2121 \% \end{aligned}$$

Für die niedrigste natürliche Sterblichkeitsrate einer Person $\lambda = R_m = \frac{2}{10^4 \text{ Jahr}} \equiv \frac{2}{10^8 h}$ (Gleichung 15) folgt eine Sterbewahrscheinlichkeit:

$$\begin{aligned} W(t = 10^4 h) &= 1 - e^{-2 \cdot \frac{10^4 h}{10^8 h}} \\ W(t = 10^4 h) &= 1 - e^{-2 \cdot 10^{-4}} \\ W(t = 10^4 h) &= \mathbf{0,0002} \\ W(t = 10^4 h) &= 0,02 \% \end{aligned}$$

Für das zulässige *individuelle Risiko* $\lambda = R_i = 10^{-5} \text{ Jahr}^{-1} \equiv 10^{-9} h^{-1}$ (Gleichung 16) folgt eine zulässige Sterbewahrscheinlichkeit:

$$\begin{aligned} W(t = 10^4 h) &= 1 - e^{-\frac{10^4 h}{10^9 h}} \\ W(t = 10^4 h) &= 1 - e^{-10^{-5}} \\ W(t = 10^4 h) &= \mathbf{0,00001} \\ W(t = 10^4 h) &= 0,001 \% \end{aligned}$$

Die fett hervorgehobenen Werte können in Abbildung 2 abgelesen werden. Es ist auffallend, dass die Wahrscheinlichkeit der niedrigsten natürlichen Sterblichkeitsrate R_m ungefähr $q(x) = 0,0001$ beträgt und somit kleiner als $W(t = 10^4 h) = 0,0002$ der *MEM* ist.

Daher *MEM* Anfang der 1980er Jahre entwickelt wurde und die Sterbewahrscheinlichkeiten für alle Altersgruppen in den letzten fünfunddreißig Jahren zurückgegangen ist, erscheint der Wert aus der Sterbetafel der Jahre 2001/2003 plausibel. Weiterhin liegen keine Informationen über die damals berücksichtigten Länder vor.

Risikomatrix

In [10, Anhang C] werden Beispiele zum Erstellen einer Risikomatrix dargestellt. Die Risikomatrix stellt das zulässige *Risiko* bezogen auf die *Schwere* des *Unfalls* bzw. der *Gefährdung* dar. Im genannten Dokument wird insbesondere betont, dass *Häufigkeit* und *Schwere* vom Bahnunternehmen festzulegen sind, um die Besonderheiten des jeweiligen Bahnsystems

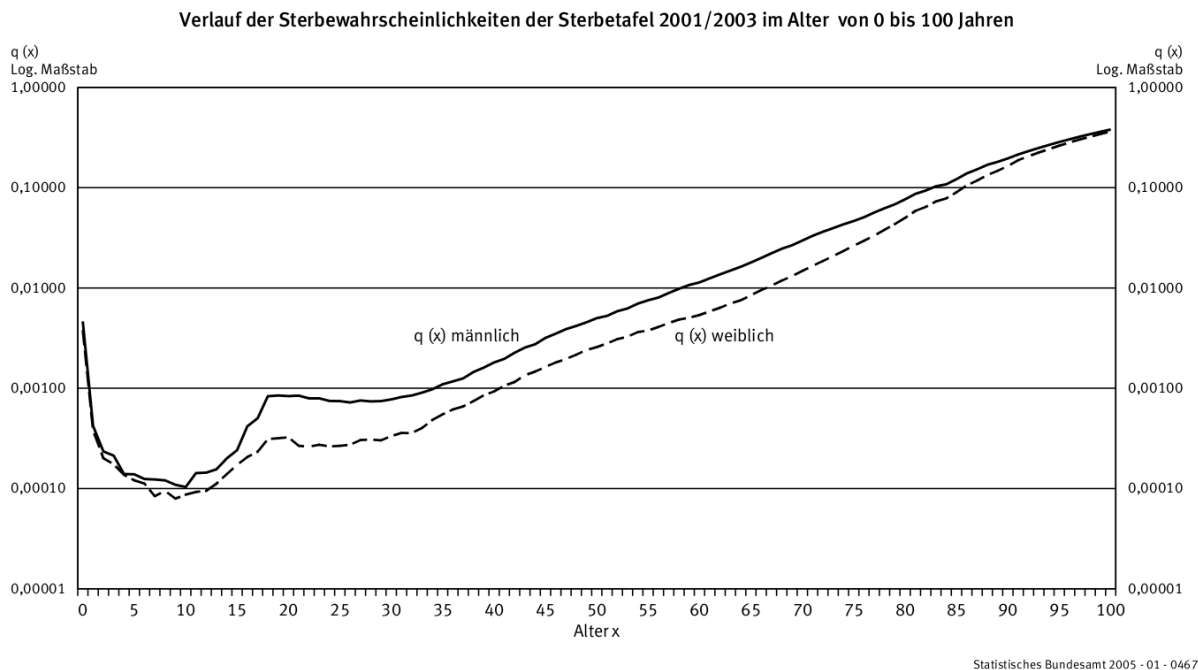


Abbildung 2: Sterbewahrscheinlichkeiten in Deutschland, basierend auf der Sterbetafel der Jahre 2001/2003 für Personen im Alter von 0 bis 100 Jahren ([22, Abbildung „Schaubild 1“])

zu berücksichtigen. Dieser Gedanke ist analog bei der Festlegung der Risikoakzeptanz zu berücksichtigen, wenngleich nicht explizit darauf hingewiesen wird.

Der im Rahmen des *Kausalitätsmodells* entwickelte Vorschlag der Zuordnung zulässiger *Häufigkeiten* zur Risikomatrix bildet das zulässige *individuelle Risiko* ab.

Er orientiert sich an den Beispielen in [10, Anhang C] und basiert auf der *MEM*, sowie dem dort formulierten quantifizierten Zusammenhang zwischen einem Todesfall und der Anzahl der äquivalent auftretenden Schwer- bzw. Leichtverletzten.

Die hier vorgeschlagene Risikomatrix (Tabelle 2) ist folglich auf *Unfälle* bzw. *Gefährdungen* anwendbar, die maximal **ehundert gleichzeitig auftretende Todesfälle** oder **eintausend gleichzeitig auftretende Schwerverletzte** oder **zehntausend gleichzeitig auftretende Leichtverletzte** zur Folge haben.

Sollte eine größere Anzahl gleichzeitig auftretender Todesfälle, Schwerverletzter oder Leichtverletzter zu befürchten sein, ist die „differential risk aversion“ bei der *Risikobeurteilung* zu berücksichtigen. In Abhängigkeit von der Gesamtzahl der zu befürchtenden Todesfälle ist in diesem Fall der *Häufigkeit - Schwere* - Kombination „sehr unwahrscheinlich“ / „katastrophal“ das *Risiko* „unerwünscht“ bzw. „untragbar“ zuzuordnen.

Die *Schwere* eines *Unfall* bzw. einer *Gefährdung* wird anhand der Kategorien „katastrophal“ (kat), „kritisch“ (krit), „geringfügig“ (ger) und „unbedeutend“ (unb) unterschieden:

katastrophal⁵⁸ Es sind maximal ehundert gleichzeitig auftretende Todesfälle oder eintausend gleichzeitig auftretende Schwerverletzte oder zehntausend gleichzeitig auftretende Leichtverletzte zu befürchten.

kritisch⁵⁹ Es ist ein Todesfall oder maximal zehn gleichzeitig auftretende Schwerverletzte oder maximal einhundert gleichzeitig auftretende Leichtverletzte zu befürchten.

geringfügig⁶⁰ Es ist ein Schwerverletzter oder maximal zehn gleichzeitig auftretende Leichtverletzte zu befürchten. Der Todesfall tritt nicht auf.

unbedeutend⁶¹ Es ist ein Leichtverletzter zu befürchten. Der Todesfall bzw. Schwerverletzte tritt nicht auf.

Die zulässige *Häufigkeit* eines *Unfalls* bzw. einer *Gefährdung* wird anhand der Kategorien „sehr unwahrscheinlich“ (suw), „unwahrscheinlich“ (unw), „selten“ (sel), „gelegentlich“ (gel), „wahrscheinlich“ (wsl) und „häufig“ (hfg) unterschieden:

sehr unwahrscheinlich⁶² Diese Kategorie repräsentiert eine *Häufigkeit*, mit der die *Situation* praktisch nicht auftritt. Ihr wird der Wert des zulässigen *individuellen Risikos* R_i (Gleichung 16) als jahresbezogene Hazardrate λ_5 zugeordnet.

unwahrscheinlich⁶³ Diese Kategorie repräsentiert eine *Häufigkeit*, mit der die *Situation* ausnahmsweise auftritt. Ihr wird eine zehnfach höhere Hazardrate als der Kategorie „sehr unwahrscheinlich“ zugeordnet.

selten⁶⁴ Diese Kategorie repräsentiert eine *Häufigkeit*, mit der die *Situation* mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit auftritt. Ihr wird eine zehnfach höhere Hazardrate als der Kategorie „unwahrscheinlich“ zugeordnet.

gelegentlich⁶⁵, **wahrscheinlich**⁶⁶, **häufig**⁶⁷ Diese Kategorien repräsentieren *Häufigkeiten*, mit der die *Situationen* immer wahrscheinlicher eintreten werden. Ihre Hazardraten steigen jeweils um eine Zehnerpotenz an.

Den *Häufigkeiten* werden Wertebereiche zugeordnet, die denen für die *Tolerierbare Funktionale Ausfallrate (TFFR)* festgelegten Wertebereichen entsprechen.⁶⁸

Der kleinste Wert der *TFFR* ist als geschlossene, untere Grenze festgelegt. Der unteren Grenze der *Häufigkeit* „sehr unwahrscheinlich“ wurde somit der Wert des zulässigen *individuellen Risikos* R_i nach *MEM* zugeordnet (Gleichung 16).

Die obere Grenze entspricht nahezu R_m (Gleichung 15). Sie kann im Bahnsystem akzeptiert werden, da der *Unfall* bzw. die *Gefährdung* im Expositionszeitraum nicht von mehreren gleichzeitig wirkenden technischen Systemen hervorgerufen und somit R_m praktisch nicht überschritten wird.

Die Risikoakzeptanz wird anhand der Kategorien „untragbar“ (unt), „unerwünscht“ (uner), „tolerierbar“ (tol) und „vernachlässigbar“ (vern) bewertet. Als notwendige Maßnahmen werden vorgeschlagen:

untragbar⁶⁹ Das *Risiko* ist nicht akzeptierbar und muss gemindert werden.

unerwünscht⁷⁰ Das *Risiko* ist nur dann akzeptierbar, wenn eine Minderung nicht möglich ist. Die Zustimmung des Bahnunternehmens oder der zuständigen Behörde muss vorliegen.

tolerierbar⁷¹ Das *Risiko* kann akzeptiert werden, wenn es einer ständigen Überwachung unterliegt. Die Zustimmung des Bahnunternehmens muss vorliegen.

vernachlässigbar⁷² Das *Risiko* ist akzeptabel. Die Zustimmung des Bahnunternehmens ist nicht erforderlich.

Die Risikomatrix stellt eine strukturierte Zusammenstellung von *Häufigkeits / Schwere* - Kombinationen dar, deren Risikoakzeptanz anhand der genannten Kategorien bewertet wird (Tabelle 2).

Die *Häufigkeits / Schwere* - Kombination „sehr unwahrscheinlich“ / „kritisch“ repräsentiert das *individuelle Risiko* des Todesfalls einer Person. Es entspricht dem zulässigen *individuellen Risiko* R_i nach MEM und wird somit mit der Risikoakzeptanzkategorie „vernachlässigbar“ bewertet.

Die *Häufigkeits / Schwere* - Kombination „sehr unwahrscheinlich“ / „katastrophal“ repräsentiert das *individuelle Risiko* des gleichzeitigen Todesfalls mehrerer Personen. Obwohl dieses *Risiko* dem zulässigen *individuellen Risiko* R_i nach MEM entspricht, wird es mit der Risikoakzeptanzkategorie „tolerierbar“ bewertet. Diese Bewertung wird mit dem Todesfall mehrerer Personen begründet, der stets einer ständigen Überwachung unterliegen sollte.

Abweichend vom Vorschlag der Risikomatrix in [10, Anhang C] wird die Risikoakzeptanzkategorie „untragbar“ auf die *Häufigkeits / Schwere* - Kombinationen „selten“ / „katastrophal“, „gelegentlich“ / „kritisch“ und „wahrscheinlich“ / „geringfügig“ erweitert.

Diese Erweiterung berücksichtigt das hohe Sicherheitsbedürfnis, welches in wirtschaftlich gut entwickelten Ländern ausgeprägt ist. Der Eintritt des Todesfalles bei einer bzw. mehreren Personen wird dort ebensowenig akzeptiert, wie der Eintritt einer schweren Verletzung bei einer Person.

Das zulässige *individuelle Risiko* R_i des Todesfalles einer Person, kann anhand des Verlaufes der Sterbewahrscheinlichkeiten (Abbildung 2) abgeschätzt werden. Die exakten Werte für jedes Alter sind der *Sterbetafel 2001/2003 für Deutschland* [22, Anhang „Anhangtabelle“] zu entnehmen.

Die obere Grenze der *Häufigkeit* W_5 „sehr unwahrscheinlich“ liegt knapp unter der Sterbewahrscheinlichkeit $q(x) = 0,0001$, welche der natürlichen Sterblichkeitsrate der zehnjährigen Jungen bzw. sechsjährigen und zwölfjährigen Mädchen in Deutschland entspricht. Die obere Grenze der *Häufigkeit* W_4 „unwahrscheinlich“ liegt knapp unter der Sterbewahrscheinlichkeit $q(x) = 0,001$, welche der natürlichen Sterblichkeitsrate der einjährigen Kinder und fünfunddreißigjährigen Männer bzw. vierzigjährigen Frauen in Deutschland entspricht. Die obere Grenze der *Häufigkeit* W_3 „selten“ liegt knapp unter der Sterbewahrscheinlichkeit $q(x) = 0,00995$, welche der natürlichen Sterblichkeitsrate der neunundfünfzigjährigen Männer bzw. siebenundsechzigjährigen Frauen in Deutschland entspricht. Die obere Grenze der *Häufigkeit* W_2 „gelegentlich“ liegt knapp unter der Sterbewahrscheinlichkeit $q(x) = 0,095163$, welche der natürlichen Sterblichkeitsrate der dreiundachzigjährigen Männer bzw. sechsundachzigjährigen Frauen in Deutschland entspricht. Die obere Grenze der *Häufigkeit* W_1 „wahrscheinlich“ liegt knapp unter der Sterbewahrscheinlichkeit $q(x) = 0,632121$, welche oberhalb der natürlichen Sterblichkeitsrate der einhundertjährigen Männer und Frauen liegt.

Wird also ein technisches System betrieben, bei dem der Todesfall einer Person (*Schwere* „kritisch“) auf die *Häufigkeit* „sehr unwahrscheinlich“ beschränkt ist, dann tritt offensichtlich keine nennenswerte Erhöhung der natürlichen Sterblichkeitsrate auf. Die geringfügige Erhöhung der natürlichen Sterblichkeitsrate für die sechs- bis zwölfjährigen Mädchen kann vernachlässigt werden, da sie nur für *Häufigkeiten* auftritt, die sehr nah an der oberen Grenze liegen.

Kann der Todesfall einer Person (*Schwere* „kritisch“) auf die *Häufigkeit* „unwahrscheinlich“

beschränkt werden, tritt im Extremfall eine Erhöhung der natürlichen Sterblichkeitsrate für eine Altersgruppe auf, die von den einjährigen Kindern bis zu den fünfunddreißigjährigen Männern und vierzigjährigen Frauen reicht. Die Erhöhung des *individuellen Risikos* für die genannte Altersgruppe kann akzeptiert werden, wenn es einer ständigen Überwachung unterliegt (Risikoakzeptanzkategorie „tolerierbar“). Für den gleichzeitigen Todesfall mehrerer Personen (*Schwere* „katastrophal“) muss die Erhöhung des *individuellen Risikos* für die genannte Altersgruppe akzeptiert werden, wenn eine Minderung nicht möglich ist und die Zustimmung des Bahnunternehmens bzw. der zuständigen Behörde vorliegt (Risikoakzeptanzkategorie „unerwünscht“).

Kann der Todesfall einer Person (*Schwere* „kritisch“) auf die *Häufigkeit* „selten“ beschränkt werden, erweitert sich im Extremfall die Erhöhung der natürlichen Sterblichkeitsrate auf eine Altersgruppe, die von den Neugeborenen bis zu den neunundfünfzigjährigen Männern und siebenundsechzigjährigen Frauen reicht. Sie umfasst die Kindheit und nahezu das gesamte Arbeitsalter der Personen. Die Erhöhung des *individuellen Risikos* für die genannte Altersgruppe muss akzeptiert werden, wenn eine Minderung nicht möglich ist und die Zustimmung des Bahnunternehmens bzw. der zuständigen Behörde vorliegt (Risikoakzeptanzkategorie „unerwünscht“). Für den gleichzeitigen Todesfall mehrerer Personen (*Schwere* „katastrophal“) kann dieses *Risiko* nicht mehr akzeptiert werden (Risikoakzeptanzkategorie „untragbar“).

Kann der Todesfall einer Person (*Schwere* „kritisch“) nur auf die *Häufigkeit* „gelegentlich“ beschränkt werden, erweitert sich im Extremfall die Erhöhung der natürlichen Sterblichkeitsrate auf eine Altersgruppe, die von den Neugeborenen bis zu den dreiundachzigjährigen Männern bzw. sechsundachzigjährigen Frauen reicht. Sie umfasst nahezu die gesamte Lebenszeit der Personen. Die Erhöhung des *individuellen Risikos* für die genannte Altersgruppe kann nicht akzeptiert werden (Risikoakzeptanzkategorie „untragbar“). Diese Betrachtung gilt analog für den gleichzeitigen Todesfall mehrerer Personen (*Schwere* „katastrophal“).

Für schwere Verletzungen einer Person (*Schwere* „geringfügig“) muss das *individuelle Risiko* akzeptiert werden, wenn eine Minderung nicht möglich ist und die Zustimmung des Bahnunternehmens bzw. der zuständigen Behörde vorliegt (Risikoakzeptanzkategorie „unerwünscht“). Kann die schwere Verletzungen einer Person nur auf die *Häufigkeit* „wahrscheinlich“ beschränkt werden, erweitert sich im Extremfall die Erhöhung der natürlichen Sterblichkeitsrate auf eine Altersgruppe, die von den Neugeborenen bis über die Einhundertjährigen hinaus reicht. Die Erhöhung des *individuellen Risikos* für die genannte Altersgruppe kann nicht akzeptiert werden (Risikoakzeptanzkategorie „untragbar“).

Die resultierende Matrix zur Akzeptanz des *individuellen Risikos* unter Anwendung der *MEM* ist in Tabelle 2 dargestellt.

zulässige <i>Häufigkeit</i> (AST/THR)				Risiko- akzeptanz- kategorie			
Hazardrate [<i>Jahr</i> ⁻¹] zulässige Anzahl der risikoerzeugenden <i>Situationen</i> pro Person nach MEM	Hazardrate [<i>Stunde</i> ⁻¹] zulässige Anzahl der risikoerzeugenden <i>Situationen</i> pro Person bei 24 Betriebsstunden an 365 Tagen	Wahrscheinlichkeit [%] risikoerzeugende <i>Situation</i> pro Person	verbal				
$1 \leq \lambda_0 < 10$	$10^{-4} \leq \lambda_0 < 10^{-3}$	$63, 2121 \leq W_0(10^4 h) < 99, 9955$	hfg	uner	unt	unt	unt
$10^{-1} \leq \lambda_1 < 1$	$10^{-5} \leq \lambda_1 < 10^{-4}$	$9, 5163 \leq W_1(10^4 h) < 63, 2121$	wsl	tol	unt	unt	unt
$10^{-2} \leq \lambda_2 < 10^{-1}$	$10^{-6} \leq \lambda_2 < 10^{-5}$	$0, 9950 \leq W_2(10^4 h) < 9, 5163$	gel	tol	uner	unt	unt
$10^{-3} \leq \lambda_3 < 10^{-2}$	$10^{-7} \leq \lambda_3 < 10^{-6}$	$0, 1000 \leq W_3(10^4 h) < 0, 9950$	sel	vern	tol	uner	unt
$10^{-4} \leq \lambda_4 < 10^{-3}$	$10^{-8} \leq \lambda_4 < 10^{-7}$	$0, 0100 \leq W_4(10^4 h) < 0, 1000$	unw	vern	vern	tol	uner
$10^{-5} \leq \lambda_5 < 10^{-4}$	$10^{-9} \leq \lambda_5 < 10^{-8}$	$0, 0010 \leq W_5(10^4 h) < 0, 0100$	suw	vern	vern	vern	tol
				unb	ger	krit	kat
				<i>Schwere</i>			

Tabelle 2: Matrix zur Akzeptanz des *individuellen Risikos* unter Anwendung der MEM, eingeschränkt auf die Bedingung, dass keine Überlagerung von mehreren, gleichzeitig wirkenden Systemen vorliegt

3.5.9 Eintrittswahrscheinlichkeiten der Elemente des Kausalitätsmodells ermitteln

Im Kapitel 3.5.7 wurde der Algorithmus zur quantitativen Ermittlung des *Risikos* erläutert. Die *Häufigkeit* des *Unfalls* bzw. der *Gefährdung* resultiert aus den Eintrittswahrscheinlichkeiten der *Ursachen* und *Auslöser*, sowie den Versagenswahrscheinlichkeiten der *Sicherheitsbarrieren*.

Zur Auswahl der geeigneten Eintritts- /Versagenswahrscheinlichkeiten der Elemente des *Kausalitätsmodells* werden in diesem Kapitel die Konzepte der Wahrscheinlichkeitstheorie (Wahrscheinlichkeitsrechnung) erläutert.

Es ist zu beachten, dass der Begriff *Häufigkeit* im Sinne der Wahrscheinlichkeitstheorie angewendet wird (siehe Begriffsdefinition). Die Gültigkeit dieser Verwendung wird auch anhand der Definition des Begriffes *Gefährdungsrate* (*Tolerable Hazard Rate* (*THR*)) bekräftigt, da sie einen expliziten Bezug zur *Ausfallrate* herstellt und die *Ausfallrate* über die Wahrscheinlichkeitstheorie definiert ist.

Der Begriff „Wahrscheinlichkeit“ wird immer dann verwendet, wenn der Eintritt einer *Situation* nicht **exakt** bestimmt werden kann. Im Sinne der Wahrscheinlichkeitstheorie dient die Wahrscheinlichkeit somit der Quantifizierung des Zufalls.

Das eigene Überleben wird vom Individuum üblicherweise nicht in Frage gestellt und somit *Situationen* vermieden, die zum Gesundheitsschaden führen. Der Eintritt eines *Unfalls* bzw. einer *Gefährdung* wird folglich nicht bewusst herbeigeführt und kann somit als zufällig eintretende *Situation* aufgefasst werden. Selbst beim bewussten Herbeiführen einer gefährlichen *Situation* besteht die feste Überzeugung, dass der Gesundheitsschaden nicht eintritt. Sollte er dennoch eintreten, so resultiert er aus dem Zusammenwirken weiterer, zufällig wirkender *Situationen*.

Die mathematische Beschreibung der Wahrscheinlichkeit basiert auf dem Konzept des *Zufallsexperimentes*, dessen Ausgang mittels *Zufallsvariable* und *Wahrscheinlichkeitsverteilung* quantifiziert wird.

Das *Zufallsexperiment* ist „ein Versuch mit zufälligem Ausgang“. Das *Risiko* im Bahnsystem kann im mathematischen Sinn als *Zufallsexperiment* aufgefasst werden, welchem das Individuum im Expositionszeitraum bei Benutzung bzw. Interaktion mit dem Bahnsystem ausgesetzt ist. Der „zufällige Ausgang“ des *Zufallsexperimentes* entspricht dem Eintreten des *Unfalls* bzw. der *Gefährdung*.

Der Ausgang eines *Zufallsexperimentes* wird als *Ergebnis* ω bezeichnet und folglich wird die Menge **aller** möglichen *Ergebnisse* als *Ergebnisraum* Ω bezeichnet. Ein *Ereignis* hingegen tritt ein, wenn ein *Ergebnis* ω Bestandteil einer vorgegebenen Teilmenge möglicher *Ergebnisse* ist. *Ereignisse* werden mit Großbuchstaben A, B, C , usw. bezeichnet.

Die *Zufallsvariable* Z ist als Funktion definiert, die jedem *Ergebnis* ω_i des *Ergebnisraumes* Ω genau eine Zahl z_i aus der Menge der reellen Zahlen \mathbb{R} zuordnet. In der Wahrscheinlichkeitstheorie wird zwischen diskreten⁷³ und stetigen⁷⁴ *Zufallsvariablen* unterschieden.

Eine diskrete *Zufallsvariable* liegt vor, wenn das Resultat (Ausgang) eines *Zufallsexperimentes* durch eine abzählbare Größe charakterisiert wird. Als Beispiele sind die Augenzahl beim Werfen eines Würfels, die Anzahl defekter Artikel in einer Stichprobe oder auch der Gewinn bei einem Glücksspiel zu nennen.

Eine stetige *Zufallsvariable* liegt vor, wenn das Resultat (Ausgang) eines *Zufallsexperimentes* durch eine nichtabzählbare Größe charakterisiert wird. Als Beispiele sind das Gewicht einer zufällig ausgewählten Person, die Geschwindigkeit eines an einer Radarkontrolle vorbeifahrenden Autos oder die Lebensdauer eines Bauteils zu nennen.

Das *Risiko* im Bahnsystem kann anhand einer diskreten oder einer stetigen *Zufallsvariable* beschrieben werden. Der Typ der *Zufallsvariable* wird jedoch von der Fragestellung bestimmt, die mittels Wahrscheinlichkeitsaussage zu beantworten ist.

Beispielsweise kann das Eintreten eines *Unfalls* bzw. einer *Gefährdung* für einen vorgegebenen Fahrzeugtyp gezählt werden (vergleichbar der Anzahl defekter Artikel in einer Stichprobe). Die zugeordnete Fragestellung nach der Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte **Anzahl** von *Gefährdungen* bzw. *Unfällen* für den Fahrzeugtyp auftreten, ist anhand einer **diskreten** *Zufallsvariable* zu beantworten.

Üblicherweise wird jedoch das Eintreten eines *Unfalls* bzw. einer *Gefährdung* in einem vorgegebenen Zeitraum betrachtet. Die zugeordnete Fragestellung nach der Wahrscheinlichkeit, dass ein *Unfall* bzw. eine *Gefährdung* in einem bestimmten **Zeitraum** auftritt, ist anhand einer **stetigen** *Zufallsvariable* zu beantworten.

Die Auswahl der geeigneten Eintrittswahrscheinlichkeiten der Elemente des *Kausalitätsmodells* wird im Weiteren anhand **stetiger** *Zufallsvariablen* erläutert (sie kann analog auf diskrete *Zufallsvariablen* angewendet werden).

Die Verteilung der Eintrittswahrscheinlichkeiten auf die möglichen Werte einer *Zufallsvariablen* wird mittels *Wahrscheinlichkeitsverteilung* ausgedrückt. Die *Wahrscheinlichkeitsverteilung* einer stetigen *Zufallsvariable* lässt sich vollständig durch die Dichtefunktion⁷⁵ oder durch die Verteilungsfunktion⁷⁶ darstellen.

Die *Dichtefunktion* $f(z)$ dient der Visualisierung der Verteilung der Werte der *Zufallsvariablen*. Aus ihr sind die Bereiche ablesbar, in denen sie sich am dichtesten konzentrieren.

Die *Dichtefunktion* $f(z)$ hat die folgenden Eigenschaften:

- Sie kann nur positive Werte annehmen: $f(z) \geq 0$ für alle $z \in \mathbb{R}$.
- Die Fläche unter der Dichtefunktion hat den Inhalt 1: $\int_{-\infty}^{\infty} f(z)dz = 1$.
- Aus der Dichtefunktion selbst lassen sich keine Wahrscheinlichkeiten ablesen.

Die Verteilungsfunktion $F(z)$ dient der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeiten. Sie ist eine Funktion, die jedem z einer *Zufallsvariablen* Z genau eine Wahrscheinlichkeit $P(Z \leq z)$ zuordnet⁷⁷. Sie wird durch Integration der Dichtefunktion ermittelt (ist folglich ein Ausdruck des Flächeninhaltes unter der Dichtefunktion⁷⁸):

$$F(z) = P(Z \leq z) = \int_{-\infty}^z f(u)du$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine stetige *Zufallsvariable* Z einen bestimmten Wert z annimmt, ist stets Null:

$$P(Z = z) = 0$$

Mathematisch lässt sich diese Eigenschaft erklären, da die Fläche über einem Punkt z gleich Null ist:

$$P(Z = z) = \int_z^z f(u)du = F(z) - F(z) = 0$$

Die Mathematische Erklärung kann anhand praktischer Erfahrungen bestätigt werden. Als Beispiel dient der Bruch einer Fahrzeugachse (mit der Länge 1). „Die Menge der möglichen Bruchstellen kann beschrieben werden durch $[0, 1]$. Dass die Achse exakt an einer festen Stelle $z \in [0, 1]$ bricht, z.B. $z = 0.233517\dots$, ist extrem unwahrscheinlich (d.h. dies hat Wahrscheinlichkeit 0). Die Angabe der Einzelwahrscheinlichkeiten ist daher zur Beschreibung der Bruchstelle ungeeignet. Sinnvoll dagegen ist z.B. die Betrachtung der Wahrscheinlichkeit für einen Bruch in $[0, \frac{1}{2}]$. Aus Symmetriegründen würde man hierfür annehmen, dass diese Wahrscheinlichkeit $\frac{1}{2}$ ist.“ [27]

Aus dieser Eigenschaft folgt, dass eine Wahrscheinlichkeit nicht für einen festen Punkt, sondern nur für ein vorgegebenes Intervall angegeben wird:

$$P(Z \leq a) = P(Z < a) = F(a)$$

$$P(a \leq Z \leq b) = P(a < Z < b) = P(a \leq Z < b) = P(a < Z \leq b) = F(b) - F(a)$$

$$P(Z > a) = P(Z \geq a) = 1 - P(Z < a) = 1 - P(Z \leq a) = 1 - F(a)$$

Bezogen auf das genannte Beispiel würde der Bruch der Fahrzeugachse im Bereich von $z = 0$ bis $z = 0,5$ mit einer Wahrscheinlichkeit $P(Z \leq 0,5) = 0,5$ zu erwarten sein.

Zur Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeiten der Elemente des *Kausalitätsmodells* ist eine *Wahrscheinlichkeitsverteilung* auszuwählen, die das zufällige Verhalten des jeweiligen Elementes am besten beschreibt. Für technische *Sicherheitsbarrieren* sind typischerweise die Verteilungen der Ausfallwahrscheinlichkeiten zu verwenden, während für menschliche *Sicherheitsbarrieren* die Verteilungen der Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten zu verwenden sind.

In der Wahrscheinlichkeitstheorie sind eine Vielzahl unterschiedlicher *Wahrscheinlichkeitsverteilungen* definiert. Im besten Fall kann die *Wahrscheinlichkeitsverteilung* aus Beobachtungen abgeleitet werden (zum Beispiel aus Ausfallstatistiken).

Sollten keine Informationen vorliegen, kann die *Wahrscheinlichkeitsverteilung* anhand theoretischer Überlegungen abgeleitet werden. Es ist insbesondere zu überlegen, ob das zufällige Verhalten von unterlagerten Prozessen abhängig ist, die mittels geeigneter *Wahrscheinlichkeitsverteilungen* abgebildet werden können (zum Beispiel der Verschleiß von Komponenten, der mit fortschreitender Gebrauchsdauer bzw. hoher Gebrauchsintensität zur Erhöhung der Ausfallwahrscheinlichkeit führt).

Kann jedoch keine Aussage über das zufällige Verhalten abgeleitet werden, dann stellt der „reine Zufall“ eine sinnvolle Annahme dar. Als „rein zufällig“ wird das Verhalten der Elemente des *Kausalitätsmodells* bezeichnet, wenn es unabhängig von weiteren, unterlagerten Prozessen ist⁷⁹. Als geeignete *Wahrscheinlichkeitsverteilungen* können dann die stetige Gleichverteilung (Rechteckverteilung) und die Exponentialverteilung verwendet werden.

Es ist zu überlegen, ob beide *Wahrscheinlichkeitsverteilungen* gleichwertig verwendet werden dürfen. Eine Antwort kann im Fachgebiet der *Ereignisanalyse* gefunden werden.

Mittels *Ereignisanalyse* werden Vorgänge betrachtet, die durch zufällige **Wartezeiten** bis zum Eintreten eines Zustandswechsels gekennzeichnet sind. Die Wartezeit kann ausgehend von einem Ausgangszustand bis zum Eintreten **eines unveränderlichen** Zielzustandes definiert sein. Dieses Szenario wird zum Beispiel bei der „Untersuchung von Lebensbeziehungsweise Überlebenszeiten“ [24, Abschnitt 3.1] betrachtet. Es können aber auch Szenarien betrachtet werden, die durch **mehrere, aufeinanderfolgende** Zustandswechsel gekennzeichnet sind. Beispiele hierfür sind der störungsfreie Betrieb eines reparierbaren technischen Systems oder auch die Analyse der Arbeitslosigkeit, die im Arbeitsleben mehrfach auftreten kann. Folglich werden Vorgänge betrachtet, die durch diskrete (abzählbare) Zustandswechsel gekennzeichnet sind, deren Eintrittszeitpunkte jedoch von der zufallsverteilten (stetigen) Zeit $z = t$ bestimmt werden.

Die Besonderheit der Vorgänge, die durch Wartezeiten gekennzeichnet sind, besteht in „der bedingten Wahrscheinlichkeit, dass das *Ereignis* im Intervall $[t, t + \Delta t)$ eintritt unter der Bedingung, dass es bis zum Zeitpunkt t noch nicht eingetreten ist“ [31, Abschnitt 1.2.1]. Diese Besonderheit wird durch die „Hazardfunktion“ ($\lambda(t)$ „... auch Hazardrate oder Conditional Failure Rate genannt“) [31, Abschnitt 1.2.1 bzw. 1.1] beschrieben, die in der Zuverlässigkeitstheorie als *Ausfallrate* bezeichnet wird. „Andere Bezeichnungen für die Hazardrate sind *Intensitäts-* oder *Risikofunktion*, *Übergangsrate* oder *Mortalitätsrate*. ... Man beachte, dass die Werte der Hazardrate selbst keine (bedingten) Wahrscheinlichkeiten sind. Sie sind zwar stets nicht-negativ, können aber größer als Eins sein“ [24, Abschnitt 3.2.1]:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{F'(t)}{1 - F(t)}, F'(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$

In [31, Abschnitt 1.2.2] wird gezeigt, dass die stetige Gleichverteilung ebenso zur Beschreibung des „reinen Zufalls“ verwendet werden kann, wie die Exponentialfunktion. Die Auswahl muss unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften der jeweiligen *Wahrscheinlichkeitsverteilung* erfolgen.

Die Dichtefunktion, Verteilungsfunktion und Hazardfunktion beider *Wahrscheinlichkeitsverteilungen* lauten ($E(\tau)$ ist der Erwartungswert der zeitabhängigen *Zufallsvariable*):

	stetige Gleichverteilung	Exponentialverteilung
Dichtefunktion:	$f(t) = \frac{1}{T} \quad t \in (0, T)$	$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$
Verteilungsfunktion:	$F(t) = \begin{cases} \frac{t}{T} & t \in (0, T) \\ 0, & t \notin (0, T) \end{cases}$	$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (17)$
Überlebensfunktion: ⁸⁰	$S(t) = 1 - F(t)$	$S(t) = 1 - F(t) \quad (18)$
Hazardfunktion:	$\lambda(t) = \frac{1}{T-t} \quad t \in (0, T)$	$\lambda = \frac{1}{E(\tau)} \quad (19)$

In Abbildung 3 ist der typische Verlauf der genannten Funktionen beider *Wahrscheinlichkeitsverteilungen* dargestellt. Aus dem Verlauf der Dichtefunktion, sowie der Verteilungsfunktion ist erkennbar, dass die Wahrscheinlichkeit in einem festgelegten Intervall (zum Beispiel $\Delta t = 1$)

- bei der stetigen Gleichverteilung konstant (somit unabhängig vom Beobachtungszeitpunkt t) ist,
- bei der Exponentialverteilung zu Beginn des Beobachtungszeitraumes ($t \rightarrow 0$) größer, als zu einem späteren Zeitpunkt ($t \rightarrow \infty$) ist.

Aus dem Verlauf der Hazardfunktion ist erkennbar, dass die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten des *Ereignisses*, unter der Bedingung, dass es bisher noch nicht eingetreten ist,

- bei der stetigen Gleichverteilung mit der Annäherung des Beobachtungszeitpunktes an die obere Grenze t immer stärker ansteigt ($t \rightarrow T$)⁸¹,
- bei der Exponentialverteilung konstant (somit unabhängig vom Beobachtungszeitpunkt) ist.

Zur Auswahl der geeigneten *Wahrscheinlichkeitsverteilung* für die Annahme des „reinen Zufalls“ empfiehlt [31, Abschnitt 1.2.2]: „Die Gleichverteilung charakterisiert den Begriff gut, wenn ein endliches Intervall als Zeitraum, in dem das in Frage stehende *Ereignis A* eintreten kann, angenommen wird, und wenn man vor Beginn dieses Intervalls Aussagen über das Eintreten von *A* machen will.“. Folglich sollte die Exponentialfunktion verwendet werden, wenn ein unendliches Beobachtungsintervall angenommen wird und der Beobachtungszeitpunkt t , innerhalb des Beobachtungsintervalls liegt.

Das *Risiko* im Bahnsystem kann im Sinne der *Ereignisanalyse* als zufällige Wartezeit bis zum Eintreten eines *Unfalls* bzw. einer *Gefährdung* aufgefasst werden. Neben der *Verteilungsfunktion* $F(t)$ kann auch die Hazardfunktion (Hazardrate) $\lambda(t)$ zur Beschreibung dieser Wartezeit verwendet werden⁸².

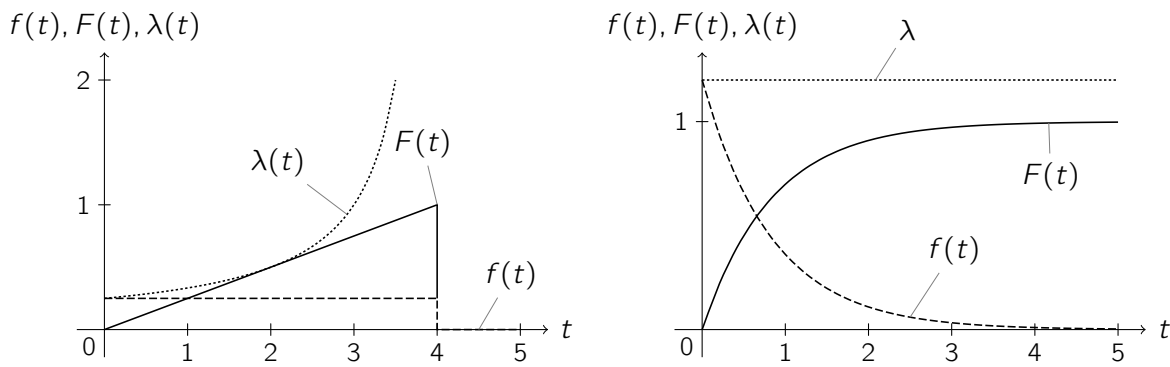


Abbildung 3: Links: stetige Gleichverteilung ($T = 4$)
Rechts: Exponentialverteilung ($\lambda = 1, 2$)

Zur Beschreibung des reinen Zufalls im *Kausalitätsmodell* ist die Exponentialfunktion zu verwenden, da ein unendliches Beobachtungsintervall angenommen wird, der Beobachtungszeitpunkt t innerhalb des Beobachtungsintervalls liegt und die Hazardfunktion konstant ist. Der steile Anstieg der *Verteilungsfunktion* $F(t)$ der Exponentialverteilung nähert sich mit $\lambda \leq 10^{-2}$ immer stärker einer ansteigenden Geraden und somit dem typischen Verlauf der stetigen Gleichverteilung an.

4 Erläuterung des Kausalitätsmodells anhand des Einklemmens an der Fahrgastraumtür

In diesem Kapitel wird das *Kausalitätsmodell* an drei Beispielen für typische Einklemmszenarien in der Fahrgastraumtür erläutert.

Der Expositionszeitraum der *Gefährdung* erstreckt sich vom Abschluß des Fahrgastwechsels bis zur Abfahrbereitschaft. Der Expositionszeitraum des *Unfalls* erstreckt sich von der Abfahrbereitschaft bis zur Fahrt.

Vom Einklemmen ist eine Person betroffen. Der risikoerzeugenden *Situation* wird die *Schwere* „kritisch“ zugeordnet, da der Todesfall als relevanter Gesundheitsschaden beim Eintreten des *Unfalls* nicht vermeidbar ist. Als Eintrittswahrscheinlichkeit des Gesundheitsschadens wird $V_H = V_A = 1$ angenommen (Kapitel 3.5.7).

Die Bewertung und Akzeptanz des *individuellen Risikos* erfolgt anhand der in Kapitel 3.5.8 vorgeschlagenen Risikomatrix für ein Betrachtungsintervall von $10^4 h$. Die Anwendbarkeit ist gegeben, da nur eine Person betroffen ist.

Als Verteilungsfunktion wird die Exponentialverteilung (Kapitel 3.5.9) verwendet.

Beim Modellieren ist zu beachten:

- Es wird das *individuelle Risiko* bewertet. Das bedeutet, jedes Individuum wird demselben Risiko ausgesetzt. Somit ist das *Risiko* von der Anzahl der **gleichzeitig** betroffenen Personen unabhängig. Daher jedoch *MEM* angewendet wird, ist bei mehr als

100 gleichzeitig betroffenen Personen der Aversionsfaktor für die Risikokategorie „katastrophal“ zu berücksichtigen, um die Risikoakzeptanzkategorie „vernachlässigbar“ zu erreichen (Kapitel 3.5.8).

- Die Elemente *Ursachen*, *Auslöser* und *Sicherheitsbarriere* repräsentieren
 - äußere Einflüsse denen das Schienenfahrzeug ausgesetzt ist (z.B. reduzierter Kraftschluss zwischen Rad und Schiene),
 - inhärente Eigenschaften des Schienenfahrzeugs (z.B. spannungsführende Komponenten) und inhärente Eigenschaften des Bahnsystems (z.B. fahrende Schienenfahrzeuge),
 - Technikausfälle (z.B. Versagen des Bremssystems) und
 - unbewußte Fehlhandlungen des Personals (z.B. Mißachtung eines Signals, Instandhaltungsfehler).

4.1 Funktionale Eigenschaften des betrachteten Fahrzeugs

In diesem Kapitel werden funktionale Eigenschaften beschrieben, über die ein fiktives Schienenfahrzeug verfügen soll. Anhand dieses Fahrzeugs werden die *Kausalitätsmodelle* der Einklemmszenarien erstellt.

Das Fahrzeug verfügt über Fahrgastraumtüren, die vom Fahrer mittels expliziter Schalthandlung für den Fahrgastwechsel freigegeben werden. Der Fahrzeugstillstand wird vom Fahrzeug automatisch erkannt. Freigegebene Türen können nur im Stillstand geöffnet werden.

Geöffnete Türen werden mittels B_7 „Grünschleife“ (aktiv) erkannt und dem Fahrer mittels B_8 „Anzeige GS“ (nicht aktiv) angezeigt. Bei vollständig geschlossenen Türen werden eingeklemmte Personen mittels B_7 „Mitschleiferkennung“ (aktiv) erkannt und dem Fahrer mittels B_8 „Anzeige ME“ (aktiv) angezeigt. Ein kurzzeitiger Impuls aktiviert die Mitschleiferkennung, welche vom Fahrer mittels expliziter Schalthandlung (Quittierung) zurückgesetzt werden muss.

Im Stillstand wird eine Anfahrt mittels B_4 „Anfahrsperrung“ (aktiv) verhindert. Sie wird bei geöffneten Türen und bei aktivierter Mitschleiferkennung aktiviert. Bei aktivierter Mitschleiferkennung während der Fahrt, wird das Fahrzeug mittels B_{11} „Bremsung in den Stillstand“ (aktiv) bis in den Stillstand abgebremst und danach die Anfahrt mittels B_4 „Anfahrsperrung“ (aktiv) verhindert. Die Fahrzeughöchstgeschwindigkeit überschreitet deutlich die Geschwindigkeit einer gehenden Person.

Zur Räumung der Strecke im Störfall ist die Grünschleife mittels T_1 „Manuelle Überbrückung der Grünschleife“ (aktiv) überbrückbar. Die aktivierte Überbrückung wird dem Fahrer mittels B_8 „Anzeige GS“ (aktiv) angezeigt.

Mit Beendigung des Fahrgastwechsels schließt der Fahrer die Fahrgastraumtüren. Mittels Kontrolle der Grünschleife B_8 „Anzeige GS“ (aktiv), mittels Blick in den Rückspiegel B_2 „Sichtbar im Rückspiegel“ und mittels Kontrolle der Mitschleiferkennung B_8 „Anzeige ME“ (nicht aktiv) überprüft er, dass die Türen geschlossen und keine Personen eingeklemmt sind. Sollten die Türen nicht geschlossen sein bzw. eine eingeklemmte Person im Rückspiegel oder mittels Mitschleiferkennung erkannt werden, dann befreit der Fahrer die eingeklemmte Person (B_3 „Wird vom Fahrer erkannt und befreit“), schließt die Türen und quittiert die aktive Mitschleiferkennung.

Der Fahrer führt die genannten Tätigkeiten vor der Abfahrt durch. Fehlhandlungen werden nicht bewußt durchgeführt.

Schienenfahrzeuge verfügen häufig über weitere funktionale Eigenschaften. Der Einklemmschutz (Reversieren der Türen beim Einklemmen von Körpern), die Weg-/Zeitbegrenzung der Grünschleife bzw. Mitschleiferkennung, die Türnotenriegelung, die Ausgruppierereinrichtung der Fahrgastraumtüren, die Lichtschanke bzw. das Lichtgitter, die Fahrgastnotbremse, die Notsprechstellen, die Überbrückung der Anfahrsperre oder die Überbrückung des Stillstandssignals sind jedoch keine Bestandteile des fiktiven Schienenfahrzeugs, um die Komplexität der *Kausalitätsmodelle* zu begrenzen.

Das Fahrzeug wird unter den folgenden Einsatz- bzw. Umgebungsbedingungen betrieben:

Normalbetrieb Fahrt mit Fahrgästen im öffentlichen Streckennetz, bei der Überbrückungsfunktionen nicht manuell aktiviert wurden.

Notfahrt Fahrt mit Fahrgästen im öffentlichen Streckennetz, bei der Überbrückungsfunktionen manuell aktiviert wurden.

Räumfahrt Fahrt ohne Fahrgäste im öffentlichen Streckennetz, bei der Überbrückungsfunktionen manuell aktiviert sind.

Depotfahrt Fahrt mit geschultem Personal im Betriebshof, bei der Überbrückungsfunktionen manuell aktiviert sind, bzw. Fahrzeugfunktionen manuell deaktiviert sind.

4.2 Erkennen des Einklemmens mittels Grünschleife

In diesem Kapitel wird ein Szenario erläutert, bei dem eine eingeklemmte Person mittels Grünschleife erkannt wird.

4.2.1 Das Modell

In Abbildung 4 ist ein *Kausalitätsmodell* der Vermeidung einer schwerverletzten Person dargestellt, die während des Normalbetriebes zwischen den Türflügeln einer Fahrgastraumtür eingeklemmt wurde und mitgeschleift werden könnte (*Unfall A₂*).

Die *Gefährdung* des Mitschleifens ist beispielweise dann gegeben, wenn eine Person das Fahrzeug während des Schließvorganges der Fahrgastraumtüren verlässt und am Arm, Bein oder Gepäckstück eingeklemmt wird. Infolge Größe und Steifigkeit des eingeklemmten Körpers wird ein vollständiges Schließen der Tür verhindert (*Ursache U*).

Mit Abschluß des Fahrgastwechsels wird die Fahrt üblicherweise angetreten bzw. fortgesetzt (*Auslöser T₁*). Der *Unfall* tritt jedoch nicht ein, da das Fahrzeug noch nicht angefahren ist.

Beide *Situationen* bilden den Abschnitt C_H „Risikoerzeugung“, dessen *Risiko* anhand der folgenden *Sicherheitsbarrieren* gemindert wird.

Der erste *Minimalpfad* berücksichtigt den Versuch der „Selbstbefreiung“, welcher von der eingeklemmten Person instinktiv unternommen wird und somit als *Sicherheitsbarriere B₁* wirkt.

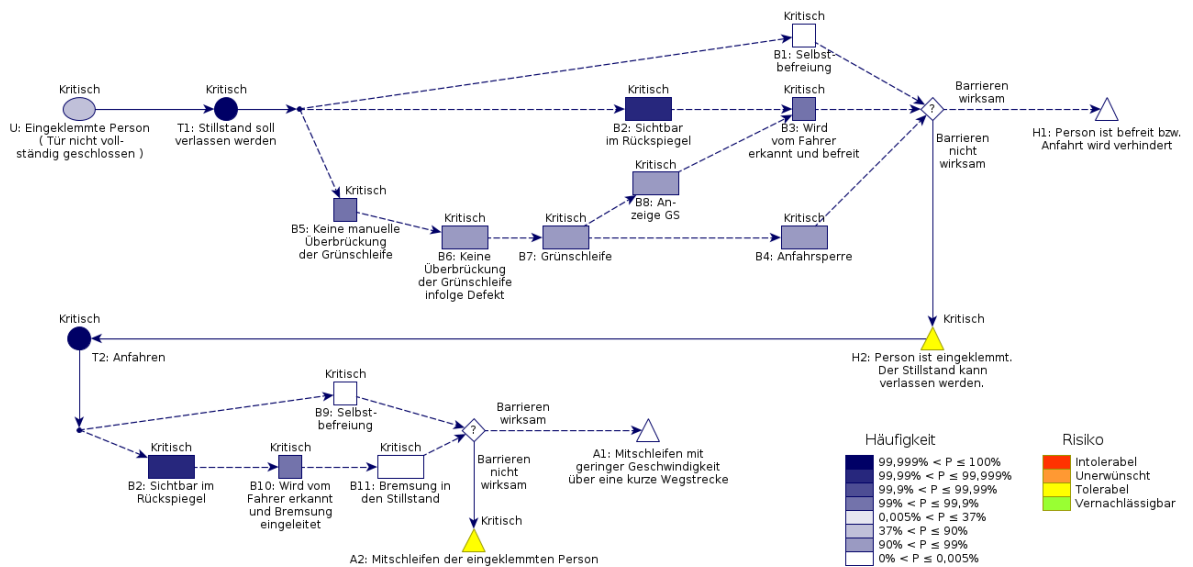


Abbildung 4: Einklemmen an der nicht vollständig geschlossenen Fahrgastraumtür.

Der Erfolg wird von der Einklemmposition und der Muskelkraft der eingeklemmten Person bestimmt. Möglicherweise helfen andere Fahrgäste bei der Befreiung. Im Erfolgsfall wird die Person befreit.

Der zweite *Minimalpfad* berücksichtigt die *Sicherheitsbarrieren* B_2 und B_3 , bei denen der Fahrer eine eingeklemmte Person im Rückspiegel erkennt und befreit.

Der Erfolg dieses *Minimalpfades* wird von der Sichtbarkeit der eingeklemmten Person (Personenanzahl auf dem Bahnsteig, Gleisführung im Bahnsteigbereich) und der Aufmerksamkeit des Fahrers bestimmt. Im Erfolgsfall wird die Person befreit.

Der dritte *Minimalpfad* berücksichtigt die *Sicherheitsbarrieren* B_5 , B_6 und B_7 , bei denen der Fahrer eine eingeklemmte Person mittels der *Sicherheitsbarrieren* B_8 und B_3 erkennt und befreit.

Der Erfolg dieses *Minimalpfades* wird vom Ausfallverhalten der Komponenten der Grünschleife, vom Ausfallverhalten der Komponenten der Anzeige der Grünschleife und von der Aufmerksamkeit des Fahrers bestimmt.

Zusätzlich darf die Grünschleife nicht überbrückt sein. Folglich wirken die *Sicherheitsbarrieren* B_5 und B_6 , deren Erfolg von der Disziplin des Fahrers (im Normalbetrieb sind Überbrückungen nicht aktiv) und vom Ausfallverhalten der Komponenten der Überbrückung der Grünschleife bestimmt wird. Im Erfolgsfall wird die Person befreit.

Der vierte *Minimalpfad* berücksichtigt ebenfalls die *Sicherheitsbarrieren* B_5 , B_6 und B_7 , bei dem die Anfahrt mittels *Sicherheitsbarriere* B_4 verhindert wird.

Der Erfolg dieses *Minimalpfades* wird vom Ausfallverhalten der Komponenten der Grünschleife (einschließlich Überbrückung), von der Disziplin des Fahrers und vom Ausfallverhalten der Komponenten der Anfahrsperrung bestimmt. Im Erfolgsfall wird die Person zwar nicht befreit, das Fahrzeug wird jedoch im Stillstand gehalten.

Eine Anfahrsperrung (*Sicherheitsbarriere* B_4) wird von unterschiedlichen Fahrzeugfunktionen

ausgelöst. Ein Rückschluß des Fahrers auf eine eingeklemmte Person infolge einer aktiven Anfahrsperre ist nicht auszuschließen, was aber in diesem Modell nicht als wirksame *Sicherheitsbarriere* berücksichtigt wird.

Die genannten *Minimalpfade* bilden den Abschnitt B_H „Risikominderung“, der bei wirksamen *Sicherheitsbarrieren* zur vermiedenen *Gefährdung* H_1 und bei unwirksamen *Sicherheitsbarrieren* zur *Gefährdung* H_2 mit dem resultierenden *Risiko* führt.

Der *Unfall* des Mitschleifens kann eintreten, wenn die *Gefährdung* H_2 des Mitschleifens vorhanden ist und der Stillstand verlassen wird (*Auslöser* T_2).

Beide *Situationen* bilden den Abschnitt C_A „Risikoerzeugung“, dessen *Risiko* anhand der folgenden *Sicherheitsbarrieren* gemindert wird.

Der fünfte *Minimalpfad* berücksichtigt den Versuch der „Selbstbefreiung“, welcher von der eingeklemmten Person instinktiv unternommen wird und somit als *Sicherheitsbarriere* B_9 wirkt.

Der Erfolg wird von denselben Faktoren bestimmt, die auch beim ersten *Minimalpfad* beschrieben wurden. Ein erfolgreicher Abschluß der (bisher erfolglosen) Selbstbefreiung kann aus der Nutzung von Kraftreserven resultieren, die im Moment der Todesangst aktiviert werden. Im Erfolgsfall konnte die Person nach einer kurzen Wegstrecke, bei einer geringen Geschwindigkeit (Schrittgeschwindigkeit) befreit werden.

Der sechste *Minimalpfad* berücksichtigt die *Sicherheitsbarrieren* B_2 , B_{10} und B_{11} , bei der der Fahrer eine eingeklemmte Person beim Anfahren erkennt und eine Bremsung einleitet. Der Erfolg wird von denselben Faktoren bestimmt, die auch beim zweiten *Minimalpfad* beschrieben wurden. Die bisher nicht erkannte eingeklemmte Person kann nun infolge der veränderten Perspektive beim Anfahren oder auch der geänderten Anzahl bzw. Position der Personen auf dem Bahnsteig erkannt werden.

Der Erfolg wird zusätzlich vom Ausfallverhalten der Komponenten der Bremsfunktion bestimmt. Im Vergleich zum fünften *Minimalpfad*, konnte die Person im Erfolgsfall nach einer längeren Wegstrecke, bei einer höheren Geschwindigkeit befreit werden. Wegstrecke und Geschwindigkeit werden von der Reaktionsgeschwindigkeit des Fahrers bestimmt.

Die genannten *Minimalpfade* bilden den Abschnitt B_A „Risikominderung“, der bei wirksamen *Sicherheitsbarrieren* zum vermiedenen *Unfall* A_1 und bei unwirksamen *Sicherheitsbarrieren* zum *Unfall* A_2 mit dem resultierenden *Risiko* führt.

Die „Grünschleife“ ist üblicherweise nicht redundant ausgeführt. Das Anfahren mit geöffneter Tür muss folglich durch den Ausfall der „Grünschleife“ oder eine wirksame Überbrückung verursacht werden. Das Aktivieren einer Bremsung infolge wirksamer „Grünschleife“ kann somit nach dem Anfahren nicht als *Sicherheitsbarriere* wirken.

statistische Unabhängigkeit der Elemente (disjunkte Elemente)

Die Eintrittswahrscheinlichkeiten der *Auslöser* T_1 , T_2 werden ausschließlich vom Verhalten des Fahrer beeinflusst. Es besteht kein funktionaler Zusammenhang zu den *Sicherheitsbarrieren* B_2 , B_6 , B_7 , B_8 , B_4 , B_{11} , dessen Ausfall zum Anfahren des Fahrzeugs führen könnte. Auch die Eintrittswahrscheinlichkeit der *Ursache* U , die Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten

der *Sicherheitsbarrieren* B_3, B_{10}, B_5 und die Ausfallwahrscheinlichkeiten (Erfolglosigkeit) der *Sicherheitsbarrieren* B_1, B_9 führen nicht zum Anfahren des Fahrzeugs.

Analog beeinflussen die Eintrittswahrscheinlichkeiten der *Auslöser* T_1, T_2 nicht das Ausfallverhalten der *Sicherheitsbarrieren* $B_2, B_6, B_7, B_8, B_4, B_{11}$, die Eintrittswahrscheinlichkeit der *Ursache* U , die Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten der *Sicherheitsbarrieren* B_3, B_{10}, B_5 und die Ausfallwahrscheinlichkeiten (Erfolglosigkeit) der *Sicherheitsbarrieren* B_1, B_9 . Der Einfluss des Anfahrens auf die Wirksamkeit der *Sicherheitsbarrieren* B_9 Selbstbefreiung infolge der sich verschlechternden Standfestigkeit, ist in der Ausfallwahrscheinlichkeit der genannten *Sicherheitsbarrieren* berücksichtigt.

Die technischen Systeme des Fahrzeugs sind beanspruchungsgemäß dimensioniert. Das Einklemmen einer Person zwischen den Türflügeln, die Selbstbefreiung, die Benutzung des Rückspiegels, das Öffnen der Fahrgastraumtüren, das Einleiten einer Bremsung, die Betätigung der manuellen Überbrückung der Grünschleife und das Verlassen des Stillstandes führt nicht zur Überlast der genannten technischen Systeme, die im *Kausalitätsmodell* als *Auslöser* bzw. *Sicherheitsbarrieren* wirken.

Die Ausfallwahrscheinlichkeiten der *Sicherheitsbarrieren* $B_2, B_6, B_7, B_8, B_4, B_{11}$ werden folglich nicht von der Eintrittswahrscheinlichkeit der *Ursache* U , den Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten *Sicherheitsbarrieren* B_3, B_{10}, B_5 und den Ausfallwahrscheinlichkeiten (Erfolglosigkeit) der *Sicherheitsbarrieren* B_1, B_9 beeinflusst.

Durch Überlegung ist weiterhin erkennbar, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit der *Ursache* U , die Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten der *Sicherheitsbarrieren* B_3, B_{10}, B_5 und die Ausfallwahrscheinlichkeiten (Erfolglosigkeit) der *Sicherheitsbarrieren* B_1, B_9 nicht von den Ausfallwahrscheinlichkeiten der *Sicherheitsbarrieren* $B_2, B_6, B_7, B_8, B_4, B_{11}$ beeinflusst werden.

Weiterhin beeinflussen sich die Ausfallwahrscheinlichkeiten der *Sicherheitsbarrieren* $B_6, B_7, B_8, B_4, B_{11}$ nicht gegenseitig, da die Fehlerzustände „Aktiviert“ / „Deaktiviert“ den geplanten Funktionszuständen der *Sicherheitsbarrieren* entspricht. Die *Sicherheitsbarriere* B_2 ist funktional unabhängig von den *Sicherheitsbarrieren* $B_6, B_7, B_8, B_4, B_{11}$.

Die *Ursache* U und *Sicherheitsbarrieren* B_3, B_{10}, B_5 basieren auf menschlichen Handlungen, die unabhängig voneinander ausgeführt werden. Die Eintrittswahrscheinlichkeit der *Ursache* U und Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten der *Sicherheitsbarrieren* B_3, B_{10}, B_5 beeinflussen sich folglich nicht gegenseitig.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Elemente des *Kausalitätsmodells* statistisch unabhängig (*disjunkt*) sind.

Kohärenz

Die Kohärenz des Modells wird anhand der in Kapitel 3.5.2 formulierten Kohärenzbedingungen für die Abschnitte C und B überprüft.

Die *Ursache* U und der *Auslöser* T_1 sind im Abschnitt C_H seriell angeordnet. Die *Gefährdung* H_2 und der *Auslöser* T_2 sind im Abschnitt C_A ebenfalls seriell angeordnet. Beide Abschnitte können zur *Gefährdung* H_2 bzw. *Unfall* A_2 führen, wenn U, T_1 bzw. H_2, T_2 wirksam sind. Sind U, T_1, H_2, T_2 hingegen nicht wirksam, können die *Gefährdung* H_2 bzw. der *Unfall* A_2 nicht eintreten.

Die *Sicherheitsbarrieren* sind im Abschnitt B_H vermascht und im Abschnitt B_A serienparallel angeordnet. Die *Gefährdung* H_2 bzw. der *Unfall* A_2 werden nicht verhindert, wenn alle *Sicherheitsbarrieren* unwirksam sind. Sind alle *Sicherheitsbarrieren* wirksam, werden *Gefährdung* H_2 und *Unfall* A_2 verhindert.

4.2.2 Eintrittswahrscheinlichkeiten der Elemente

In diesem Kapitel werden Leistungs- und Wahrscheinlichkeitsparameter für die Elemente des *Kausalitätsmodells* quantifiziert. Weiterhin werden Annahmen über einzelne Aspekte des menschlichen Leistungsvermögens und daraus resultierender Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten getroffen. Diese Parameter orientieren sich an realen Werten, die allerdings für einen konkreten Anwendungsfall neu ermittelt werden müssen.

Die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Elemente beschreiben *Situationen*, die „rein zufällig“ auftreten. Zur Berechnung wird die *Verteilungsfunktion* $F(t)$ aus Gleichung 17 für den in Kapitel 4 genannten Betrachtungszeitraum verwendet. Weiterführende Informationen zur Wahrscheinlichkeitsrechnung sind Kapitel 3.5.9 entnehmbar.

Das Einklemmen U „Eingeklemmte Person (Tür nicht vollständig geschlossen)“ findet während des Schließvorganges der Fahrgastraumtür statt.

Die Tiefe des Türbereiches, einschließlich Spalt zwischen Fahrzeugfußboden und Bahnsteigkante kann von Jugendlichen und Erwachsenen mit einem bequem ausgeführten Schritt überwunden werden. Die Länge eines bequem ausgeführten Schrittes entspricht der Körpertiefe eines stehenden Erwachsenen.⁸³ Der Zeitbedarf eines Schrittes wird in [28] mit 0,6 s angegeben.⁸⁴

Die *Häufigkeit* wird anhand der Anzahl der im Jahr beförderten Fahrgäste und anhand des Zeitbedarfes für das Passieren des Türbereiches abgeleitet. Die Überlegung basiert auf dem Gedanken, dass alle beförderten Fahrgäste das Fahrzeug durch die Fahrgastraumtüren verlassen und der möglichen *Situation* des Einklemmens im Moment des Passierens der Fahrgastraumtüren ausgesetzt (exponiert) sind.

Es wird angenommen, dass $1,8 \cdot 10^8$ Fahrgäste im Jahr befördert und 3 Personen im genannten Zeitraum eingeklemmt werden. Unter Verwendung des Zeitbedarfes von 0,6 s für das Passieren der Fahrgastraumtür wird ein Erwartungswert

$$E(\tau) = \frac{1,8 \cdot 10^8}{3} \cdot \frac{0,6 \text{ s} \cdot h}{3600 \text{ s}} = 10000 \text{ h}$$

ermittelt, woraus eine Hazardrate λ (Gleichung 19), einschließlich zugeordneter Wahrscheinlichkeit $S_{C1}(t) = F(t)$

$$\lambda = \frac{1}{10000 \text{ h}} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ h}^{-1}$$

$$S_{C1}(t = 10^4 \text{ h}) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-1 \cdot 10^{-4} \text{ h}^{-1} \cdot 10^4 \text{ h}} = 0,632121 \equiv 63,2121 \%$$

resultiert.

Der Bahnbetrieb wird zum Zweck des Fahrgasttransportes durchgeführt. Folglich wird der Fahrgastwechsel mit dem Ziel abgeschlossen, den Stillstand zu verlassen und das Fahrzeug in Bewegung zu setzen. Den *Auslösern* T_1 „Stillstand soll verlassen werden“ und

T_2 „Anfahren“ wird somit die Eintrittswahrscheinlichkeit

$$S_{C2} = S_{C3} = 1 \equiv 100\%$$

zugeordnet.

Die Wirksamkeit der *Sicherheitsbarrieren* B_1 und B_9 „Selbstbefreiung“ wird von der Position des menschlichen Körpers beim Einklemmvorgang bestimmt.

Wird der Einstiegsbereich während des Schließvorganges der Türen passiert, reduziert sich der freie Durchgangsbereich bei Verwendung einer typischen Türöffnungsweite von 1300 mm und einer typischen Türschließzeit von ca. 4 s um $\frac{1300\text{mm}}{4\text{s}} \cdot 0,6\text{ s} = 195\text{ mm}$. Sollte der freie Durchgangsbereich bereits soweit reduziert sein, dass ein Passieren nur noch mit seitlich gedrehtem Oberkörper⁸⁵ möglich ist, dann beträgt der verbleibende Freiraum nach Durchschreiten des Türbereiches $285\text{ mm} - 195\text{ mm} = 90\text{ mm}$. Das nachgezogene Bein oder der nachschwingende Arm kann somit eingeklemmt werden. Eine Selbstbefreiung ist mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit durch Herausziehen des Beines bzw. Armes gegeben, weshalb dieser Fall nicht betrachtet wird.

Sollte der freie Durchgangsbereich soweit reduziert sein, dass ein Passieren auf Schulterbreite⁸⁶ möglich ist, dann kann ein auf dem Rücken getragener mittelgroßer Rucksack im Bereich des Tragesystems eingeklemmt werden. Eine Selbstbefreiung durch Verlängern der Träger mittels Verstellschnallen ist stark erschwert, da der entstehende Freiraum von den weiter schließenden Türen ausgefüllt und somit die Träger an den Körper gepresst werden. Für den Stillstand wird eine Versagenswahrscheinlichkeit der *Sicherheitsbarriere* B_1 von

$$F_{B1} = 0,9 \equiv 90\%$$

geschätzt werden. Sollte eine Selbstbefreiung bis in den Anfahrvorgang hinein nicht möglich sein, so soll eine Versagenswahrscheinlichkeit der *Sicherheitsbarriere* B_9 von

$$F_{B9} = 0,8 \equiv 80\%$$

geschätzt. Der geringere Wert wird mit der Mobilisierung zusätzlicher Kräfte im Moment der Todesangst begründet.

Die Wirksamkeit der *Sicherheitsbarrieren* B_6 „Keine Überbrückung der Grünschleife infolge Defekt“, B_7 „Grünschleife“, B_8 „Anzeige GS“, B_4 „Anfahrsperrung“ und B_{11} „Bremsung in den Stillstand“ wird anhand des sicherheitsrelevanten Anteils der *Ausfallrate* quantifiziert. Dieser Anteil wird am Beispiel der „Grünschleife“ erläutert.

Die „Grünschleife“ kann mittels entgegengesetzter Fehlermodi versagen. Einerseits kann sie infolge Leitungsbruch permanent unterbrochen sein, sodass auch geschlossene Türen nicht angezeigt werden. Dieser Fehlermodus ist nicht sicherheitsrelevant, da das Abfahren nicht möglich ist. Andererseits können permanent geschlossene Türen infolge fehlerhafter Spannungseinspeisung auch dann signalisieren werden, wenn die Türen geöffnet sind. Dieser Fehlermodus ist sicherheitsrelevant, da das Abfahren mit geöffneten Türen möglich ist. Der sicherheitsrelevante Anteil der *Ausfallrate* der *Sicherheitsbarrieren* wird mittels Hazar-

drate λ , einschließlich zugeordneter Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$

$$\lambda = 5 \cdot 10^{-7} h^{-1}$$

$$F(t = 10^4 h) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-5 \cdot 10^{-7} h^{-1} \cdot 10^4 h} = 0,004988 \equiv 0,4988 \%$$

$$F_{B_6}(t = 10^4 h) = F_{B_7}(t = 10^4 h) = \\ F_{B_8}(t = 10^4 h) = F_{B_4}(t = 10^4 h) = F_{B_{11}}(t = 10^4 h) = F(t = 10^4 h)$$

quantifiziert.

Die Wirksamkeit der *Sicherheitsbarriere* B_2 „Sichtbar im Rückspiegel“ resultiert aus der *Ausfallrate* des Spiegels.

Diese *Sicherheitsbarriere* ist jedoch nur dann wirksam, wenn sich der Fahrer bei unzureichender Sichtbarkeit der Fahrgastraumtüren mittels alternativer Maßnahmen (Heraustreten auf den Bahnsteig, Herauslehnen aus dem Fenster, Rückmeldung durch Bahnsteigpersonal, usw.) überzeugt, dass keine Personen eingeklemmt sind. Die Sichtbarkeit der Fahrgastraumtüren kann infolge eines defekten Spiegels, einer ungünstigen Gleisgeometrie, einer unzureichenden Bahnsteigbeleuchtung, ungünstiger Witterungsverhältnisse oder infolge einer sehr hohen Personenanzahl auf dem Bahnsteig eingeschränkt sein. Zur Vereinfachung des Modells wird jedoch keine Fehlhandlungswahrscheinlichkeit zugeordnet.

Die *Sicherheitsbarriere* B_2 basiert auf einer robusten Konstruktion, deren Ausfall unmittelbar erkannt wird. Die *Ausfallrate* wird folglich mittels Hazardrate λ , einschließlich zugeordneter Ausfallwahrscheinlichkeit $F_{B_2}(t)$

$$\lambda = 5 \cdot 10^{-9} h^{-1}$$

$$F_{B_2}(t = 10^4 h) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-5 \cdot 10^{-9} h^{-1} \cdot 10^4 h} = 0,000050 \equiv 0,0050 \%$$

quantifiziert.

Die Wirksamkeit der *Sicherheitsbarrieren* B_3 „Wird vom Fahrer erkannt und befreit“ und B_{10} „Wird vom Fahrer erkannt und Bremsung eingeleitet“ basiert auf der Fehlhandlungswahrscheinlichkeit bei der Beobachtung des Fahrgastwechsels.

In Straßen- und Stadtbahnssystemen ist der Haltestellenabstand sehr kurz. Somit wird die genannte Tätigkeit sehr häufig und routiniert durchgeführt. Die Komplexität ist gering, da der Fahrer eine einfache JA / NEIN - Entscheidung treffen muss (Person ist eingeklemmt / Person ist nicht eingeklemmt), wobei er bei unklaren *Situationen* von einer eingeklemmten Person ausgeht. Der Stress variiert zwischen gering (wenig Verkehr, überschaubare Fahrgastanzahl, Fahrplan wird eingehalten) und hoch (Berufsverkehr, sehr hohe Fahrgastanzahl, Fahrplan wird nicht eingehalten).

In [25], [1] und [32] werden Verfahren zur Ermittlung von Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten genannt, deren Anwendung jedoch mit einem signifikanten Analyseaufwand verbunden ist. In den genannten Dokumenten werden aber auch Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten quantifiziert, die auf einer groben Kategorisierung von Tätigkeiten basieren.

In [25, Seite 23] werden Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten für „Automatische Handlungen“, „Verfahrensbasierende Handlungen“ und „Wissensbasierende Handlungen“ genannt, die sich in einem Bereich von $F = 5 \cdot 10^{-5}$ für automatische Handlungen bis $F = 5 \cdot 10^{-1}$ für wissensbasierende Handlungen bewegen.

[32, Tabelle 6] gibt fünf Kategorien an, in denen Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten für „Einfache und häufig durchgeführte Aufgaben bei geringem Stress und genügend zur Verfügung stehender Zeit“ bis „Hochkomplexe oder sehr selten durchgeführte Aufgaben in ungewohnten Situationen ..., bei sehr hohem Stress oder geringer zur Verfügung stehender Zeit“ genannt werden, die sich in einem Bereich von $F = 10^{-3}$ für einfache Aufgaben bis $F = 1$ für hochkomplexe Aufgaben bewegen.

Die Fehlhandlungswahrscheinlichkeit der *Sicherheitsbarrieren* B_3 und B_{10} wird vom Stress des Fahrers beeinflusst. Somit wird sie im Bereich zwischen „Einfache und häufig durchgeführte Aufgaben bei geringem Stress und genügend zur Verfügung stehender Zeit“ ($F = 10^{-3}$) und „Komplexe und häufig durchgeführte Aufgaben in gewohnten Situationen mit geringem Stress und genügend zur Verfügung stehender Zeit, wobei eine gewisse Sorgfalt bei der Durchführung notwendig ist“ ($F = 10^{-2}$) eingeordnet. Es wird angenommen, dass das höhere Stressniveau von der gleichbleibend geringen Komplexität der Aufgabe kompensiert wird und somit eine vergleichbare Fehlhandlungswahrscheinlichkeit resultiert. Es wird der arithmetische Mittelwert beider Kategorien verwendet:

$$F_{B3} = F_{B10} = \frac{10^{-3} + 10^{-2}}{2} = 5,5 \cdot 10^{-3} = 0,0055 \equiv 0,55 \%$$

Die Wirksamkeit der *Sicherheitsbarriere* B_5 „Keine Manuelle Überbrückung der Grünschleife“ basiert auf der Fehlhandlungswahrscheinlichkeit bei der Betätigung des Überbrückungsschalters auf dem Fahrerpult.

Der Überbrückungsschalter ist typischerweise außerhalb des ständigen Griffbereiches des Fahrers angeordnet. Weiterhin ist er verplombt bzw. farblich oder haptisch hervorgehoben. Die Fahrer sind geschult, diesen Überbrückungsschalter nur in Ausnahmesituationen zu betätigen und den Fahrgastbetrieb zu beenden.

Die Fehlhandlungswahrscheinlichkeit der genannten *Sicherheitsbarriere* wird als Äquivalent zur Kategorie „Einfache und häufig durchgeführte Aufgaben bei geringem Stress und genügend zur Verfügung stehender Zeit“ bewertet, woraus

$$F_{B5} = 10^{-3} = 0,001 \equiv 0,1 \%$$

resultiert.

4.2.3 Risikobeurteilung

In diesem Kapitel werden die *Häufigkeiten* für das Eintreten der *Gefährdung* H_2 und des *Unfall* A_2 angegeben. Weiterhin werden die *Häufigkeiten* einzelner *Sicherheitsbarrieren* unter Berücksichtigung typischer Fragestellungen variiert und die *Häufigkeiten* für das Eintreten von H_2 und A_2 ermittelt.

Die Wahrscheinlichkeiten $S_{H_2}(t)$ und $S_{A_2}(t)$ für das Eintreten von H_2 und A_2 sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Sie resultieren aus der *Konjunktion* der Eintrittswahrscheinlichkeiten $S_{CH}(t)$, $S_{CA}(t)$ des Abschnittes *C* „Risikoerzeugung“ und den Versagenswahrscheinlichkeiten $F_{BH}(t)$, $F_{BA}(t)$ des Abschnittes *B* „Risikominderung“ des *Kausalitätsmodells* (Gleichungen 10 und 11).

Die Eintrittswahrscheinlichkeiten $S_{CH}(t)$ und $S_{CA}(t)$ resultieren aus der *Konjunktion* der

Eintrittswahrscheinlichkeiten der wirksamen *Ursache* S_{C1} , der *Auslöser* S_{C2} , S_{C3} und der *Gefährdung* S_H (Gleichungen 8 und 9).

Die Versagenswahrscheinlichkeiten $F_{BH}(t)$ und $F_{BA}(t)$ resultieren aus der Kombination der Versagenswahrscheinlichkeiten der *Sicherheitsbarrieren* B_i (Gleichungen 6 und 7).

Zur Bewertung der Wirksamkeit einzelner *Sicherheitsbarrieren* B_i ist die Kenntnis der Versagenswahrscheinlichkeit der einzelnen *Minimalpfade* M_i hilfreich. Sie wird als Seriensystem der Versagenswahrscheinlichkeiten der *Sicherheitsbarrieren* B_i nach Gleichung 5 berechnet:

$M_1 : B_1$	$F_1(t = 10^4 h) = 0,9$	$\equiv 90 \%$
$M_2 : B_2 \rightarrow B_3$	$F_2(t = 10^4 h) = 0,00555$	$\equiv 0,56 \%$
$M_3 : B_5 \rightarrow B_6 \rightarrow B_7 \rightarrow B_8 \rightarrow B_3$	$F_3(t = 10^4 h) = 0,021287$	$\equiv 2,13 \%$
$M_4 : B_5 \rightarrow B_6 \rightarrow B_7 \rightarrow B_4$	$F_4(t = 10^4 h) = 0,015875$	$\equiv 1,59 \%$
$M_5 : B_9$	$F_5(t = 10^4 h) = 0,8$	$\equiv 80 \%$
$M_6 : B_2 \rightarrow B_{10} \rightarrow B_{11}$	$F_6(t = 10^4 h) = 0,010510$	$\equiv 1,05 \%$

Identifikationsnummer	Situation	Formelzeichen	Wahrscheinlichkeit $F(t = 10^4 h)$ bzw. $S(t = 10^4 h)$				
			1. Alle Elemente wirksam	2. B_1, B_9 nicht wirksam	3. B_1, B_9, B_{11} nicht wirksam B_8, B_6, B_7, B_4 vermindert wirksam	4. B_1, B_2, B_9 nicht wirksam	5. B_1, B_2 nicht wirksam B_5, B_6 nicht vorhanden
U	Eingeklemmte Person (Tür nicht vollständig geschlossen)	S_{C1}	0,632121	0,632121	0,632121	0,632121	0,632121
T_1	Stillstand soll verlassen werden	S_{C2}	1	1	1	1	1
C_H	Häufigkeit des Abschnitts „Risikoerzeugung“	S_{CH}	0,632121	0,632121	0,632121	0,632121	0,632121
B_1	Selbstbefreiung	F_{B1}	0,9	1	1	1	1
B_2	Sichtbar im Rückspiegel	F_{B2}	0,00005	0,00005	0,00005	1	1
B_8	Anzeige GS	F_{B8}	0,004988	0,004988	0,048771	0,004988	0,004988
B_3	Wird vom Fahrer erkannt und befreit	F_{B3}	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055
B_5	Keine manuelle Überbrückung der Grünschleife	F_{B5}	0,001	0,001	0,001	0,001	0
B_6	Keine Überbrückung der Grünschleife infolge Defekt	F_{B6}	0,004988	0,004988	0,048771	0,004988	0

Tabelle wird fortgesetzt

Identifikationsnummer	Situation	Formelzeichen	Wahrscheinlichkeit $F(t = 10^4 h)$ bzw. $S(t = 10^4 h)$				
			1. Alle Elemente wirksam	2. B_1, B_9 nicht wirksam	3. B_1, B_9, B_{11} nicht wirksam B_8, B_6, B_7, B_4 vermindert wirksam	4. B_1, B_2, B_9 nicht wirksam	5. B_1, B_2 nicht wirksam B_5, B_6 nicht vorhanden
B_7	Grünschleife	F_{B7}	0,004988	0,004988	0,048771	0,004988	0,004988
B_4	Anfahrsperr	F_{B4}	0,004988	0,004988	0,048771	0,004988	0,004988
B_H	Häufigkeit des Abschnitts „Risikominderung“	F_{BH}	0,000079	0,000088	0,000776	0,010993	0,00504
H_2	Häufigkeit der Gefährdung	S_{H2}	0,000050 0,005% suw	0,000056 0,006% suw	0,000491 0,05% unw	0,006949 0,69% sel	0,003186 0,32% sel
T_2	Anfahren	S_{C3}	1	1	1	1	—
C_A	Häufigkeit des Abschnitts „Risikoerzeugung“	S_{CA}	0,000050	0,000056	0,000491	0,006949	—
B_9	Selbstbefreiung	F_{B9}	0,8	1	1	1	—
B_2	Sichtbar im Rückspiegel	F_{B2}	0,00005	0,00005	0,00005	1	—
B_{10}	Wird vom Fahrer erkannt und Bremsung eingeleitet	F_{B10}	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055	—
B_{11}	Bremsung in den Stillstand	F_{B11}	0,004988	0,004988	1	0,004988	—
B_A	Häufigkeit des Abschnitts „Risikominderung“	F_{BA}	0,008408	0,010510	1	1	—
A_2	Häufigkeit des Unfalls	S_{A2}	$4 \cdot 10^{-7}$ 0,00004% suw	$6 \cdot 10^{-7}$ 0,00006% suw	0,000491 0,05% unw	0,006949 0,69% sel	—

Tabelle 3: Häufigkeiten zur Gefährdung, welche aus dem Versagen des Erkennens des Einklemmens mittels Grünschleife resultiert (die modifizierten Wahrscheinlichkeiten sind fett hervorgehoben)

Erste Datenspalte

Die Häufigkeiten der Gefährdung H_2 und des Unfalls A_2 betragen

$$S_{H2}(t = 10^4 h) = 0,000050 \equiv 0,005 \%$$

$$S_{A2}(t = 10^4 h) = 4 \cdot 10^{-7} \equiv 0,00004 \%$$

und entsprechen somit W_5 in der Risikomatrix (Tabelle 2).

Basierend auf der in Kapitel 4 genannten möglichen Schwere, wird die Risikoakzeptanzkategorie „vernachlässigbar“ abgeleitet.

Weitere Maßnahmen zur Risikominderung sind nicht erforderlich.

Zweite Datenspalte

Im Bahnbetrieb ermittelte Daten der Versagenswahrscheinlichkeit der *Sicherheitsbarrieren* B_1 und B_9 „Selbstbefreiung“ liegen oft nicht vor. Es sollen die *Häufigkeiten* der *Gefährdung* H_2 und des *Unfalls* A_2 ermittelt werden, wenn B_1 und B_9 nicht wirksam sind ($F_{B_1} = F_{B_9} = 1$). Die *Häufigkeiten* betragen

$$S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,000056 \equiv 0,006 \%$$

$$S_{A_2}(t = 10^4 h) = 6 \cdot 10^{-7} \equiv 0,00006 \%$$

und entsprechen somit W_5 in der Risikomatrix (Tabelle 2).

Basierend auf der in Kapitel 4 genannten möglichen *Schwere*, wird die Risikoakzeptanzkategorie „vernachlässigbar“ abgeleitet.

Die geringfügige Erhöhung der *Häufigkeit* von H_2 und A_2 resultiert aus der hohen Versagenswahrscheinlichkeit der *Sicherheitsbarrieren* B_1 und B_9 (Kapitel 4.2.2) und dem daraus resultierenden geringen Beitrag an der Risikominderung.

Weitere Maßnahmen zur Risikominderung sind nicht erforderlich.

Die Eintrittswahrscheinlichkeiten der *Ursache* U und des *Auslösers* T_1 sind ebenfalls oft nicht aus im Bahnbetrieb ermittelten Daten ableitbar. Es soll die *Häufigkeit* von H_2 ermittelt werden, wenn U und T_1 permanent wirksam sind ($S_{C_1} = S_{C_2} = 1$).

Aus Gleichung 10 ist leicht ableitbar, dass die *Häufigkeit* von H_2 nun der *Häufigkeit* des Abschnitts B_H „Risikominderung“ des *Kausalitätsmodells* entspricht und somit unmittelbar in der zweiten Datenspalte der Tabelle 3 ablesbar ist. Sie beträgt

$$S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,000088 \equiv 0,009 \%$$

und entspricht somit W_5 in der Risikomatrix (Tabelle 2).

Basierend auf der in Kapitel 4 genannten möglichen *Schwere*, wird die Risikoakzeptanzkategorie „vernachlässigbar“ abgeleitet.

Die geringfügige Erhöhung der *Häufigkeit* von H_2 resultiert aus der großen *Häufigkeit* des Abschnitts C_H „Risikoerzeugung“ des *Kausalitätsmodells* (Kapitel 4.2.2).

Dritte Datenspalte

Es soll untersucht werden, wie weit die Versagenswahrscheinlichkeiten der technischen *Sicherheitsbarrieren* B_6 „Keine Überbrückung der Grünschleife infolge Defekt“, B_7 „Grünschleife“, B_8 „Anzeige GS“ und B_4 „Anfahrsperrre“ erhöht werden dürfen, ohne ein unzulässiges *Risiko* hervorzurufen. Die Versagenswahrscheinlichkeiten der genannten technischen *Sicherheitsbarrieren* werden um eine Zehnerpotenz erhöht.

Die *Sicherheitsbarrieren* B_1 und B_9 „Selbstbefreiung“, sowie die *Sicherheitsbarriere* B_{11} „Bremsung in den Stillstand“ sollen nicht wirksam sein. B_1 und B_{11} sind Bestandteil der parallel wirkenden Minimalpfade Fünf und Sechs. Mit Unwirksamkeit beider *Sicherheitsbarrieren* wird der risikomindernde Teil B_A des *Kausalitätsmodells* unwirksam $F_{B_A} = 1$.

Die *Häufigkeiten* betragen

$$S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,000776 \equiv 0,08 \% \quad C_H \text{ nicht wirksam}$$

$$S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,000491 \equiv 0,05 \% \quad C_H \text{ wirksam}$$

$$S_{A_2}(t = 10^4 h) = 0,000491 \equiv 0,05 \% \quad C_H \text{ wirksam}$$

und entsprechen somit W_4 in der Risikomatrix (Tabelle 2).

Basierend auf der in Kapitel 4 genannten möglichen *Schwere*, wird die Risikoakzeptanzkategorie „tolerierbar“ abgeleitet. Weitere Maßnahmen zur Risikominderung sind mit Zustimmung des Bahnunternehmens nicht erforderlich.

Eine Erhöhung der Versagenswahrscheinlichkeiten der genannten technischen *Sicherheitsbarrieren* um eine weitere Zehnerpotenz ($F_{B_6, B_7, B_4, B_8}(t = 10^4 h) = 0,393469$) resultiert in einer *Häufigkeit* von H_2

$$\begin{array}{ll} S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,004308 \equiv 0,43 \% & C_H \text{ nicht wirksam} \\ S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,002723 \equiv 0,27 \% & C_H \text{ wirksam} \end{array}$$

und entspricht somit W_3 in der Risikomatrix (Tabelle 2).

Basierend auf der in Kapitel 4 genannten möglichen *Schwere* der *Gefährdung*, wird die Risikoakzeptanzkategorie „unerwünscht“ abgeleitet. Eine Minderung des *Risikos* ist möglich. Folglich sind weitere Maßnahmen zur Risikominderung erforderlich, um ein akzeptables *Risiko* des *Unfalls* zu erreichen.

Vierte Datenspalte

Einige Bahnunternehmen akzeptieren die *Sicherheitsbarriere* B_2 „Sichtbar im Rückspiegel“ nicht als Bestandteil der Risikominderung. Die Auswirkung auf die *Häufigkeit* der *Gefährdung* H_2 und des *Unfalls* A_2 soll ermittelt werden, indem $F_{B_2} = 1$ (nicht wirksam) festgelegt wird. Die *Sicherheitsbarrieren* B_1, B_9 „Selbstbefreiung“ sollen ebenfalls nicht wirksam sein.

Die *Häufigkeiten* betragen

$$\begin{array}{ll} S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,010993 \equiv 1,10 \% & C_H \text{ nicht wirksam} \\ S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,006949 \equiv 0,69 \% & C_H \text{ wirksam} \\ S_{A_2}(t = 10^4 h) = 0,006949 \equiv 0,69 \% & \end{array}$$

und entsprechen somit W_2 bei nicht wirksamen C_H bzw. W_3 bei wirksamen C_H (Risikomatrix, Tabelle 2).

Basierend auf der in Kapitel 4 genannten möglichen *Schwere* der *Gefährdung*, werden die Risikoakzeptanzkategorien „untragbar“ und „unerwünscht“ abgeleitet.

Weitere Maßnahmen zur Risikominderung sind erforderlich, um ein akzeptables *Risiko* des *Unfalls* zu erreichen.

Eine Reduzierung der Versagenswahrscheinlichkeiten der technischen *Sicherheitsbarrieren* B_6, B_7, B_4, B_8 auf $F_{B_6, B_7, B_4, B_8}(t = 10^4 h) = 0,000050$ reduziert die *Häufigkeit* von H_2 auf

$$\begin{array}{ll} S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,001100 \equiv 0,11 \% & C_H \text{ nicht wirksam} \\ S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,000695 \equiv 0,07 \% & C_H \text{ wirksam} \end{array}$$

und entspricht somit W_3 bei nicht wirksamen C_H bzw. W_4 bei wirksamen C_H (Risikomatrix, Tabelle 2).

Basierend auf der in Kapitel 4 genannten möglichen *Schwere* der *Gefährdung*, werden die Risikoakzeptanzkategorien „unerwünscht“ und „tolerierbar“ abgeleitet.

Weitere Maßnahmen zur Risikominderung sind erforderlich, um ein akzeptables *Risiko* des

Unfalls zu erreichen (es wird unterstellt, dass die Risikoakzeptanzkategorie vom Bahnunternehmen nicht akzeptiert wird).

Auf die Wirksamkeit der *Sicherheitsbarriere* B_9 „Sichtbar im Rückspiegel“ kann verzichtet werden, wenn

- die Versagenswahrscheinlichkeiten der technischen *Sicherheitsbarrieren* B_6, B_7, B_4, B_8 reduziert werden (Vierte Datenspalte, Kapitel 4.2.3) oder
- die Grünschleifenüberbrückung entfernt wird und die Versagenswahrscheinlichkeiten der technischen *Sicherheitsbarrieren* B_7, B_4, B_8 reduziert werden (Fünfte Datenspalte, Kapitel 4.2.3) oder
- die Versagenswahrscheinlichkeit der *Sicherheitsbarriere* B_1 „Selbstbefreiung“ anhand im Bahnbetrieb ermittelter Daten signifikant reduziert wird.

Fünfte Datenspalte

Abschließend soll untersucht werden, ob das Entfernen der *Sicherheitsbarrieren* B_5 und B_6 (Grünschleifenüberbrückung, $F_{B_5, B_6}(t = 10^4 h) = 0$) geeignet ist, ein akzeptables *Risiko* zu erreichen. Die *Sicherheitsbarrieren* B_1 „Selbstbefreiung“ und B_2 „Sichtbar im Rückspiegel“ sind nicht wirksam.

Die *Häufigkeiten* betragen

$$\begin{array}{ll} S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,00504 \equiv 0,50 \% & C_H \text{ nicht wirksam} \\ S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,003186 \equiv 0,32 \% & C_H \text{ wirksam} \end{array}$$

und entsprechen somit W_3 in der Risikomatrix (Tabelle 2).

Basierend auf der in Kapitel 4 genannten möglichen *Schwere* der *Gefährdung*, wird die Risikoakzeptanzkategorie „unerwünscht“ abgeleitet.

Weitere Maßnahmen zur Risikominderung sind erforderlich, um ein akzeptables *Risiko* des *Unfalls* zu erreichen.

Eine Reduzierung der Versagenswahrscheinlichkeiten der technischen *Sicherheitsbarrieren* B_7, B_4, B_8 um eine Zehnerpotenz ($F_{B_7, B_4, B_8}(t = 10^4 h) = 0,000500$) reduziert die *Häufigkeiten*

$$\begin{array}{ll} S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,000503 \equiv 0,05 \% & C_H \text{ nicht wirksam} \\ S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,000318 \equiv 0,03 \% & C_H \text{ wirksam} \end{array}$$

und entspricht somit in beiden Fällen W_4 in der Risikomatrix (Tabelle 2).

Basierend auf der in Kapitel 4 genannten möglichen *Schwere* der *Gefährdung*, wird die Risikoakzeptanzkategorie „tolerierbar“ abgeleitet.

Weitere Maßnahmen zur Risikominderung sind mit Zustimmung des Bahnunternehmens nicht erforderlich.

4.3 Erkennen des Einklemmens mittels Mitschleiferkennung

In diesem Kapitel wird ein Szenario erläutert, bei dem eine eingeklemmte Person mittels Mitschleiferkennung erkannt wird.

4.3.1 Das Modell

In Abbildung 5 ist ein *Kausalitätsmodell* der Vermeidung einer schwerverletzten Person dargestellt, die während des Normalbetriebes zwischen den Türflügeln einer Fahrgastraumtür eingeklemmt wurde und mitgeschleift werden könnte (*Unfall A₂*).

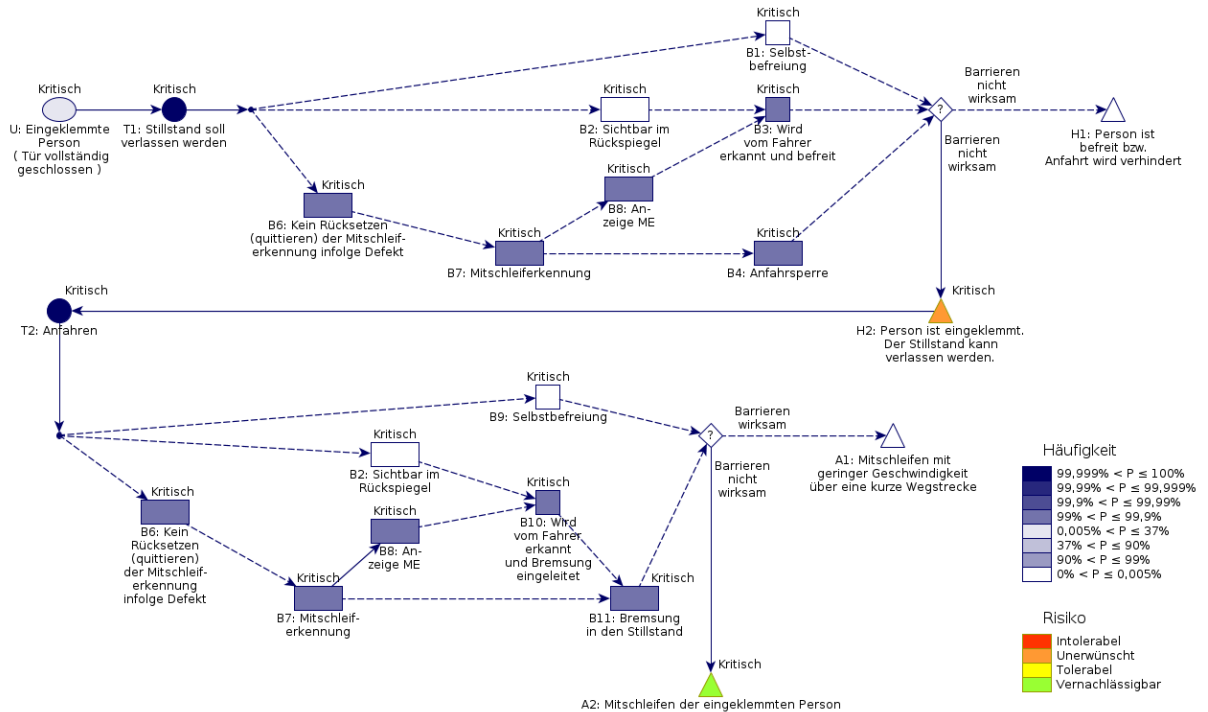


Abbildung 5: Einklemmen an der vollständig geschlossenen Fahrgastraumtür.

Die *Gefährdung* des Mitschleifens ist beispielweise dann gegeben, wenn eine Person das Fahrzeug während des Schließvorganges der Fahrgastraumtüren verlässt und beispielsweise an der Jacke, dem Mantel oder dem Tragegurt eines Gepäckstückes eingeklemmt wird. Größe und Steifigkeit des eingeklemmten Objektes ermöglichen ein vollständiges Schließen der Tür. Das eingeklemmte Objekt umschließt den Körper der Person derart, dass eine unmittelbare Selbstbefreiung nicht möglich ist (*Ursache U*).

Mit Abschluss des Fahrgastwechsels wird die Fahrt üblicherweise angetreten bzw. fortgesetzt (*Auslöser T₁*). Der *Unfall* tritt jedoch nicht ein, da das Fahrzeug noch nicht angefahren ist.

Beide *Situationen* bilden den Abschnitt C_H „Risikoerzeugung“, dessen *Risiko* anhand der folgenden *Sicherheitsbarrieren* gemindert wird.

Der erste *Minimalpfad* berücksichtigt den Versuch der „Selbstbefreiung“, welcher beim Einklemmen instinktiv unternommen wird und somit als *Sicherheitsbarriere B₁* wirkt. Der Erfolg wird von der Art der Befestigung des eingeklemmten Objektes am Körper und der Elastizität des Objektes bestimmt. Ein Aufschieben der Fahrgastraumtür mit Muskelkraft ist nicht möglich, da die Türflügel mechanisch verriegelt sind. Im Erfolgsfall wird die Person befreit.

Der zweite *Minimalpfad* berücksichtigt die *Sicherheitsbarrieren* B_2 und B_3 , bei denen der Fahrer eine eingeklemmte Person im Rückspiegel erkennt und befreit.

Der Erfolg wird von den selben Faktoren bestimmt, die auch beim zweiten *Minimalpfad* der Grünschleife (Kapitel 4.2.1) beschrieben wurden.

Der dritte *Minimalpfad* berücksichtigt die *Sicherheitsbarrieren* B_6 und B_7 , bei denen der Fahrer eine eingeklemmte Person mittels der *Sicherheitsbarrieren* B_8 und B_3 erkennt und befreit.

Der Erfolg dieses *Minimalpfades* wird vom Ausfallverhalten der Komponenten der Mitschleiferkennung, vom Ausfallverhalten der Komponenten der Anzeige der Mitschleiferkennung und von der Aufmerksamkeit des Fahrers bestimmt.

Zusätzlich darf die Mitschleiferkennung nicht zurückgesetzt (quittiert) werden. Folglich wirkt die *Sicherheitsbarriere* B_6 , deren Erfolg vom Ausfallverhalten der Komponenten der Quittierung der Mitschleiferkennung bestimmt wird. Im Erfolgsfall wird die Person befreit.

Der vierte *Minimalpfad* berücksichtigt ebenfalls die *Sicherheitsbarrieren* B_6 und B_7 , bei dem die Anfahrt mittels *Sicherheitsbarriere* B_4 verhindert wird.

Der Erfolg dieses *Minimalpfades* wird vom Ausfallverhalten der Komponenten der Mitschleiferkennung (einschließlich Quittierung) und vom Ausfallverhalten der Komponenten der Anfahrsperrung bestimmt. Im Erfolgsfall wird die Person zwar nicht befreit, das Fahrzeug wird jedoch im Stillstand gehalten.

Eine Anfahrsperrung (*Sicherheitsbarriere* B_4) wird von unterschiedlichen Fahrzeugfunktionen ausgelöst. Ein Rückschluss des Fahrers auf eine eingeklemmte Person infolge einer aktiven Anfahrsperrung ist nicht auszuschließen, soll in diesem Modell aber nicht als wirksame *Sicherheitsbarriere* berücksichtigt werden.

Die genannten *Minimalpfade* bilden den Abschnitt B_H „Risikominderung“, der bei wirksamen *Sicherheitsbarrieren* zur vermiedenen *Gefährdung* H_1 und bei unwirksamen *Sicherheitsbarrieren* zur *Gefährdung* H_2 mit dem resultierenden *Risiko* führt.

Der *Unfall* des Mitschleifens kann eintreten, wenn die *Gefährdung* H_2 des Mitschleifens vorhanden ist und der Stillstand verlassen wird (*Auslöser* T_2).

Beide *Situationen* bilden den Abschnitt C_A „Risikoerzeugung“, dessen *Risiko* anhand der folgenden *Sicherheitsbarrieren* gemindert wird.

Der fünfte *Minimalpfad* berücksichtigt den Versuch der „Selbstbefreiung“, welcher von der eingeklemmten Person instinktiv unternommen wird und somit als *Sicherheitsbarriere* B_9 wirkt.

Der Erfolg wird von den selben Faktoren bestimmt, die auch beim ersten *Minimalpfad* im Stillstand beschrieben wurden. Ein erfolgreicher Abschluss der (bisher erfolglosen) Selbstbefreiung kann aus der Nutzung von Kraftreserven resultieren, die im Moment der Todesangst aktiviert werden. Im Erfolgsfall konnte die Person nach einer kurzen Wegstrecke, bei einer geringen Geschwindigkeit (Schrittgeschwindigkeit) befreit werden.

Der sechste *Minimalpfad* berücksichtigt die *Sicherheitsbarrieren* B_2 , B_{10} und B_{11} , bei der der Fahrer eine eingeklemmte Person beim Anfahren erkennt und eine Bremsung einleitet.

Der Erfolg wird von den selben Faktoren bestimmt, die auch beim zweiten *Minimalpfad* beschrieben wurden. Die bisher nicht erkannte eingeklemmte Person kann nun infolge der veränderten Perspektive beim Anfahren oder auch der geänderten Anzahl bzw. Position der Personen auf dem Bahnsteig erkannt werden.

Der Erfolg wird zusätzlich vom Ausfallverhalten der Komponenten der Bremsfunktion bestimmt. Im Vergleich zum fünften *Minimalpfad*, konnte die Person im Erfolgsfall nach einer längeren Wegstrecke, bei einer höheren Geschwindigkeit befreit werden. Wegstrecke und Geschwindigkeit werden von der Reaktionsgeschwindigkeit des Fahrers bestimmt.

Der siebte *Minimalpfad* berücksichtigt die risikomindernde Wirkung der Mitschleiferkennung auch bei der Anfahrt.

Im Vergleich zur Grünschleife wird die Erkennung einer eingeklemmten Person mittels Mitschleiferkennung nicht nur vom Komponentendefekt bestimmt, sondern auch von der Richtung, mit der die Person versucht, das eingeklemmte Objekt herauszuziehen. Folglich ist das erfolglose Aktivieren im Stillstand nicht ausschließlich auf einen Defekt der Mitschleiferkennung zurückzuführen. Eine Bremsung kann somit auch während der Anfahrt eingeleitet werden.

Bei diesem *Minimalpfad* wirken die *Sicherheitsbarrieren* B_6 und B_7 , bei denen der Fahrer eine eingeklemmte Person mittels der *Sicherheitsbarrieren* B_8 und B_{10} erkennt und eine Bremsung einleitet.

Der Erfolg wird von den selben Faktoren bestimmt, die auch beim dritten *Minimalpfad* beschrieben wurden. Insbesondere ist der Einfluss der Quittierung zu berücksichtigen.

Der Erfolg wird zusätzlich vom Ausfallverhalten der Komponenten der Bremsfunktion bestimmt. Im Vergleich zum dritten *Minimalpfad* konnte die Person im Erfolgsfall nach einer längeren Wegstrecke, bei einer höheren Geschwindigkeit befreit werden. Wegstrecke und Geschwindigkeit werden von der Reaktionsgeschwindigkeit des Fahrers bestimmt.

Der achte *Minimalpfad* berücksichtigt ebenfalls die *Sicherheitsbarrieren* B_6 und B_7 , bei dem die Bremsung mittels *Sicherheitsbarriere* B_{11} eingeleitet wird.

Der Erfolg wird von den selben Faktoren bestimmt, die auch beim vierten *Minimalpfad* beschrieben wurden. Abweichend wird der Erfolg durch das Ausfallverhalten der Komponenten der Bremsfunktion bestimmt und nicht durch das Ausfallverhalten der Komponenten der Anfahrsperrre. Im Erfolgsfall konnte die Person nach einer kurzen Wegstrecke bei einer geringen Geschwindigkeit befreit werden. Wegstrecke und Geschwindigkeit werden von der Reaktionszeit des Bremssystems bestimmt.

Die genannten *Minimalpfade* bilden den Abschnitt B_A „Risikominderung“, der bei wirksamen *Sicherheitsbarrieren* zum vermiedenen *Unfall* A_1 und bei unwirksamen *Sicherheitsbarrieren* zum *Unfall* A_2 mit dem resultierenden *Risiko* führt.

statistische Unabhängigkeit der Elemente (disjunkte Elemente)

Der kausale Zusammenhang zwischen *Ursache*, *Auslöser* und *Sicherheitsbarrieren* der „Grünschleife“ entspricht funktional der „Mitschleiferkennung“. Lediglich die *Sicherheitsbarriere* B_5 ist im vorliegenden Modell nicht vorhanden, da die „Mitschleiferkennung“ nicht manuell überbrückbar ist.

Es gelten somit die Erläuterungen des Kapitels 4.2.1 denen analog entnommen werden kann, dass die Elemente des *Kausalitätsmodells* statistisch unabhängig (*disjunkt*) sind.

Kohärenz

Es gelten die Erläuterungen des Kapitels 4.2.1 zur Kohärenz des Modells.

4.3.2 Eintrittswahrscheinlichkeiten der Elemente

In diesem Kapitel werden Leistungs- und Wahrscheinlichkeitsparameter für die Elemente des *Kausalitätsmodells* quantifiziert. Weiterhin werden Annahmen über einzelne Aspekte des menschlichen Leistungsvermögens und daraus resultierender Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten getroffen. Diese Parameter orientieren sich an realen Werten, die allerdings für einen konkreten Anwendungsfall neu ermittelt werden müssen.

Die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Elemente beschreiben *Situationen*, die „rein zufällig“ auftreten. Zur Berechnung wird die Verteilungsfunktion $F(t)$ aus Gleichung 17 für den in Kapitel 4 genannten Betrachtungszeitraum verwendet. Weiterführende Informationen zur Wahrscheinlichkeitsrechnung sind Kapitel 3.5.9 entnehmbar.

Das Einklemmen U „Eingeklemmte Person (Tür vollständig geschlossen)“ findet während des Schließvorganges der Fahrgastraumtür statt.

Der Zeitbedarf eines Schrittes wird in Kapitel 4.2.2 genannt. Die Ermittlung der *Häufigkeit* des Einklemmens folgt dem in Kapitel 4.2.2 formulierten Gedanken. Sie basiert auf derselben Anzahl der im Jahr beförderten Personen. Abweichend wird angenommen, dass nur 1 Person im genannten Zeitraum eingeklemmt wird.

Unter Verwendung des Zeitbedarfes von 0,6 s für das Passieren der Fahrgastraumtür wird ein Erwartungswert

$$E(\tau) = \frac{1,8 \cdot 10^8}{1} \cdot \frac{0,6 \text{ s} \cdot h}{3600 \text{ s}} = 30000 \text{ h}$$

ermittelt, woraus eine Hazardrate λ , einschließlich zugeordneter Wahrscheinlichkeit $S_{C1}(t) = F(t)$

$$\lambda = \frac{1}{30000 \text{ h}} = 3,33 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$$

$$S_{C1}(t = 10^4 \text{ h}) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-3,33 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1} \cdot 10^4 \text{ h}} = 0,283469 \equiv 28,3469 \%$$

resultiert.

Der Bahnbetrieb wird zum Zweck des Fahrgasttransportes durchgeführt. Folglich wird der Fahrgastwechsel mit dem Ziel abgeschlossen, den Stillstand zu verlassen und das Fahrzeug in Bewegung zu setzen. Den *Auslösern* T_1 „Stillstand soll verlassen werden“ und T_2 „Anfahren“ wird somit die Eintrittswahrscheinlichkeit

$$S_{C2} = S_{C3} = 1 \equiv 100\%$$

zugeordnet.

Die Wirksamkeit der *Sicherheitsbarrieren* B_1 und B_9 „Selbstbefreiung“ wird von der Reißfestigkeit und der Art der Befestigung des eingeklemmten Gegenstandes am menschlichen

Körper bestimmt. Als typisches Szenario wird das Einklemmen eines nahezu geschlossenen Mantels beschrieben, bei dem das Herausziehen von einem in der Manteltasche steckenden Gegenstand verhindert wird. Das Aufschieben der Fahrgastraumtüren ist nicht möglich, da sie im geschlossenen Zustand mechanisch verriegelt sind.

Für den Stillstand wird eine Versagenswahrscheinlichkeit der *Sicherheitsbarriere* B_1 von

$$F_{B_1} = 0,99 \equiv 99\%$$

geschätzt. Sollte eine Selbstbefreiung bis in den Anfahrvorgang hinein nicht möglich sein, so wird eine Versagenswahrscheinlichkeit der *Sicherheitsbarriere* B_9 von

$$F_{B_9} = 0,98 \equiv 98\%$$

werden. Der etwas geringere Wert wird mit der Mobilisierung zusätzlicher Kräfte im Moment der Todesangst begründet.

Die Wirksamkeit der *Sicherheitsbarrieren* B_6 „Kein Rücksetzen (quittieren) der Mitschleiferkennung infolge Defekt“, B_7 „Mitschleiferkennung“, B_8 „Anzeige ME“, B_4 „Anfahrsperrung“ und B_{11} „Bremsung in den Stillstand“ wird anhand des sicherheitsrelevanten Anteils der *Ausfallrate* quantifiziert. Der Begriff „sicherheitsrelevanter Anteil der *Ausfallrate*“ wird in Kapitel 4.2.2 erläutert.

Der sicherheitsrelevante Anteil der *Ausfallrate* der *Sicherheitsbarrieren* wird mittels Hazardrate λ , einschließlich zugeordneter Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$

$$\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ h}^{-1}$$

$$F(t = 10^4 \text{ h}) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-5 \cdot 10^{-7} \text{ h}^{-1} \cdot 10^4 \text{ h}} = 0,004988 \equiv 0,4988 \%$$

$$F_{B_6}(t = 10^4 \text{ h}) = F_{B_7}(t = 10^4 \text{ h}) = \\ F_{B_8}(t = 10^4 \text{ h}) = F_{B_4}(t = 10^4 \text{ h}) = F_{B_{11}}(t = 10^4 \text{ h}) = F(t = 10^4 \text{ h})$$

quantifiziert.

Die Wirksamkeit der *Sicherheitsbarrieren* B_2 „Sichtbar im Rückspiegel“, B_3 „Wird vom Fahrer erkannt und befreit“ und B_{10} „Wird vom Fahrer erkannt und Bremsung eingeleitet“ ist dem Kapitel 4.2.2 entnehmbar.

4.3.3 Risikobeurteilung

In diesem Kapitel werden die *Häufigkeiten* für das Eintreten der *Gefährdung* H_2 und des *Unfall* A_2 angegeben.

Weiterhin werden die *Häufigkeiten* einzelner *Sicherheitsbarrieren* unter Berücksichtigung typischer Fragestellungen variiert und die *Häufigkeiten* für das Eintreten von H_2 und A_2 ermittelt.

Die Wahrscheinlichkeiten $S_{H_2}(t)$ und $S_{A_2}(t)$ für das Eintreten von H_2 und A_2 sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Erläuterungen zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten sind Kapitel 4.2.3 zu entnehmen.

Zur Bewertung der Wirksamkeit einzelner *Sicherheitsbarrieren* B_i ist die Kenntnis der Versagenswahrscheinlichkeit der einzelnen *Minimalpfade* M_i hilfreich. Sie wird als Seriensystem der Versagenswahrscheinlichkeiten der *Sicherheitsbarrieren* B_i nach Gleichung 5 berechnet:

$M_1 : B_1$	$F_1(t = 10^4 h) = 0,99$	$\equiv 99 \%$
$M_2 : B_2 \rightarrow B_3$	$F_2(t = 10^4 h) = 0,00555$	$\equiv 0,56 \%$
$M_3 : B_6 \rightarrow B_7 \rightarrow B_4$	$F_3(t = 10^4 h) = 0,014889$	$\equiv 1,49 \%$
$M_4 : B_6 \rightarrow B_7 \rightarrow B_8 \rightarrow B_3$	$F_4(t = 10^4 h) = 0,020308$	$\equiv 2,03 \%$
$M_5 : B_9$	$F_5(t = 10^4 h) = 0,98$	$\equiv 98 \%$
$M_6 : B_2 \rightarrow B_{10} \rightarrow B_{11}$	$F_6(t = 10^4 h) = 0,010510$	$\equiv 1,05 \%$
$M_7 : B_6 \rightarrow B_7 \rightarrow B_{11}$	$F_7(t = 10^4 h) = 0,014889$	$\equiv 1,49 \%$

Es ist zu beachten, dass die *Sicherheitsbarriere* B_8 „Anzeige ME“ nach der Anfahrt nicht zur Risikominderung beiträgt.

Identifikationsnummer	Situation	Formelzeichen	Wahrscheinlichkeit $F(t = 10^4 h)$ bzw. $S(t = 10^4 h)$			
			1. Alle Elemente wirksam	2. B_1, B_9 nicht wirksam	3. B_1, B_9 nicht wirksam $B_6, B_7, B_8, B_4, B_{11}$ vermindert wirksam	4. B_1, B_2, B_9 nicht wirksam
U	Eingeklemmte Person (Tür vollständig geschlossen)	S_{C1}	0,283469	0,283469	0,283469	0,283469
T_1	Stillstand soll verlassen werden	S_{C2}	1	1	1	1
C_H	Häufigkeit des Abschnitts „Risikoerzeugung“	S_{CH}	0,283469	0,283469	0,283469	0,283469
B_1	Selbstbefreiung	F_{B1}	0,99	1	1	1
B_2	Sichtbar im Rückspiegel	F_{B2}	0,00005	0,00005	0,00005	1
B_8	Anzeige ME	F_{B8}	0,004988	0,004988	0,048771	0,004988
B_3	Wird vom Fahrer erkannt und befreit	F_{B3}	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055
B_6	Kein Rücksetzen (quittieren) der Mitschleiferkennung infolge Defekt	F_{B6}	0,004988	0,004988	0,048771	0,004988
B_7	Mitschleiferkennung	F_{B7}	0,004988	0,004988	0,048771	0,004988
B_4	Anfahrsperr	F_{B4}	0,004988	0,004988	0,048771	0,004988
B_H	Häufigkeit des Abschnitts „Risikominderung“	F_{BH}	0,000082	0,000082	0,000771	0,010003
H_2	Häufigkeit der Gefährdung	S_{H2}	0,000023 0,002% suw	0,000023 0,002% suw	0,000219 0,02% unw	0,002836 0,28% sel

Tabelle wird fortgesetzt

Identifikationsnummer	Situation	Formelzeichen	Wahrscheinlichkeit $F(t = 10^4 h)$ bzw. $S(t = 10^4 h)$			
			1. Alle Elemente wirksam	2. B_1, B_9 nicht wirksam	3. B_1, B_9 nicht wirksam $B_6, B_7, B_8, B_4, B_{11}$ vermindert wirksam	4. B_1, B_2, B_9 nicht wirksam
T_2	Anfahren	S_{C3}	1	1	1	1
C_A	Häufigkeit des Abschnitts „Risikoerzeugung“	S_{CA}	0,000023	0,000023	0,000219	0,002836
B_9	Selbstbefreiung	F_{B9}	0,98	1	1	1
B_2	Sichtbar im Rückspiegel	F_{B2}	0,00005	0,00005	0,00005	1
B_8	Anzeige ME	F_{B8}	0,004988	0,004988	0,048771	0,004988
B_{10}	Wird vom Fahrer erkannt und Bremsung eingeleitet	F_{B10}	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055
B_6	Kein Rücksetzen (quittieren) der Mitschleiferkennung infolge Defekt	F_{B6}	0,004988	0,004988	0,048771	0,004988
B_7	Mitschleiferkennung	F_{B7}	0,004988	0,004988	0,048771	0,004988
B_{11}	Bremsung in den Stillstand	F_{B11}	0,004988	0,004988	0,048771	0,004988
B_A	Häufigkeit des Abschnitts „Risikominderung“	F_{BA}	0,004942	0,005043	0,049273	0,014889
A_2	Häufigkeit des Unfalls	S_{A2}	0,0000001 0,00001% suw	0,0000001 0,00001% suw	0,000011 0,001% suw	0,000042 0,004% suw

Tabelle 4: Häufigkeiten zur Gefährdung, welche aus dem Versagen des Erkennens des Einklemmens mittels Mitschleiferkennung resultiert

Erste Datenspalte

Die Häufigkeiten der Gefährdung H_2 und des Unfalls A_2 betragen

$$S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,000023 \equiv 0,002 \%$$

$$S_{A_2}(t = 10^4 h) = 0,0000001 \equiv 0,00001 \%$$

und entsprechen somit W_5 in der Risikomatrix (Tabelle 2).

Basierend auf der in Kapitel 4 genannten möglichen Schwere, wird die Risikoakzeptanzkategorie „vernachlässigbar“ abgeleitet.

Weitere Maßnahmen zur Risikominderung sind nicht erforderlich.

Zweite Datenspalte

Im Bahnbetrieb ermittelte Daten der Versagenswahrscheinlichkeit der Sicherheitsbarrieren B_1 und B_9 „Selbstbefreiung“ liegen oft nicht vor. Es sollen die Häufigkeiten der Gefährdung H_2 und des Unfalls A_2 ermittelt werden, wenn B_1 und B_9 nicht wirksam sind

($F_{B_1} = F_{B_9} = 1$). Die *Häufigkeiten* betragen

$$S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,000023 \equiv 0,002 \%$$
$$S_{A_2}(t = 10^4 h) = 0,0000001 \equiv 0,00001 \%$$

und entsprechen somit W_5 in der Risikomatrix (Tabelle 2).

Basierend auf der in Kapitel 4 genannten möglichen *Schwere*, wird die Risikoakzeptanzkategorie „vernachlässigbar“ abgeleitet.

Die fehlende Erhöhung der *Häufigkeit* von H_2 und A_2 resultiert aus der hohen Versagenswahrscheinlichkeit der *Sicherheitsbarrieren* B_1 und B_9 (Kapitel 4.2.2) und dem daraus resultierenden vernachlässigbaren Beitrag an der Risikominderung. Weitere Maßnahmen zur Risikominderung sind nicht erforderlich.

Die Eintrittswahrscheinlichkeiten der *Ursache* U und des *Auslösers* T_1 sind ebenfalls oft nicht aus im Bahnbetrieb ermittelten Daten ableitbar. Es soll die *Häufigkeit* von H_2 ermittelt werden, wenn U und T_1 permanent wirksam sind ($S_{C_1} = S_{C_2} = 1$).

Aus Gleichung 10 ist leicht ableitbar, dass die *Häufigkeit* von H_2 nun der *Häufigkeit* des Abschnitts B_H „Risikominderung“ des *Kausalitätsmodells* entspricht und somit unmittelbar in der zweiten Datenspalte der Tabelle 3 ablesbar ist. Sie beträgt

$$S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,000082 \equiv 0,008 \%$$

und entspricht somit W_5 in der Risikomatrix (Tabelle 2).

Basierend auf der in Kapitel 4 genannten möglichen *Schwere*, wird die Risikoakzeptanzkategorie „vernachlässigbar“ abgeleitet.

Die um den Faktor 3,5 erhöhte *Häufigkeit* von H_2 resultiert aus der entsprechenden *Häufigkeit* des Abschnitts C_H „Risikoerzeugung“ des *Kausalitätsmodells* (Kapitel 4.2.2).

Dritte Datenspalte

Es soll untersucht werden, wie weit die Versagenswahrscheinlichkeiten der technischen *Sicherheitsbarrieren* B_6 „Kein Rücksetzen (quittieren) der Mitschleiferkennung infolge Defekt“, B_7 „Mitschleiferkennung“, B_8 „Anzeige ME“ und B_4 „Anfahrsperrung“ erhöht werden dürfen, ohne ein unzulässiges *Risiko* hervorzurufen. Die Versagenswahrscheinlichkeiten der genannten technischen *Sicherheitsbarrieren* werden um eine Zehnerpotenz erhöht.

Die *Sicherheitsbarrieren* B_1 , B_9 „Selbstbefreiung“ und die *Sicherheitsbarriere* B_{11} „Bremsung in den Stillstand“ sollen nicht wirksam sein.

Die *Häufigkeiten* betragen

$$S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,000771 \equiv 0,08 \%$$
$$S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,000219 \equiv 0,02 \%$$
$$S_{A_2}(t = 10^4 h) = 0,000011 \equiv 0,001 \%$$

C_H nicht wirksam
C_H wirksam

und entsprechen somit in beiden Fällen W_4 in der Risikomatrix (Tabelle 2).

Basierend auf der in Kapitel 4 genannten möglichen *Schwere* der *Gefährdung*, wird die Risikoakzeptanzkategorie „tolerierbar“ abgeleitet. Weitere Maßnahmen zur Risikominderung sind mit Zustimmung des Bahnunternehmens nicht erforderlich.

Eine Erhöhung der Versagenswahrscheinlichkeiten der genannten technischen *Sicherheitsbarrieren* um eine weitere Zehnerpotenz ($F_{B_6, B_7, B_4, B_8}(t = 10^4 h) = 0,393469$) resultiert in einer *Häufigkeit* von H_2

$$\begin{array}{ll} S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,004307 \equiv 0,43 \% & C_H \text{ nicht wirksam} \\ S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,001221 \equiv 0,12 \% & C_H \text{ wirksam} \end{array}$$

und entspricht somit W_3 in der Risikomatrix (Tabelle 2).

Basierend auf der in Kapitel 4 genannten möglichen *Schwere*, wird die Risikoakzeptanzkategorie „unerwünscht“ abgeleitet. Eine Minderung des *Risikos* ist möglich. Folglich sind Maßnahmen zur Risikominderung erforderlich, um ein akzeptables *Risiko* des *Unfalls* zu erreichen.

Vierte Datenspalte

Einige Bahnunternehmen akzeptieren die *Sicherheitsbarriere* B_2 „Sichtbar im Rückspiegel“ nicht als Bestandteil der Risikominderung. Die Auswirkung auf die *Häufigkeit* der *Gefährdung* H_2 und des *Unfalls* A_2 soll ermittelt werden, indem $F_{B_2} = 1$ (nicht wirksam) festgelegt wird. Die *Sicherheitsbarrieren* B_1, B_9 „Selbstbefreiung“ sollen ebenfalls nicht wirksam sein.

Die *Häufigkeiten* betragen

$$\begin{array}{ll} S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,010003 \equiv 1 \% & C_H \text{ nicht wirksam} \\ S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,002836 \equiv 0,28 \% & C_H \text{ wirksam} \\ S_{A_2}(t = 10^4 h) = 0,000042 \equiv 0,004 \% & \end{array}$$

S_{H_2} entsprechen somit W_2 bei nicht wirksamen C_H bzw. W_3 bei wirksamen C_H und S_{A_2} entspricht F_{A_5} (Risikomatrix, Tabelle 2).

Basierend auf der in Kapitel 4 genannten möglichen *Schwere*, werden für S_{H_2} die Risikoakzeptanzkategorien „untragbar“ und „unerwünscht“ abgeleitet. Weitere Maßnahmen zur Risikominderung sind erforderlich, um ein akzeptables *Risiko* des *Unfalls* zu erreichen.

Eine Reduzierung der Versagenswahrscheinlichkeiten der technischen *Sicherheitsbarrieren* B_6, B_7, B_4, B_8 auf $F_{B_6, B_7, B_4, B_8}(t = 10^4 h) = 0,000050$ reduziert die *Häufigkeit* von H_2 auf

$$\begin{array}{ll} S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,001003 \equiv 0,1 \% & C_H \text{ nicht wirksam} \\ S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,000284 \equiv 0,03 \% & C_H \text{ wirksam} \\ S_{A_2}(t = 10^4 h) = 0,00075 \equiv 0,075 \% & \end{array}$$

und entspricht somit W_3 bei nicht wirksamen C_H bzw. W_4 bei wirksamen C_H (Risikomatrix, Tabelle 2).

Basierend auf der in Kapitel 4 genannten möglichen *Schwere*, werden die Risikoakzeptanzkategorien „unerwünscht“ und „tolerierbar“ abgeleitet. Weitere Maßnahmen zur Risikominderung sind erforderlich, um ein akzeptables *Risiko* des *Unfalls* zu erreichen (es wird unterstellt, dass die Risikoakzeptanzkategorie vom Bahnunternehmen nicht akzeptiert wird).

4.4 Erkennen des Einklemmens bei manuell überbrückter Grünschleife

In diesem Kapitel wird ein Szenario erläutert, bei dem eine eingeklemmte Person bei manuell überbrückter Grünschleife erkannt wird.

4.4.1 Das Modell

In Abbildung 6 ist ein *Kausalitätsmodell* der Vermeidung einer schwerverletzten Person dargestellt, die während der Notfahrt zwischen den Türflügeln einer Fahrgastraumtür eingeklemmt wurde und mitgeschleift werden könnte (*Unfall A₂*).

Die *Situation* der Notfahrt resultiert beispielsweise aus einem Halt in einem Streckenabschnitt, auf dem kein Fahrgastwechsel stattfinden darf. Infolge einer Störungsbeseitigung musste der Fahrer die Türen kurzzeitig öffnen und die Grünschleife überbrücken.

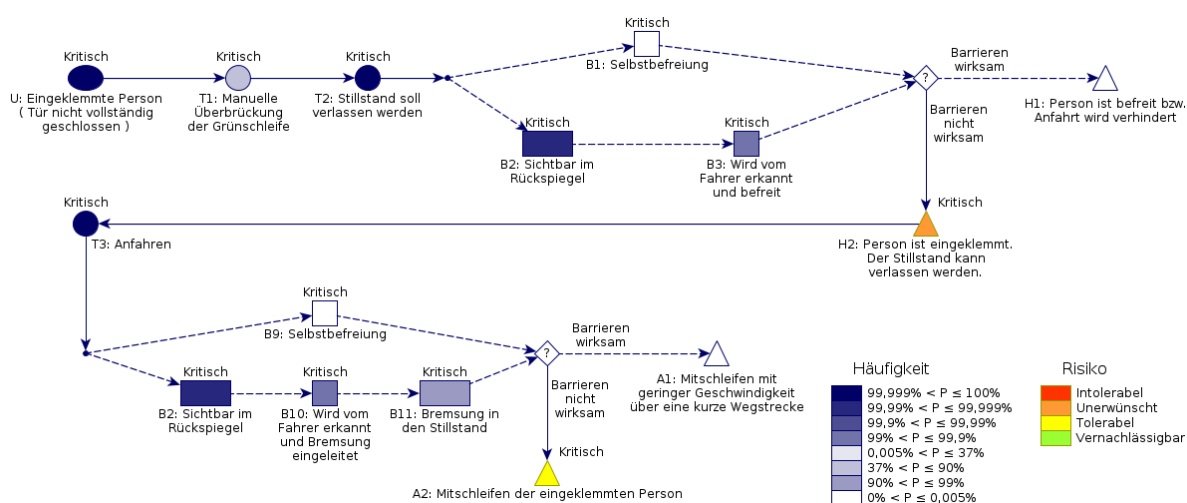


Abbildung 6: Notbetrieb: Einklemmen an der nicht vollständig geschlossenen Fahrgastraumtür bei aktivierter Überbrückung der Grünschleife.

Die *Gefährdung* des Mitschleifens wird von den selben *Situationen* verursacht, wie sie bereits für die *Gefährdung* des Mitschleifens bei aktiver Grünschleife (Kapitel 4.2.1) beschrieben wurden (*Ursache U*). Zusätzlich wirkt die manuelle Überbrückung der Grünschleife (*Auslöser T₁*).

Mit Abschluss des Fahrgastwechsels wird die Fahrt üblicherweise angetreten bzw. fortgesetzt (*Auslöser T₂*). Der *Unfall* tritt jedoch nicht ein, da das Fahrzeug noch nicht angefahren ist.

Die genannten *Situationen* bilden den Abschnitt C_H „Risikoerzeugung“, dessen *Risiko* anhand der folgenden *Sicherheitsbarrieren* gemindert wird.

Der erste *Minimalpfad* berücksichtigt den Versuch der „Selbstbefreiung“, welcher von der eingeklemmten Person instinktiv unternommen wird und somit als *Sicherheitsbarriere B₁* wirkt.

Der Erfolg wird von den selben Faktoren bestimmt, die auch beim ersten *Minimalpfad* bei aktiver Grünschleife (Kapitel 4.2.1) beschrieben wurden.

Der zweite *Minimalpfad* berücksichtigt die *Sicherheitsbarrieren* B_2 und B_3 , bei denen der Fahrer eine eingeklemmte Person im Rückspiegel erkennt und befreit.

Der Erfolg wird von den selben Faktoren bestimmt, die auch beim zweiten *Minimalpfad* bei aktiver Grünschleife (Kapitel 4.2.1) beschrieben wurden.

Die genannten *Minimalpfade* bilden den Abschnitt B_H „Risikominderung“, der bei wirksamen *Sicherheitsbarrieren* zur vermiedenen *Gefährdung* H_1 und bei unwirksamen *Sicherheitsbarrieren* zur *Gefährdung* H_2 mit dem resultierenden *Risiko* führt.

Der *Unfall* des Mitschleifens kann eintreten, wenn die *Gefährdung* H_2 des Mitschleifens vorhanden ist und der Stillstand verlassen wird (*Auslöser* T_2).

Beide *Situationen* bilden den Abschnitt C_A „Risikoerzeugung“, dessen *Risiko* anhand der folgenden *Sicherheitsbarrieren* gemindert wird.

Der dritte bzw. vierte *Minimalpfad* entspricht dem fünften bzw. sechsten *Minimalpfad* bei aktiver Grünschleife (Kapitel 4.2.1).

Die genannten *Minimalpfade* bilden den Abschnitt B_A „Risikominderung“, der bei wirksamen *Sicherheitsbarrieren* zum vermiedenen *Unfall* A_1 und bei unwirksamen *Sicherheitsbarrieren* zum *Unfall* A_2 mit dem resultierenden *Risiko* führt.

statistische Unabhängigkeit der Elemente (disjunkte Elemente)

Die Eintrittswahrscheinlichkeiten der *Auslöser* T_1, T_2, T_3 werden ausschließlich vom Verhalten des Fahrer beeinflusst. Es besteht kein funktionaler Zusammenhang zu den *Sicherheitsbarrieren* B_2, B_{11} , dessen Ausfall zum Anfahren des Fahrzeugs führen könnte. Auch die Eintrittswahrscheinlichkeit der *Ursache* U , die Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten der *Sicherheitsbarrieren* B_3, B_{10} und die Ausfallwahrscheinlichkeiten (Erfolglosigkeit) der *Sicherheitsbarrieren* B_1, B_9 führen nicht zum Anfahren des Fahrzeugs.

Analog beeinflussen die Eintrittswahrscheinlichkeiten der *Auslöser* T_1, T_2, T_3 nicht das Ausfallverhalten der *Sicherheitsbarrieren* B_2, B_{11} , die Eintrittswahrscheinlichkeit der *Ursache* U , die Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten der *Sicherheitsbarrieren* B_3, B_{10} und die Ausfallwahrscheinlichkeiten (Erfolglosigkeit) der *Sicherheitsbarrieren* B_1, B_9 . Der Einfluss des Anfahrens auf die Wirksamkeit der *Sicherheitsbarrieren* B_9 Selbstbefreiung infolge der sich verschlechternden Standfestigkeit, ist in der Ausfallwahrscheinlichkeit der genannten *Sicherheitsbarrieren* berücksichtigt.

Die technischen Systeme des Fahrzeugs sind beanspruchungsgemäß dimensioniert. Das Einklemmen einer Person zwischen den Türflügeln, die Selbstbefreiung, die Benutzung des Rückspiegels, das Öffnen der Fahrgastraumtüren, das Einleiten einer Bremsung, die Betätigung der manuellen Überbrückung der Grünschleife und das Verlassen des Stillstandes führt nicht zur Überlast der genannten technischen Systeme, die im *Kausalitätsmodell* als *Auslöser* bzw. *Sicherheitsbarrieren* wirken.

Die Ausfallwahrscheinlichkeiten der *Sicherheitsbarrieren* B_2, B_{11} werden folglich nicht von der Eintrittswahrscheinlichkeit der *Ursache* U , den Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten *Sicherheitsbarrieren* B_3, B_{10} und den Ausfallwahrscheinlichkeiten (Erfolglosigkeit) der *Sicherheitsbarrieren* B_1, B_9 beeinflusst.

Durch Überlegung ist weiterhin erkennbar, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit der *Ursache* U , die Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten der *Sicherheitsbarrieren* B_3, B_{10} und die Ausfallwahrscheinlichkeiten (Erfolglosigkeit) der *Sicherheitsbarrieren* B_1, B_9 nicht von den Ausfallwahrscheinlichkeiten der *Sicherheitsbarrieren* B_2, B_{11} beeinflusst werden. Weiterhin beeinflussen sich die Ausfallwahrscheinlichkeiten der *Sicherheitsbarrieren* B_2 und B_{11} nicht gegenseitig, da sie funktional unabhängig voneinander sind.

Die *Ursache* U und *Sicherheitsbarrieren* B_3, B_{10} basieren auf menschlichen Handlungen, die unabhängig voneinander ausgeführt werden. Die Eintrittswahrscheinlichkeit der *Ursache* U und Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten der *Sicherheitsbarrieren* B_3, B_{10} beeinflussen sich folglich nicht gegenseitig.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Elemente des *Kausalitätsmodells* statistisch unabhängig (*disjunkt*) sind.

Kohärenz

Die Kohärenz des Modells wird anhand der in Kapitel 3.5.2 formulierten Kohärenzbedingungen für die Abschnitte C und B überprüft.

Die *Ursache* U und die *Auslöser* T_1, T_2 sind im Abschnitt C_H seriell angeordnet. Die *Gefährdung* H_2 und der *Auslöser* T_3 sind im Abschnitt C_A ebenfalls seriell angeordnet. Beide Abschnitte können zur *Gefährdung* H_2 bzw. *Unfall* A_2 führen, wenn U, T_1, T_2 bzw. H_2, T_3 wirksam sind. Sind U, T_1, T_2, H_2, T_3 hingegen nicht wirksam, können die *Gefährdung* H_2 bzw. der *Unfall* A_2 nicht eintreten.

Die *Sicherheitsbarrieren* sind im Abschnitt B_H und im Abschnitt B_A serien-parallel angeordnet. Die *Gefährdung* H_2 bzw. der *Unfall* A_2 werden nicht verhindert, wenn alle *Sicherheitsbarrieren* unwirksam sind. Sind alle *Sicherheitsbarrieren* wirksam, werden *Gefährdung* H_2 und *Unfall* A_2 verhindert.

4.4.2 Eintrittswahrscheinlichkeiten der Elemente

In diesem Kapitel werden Leistungs- und Wahrscheinlichkeitsparameter für die Elemente des *Kausalitätsmodells* quantifiziert. Weiterhin werden Annahmen über einzelne Aspekte des menschlichen Leistungsvermögens und daraus resultierender Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten getroffen. Diese Parameter orientieren sich an realen Werten, die allerdings für einen konkreten Anwendungsfall neu ermittelt werden müssen.

Die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Elemente beschreiben *Situationen*, die „rein zufällig“ auftreten. Zur Berechnung wird die Verteilungsfunktion $F(t)$ aus Gleichung 17 für den in Kapitel 4 genannten Betrachtungszeitraum verwendet. Weiterführende Informationen zur Wahrscheinlichkeitsrechnung sind Kapitel 3.5.9 entnehmbar.

Das Einklemmen U „Eingeklemmte Person (Tür nicht vollständig geschlossen)“ findet während des Schließvorganges der Fahrgastraumtür statt. Die *Häufigkeit* wird mit $10^6 h$ geschätzt, woraus eine Hazardrate λ , einschließlich zugeordneter Wahrscheinlichkeit $S_{C1}(t) = F(t)$

$$\lambda = \frac{1}{1000000 h} = 1 \cdot 10^{-6} h^{-1}$$

$$S_{C1}(t = 10^4 h) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-1 \cdot 10^{-6} h^{-1} \cdot 10^4 h} = 0,009950 \equiv 0,9950 \%$$

resultiert.

Der *Auslöser* T_1 „Manuelle Überbrückung der Grünschleife“ wird von der Anzahl der technischen Defekte bestimmt, bei denen die Grünschleife nicht geschlossen werden kann. Die *Häufigkeit* wird mit $10^5 h$ geschätzt, woraus eine Hazardrate λ , einschließlich zugeordneter Wahrscheinlichkeit der Betätigung der Überbrückung $S_{C2} = F(t)$

$$\lambda = \frac{1}{100000 h} = 1 \cdot 10^{-5} h^{-1}$$

$$S_{C2}(t = 10^4 h) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-1 \cdot 10^{-5} h^{-1} \cdot 10^4 h} = 0,095163 \equiv 9,5163 \%$$

resultiert.

Der Bahnbetrieb wird zum Zweck des Fahrgasttransportes durchgeführt. Folglich wird der Fahrgastwechsel mit dem Ziel abgeschlossen, den Stillstand zu verlassen und das Fahrzeug in Bewegung zu setzen. Den *Auslösern* T_2 „Stillstand soll verlassen werden“ und T_3 „Anfahren“ wird somit die Eintrittswahrscheinlichkeit

$$S_{C3} = S_{C4} = 1 \equiv 100\%$$

zugeordnet.

Die Wirksamkeit der *Sicherheitsbarrieren* B_1 und B_9 „Selbstbefreiung“, sowie B_2 „Sichtbar im Rückspiegel“, B_3 „Wird vom Fahrer erkannt und befreit“, B_{10} „Wird vom Fahrer erkannt und Bremsung eingeleitet“ und B_{11} „Bremsung in den Stillstand“ ist dem Kapitel 4.2.2 entnehmbar.

4.4.3 Risikobeurteilung

In diesem Kapitel werden die *Häufigkeiten* für das Eintreten der *Gefährdung* H_2 und des *Unfall* A_2 angegeben.

Weiterhin werden die *Häufigkeiten* einzelner *Sicherheitsbarrieren* unter Berücksichtigung typischer Fragestellungen variiert und die *Häufigkeiten* für das Eintreten von H_2 und A_2 ermittelt.

Die Wahrscheinlichkeiten $S_{H2}(t)$ und $S_{A2}(t)$ für das Eintreten von H_2 und A_2 sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Erläuterungen zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten sind Kapitel 4.2.3 zu entnehmen.

Zur Bewertung der Wirksamkeit einzelner *Sicherheitsbarrieren* B_i ist die Kenntnis der Versagenswahrscheinlichkeit der einzelnen *Minimalpfade* M_i hilfreich. Sie wird als Seriensystem der Versagenswahrscheinlichkeiten der *Sicherheitsbarrieren* B_i nach Gleichung 5 berechnet:

$$\begin{array}{llll}
 M_1 : B_1 & F_1(t = 10^4 h) = 0,9 & \equiv & 90 \% \\
 M_2 : B_2 \rightarrow B_3 & F_2(t = 10^4 h) = 0,00555 & \equiv & 0,56 \% \\
 M_3 : B_9 & F_3(t = 10^4 h) = 0,80 & \equiv & 80 \% \\
 M_4 : B_2 \rightarrow B_{10} \rightarrow B_{11} & F_4(t = 10^4 h) = 0,010510 & \equiv & 1,05 \%
 \end{array}$$

Identifikationsnummer	Situation	Formelzeichen	Wahrscheinlichkeit $F(t = 10^4 h)$ bzw. $S(t = 10^4 h)$			
			1. Alle Elemente wirksam	2. B_1, B_9 nicht wirksam	3. U stets wirksam T_1 häufiger wirksam B_1, B_9 nicht wirksam B_{11} vermindert wirksam	4. B_1, B_2, B_9 nicht wirksam
U	Eingeklemmte Person (Tür nicht vollständig geschlossen)	S_{C1}	0,00995	0,00995	1	0,00995
T_1	Manuelle Überbrückung der Grünschleife	S_{C2}	0,095163	0,095163	0,632121	0,095163
T_2	Stillstand soll verlassen werden	S_{C3}	1	1	1	1
C_H	Häufigkeit des Abschnitts „Risikoerzeugung“	S_{CH}	0,000947	0,000947	0,632121	0,000947
B_1	Selbstbefreiung	F_{B1}	0,9	1	1	1
B_2	Sichtbar im Rückspiegel	F_{B2}	0,00005	0,00005	0,00005	1
B_3	Wird vom Fahrer erkannt und befreit	F_{B3}	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055
B_H	Häufigkeit des Abschnitts „Risikominderung“	F_{BH}	0,004995	0,00555	0,00555	1
H_2	Häufigkeit der Gefährdung	S_{H2}	0,000005 0,0005% suw	0,000005 0,0005% suw	0,003508 0,35% sel	0,000947 0,09% unw
T_3	Anfahren	S_{C4}	1	1	1	1
C_A	Häufigkeit des Abschnitts „Risikoerzeugung“	S_{CA}	0,000005	0,000005	0,003508	0,000947
B_9	Selbstbefreiung	F_{B9}	0,8	1	1	1
B_2	Sichtbar im Rückspiegel	F_{B2}	0,00005	0,00005	0,00005	1
B_{10}	Wird vom Fahrer erkannt und Bremsung eingeleitet	F_{B10}	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055
B_{11}	Bremsung in den Stillstand	F_{B11}	0,004988	0,004988	0,048771	0,004988

Tabelle wird fortgesetzt

Identifikationsnummer	Situation	Formelzeichen	Wahrscheinlichkeit $F(t = 10^4 h)$ bzw. $S(t = 10^4 h)$			
			1. Alle Elemente wirksam	2. B_1, B_9 nicht wirksam	3. U stets wirksam T_1 häufiger wirksam B_1, B_9 nicht wirksam B_{11} vermindert wirksam	4. B_1, B_2, B_9 nicht wirksam
B_A	Häufigkeit des Abschnitts „Risikominderung“	F_{BA}	0,008408	0,01051	0,05405	1
A_2	Häufigkeit des Unfalls	S_{A2}	$4E - 08$ 0,000004% suw	$6E - 08$ 0,000005% suw	0,000190 0,02% unw	0,000947 0,09% unw

Tabelle 5: Häufigkeiten zum Unfall, welcher aus dem Versagen des Erkennens des Einklemmens mittels Grünschleife resultiert

Erste Datenspalte

Die Häufigkeiten der Gefährdung H_2 und des Unfalls A_2 betragen

$$S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,000005 \equiv 0,0005 \%$$

$$S_{A_2}(t = 10^4 h) = 4 \cdot 10^{-8} \equiv 0,000004 \%$$

und entsprechen somit W_5 in der Risikomatrix (Tabelle 2).

Basierend auf der in Kapitel 4 genannten möglichen Schwere, wird die Risikoakzeptanzkategorie „vernachlässigbar“ abgeleitet. Weitere Maßnahmen zur Risikominderung sind nicht erforderlich.

Zweite Datenspalte

Im Bahnbetrieb ermittelte Daten der Versagenswahrscheinlichkeit der Sicherheitsbarrieren B_1 und B_9 „Selbstbefreiung“ liegen oft nicht vor. Es sollen die Häufigkeiten der Gefährdung H_2 und des Unfalls A_2 ermittelt werden, wenn B_1 und B_9 nicht wirksam sind ($F_{B_1} = F_{B_9} = 1$). Die Häufigkeiten betragen

$$S_{H_2}(t = 10^4 h) = 0,000005 \equiv 0,0005 \% \quad S_{A_2}(t = 10^4 h) = 5 \cdot 10^{-8} \equiv 0,000005 \%$$

und entsprechen somit W_5 in der Risikomatrix (Tabelle 2).

Basierend auf der in Kapitel 4 genannten möglichen Schwere, wird die Risikoakzeptanzkategorie „vernachlässigbar“ abgeleitet.

Die fehlende Erhöhung der Häufigkeit von H_2 und A_2 resultiert aus der hohen Versagenswahrscheinlichkeit der Sicherheitsbarrieren B_1 und B_9 (Kapitel 4.2.2) und dem daraus resultierenden vernachlässigbaren Beitrag an der Risikominderung. Weitere Maßnahmen zur Risikominderung sind nicht erforderlich.

Dritte Datenspalte

Die Eintrittswahrscheinlichkeit der *Ursache* U ist ebenfalls oft nicht aus im Bahnbetrieb ermittelten Daten ableitbar. Es soll die *Häufigkeit* der *Gefährdung* H_2 ermittelt werden, wenn U permanent wirksam ist ($S_{C1} = 1$). Weiterhin soll die Eintrittswahrscheinlichkeit des *Auslösers* T_1 „Manuelle Überbrückung der Grünschleife“ um eine Zehnerpotenz ($S_{C2}(t = 10^4 h) = 0,632121$) erhöht werden. Die *Sicherheitsbarrieren* B_1 und B_9 „Selbstbefreiung“ sollen nicht wirksam sein.

Die Versagenswahrscheinlichkeit der *Sicherheitsbarriere* B_{11} „Bremsung in den Stillstand“ wird um eine Zehnerpotenz erhöht.

Die *Häufigkeiten* betragen

$$S_{H2}(t = 10^4 h) = 0,003508 \equiv 0,35 \%$$

$$S_{A2}(t = 10^4 h) = 0,000190 \equiv 0,02 \%$$

und entsprechen somit W_3 für S_{H2} und W_4 für S_{A2} in der Risikomatrix (Tabelle 2).

Basierend auf der in Kapitel 4 genannten möglichen *Schwere*, werden die Risikoakzeptanzkategorien „unerwünscht“ und „tolerierbar“ abgeleitet.

Eine Minderung des *Risikos* „unerwünscht“ ist möglich. Folglich sind Maßnahmen zur Risikominderung erforderlich, um ein akzeptables *Risiko* des *Unfalls* zu erreichen.

Weitere Maßnahmen zur Minderung des *Risikos* „tolerierbar“ sind mit Zustimmung des Bahnunternehmens jedoch nicht erforderlich, um ein akzeptables *Risiko* des *Unfalls* zu erreichen.

Vierte Datenspalte

Einige Bahnunternehmen akzeptieren die *Sicherheitsbarriere* B_2 „Sichtbar im Rückspiegel“ nicht als Bestandteil der Risikominderung. Die Auswirkung auf die *Häufigkeit* der *Gefährdung* H_2 und des *Unfalls* A_2 soll ermittelt werden, indem $F_{B2} = 1$ (nicht wirksam) festgelegt wird. Die *Sicherheitsbarrieren* B_1 , B_9 „Selbstbefreiung“ sollen ebenfalls nicht wirksam sein.

Die *Häufigkeiten* betragen

$$S_{H2}(t = 10^4 h) = 0,000947 \equiv 0,09 \% \quad S_{A2}(t = 10^4 h) = 0,000947 \equiv 0,09 \%$$

und entsprechen somit W_4 in der Risikomatrix (Tabelle 2).

Basierend auf der in Kapitel 4 genannten möglichen *Schwere*, wird die Risikoakzeptanzkategorie „tolerierbar“ abgeleitet. Weitere Maßnahmen zur Risikominderung sind mit Zustimmung des Bahnunternehmens nicht erforderlich.

Dieses Modell verfügt über zwei unabhängige Pfade, bei denen B_9 im ersten Pfad und B_{11} im zweiten Pfad wirkt. Mit Unwirksamkeit beider *Sicherheitsbarrieren* wird der risikomindernde Teil B_A des *Kausalitätsmodells* unwirksam $F_{BA} = 1$.

Die *Häufigkeit* der *Gefährdung* H_2 wird wesentlich von den *Häufigkeiten* der *Ursache* U und des *Auslösers* T_1 bestimmt. Mittels hoher Zuverlässigkeit der technischen Komponenten des Einstiegssystems und der Grünschleifenfunktion kann die *Häufigkeit* von T_1 aktiv beeinflusst werden.

5 Schlussfolgerungen und weiterführende Gedanken

In den vorhergehenden Kapiteln wurde gezeigt, dass ein *Risikomodell* im Sinne der *DIN EN 50 126-2 [11]* erstellbar ist, welches auf der *Zuverlässigkeitsblockdiagrammanalyse* basiert. Es wird als *Kausalitätsmodell* bezeichnet.

Dieses Modell besteht aus den *Ursachen* und *Auslösern*, die den Abschnitt C „Risikoerzeugung“ bilden, den *Sicherheitsbarrieren*, die den Abschnitt B „Risikominderung“ bilden, sowie den resultierenden *Gefährdungen* bzw. *Unfällen*. Es beschreibt den kausalen Zusammenhang zwischen den Eintrittswahrscheinlichkeiten der Elemente des Abschnitts C „Risikoerzeugung“, den Versagenswahrscheinlichkeiten der Elemente des Abschnitts B „Risikominderung“ und der daraus resultierenden Eintrittswahrscheinlichkeit der *Gefährdung* bzw. des *Unfalls*.

Zur Beschreibung des kausalen Zusammenhangs der Elemente des *Kausalitätsmodells* werden *Kausalketten* gebildet, die eine vernetzte Struktur aufweisen können. Aus der vernetzten Struktur ist der konzeptionelle Zusammenhang zwischen den geplanten risikomindernden Maßnahmen und den zufällig risikomindernd wirkenden *Situationen* eindeutig erkennbar.

Die *Häufigkeit* der *Gefährdung* bzw. des *Unfalls* resultiert aus den *Häufigkeiten*, mit denen die Elemente des Abschnitts C „Risikoerzeugung“ wirken und den *Häufigkeiten*, mit denen die Elemente des Abschnitts B „Risikominderung“ versagen. Sie werden mittels Wahrscheinlichkeiten quantifiziert.

Die *Schwere* der *Gefährdung* bzw. des *Unfalls* wird mittels definierter Kategorien beschrieben. Der Anteil der Elemente des *Kausalitätsmodells* wird mittels Wahrscheinlichkeiten quantifiziert.

Das anhand der Parameter *Häufigkeit* und *Schwere* beschriebene *Risiko* der *Gefährdung* bzw. des *Unfalls* wird somit ebenfalls mittels Wahrscheinlichkeiten quantifiziert.

Die Risikoakzeptanz wird anhand einer quantifizierten *Häufigkeits - Schwere - Matrix* (Risikomatrix) bewertet. Sie basiert auf dem Risikoakzeptanzkriterium *Minimale Endogene Mortalität*.

Anmerkungen

Die *Kausalketten* des Abschnitts B „Risikominderung“ bilden beim *Kausalitätsmodell* die erfolgreiche Vermeidung der *Gefährdung* bzw. des *Unfalls* ab. Die vernetzte Struktur der *Sicherheitsbarrieren* entspricht somit der Funktionsstruktur des Fahrzeugs und der organisatorischen Struktur der Einbindung des Fahrzeugs in den Betriebsablauf. Folglich sind die *Kausalketten* intuitiv erstellbar und leicht auf Plausibilität prüfbar.

Die Eintrittswahrscheinlichkeiten der *Ursachen* und *Auslöser*, sowie die Versagenswahrscheinlichkeiten der *Sicherheitsbarrieren* sind sorgsam zu begründen. Wahrscheinlichkeitsaussagen, die nicht auf Daten aus dem Betriebseinsatz beruhen, sind zu kennzeichnen. Ihre Auswirkung auf das *Risiko*, ist kritisch zu prüfen.

In *DIN EN 50 126-2 [11]* werden die Risikoakzeptanzkriterien *ALARP*, *GAMAB* und *MEM* erläutert. Nur das Risikoakzeptanzkriterium *MEM* quantifiziert das *Risiko* explizit. Der Bezug zu belastbaren Daten ist über die Sterbetafel herstellbar.

Weiterführende Gedanken

Beim *Kausalitätsmodell* können die Elemente des Abschnitts *C* „Risikoerzeugung“ nicht unmittelbar mit den Elementen des Abschnitts *B* „Risikominderung“ kombiniert werden. Zur Erhöhung der Flexibilität könnten Lösungsansätze in einem nächsten Schritt untersucht werden.

Die direkte Verwendung von Wahrscheinlichkeiten ist unkomfortabel, da die Werte in Abhängigkeit vom Betrachtungszeitraum verwendet werden. Zur Erhöhung der Komfortabilität ist das mathematische Modell auf die direkte Verwendung von *Ausfallraten* bzw. Fehlhandlungsraten zu erweitern.

Die Stärke des Einflusses der Eintrittswahrscheinlichkeiten der risikoerzeugenden *Situationen* auf die Eintrittswahrscheinlichkeit der *Gefährdung* bzw. des *Unfalls* kann mittels Importanzkenngrößen bewertet werden⁸⁷:

Marginale Importanz „... die Wahrscheinlichkeit, dass sich das System in einem Zustand befindet, in dem die Komponente *i* kritisch ist“ [34, Abschnitt 4.2.2].

Bezogen auf das *Kausalitätsmodell* können somit die Elemente ermittelt werden, die den größten Einfluss auf die Eintrittswahrscheinlichkeit der *Gefährdung* bzw. des *Unfalls* haben.

Fraktionale Importanz „Bei vielen praktischen Anwendungen ist man an der Untersuchung des Einflusses von relativen Änderungen gewisser Komponentenmerkmale interessiert“ [34, Abschnitt 4.2.3].

Bezogen auf das *Kausalitätsmodell* kann somit durch Variation der Eintrittswahrscheinlichkeiten der Elemente die Stärke des Einflusses auf die Eintrittswahrscheinlichkeit der *Gefährdung* bzw. des *Unfalls* bewertet werden.

Kompetitive (Barlow-Proschan-)-Importanz „Verbal ausgedrückt gibt die kompetitive Importanz ... die Wahrscheinlichkeit an, dass ein im Intervall $(0, t)$ erfolgter Systemausfall durch den Ausfall der Komponente *i* bewirkt worden ist“ [34, Abschnitt 4.2.4]. Bezogen auf das *Kausalitätsmodell* kann somit die Wirksamkeit von Kontrollen im Rahmen der Instandhaltung bewertet werden.

Barlow-Proschan-Importanz für Minimalschnitte „Barlow und Proschan ... definieren die Importanz ... eines *Minimalschnittes* C_j als die Wahrscheinlichkeit, dass der Ausfall des *Minimalschnittes* C_j mit dem Systemausfall koinzidiert, d.h. dass ein erfolgter Systemausfall durch den Ausfall des *Minimalschnittes* C_j bewirkt worden ist“ [34, Abschnitt 4.3.1].

Bezogen auf das *Kausalitätsmodell* kann somit der Einfluss des *Minimalschnittes* der Elemente bewertet werden, die das Eintreten der *Gefährdung* bzw. des *Unfalls* verhindern.

Zur qualitativen und quantitativen Bewertung des *Risikos* kann die Anwendbarkeit der Importanzkenngrößen in einem weiteren Schritt untersucht werden.

Die vernetzte Struktur des *Kausalitätsmodells* kann als gerichteter Graph im Sinne der Graphentheorie dargestellt werden, bei dem die Elemente des *Kausalitätsmodells* den Knoten eines Graphen entsprechen. Die Verbindungen zwischen den Elementen entsprechen den gerichteten Kanten des Graphen, deren Richtung von den *Ursachen* zu den *Unfällen* zeigt. Eine Untersuchung des *Kausalitätsmodells* anhand graphentheoretischer Fragestellungen kann in einem nächsten Schritt erfolgen, bei denen die folgenden Aspekte untersucht werden könnten:

- Matching,
- Zusammenhang zwischen Knoten,
- Flüsse und Schnitte in Netzwerken,
- Färbung,
- Durchlaufbarkeit von Graphen (Eulerkreisproblem, Briefträgerproblem, Hamiltonkreisproblem, Problem des Handlungsreisenden),
- Knotenüberdeckung,
- Cliques und
- stabile Menge.

— Leerseite —

A Freie DPPL Lizenz (f-DPPL)

Version 3.0 - November 2008

Copyright ©2004 — 2008 Ministerium für Innovation, Wissenschaft, Forschung und Technologie des Landes Nordrhein-Westfalen

Erstellt von Axel Metzger und Till Jaeger, Institut für Rechtsfragen der Freien und Open Source Software, <http://www.ifross.de>

Präambel

Das Internet hat die Rahmenbedingungen wissenschaftlichen Arbeitens tiefgreifend verändert. Dokumente sind in unüberschaubarer Menge in öffentlich zugänglichen Webangeboten verfügbar. Klassische Wissenschaftsmagazine, wie Fachjournale und Buchpublikationen, werden durch elektronische Angebote ergänzt oder sogar ersetzt. Zugleich geben Wissenschaftler Quellen aller Art in Datennetzen im Wege der Individualkommunikation weiter. Die Digitalisierung ermöglicht die Veränderung von Dokumenten. Dies erleichtert die interaktive Zusammenarbeit von Wissenschaftlern. Ein Prozess, der von den führenden deutschen Forschungsorganisationen mit der Berliner Erklärung (<http://www.zim.mpg.de/openaccess-berlin/berlindeclaration.html>) ausdrücklich unterstützt wird.

Diese neuen Möglichkeiten der Kommunikation gestatten eine dezentrale Verbreitung wissenschaftlicher Inhalte in veränderter oder unveränderter Form - schnell, transparent und forschungsnah. Wissenschaftler sind regelmäßig an der weiten, qualitativ hochwertigen Verbreitung ihrer Forschungsergebnisse interessiert. Die Freie DPPL Lizenz gestattet deshalb die Weitergabe von urheberrechtlich geschützten Werken. Sie ermöglicht darüber hinaus die Veränderung von Werken und die Weitergabe entsprechend veränderter Versionen, um die Zusammenarbeit von Wissenschaftlern zu erleichtern. Diesen Prozess fair und sicher für alle Beteiligten zu gestalten, ist Ziel der Freien DPPL Lizenz.

Die Freie DPPL Lizenz bietet die lizenzrechtliche Grundlage für eine entsprechende Verbreitung von Dokumenten in elektronischer Form, z.B. in E-Journals, oder in körperlicher Form, etwa in Druckform oder auf Trägermedien. Die Nutzung von Werken ist an Pflichten geknüpft. Wer das Werk unverändert weitergibt, muss die Autoren und Rechteinhaber nennen und die verwendeten bibliographischen Angaben beibehalten, um eine einheitliche Zitierweise zu gewährleisten. Wer veränderte Versionen des Werkes nutzt, darf die Autoren der ursprünglichen Version nicht mehr als Urheber benennen, muss aber in geeigneter Weise auf die Vorarbeiten hinweisen. Auch darf das veränderte Werk nur unter den Bedingungen der Freien DPPL Lizenz verbreitet werden.

Diese Lizenzbedingungen verstehen sich als Angebot an jedermann auf Abschluss eines Lizenzvertrages dieses Inhalts. Zwischen Lizenzgeber und Lizenznutzer kommt dadurch ein Vertrag zustande, dass der Nutzer die Rechte aus dem Lizenzvertrag wahrnimmt.

Als Lizenzgeber kommen entweder die Autoren selbst in Betracht, sofern die Rechte an den Werken bei ihnen liegen, oder die sonstigen Inhaber von ausschließlichen Nutzungsrechten

an den Werken, insbesondere Arbeitgeber, Verlage etc. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass die Freie DPPL Lizenz pauschal jede Veränderung des Werks gestattet. Um die Persönlichkeitsrechte des Urhebers zu schützen ist es deshalb rechtlich zwingend erforderlich, dass der Urheber der Benutzung dieser Lizenz stets auch selbst zustimmt, selbst wenn er nicht mehr Inhaber der ausschließlichen wirtschaftlichen Nutzungsrechte sein sollte.

Abschnitt 1: Definitionen

§ 1: Definitionen

In diesem Lizenzvertrag werden die nachfolgend definierten Begriffe einheitlich verwendet:

- (a) „History“: Informationen zu dem Werk, insbesondere zu den Urhebern, zur Entstehungsgeschichte oder zu der Version des Werkes, die unmittelbar in das Werk eingefügt oder ihm in einer eigenen Datei beigefügt werden und die der Information des Nutzers dienen. Die History kann auch Hinweise darauf enthalten, an welchem Ort der Urheber aktuelle Versionen des Werks zur Verfügung stellt oder nachträgliche inhaltliche Korrekturen auführt.
- (b) „Lizenzgeber“: Der Inhaber eines ausschließlichen Nutzungsrechts an dem Werk und/oder der Urheber sowie seine Rechtsnachfolger, die den Abschluss dieses Lizenzvertrages anbieten.
- (c) „Nutzung“: Jede Verwendung des Werkes, für die urheberrechtlich eine Erlaubnis des Urhebers oder des Inhabers eines ausschließlichen Nutzungsrechts erforderlich ist, z.B. die unveränderte oder veränderte Weitergabe des Werkes oder die Bereitstellung zum Download.
- (d) „Offenes Dateiformat“: Ein Dokumentenformat, das in einem für jedermann frei einsehbaren Standard beschrieben ist und von jedermann ohne Beschränkungen und lizenzgebührenfrei in einem Computerprogramm implementiert werden darf. Dies gilt beispielsweise für das Open Document Format (ODF), das Portable Document Format (PDF), DocBook XML und die Hypertext Markup Language (HTML).
- (e) „Sie“: Der Lizenznehmer - jedermann, der diesen Lizenzvertrag abschließt.
- (f) „Veränderte Version“: Jede Version des Werkes, in der Sie oder ein Dritter Veränderungen vorgenommen haben, unabhängig davon, ob die Veränderungen selbst die Schwelle der urheberrechtlichen Schutzfähigkeit erreichen oder nicht. Ausgenommen sind die Fälle, in denen das Gesetz eine zustimmungsfreie Veröffentlichung und einen zustimmungsfreien Vertrieb gestattet („freie Benutzung“).
- (g) „Vervielfältigungsstück“: Ein verkörpertes Werkexemplar, also das Werk in gegenständlicher Form (z.B. als gedrucktes Buch oder auf CD-ROM).
- (h) „Werk“: Das urheberrechtlich geschützte Werk sowie jeder sonstige, urheberrechtlich schutzfähige Gegenstand (insbesondere Datenbanken und Fotografien), an dem Nutzungsrechte durch diesen Lizenzvertrag eingeräumt werden.

Abschnitt 2: Nutzungsrechte

§ 2: Einräumung von Nutzungsrechten an unverändertem Werk

(1) Dieser Lizenzvertrag erlaubt Ihnen, zeitlich und räumlich unbeschränkt das Werk auf beliebigen Trägermedien, insbesondere in Druckform, zu vervielfältigen, zu verbreiten, Dritten auf elektronischem Wege zu übermitteln, z.B. per E-Mail zu übersenden, öffentlich zugänglich zu machen, insbesondere durch Bereitstellung zum Download, und auf andere Weise öffentlich wiederzugeben. Dabei sollen alle bekannten und unbekanntem Nutzungsarten erfasst werden.

(2) Dieser Lizenzvertrag berechtigt Sie ferner, das Werk in elektronische Datenbanken oder sonstige Sammlungen aufzunehmen. Soweit Sie dabei eigene Rechte an Datenbanken oder Sammelwerken erwerben, dürfen Sie diese nicht dafür verwenden, die weitere Nutzung des Werkes zu beschränken oder zu behindern.

(3) Die Einräumung der Nutzungsrechte durch diesen Lizenzvertrag erfolgt lizenzgebührenfrei.

§ 3 Veränderung

(1) Sie dürfen das Werk in beliebiger Weise verändern und das veränderte Werk nach den Bestimmungen von § 2 nutzen. Bei einer Veränderung des Werks sind die geistig-persönlichen Interessen der Urheber zu respektieren, insbesondere hat eine weitere Nennung als Urheber zu unterbleiben (siehe § 6 Abs. 2).

(2) Bei einer Veränderung des Werkes müssen Sie seinen Titel verändern. Hierfür genügt die Aufnahme eines Zusatzes, der die Veränderung des Werkes kenntlich macht (Versionsnummer o.ä.). Sie dürfen den Titel des Werkes nicht verändern, wenn das Werk ansonsten inhaltlich unverändert genutzt wird.

(3) Sie dürfen das Werk gem. § 10 mit anderen Inhalten in der Weise verbinden, dass jedes Werk weiterhin selbständig verwertbar bleibt (z.B. Kombination von Foto und Text).

Abschnitt 3: Nutzungsmodalitäten

§ 4: Keine Pflicht zur unentgeltlichen Weitergabe

Dieser Lizenzvertrag verpflichtet Sie nicht, die Nutzung des Werkes unentgeltlich durchzuführen. Für den Zugang zu dem Werk oder die Verschaffung eines Vervielfältigungsstücks dürfen Sie mit dem Nutzer die Zahlung eines Entgelts vereinbaren. Sie dürfen jedoch nicht die weitere Nutzung durch den Erwerber von Gegenleistungen abhängig machen, da er die dafür erforderlichen Nutzungsrechte nicht von Ihnen erhält, sondern vom Lizenzgeber.

§ 5: Offener Zugang

(1) Wenn Sie das Werk nutzen, dürfen Sie die weitere Nutzung durch Dritte nicht mittels technischer Schutzmaßnahmen, insbesondere durch den Einsatz von Kopierschutzvorrichtungen jeglicher Art, verhindern oder erschweren. Eine passwortgeschützte Zugangsbe-

schränkung oder die Nutzung in einem Intranet wird nicht als technische Schutzmaßnahme angesehen.

(2) Wenn Sie das Dokument in einem offenen Dateiformat erhalten haben, dürfen Sie es nicht ohne vorherige ausdrückliche Zustimmung des Urhebers oder des Inhabers eines ausschließlichen Nutzungsrechts in einem nicht-offenen Dateiformat nutzen. Die Zustimmung soll erteilt werden, wenn wegen des hohen Verbreitungsgrades des Dateiformats ein verbesserter Zugang zu dem Werk zu erwarten ist und sich das Dateiformat für die Präsentation des Werkes eignet.

§ 6: Nennung von Urhebern und Nutzungsrechtsinhabern

(1) Wenn Sie das Werk unverändert nutzen, müssen Sie die Namensnennung von Urhebern - Urheber- oder Copyrightvermerke - in der vorgefundenen Art und Weise übernehmen. Gleiches gilt für die Nennung der Inhaber eines ausschließlichen Nutzungsrechts, sofern diese im Zusammenhang mit dem Werk genannt werden.

(2) Wenn Sie das Werk in veränderter Form nutzen, dann dürfen die Urheber des ursprünglichen Werks nicht als Urheber des veränderten Werks bezeichnet werden. Sie müssen in diesem Fall aber in geeigneter Weise auf die ursprünglichen Urheber hinweisen, z.B. durch den Vermerk „Basierend auf einer Studie von xy“.

(3) Sie können bei einer nicht völlig unerheblichen Veränderung des Werks einen Urheberrechtsvermerk mit Ihrem Namen oder Pseudonym hinzufügen.

(4) Wird das Werk in ein umfassenderes Gesamtangebot eingebunden, etwa in ein Sammelwerk oder eine Datenbank, müssen Sie die Nennung der Urheber und der Inhaber eines ausschließlichen Nutzungsrechts in einer angemessenen und für die Form der Nutzung üblichen Art und Weise sicherstellen.

§ 7: Zitierung

(1) Um trotz der möglichen dezentralen Verbreitung eine einheitliche Zitierweise des Werkes und eine dauerhafte Auffindbarkeit des Dokuments für jedermann zu gewährleisten, dürfen Sie im Rahmen der unveränderten Nutzung des Werkes bibliographische Angaben zur Originalfundstelle weder verändern noch entfernen. Sie dürfen aber zusätzliche bibliographische Angaben hinzufügen.

(2) Wenn Sie das Werk in veränderter Weise nutzen, so müssen Sie die Fundstelle (insbesondere die vollständige Internetadresse) angeben, an der Sie das Werk in der von Ihnen für die Veränderung verwendeten Form erhalten haben.

§ 8: Freigabe von Veränderungen

(1) Wenn Sie das Werk in veränderter Weise nutzen, so müssen Sie die lizenzgebührenfreie Nutzung des gesamten veränderten Werks nach den Bestimmungen der Freien DPPL Lizenz durch jedermann gestatten.

(2) Sollte es sich bei den von Ihnen hinzugefügten Werkteilen um ein neues, selbständiges Werk handeln, welches auch isoliert selbständig verwertet werden kann, so können Sie dieses neue Werk auch unter den Bedingungen einer anderen Lizenz gemeinsam mit dem ursprünglichen Werk nutzen.

(3) Wenn Sie das Werk in Kombination mit einem anderen Inhalt nutzen möchten, der unter einer Creative Commons-Lizenz oder der GNU Free Documentation License lizenziert ist, so ist dies unter den in § 10 geregelten Bedingungen gestattet.

§ 9: Mitlieferung weiterer Informationen

(1) Wenn Sie Nutzungshandlungen vornehmen, die Ihnen aufgrund dieses Lizenzvertrags gestattet sind, müssen Sie dem Werk stets diesen Lizenztext in beiden Sprachfassungen beifügen oder eine Quelle angeben, unter der der Lizenztext auf elektronischem Weg dauerhaft und in üblicher Weise in beiden Sprachfassungen abrufbar ist, bevorzugt durch Download aus dem Internet. Im Internet ist der Lizenztext abrufbar unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0009-fdpp1-v3-de3>.

(2) Hinweise auf diese Lizenz, die der Urheber oder der Inhaber eines ausschließlichen Nutzungsrechts dem Werk hinzugefügt hat, dürfen Sie weder verändern noch entfernen.

(3) Ist dem Werk eine History beigefügt, so dürfen Sie das unveränderte Werk nur gemeinsam mit der vollständigen und unveränderten History weitergeben. Wenn Sie das Werk in veränderter Form nutzen, dann müssen Sie in der History kurz beschreiben, welche Änderungen Sie vorgenommen haben. Sie können dabei einen Urhebervermerk anbringen.

§ 10: Kombination mit anderen Inhalten

(1) Der Lizenzgeber darf das Werk mit einem anderen Inhalt, der unter der Creative Commons-Lizenz „Namensnennung“ („Attribution“) genutzt werden darf, für eine gemeinsame Nutzung verbinden, sofern das Werk und der andere Inhalt weiterhin selbstständig verwertbar bleiben (z.B. Kombination von Text und Foto).

(2) Hat der Lizenzgeber das Werk mit einem anderen Inhalt gemäß Absatz 1 verbunden, dürfen Sie die Hinweise auf die Creative Commons-Lizenz weder verändern noch entfernen und müssen die Lizenzbedingungen der Creative Commons-Lizenz „Namensnennung“ („Attribution“) für den anderen Inhalt beachten.

(3) Wenn Sie das Werk mit einem anderen Inhalt, der unter der Creative Commons-Lizenz „Namensnennung“ („Attribution“) genutzt werden darf, für eine gemeinsame Nutzung verbinden, bei der das Werk und der andere Inhalt weiterhin selbstständig verwertbar bleiben (z.B. Kombination von Foto und Text), so findet diese Lizenz nur auf das Werk Anwendung. Sie dürfen die Hinweise auf die Lizenzbedingungen der Creative Commons-Lizenz „Namensnennung“ („Attribution“) weder verändern noch entfernen und müssen die Lizenzbedingungen für den anderen Inhalt beachten.

(4) Wenn Sie das Werk mit einem anderen Inhalt, der unter der Creative Commons-Lizenz „Namensnennung“ („Attribution“) genutzt werden darf, für eine gemeinsame Nutzung verbinden, bei der das Werk und der andere Inhalt nicht mehr selbstständig verwertbar sind

(z.B. Einfügen von Text in einen anderen Text), müssen Sie die lizenzgebührenfreie Nutzung des gesamten veränderten Werks nach den Bestimmungen der Freien DPPL Lizenz durch jedermann gestatten und zusätzlich die Lizenzbedingungen der Creative Commons-Lizenz beachten.

(5) Wenn Sie das Werk mit einem anderen Inhalt, der unter der Creative Commons-Lizenz „Weitergabe unter gleichen Bedingungen“ („Share Alike“) oder der GNU Free Documentation License genutzt werden darf, durch die Verbindung oder Bearbeitung des vorbestehenden Werkes und Inhalts kombinieren, dürfen Sie das neue Werk insgesamt nur unter den Bedingungen der Creative Commons Lizenz oder der GNU Free Documentation License nutzen.

Abschnitt 4: Abschluss und Beendigung dieses Vertrages; Vorbehalt der gesetzlichen Rechte

§ 11: Vertragsschluss

Dieser Lizenztext ist ein Angebot an Sie, das auf den Abschluss eines Lizenzvertrages zu den in diesem Lizenzvertrag genannten Bedingungen gerichtet ist. Sie können den Lizenzvertrag annehmen, indem Sie die in § 2 des Vertrages genannten Rechte ausüben. Die Annahmeerklärung muss dem Lizenzgeber nicht zugehen.

§ 12: Heimfall der Nutzungsrechte

(1) Wenn Sie die in den §§ 2-10 dieses Vertrages genannten Verpflichtungen verletzen, entfallen automatisch Ihre durch den Lizenzgeber mit diesem Vertrag eingeräumten Nutzungsrechte. Sie dürfen das Werk dann nicht mehr nutzen. Sie können jedoch diesen Vertrag erneut abschließen, wenn Sie dann die Verpflichtungen aus diesem Vertrag einhalten.

(2) Die Nutzungsbefugnisse Dritter, die das Werk von Ihnen erworben haben, werden durch einen Heimfall der Nutzungsrechte nicht berührt.

§ 13: Vorbehalt der gesetzlichen Rechte

(1) Gegenstand dieser Lizenz ist ausschließlich die Einräumung von Nutzungsrechten, um das Werk in unveränderter oder veränderter Form zu vervielfältigen oder zu verbreiten oder der Öffentlichkeit oder einzelnen Personen in elektronischer Form zugänglich zu machen. Nicht in den Anwendungsbereich dieser Lizenz fallen diejenigen Befugnisse zur Nutzung des Werkes, die sich aus den gesetzlichen Beschränkungen des Urheberrechts ergeben, etwa die Vervielfältigung zum privaten Gebrauch, das Zitatrecht etc. Für die Wahrnehmung dieser Befugnisse bedarf es nicht des Abschlusses dieses Lizenzvertrags.

(2) Etwaige gesetzliche Ansprüche des Lizenzgebers wegen der Inanspruchnahme dieser Befugnisse bleiben vorbehalten und können durch Verwertungsgesellschaften wahrgenommen werden (z.B. Pauschalabgaben auf Leermedien).

Abschnitt 5: Haftung und Gewährleistung

§ 14: Haftung und Gewährleistung

Die Haftung des Lizenzgebers Ihnen gegenüber beschränkt sich auf das arglistige Verschweigen von Mängeln.

§ 15: Haftung bei Ansprüchen Dritter

Werden die Vertragsparteien einzeln oder gemeinsam durch Dritte wegen des Inhalts des Werkes auf Schadensersatz und/oder Kosten einer Rechtsverfolgung in Anspruch genommen, so haftet jede Partei im Innenverhältnis entsprechend dem Anteil ihres eigenen Verschuldens. Der Lizenznehmer haftet alleine, wenn der Lizenzgeber in dem Werk eine Quelle angegeben hat, unter der er nachträgliche inhaltliche Korrekturen aufführt, und diejenigen Inhalte, die den Gegenstand der Inanspruchnahme durch Dritte bilden, unter dieser Quelle zum Zeitpunkt der Verletzungshandlung bereits korrigiert oder gelöscht waren.

Abschnitt 6: Der Lizenzvertrag

§ 16: Verhältnis der Sprachversionen

Dieser Lizenzvertrag ist in deutscher und englischer Sprache abgefasst. Beide Fassungen sind gleich verbindlich. Es wird unterstellt, dass die in dem Lizenzvertrag verwandten Begriffe in beiden Fassungen die gleiche Bedeutung haben. Ergeben sich dennoch Unterschiede, so ist die Bedeutung maßgeblich, welche die Fassungen unter Berücksichtigung des Ziels und Zwecks des Lizenzvertrags am besten miteinander in Einklang bringt.

§ 17: Neue Versionen des Lizenzvertrags

(1) Das Ministerium für Innovation, Wissenschaft, Forschung und Technologie des Landes Nordrhein-Westfalen kann mit verbindlicher Wirkung neue Versionen des Lizenzvertrags in Kraft setzen, soweit dies erforderlich und zumutbar ist. Neue Versionen des Lizenzvertrags werden auf der Internetseite <http://www.dipp.nrw.de> mit einer eindeutigen Versionsnummer veröffentlicht. Die neue Version des Lizenzvertrags erlangt für Sie verbindliche Wirkung, wenn Sie von deren Veröffentlichung Kenntnis genommen haben. Gesetzliche Rechtsbehelfe gegen die Änderung des Lizenzvertrags werden durch die vorstehenden Bestimmungen nicht beschränkt.

(2) Sie dürfen diesen Lizenzvertrag in unveränderter Form vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen.

§ 18: Anwendbares Recht

Auf diesen Lizenzvertrag findet deutsches Recht Anwendung.

Anhang

Um jedermann den Abschluss dieses Lizenzvertrages zu ermöglichen, wird empfohlen, das Werk mit folgendem Hinweis auf den Lizenzvertrag zu versehen:

„Jedermann darf dieses Werk unter den Bedingungen der Freien DPPL Lizenz unverändert oder verändert verbreiten und zum Download bereitstellen. Der Lizenztext ist im Internet abrufbar unter der Adresse <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0009-fdpp1-v3-de3>.“ Sofern das Werk mit einem oder mehreren anderen Inhalten verbunden wird, die nach anderen Lizenzbedingungen genutzt werden können (z.B. nach einer Creative Commons-Lizenz oder der GNU Free Documentation License), so wird empfohlen, den Hinweis wie folgt zu ergänzen:

„Inhalte Dritter sind durch entsprechende Hinweise gekennzeichnet und dürfen unter den jeweils angegebenen Lizenzbedingungen genutzt werden.“

Glossar

Ausfallrate

3.23 *Ausfallrate* (en: *failure rate*) — Grenzwert, falls ein solcher existiert, der Verhältnisses zwischen der bedingten Wahrscheinlichkeit, dass der Zeitpunkt T des Ausfalls eines Produktes in ein gegebenes Zeitintervall $(t, t + \Delta t)$ fällt, und der Länge dieses Intervalls Δt , wenn Δt gegen 0 geht, vorausgesetzt, die Einheit ist zu Beginn des Zeitintervalls in betriebsfähigem Zustand

Anmerkung 1 zum Begriff: Ausfallraten werden oftmals als konstant angenommen. Dies ist nicht immer gültig, z. B. bei Komponenten, die (mechanischem, pneumatischem, elektromechanischem usw.) Verschleiß unterliegen.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Benennung 'Ausfallrate' wird häufig im Sinne der 'mittleren Ausfallrate' verwendet, deren Definition in IEC 60050-192:2015, 192-05-07 angegeben ist.

[Quelle: IEC 60050-821:FDIS2016] [10, Abschnitt 3].

Auslöser

Als Auslöser werden alle nichtkontrollierbaren Situationen betrachtet, die bei vorhandener Ursache notwendig sind, um zur Gefahr oder zum Unfall zu führen.

Brainstorming

Bei einem Brainstorming (Sammeln von spontanen Einfällen zur Ideenfindung) wird eine Gruppe von sachkundigen Personen dazu angeregt und ermutigt, in einer frei laufenden Konversation mögliche Ausfallarten und damit verbundene Gefährdungen, Risiken, Entscheidungskriterien und Optionen zur Steuerung und Bewältigung von Risiken zu ermitteln. Der Begriff Brainstorming wird oft sehr locker benützt, um irgendwelche Gruppendiskussionen zu bezeichnen. Zu einem richtigen Brainstorming gehört jedoch eine besondere Technik, welche die Vorstellungskraft der Personen durch die Gedanken, Meinungen und Erklärungen der anderen Gruppenmitglieder spontan anregt. [8, B.1].

disjunkt

Zwei Mengen **A** und **B**, die keine gemeinsamen Elemente besitzen, nennt man disjunkt. Für disjunkte Mengen gibt es auch die Bezeichnungen „elementfremd“ oder „durchschnittsfremd“. Das Wort „disjunkt“ leitet sich dabei vom lateinischen Wort „disiunctum“ ab, was soviel wie „getrennt“ bedeutet.

https://de.wikibooks.org/wiki/Mathe_f%C3%BCr_Nicht-Freaks:_Disjunkte_Mengen_und_paarweise_disjunkte_Mengensysteme.

Disjunktion

Die Disjunktion wird auch inklusives ODER genannt, und mit \vee bezeichnet, z.B. $1 \vee 0 = 1$ [34, Abschnitt 1.1].

disjunktive Normalform

Wir brauchen zuerst den Begriff des Minterms. ... Damit können wir jede Schaltfunktion (Boolesche Funktion) als eine Disjunktion von Mintermen schreiben. Diese wird **disjunktive Normalform** genannt: ... [34, Abschnitt 1.4.1].

Einsatz- und Umgebungsbedingung

Der Betriebs- und Umgebungscontext des betrachteten Systems legt fest, wo und wann sich eine Gefährdung auf der Ebene des betrachteten Systems zu einer Gefährdung auf der Ebene des Bahnsystems entwickeln kann, die einen Unfall verursachen könnte. Eine Gefährdung kann sich in unterschiedlichen Betriebs- und/oder Umgebungscontexten zu unterschiedlichen potenziellen Unfällen entwickeln. Der Betriebs- und Umgebungscontext sollte auch alle Betriebs- oder Umgebungsbedingungen einschließen, die für das Verständnis des Unfallszenarios notwendig sind.

BEISPIEL 1 Ein Betriebscontext kann bestehen aus einem Zug im Normalbetrieb, bei Stillstand im Bahnhof, bei laufender Fahrgastbeförderung. Andere Beispiele für Betriebs- oder Umgebungsbedingungen sind Betrieb nur mit Triebfahrzeugführer, eine Gefällegleisstrecke, eisige Wetterbedingungen, überfüllter Bahnsteig und außerplanmäßig kurze Zugeinheiten.

BEISPIEL 2 Externe umgebungsbedingte Vorfälle, menschliche Handlungen (z. B. Fahrgast drückt den Türöffner), Fallspezifika und Ausfälle von Systemen außerhalb des betrachteten Systems. [11, 8.2.2]

Beispiele: Normalbetrieb, Notbetrieb, Verhalten bei Komponentendefekten, Verhalten bei vorhersehbarem Missbrauch, Verhalten unter Umwelteinflüssen..

Ereignis

Jede Teilmenge E des Ergebnisraums Ω heißt **Ereignis**. ... Ein Ereignis E tritt ein, wenn das Ergebnis ω ein Element von E ist. <http://www.mathebibel.de/ereignis-ereignisraum.html>.

Ereignisanalyse

Mit dem Begriff Ereignisanalyse bezeichnen wir statistische Verfahren zur Untersuchung von Zeitintervallen zwischen aufeinanderfolgenden Zustandswechseln beziehungsweise Ereignissen. Die von den Untersuchungseinheiten eingenommenen Zustände sind dabei abzählbar, und die Ereignisse können zu beliebigen Zeitpunkten eintreten. Es handelt sich also um statistische Verfahren zur Analyse stochastischer Prozesse mit diskreten Zuständen und stetiger Zeit. [24, Abschnitt 1].

Ergebnis

Der Ausgang eines Zufallsexperiments heißt Ergebnis ω .
<http://www.mathebibel.de/ergebnis-ergebnisraum.html>.

Ergebnisraum

Die Menge **aller** möglichen Ergebnisse heißt Ergebnisraum Ω .
<http://www.mathebibel.de/ergebnis-ergebnisraum.html>.

Gefährdung

3.28 Gefährdung (en: hazard) — Zustand, der zu einem Unfall führen kann
Anmerkung 1 zum Begriff: Die entsprechende Definition in [IEC 60050-903:2013, 903-01-02] bezieht sich nicht auf 'Unfall' (en: accident), sondern auf 'Schaden' (en: harm). [10].

Gefährdungsanalyse

3.29 *Gefährdungsanalyse* (en: *hazard analysis*) — Prozess der Identifizierung von Gefährdungen und der Analyse von deren Ursachen sowie der Ableitung von Anforderungen, um die Wahrscheinlichkeit und die Folgen von Gefährdungen auf ein vertretbares Maß zu begrenzen

Anmerkung 1 zum Begriff: Ähnliche Prozessaspekte werden auch bei der Risikobewertung betrachtet. In der vorliegenden Norm wird dieser Begriff in den Lebenszyklusphasen nach der 'Festlegung von Anforderungen' angewendet.

[QUELLE: IEC 60050-821: FDIS 2016, 821-11-23] [10].

Gefährdungsrate

3.31 *Gefährdungsrate* (en: *hazard rate*) — Rate des Auftretens einer Gefährdung

Anmerkung 1 zum Begriff: Zum detaillierten mathematischen Verständnis von 'Rate' siehe die Definition der 'Ausfallrate'. [10].

Häufigkeit

Die Häufigkeit gibt an, wie oft ein *Unfall* bzw. eine *Gefährdung* im Betrachtungszeitraum auftritt (auftreten darf).

Anmerkung (Bellair): Die Häufigkeit ist in *DIN EN 50 126-1* [10] nicht exakt definiert. Aus den bestehenden Erläuterungen lässt sich jedoch unter Berücksichtigung der Übersetzungen auf Beolingus (<http://dict.tu-chemnitz.de/> schließen, dass sie im Sinne der Wahrscheinlichkeitstheorie zu verwenden ist (frequency: „Häufigkeit{f}[math.][statist.]“ bzw. probability: „Wahrscheinlichkeit{f}[math.]“):

... im qualitativen Sinne typische Kategorien für die Wahrscheinlichkeit oder die Häufigkeit des Auftretens von Ereignissen ... [10, Anhang C].

individuelles Risiko

Das Individuum ist primär am Grad der eigenen Gefährdung interessiert. Diese wird durch das individuelle Risiko r_i dargestellt und entspricht der Todesfallwahrscheinlichkeit einer Einzelperson (z.B. pro Jahr):

$$r_i = \sum_j w_j \cdot v_{ij} \cdot \lambda_{ij}$$

wobei

w_j die Eintretenswahrscheinlichkeit eines Ereignisses j ,

v_{ij} die Wahrscheinlichkeit, dass eine Person i beim Ereignis j anwesend ist,

λ_{ij} die Wahrscheinlichkeit, dass eine Person i beim Ereignis j getötet wird

bedeuten. [30, Abs. 3.4].

Kausalitätsmodell

Das *Kausalitätsmodell* ist ein *Risikomodell* im Sinne der *DIN EN 50 126-2* [11], welches zur *Risikoanalyse* im Bahnsystem eingesetzt werden kann. Mittels *Kausalketten* wird der vernetzte Zusammenhang zwischen *Ursachen*, *Auslösern*, *Sicherheitsbarrieren*, *Gefährdungen* und *Unfällen* hergestellt.

Die Modellierung der *Kausalketten* basiert auf der *Zuverlässigkeitsblockdiagrammanalyse*..

Kausalkette

Kausalkette — Beispiel: Dominosteine: Das Umfallen des ersten Steins bewirkt das Umfallen des zweiten Steins; dieses Umfallen bewirkt wiederum das zeitlich darauffolgende Umfallen des dritten usw. – bis der letzte Stein umgefallen ist. In einer Kausalkette bewirkt ein Ereignis ein anderes, das selbst wiederum ein weiteres Ereignis bewirkt usw. – bis das letzte Ereignis der Kette bewirkt wurde. Die Ursachen sind in ihr streng zeitlich nacheinander gereiht und durchweg voneinander abhängig. Der Kausalzusammenhang wird auch als Kausalnexus bezeichnet siehe <http://de.wikipedia.org/wiki/Kausalität>.

empfundenes (kollektives) Risiko

Das empfundene (kollektive) Risiko R_e berucktigt zusätzlich eine sogenannte Risikoaversion:

$$[2ex] \quad R_e = \sum_j w_j \cdot A_j \cdot \varphi(A_j)$$

[2ex] Durch den Aversionsfaktor $\varphi(A)$ werden Unfälle mit zunehmender Anzahl Opfer stärker gewichtet [30, Abs. 3.4].

kollektives Risiko

Das kollektive Risiko R_o zeigt den Standpunkt der Allgemeinheit und gibt die Zahl der Opfer an, die beim Betrieb eines Systems (z.B. pro Jahr) zu erwarten ist. Das kollektive Risiko R_o entspricht dem Wert, der in Unfallstatistiken erscheint:

$$[2ex] \quad R_o = \sum_j w_j \cdot A_j = \sum_i r_i$$

wobei

w_j die Eintretenswahrscheinlichkeit eines Ereignisses j ,

A_j die Anzahl der Todesopfer beim Ereignis j ,

bedeuten.

Dieser statistische Schadenerwartungswert ist identisch mit der Summe der individuellen Risiken r aller Betroffenen [30, Abs. 3.4].

Konjunktion

Die Konjunktion wird auch UND genannt, und mit \wedge bezeichnet, z.B. $1 \wedge 0 = 0$ [34, Abschnitt 1.1].

Negation

Die Negation wird auch NICHT genannt, und mit $\bar{}$ bezeichnet, z.B. $\bar{1} = 0$ [34, Abschnitt 1.1].

Konsequenzanalyse

3.13 Konsequenzanalyse (en: consequence analysis) — Analyse von Ereignissen, die passieren könnten nachdem eine Gefährdung aufgetreten ist [QUELLE: IEC 60050-821: FDIS 2016, 821-12-14] [10].

Markoffanalyse

Beim Markoff-Verfahren wird ein Zustandsdiagramm verwendet, welches eine bildhafte Darstellung der Funktionsfähigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit oder Sicherheit eines Systems ist. Damit kann das zeitliche Verhalten des Systems modelliert werden. In dieser Internationalen Norm wird als System eine Anzahl von Einheiten bezeichnet, die ihrerseits jeweils nur zwei Zustände besitzen können: ausgefallen oder funktionsfähig. Das System als Ganzes kann dagegen in vielen Zuständen sein, jeder Zustand ist durch eine bestimmte Kombination von ausgefallenen und funktionsfähigen Einheiten gekennzeichnet. Wenn also eine Einheit ausfällt oder wenn sie repariert wird, geht das System von einem Zustand in den nächsten über. Diese Art von Modell wird allgemein als ein diskretes Zustandsmodell mit kontinuierlichem Zeitablauf bezeichnet. Aufgrund der Darstellung des Modells ist die zugehörige Methodik auch ein Sonderfall der 'Zustandsraum'-Analyse.

Die Untersuchung des Zustandsraumes ist besonders geeignet zur Bewertung von Systemen mit Redundanz, von Systemen, bei denen der Systemausfall von der Reihenfolge der Ereignisse abhängt und von Systemen mit komplexen Instandhaltungsstrategien wie z.B. priorisierte Wiederherstellung, Warteschlangenprobleme und Mitteleinschränkungen. Bei der Analyse sollte sichergestellt werden, dass das Modell den Betrieb des realen Systems hinsichtlich der Strategien und Vorgaben zur Instandhaltung in angemessener Weise widerspiegelt ... [16, Abschnitt 5].

Minimalpfad

Es sei $K = (K_1, K_2, \dots, K_n)$ die Menge der Komponenten eines kohärenten Systems S Eine Teilmenge U von M derart, dass S intakt ist, wenn alle in U enthaltenen Komponenten intakt und alle nicht in U enthaltenen Komponenten defekt sind, heißt ein **Pfad**. Ein Pfad heißt **minimal**, wenn er keine anderen Pfade als echte Teilmengen enthält. Diesen nennen wir **Minimalpfad** T_j . [34, Abschnitt 2.3].

Minimalschnitt

Es sei $K = (K_1, K_2, \dots, K_n)$ die Menge der Komponenten eines kohärenten Systems S Eine Teilmenge V von M derart, dass S defekt ist, wenn alle in V enthaltenen Komponenten defekt und alle nicht in V enthaltenen Komponenten intakt sind, heißt ein **Schnitt**. Ein Schnitt heißt **minimal**, wenn er keine anderen Schnitte als echte Teilmengen enthält. Diesen nennen wir **Minimalschnitt** C_j . [34, Abschnitt 2.3].

Minterm

Ein Minterm ist eine Konjunktion (Boolesches Produkt) von n Variablen: $p = \dot{x}_1 \wedge \dot{x}_2 \wedge \dots \wedge \dot{x}_n$. Dabei ist \dot{x}_i entweder x_i oder \bar{x} (nicht negiert oder negiert) für $i = 1, 2, \dots, n$. Die Eigenschaft eines Minters ist es, dass er für genau eine Wertzuweisung der Variablen x_1, x_2, \dots, x_n den Wert 1 annimmt. [34, Abschnitt 1.1].

Monokausalität

Bei Monokausalität verursacht genau ein (altgr. mono 'alleinig', 'einziges') Ereignis ein anderes Ereignis. Es ist auch möglich, dass dieses eine Ereignis mehrere Wirkungen entfaltet.

Beispiel für eine Wirkung: Ein schwerer Stein löst sich und fällt (Ursache) auf ein Glasdach, wodurch die Glasscheibe zerplatzt (Wirkung).

Beispiel für mehrere Wirkungen: Eine Explosion (Ursache) lässt die Glasscheibe zerplatzen (Wirkung), reißt aber zusätzlich noch die Hauswand ein (Wirkung) und sprengt ein Loch in den Vorgarten (Wirkung) siehe <http://de.wikipedia.org/wiki/Kausalität>.

Multikausalität

Bei Multikausalität sind mehrere (lat. multi 'viele') Ursachen im Spiel. Sie bewirken ein oder auch mehrere Ereignisse.

Beispiel: Ein schwerer Stein löst sich und fällt (Ursache) auf ein Schieferdach. Gleichzeitig stürzt ein Baum (Ursache) auf das Dach. Es bricht zusammen (Wirkung) siehe <http://de.wikipedia.org/wiki/Kausalität>.

Norm — DIN EN ISO 12 100 [21]

Der Hauptzweck dieser Internationalen Norm besteht darin, Konstrukteuren einen Gesamtüberblick und eine Anleitung für während der Entwicklung von Maschinen zu treffende Entscheidungen zu geben, um diesen die Konstruktion von Maschinen zu ermöglichen, die für ihre bestimmungsgemäße Verwendung sicher sind. [21].

Norm — DIN EN 31 010 [8]

Die Risikobeurteilung soll dazu dienen, Informationen und Analysen auf der Grundlage von Beweisen zu erhalten, anhand derer nachvollziehbare Entscheidungen getroffen werden können, wie bestimmte Risiken zu behandeln sind und wie zwischen verfügbaren Optionen ausgewählt werden kann. [8].

Norm — DIN EN 50 126-1 [9]

*Mit dieser Europäischen Norm wird den Bahnunternehmen und der Bahnindustrie sowie ihren Zulieferern in der Europäischen Gemeinschaft ein Verfahren zur konsequenten Anwendung eines Managements für Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit, abgekürzt als **RAMS**, zur Verfügung gestellt. [9].*

Norm — DIN EN 50 126-1 [10]

Diese Europäische Norm wurde vom Technischen Komitee CLC/TC 9X 'Elektrische und elektronische Anwendungen für Bahnen' erarbeitet. ... Dieses Dokument ersetzt EN 50126-1:1999 welches technisch überarbeitet wurde.

EN 50126 'Bahnanwendungen — Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS)' besteht aus folgenden Teilen:

- Teil 1: Generischer RAMS Prozess;
- Teil 2: Systembezogene Sicherheitsmethodik.

[10, Europäisches Vorwort].

Norm — CLC/TR 50 126-2 [5]

A guide to the application of EN 50126-1 for safety of railway systems (this CLC/TR 50126-2) and a guide for the application to EN 50126-1 for rolling stock RAM (CLC/TR 50126-3:2006) have been produced to form informative parts of EN 50126-1:1999. Whilst this CLC/TR 50126-2 is applicable to all railway systems,

including rolling stock, CLC/TR 50126-3:2006 is applicable to rolling stock RAM only. [5].

Norm — DIN EN 50 126-2 [11]

Dieses Dokument (EN 50126-2:2017) wurde vom Technischen Komitee CLC/TC 9X 'Elektrische und elektronische Anwendungen für Bahnen' erstellt. ... Dieses Dokument ersetzt CLC/TR 50126-2:2007. ...

Die frühere Ausgabe von CLC/TR 50126-2:2007 wird durch die neuen Editionen EN 50126-1:2017 und EN 50126-2:2017 überholt; Der Grund dafür ist, dass der Anwendungsbereich des vorliegenden Teils im Vergleich zur ersetzten Ausgabe geändert wurde ...

EN 50126, Bahnanwendungen — Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS), beinhaltet die folgenden Teile:

- *Teil 1: Generischer RAMS-Prozess;*
- *Teil 2: Systembezogene Sicherheitsmethodik.*

[11, Europäisches Vorwort].

Norm — DIN EN 60 300-3-1 [12]

Dieser Teil von IEC 60300 enthält einen allgemeinen Überblick über die üblicherweise verwendeten Verfahren zur Analyse der Zuverlässigkeit. Die jeweils übliche Methodik, deren Vor- und Nachteile, benötigte Eingabedaten und sonstige Bedingungen für die Verwendung der verschiedenen Techniken werden beschrieben. Diese Norm ist eine Einführung in ausgewählte Verfahren und stellt die für die Auswahl der geeignetsten Analyseverfahren benötigten Informationen bereit. [12].

Norm — DIN IEC 61 165 [16]

Diese Internationale Norm enthält Anleitungen zur Anwendung des Markoff-Verfahrens für die Modellierung und Analyse eines Systems und zur Schätzung der Zuverlässigkeitsmaßgrößen (Funktionsfähigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit) und Sicherheitsmaßgrößen. Diese Norm ist in industriellen Bereichen anwendbar, in denen Zustandsabhängiges Verhalten von Systemen zu analysieren ist. Bei den in dieser Norm behandelten Markoff-Verfahren werden zeitlich konstante Übergangsraten angenommen. Solche Verfahren werden auch als homogene Markoff-Verfahren bezeichnet [16, Abschnitt 1].

Norm — DIN EN 62 267 [18]

Diese Norm ist ein generischer Leitfaden, der Empfehlungen zur Verfügung stellt, um Verkehrsunternehmen und Aufsichtsbehörden bei der Bestimmung von geeigneten Sicherheitsanforderungen für AUGT-Systeme zu unterstützen. Die in dieser Norm empfohlenen generischen Anforderungen beruhen auf gewonnenen Erfahrungen von bereits in Betrieb befindlichen AUGT-Systemen. Sicherheitsanforderungen für jede spezifische Anwendung können jedoch nur von den Ergebnissen einer Risikoanalyse abgeleitet werden, die die spezifischen Bedingungen berücksichtigt, in denen

das AUGT-System errichtet wird, und die auf den für das lokale Umfeld maßgebenden Risikoakzeptanzprinzipien beruhen. Die zum obligatorischen und umfassenden Durchführen einer Risikoanalyse für ein AUGT-System geeignete Norm stellt IEC 62278 (RAMS) dar. [18].

Norm — DIN EN 62 551 [20]

Diese Internationale Norm stellt die grundlegende Methodologie zur Darstellung der Grundelemente von Petrinetzen (PN) ... dar und enthält Leitlinien für ihre Anwendung in der Zuverlässigkeitsdomäne.

Die wesentliche Modellierungsstärke von Petrinetzen basiert auf der Beschreibung des globalen kausalen Verhaltens eines Systems durch Modellieren der Beziehungen zwischen lokalen Zuständen und lokalen Ereignissen. Vor diesem Hintergrund haben Petrinetze breite Akzeptanz in allen Industriezweigen gefunden ...

Im Vergleich zu anderen automatenbasierten Zuverlässigkeitsmethoden (z. B. Markov-Methode) erlaubt das eindeutige Modellieren von lokalen Zuständen und auch von lokalen unabhängigen Ereignissen ein angemessenes und intuitives Modellieren von Systemen und deren Dynamik (Störungsbäume oder Zuverlässigkeits-Block-Diagramme). Darüber hinaus wird die Modellierung von stochastischem Verhalten nicht auf exponentialverteilte Eigenschaften beschränkt (Markov-Prozesse), sondern kann frei gewählt werden. [20, Einleitung].

Petrinetz

Die wesentliche Modellierungsstärke von Petrinetzen basiert auf der Beschreibung des globalen kausalen Verhaltens eines Systems durch Modellieren der Beziehungen zwischen lokalen Zuständen und lokalen Ereignissen. Vor diesem Hintergrund haben Petrinetze breite Akzeptanz in allen Industriezweigen gefunden ... [20, Einleitung]

Petrinetze (PN) sind Graphen, in denen aktive und passive Knoten unterschieden werden. Die passiven Knoten werden Stellen genannt und modellieren z.B. lokale Zustände oder Bedingungen und werden mit Token markiert, falls der lokale Zustand erfüllt ist. Die aktiven Elemente nennt man Transitionen. Sie modellieren die möglichen Übergänge von einem Zustand zu einem anderen. (d. h. die potentiellen Zustandsübergänge). Stellen und Transitionen können Knoten genannt werden. Die kausalen Beziehungen zwischen den Stellen und Transitionen werden durch verschiedene Arten von gerichteten Kanten, die die Knoten verbinden, beschrieben (...). Inhibitorkanten können nur von Stellen zu Transitionen führen (...).

Eine Transition ist schaltbereit, wenn alle ihre Eingangsstellen, die mit Normal- oder Testkanten verbunden sind, eine ausreichende Anzahl von Token tragen und alle Eingangsstellen, die mit einer Inhibitorkante verbunden sind, mit 'hinreichend wenigen' Token markiert sind. Die Anzahl der benötigten Token, um eine Transition zu aktivieren, ist an der Kante notiert. All gemein gilt hierbei, dass diese Kennzeichnung von der Belegung der Markierung abhängen kann ... [20, Abschnitt 5].

Risiko

3.57 Risiko (en: risk, <for railway RAMS>) Kombination aus erwarteter Häufigkeit eines Verlustes ... und erwartetem Schweregrad dieses Verlustes [10].

Risikoanalyse

3.58 Risikoanalyse (en: risk analysis) systematische Auswertung verfügbarer Informationen, um Gefährdungen zu identifizieren und das Risiko einzuschätzen

[Quelle: ISO/IEC Guide 51:2014, 3.10]

[Quelle: IEC 60050-903:2013, 903-01-08] [10].

Risikobeurteilung

3.59 Risikobeurteilung (en: risk assessment) Gesamtheit des Verfahrens, das Risikoanalyse und Risikobewertung umfasst

[QUELLE: ISO/IEC Guide 51:2014, 3.12]

[QUELLE: IEC 60050-903:2013, 903-01-10] [10].

Risikomodell

Sofern dies zur Unterstützung der Gefährdungsermittlung, der Gefährdungsklassifizierung und der gewählten Risikoakzeptanzprinzipien notwendig ist, sollte ein Risikomodell definiert werden. Ursachen, Gefährdungen und Unfälle stehen in einer m:n-Beziehung (en: many-to-many relationship), wie z. B.:

- Eine einzelne Ursache kann mehrere unterschiedliche Gefährdungen auslösen (oder dazu beitragen);
- eine Gefährdung kann durch mehrere, unterschiedliche Ursachen ausgelöst werden;
- eine Gefährdung kann in unterschiedlichen Betriebs- und Umgebungskontexten zu unterschiedlichen Unfallarten führen;
- ein Unfall kann in unterschiedlichen Betriebs- und Umgebungskontexten unterschiedliche Auswirkungen haben.

[11, 8.2.2].

Schwere

Die Schwere ist ein Ausdruck des Ausmaßes des Gesundheitsschadens beim Eintreten des Unfalls.

Anmerkung (Bellair): Die Schwere ist in *DIN EN 50 126-1* [10] nicht exakt definiert. In den bestehenden Beispielen wird sie einerseits auf den Grad der Verletzung (Todesfall, Schwerverletzter, Leichtverletzter) und andererseits auf die Anzahl der gleichzeitig betroffenen Personen bezogen (*Tabelle C.4 — Schweregradkategorien (Beispiel 1 mit Bezug auf RAMS)* oder *Tabelle C.5 — Schweregradkategorien (Beispiel 2 mit Bezug auf die Sicherheit)* [10, Anhang C.3]).

Sicherheit

3.64 Sicherheit (en: safety) Freiheit von inakzeptablem Risiko

Anmerkung 1 zum Begriff: Risiko in Bezug auf die menschliche Gesundheit oder die Umwelt.

[QUELLE: IEC 60050-903:2013, 903-01-19] [10].

Sicherheitsbarriere

3.66 Sicherheitsbarriere (en: safety barrier) — jedes physische oder nicht-physische Hilfsmittel, das die Häufigkeit einer Gefährdung und/oder eines wahrscheinlichen, aus der Gefährdung resultierenden Unfalls verringert und/oder den Schweregrad von wahrscheinlichen, aus der Gefährdung resultierenden Unfällen abschwächt

Anmerkung 1 zum Begriff: Dieser Begriff kann in ähnlicher Weise auf RAM-Aspekte angewendet werden. [10]

Anmerkung (Bellair): Als Sicherheitsbarrieren werden alle geplanten risikomindernden Maßnahmen und zufällig wirkenden risikomindernden Situationen betrachtet.

Sicherheitsfunktion

3.68 Sicherheitsfunktion (en: safety function) Funktion, deren alleiniger Zweck die Sicherstellung der Sicherheit ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Eine sicherheitsbezogene Funktion ist eine Funktion, deren Ausfall sich nachteilig auf die Sicherheit auswirkt (zu Einzelheiten siehe die Definition von 'sicherheitsbezogen'). Deshalb sind alle Sicherheitsfunktionen sicherheitsbezogene Funktionen, aber nicht alle sicherheitsbezogenen Funktionen sind Sicherheitsfunktionen.

Anmerkung 2 zum Begriff: Eine Sicherheitsfunktion kann zu einer oder mehr Sicherheitsbarrieren beitragen. Jedoch wird eine Sicherheitsbarriere nicht notwendigerweise durch eine Sicherheitsfunktion realisiert. [10].

Situation

Zur Vermeidung einer von der Wahrscheinlichkeitstheorie abweichenden Interpretation des Begriffes „Ereignis“ wird stattdessen der Begriff „Situation“ verwendet. Er wird kontextabhängig als Verallgemeinerung einer *Ursache*, einer *Sicherheitsbarriere*, eines *Auslösers*, einer *Gefährdung* und eines *Unfalls* verwendet.

Eine Situation repräsentiert eine Aktivität (z.B. Handlung, Funktion, Zustandsänderung) ebenso, wie einen Zustand (ein möglicherweise zeitlich begrenztes, innerhalb des Betrachtungszeitraumes ständig wirkendes Umfeld, z.B. Temperatur, Spannung, Materialeigenschaft, usw.).

Straßenbahnfahrzeug

Straßenbahnen verkehren im Verkehrsraum öffentlicher Straßen entweder auf straßenbündigen (eingepflasterten) Strecken oder auf besonderen und unabhängigen Bahnkörpern. Straßenbahnen fahren in der Regel auf Sicht, die Verkehrsregeln und Verkehrszeichen der Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) sind zu beachten. Darüber hinaus gelten Signale und Zeichen der BOStrab bzw. der darauf aufbauenden örtlichen Signalordnung (SO). [35].

Strukturfunktion

Man kann manche Probleme durch eine direkte Anwendung der Wahrscheinlichkeitsrechnung behandeln. Es ist jedoch auch möglich, eine formale Strukturbeschreibung mit Hilfe einer sogenannten Strukturfunktion einzuführen, wobei der Zustand des Systems in Abhängigkeit von den Zuständen der Komponenten eindeutig festgelegt wird. [34].

Unfall

3.2 Unfall (en: accident) nicht beabsichtigte(s) Ereignis oder Reihe von Ereignissen mit der Folge von Verlusten an Menschenleben, gesundheitlichen Schäden, Beschädigung von Eigentum oder Umweltschäden

[Quelle: IEC 60050-821: FDIS2016, 821-12-02] [10].

Universelle Gefahrenanalyse für Stadtbahnfahrzeuge [4]

In diesem Dokument wird eine realisierungsunabhängige und in diesem Sinne universelle Gefahrenanalyse für Stadtbahnfahrzeuge dargestellt. Ausgehend von den im direkten Zusammenhang mit Stadtbahnfahrzeugen stehenden Gesundheitsschäden und Umweltschäden werden die zugeordneten Gefahren dargestellt. [4].

Ursache

Als Ursache werden alle Situationen bezeichnet, die eine Gefahr hervorrufen können.

Ursache-Folgen-Analyse

Die Ursache-Folgen-Analyse ist eine Kombination von Fehlzustands- und Ereignisbaumanalyse. Man beginnt bei einem kritischen Ereignis und analysiert die Folgen mittels einer Kombination von Ja/Nein-Logikgattern. Diese repräsentieren Bedingungen, die eintreten können, oder repräsentieren Ausfälle von Sicherungssystemen, die geschaffen worden waren, um die Folgen des auslösenden Ereignisses abzuschwächen. Die Ursachen solcher Bedingungen oder Ausfälle werden mittels Fehlzustandsbäumen analysiert ... [8, B.16].

Ursache-Wirkung-Analyse

Die Ursache-Wirkung-Analyse ist ein strukturiertes und bildhaftes Verfahren zum Darstellen möglicher Ursachen eines unerwünschten Ereignisses oder Problems. Bei diesem Verfahren werden die beitragenden Faktoren in breit angelegten Kategorien organisiert, so dass alle möglichen Hypothesen untersucht werden können. Die Ursache-Wirkung-Analyse zeigt aber nicht selbst auf die tatsächlichen Ursachen, da diese nur durch wirkliche Beweise und empirisches Testen der Hypothesen bestimmt werden können. Die Informationen werden entweder in einem Fischgräten-Diagramm (auch Ishikawa-Diagramm genannt) oder manchmal auch in einem Baumdiagramm dargestellt [8, B.17].

Wahrscheinlichkeitsverteilung

Eine **Wahrscheinlichkeitsverteilung** gibt an, wie sich die Wahrscheinlichkeiten auf die möglichen Werte einer Zufallsvariablen verteilen.

<http://www.mathebibel.de/wahrscheinlichkeitsverteilung.html>.

Was-Wenn-Verfahren

Das 'was-wenn'-Verfahren ist ein induktives Verfahren. Für relativ einfache Anwendungen werden Konstruktion und Betrieb der Maschine untersucht. Bei jedem Schritt werden 'was-wenn'-Fragen gestellt und beantwortet, um die Wirkung des Ausfalls von Maschinenelementen oder von Verfahrensfehlern hinsichtlich der durch die Maschine hervorgerufenen Gefährdungen bewerten zu können. [7].

Zufallsexperiment

Ein Zufallsexperiment ist ein Versuch mit zufälligem Ausgang.

Ein Versuch heißt Zufallsexperiment, falls

- (a) er unter gleichen Bedingungen beliebig oft wiederholbar ist,*
- (b) alle möglichen Ergebnisse vor Durchführung bekannt sind und*
- (c) sein Ergebnis sich nicht mit Sicherheit vorhersagen lässt.*

<http://www.mathebibel.de/zufallsexperiment.html>.

Zufallsvariable

Lass dich von dem Wort Zufallsvariable nicht verwirren! Eine Zufallsvariable X ist keine Zahl, die in einem Zufallsexperiment zufällig herauskommt, sondern eine Funktion, die jedem zufällig entstehenden Ergebnis ω einen ganz genau bestimmten Zahlenwert x zuordnet: $X : \omega \rightarrow x$.

<http://www.mathebibel.de/zufallsvariable.html>.

Zuverlässigkeitsblockdiagrammanalyse

Ein Zuverlässigkeitsblockdiagramm (ZBD) ist eine bildhafte Darstellung der Funktionsfähigkeit eines Systems. Es zeigt die logische Verknüpfung der (funktionierenden) Komponenten, die zur Erzielung des erfolgreichen Betriebs des Systems (nachfolgend mit „Systemerfolg“ bezeichnet) erforderlich ist. [15, Einleitung]

Die ZBD-Technik der Modellerstellung ist primär für die Anwendung auf solche Systeme gedacht, die nicht repariert werden und bei denen die Reihenfolge der Ausfälle keine Rolle spielt. Bei Systemen, bei denen die Reihenfolge der Ausfälle berücksichtigt werden muss oder bei denen Reparaturen ausgeführt werden, sind andere Techniken der Modellerstellung, wie z. B. die Markoffanalyse, besser geeignet. [15, Abschnitt 1].

Akronyme

ALARP

Erlegt eine relative Verpflichtung auf, die besagt, dass das Bahnunternehmen alle Sicherheitsmaßnahmen anwenden sollte, die das Risiko auf das Maß ALARP verringern. Falls die Kosten einer Maßnahme unter Berücksichtigung aller Unschärfen der Risikoschätzwerte als nicht unverhältnismäßig zum Zugewinn an Sicherheit beurteilt werden, gilt die Maßnahme als notwendig zur Verringerung des Risikos auf das Maß ALARP. [11, Tabelle A.1].

DCCA

... Deductive Cause-Consequence Analysis (DCCA). This technique is a formal generalization of well-known safety analysis methods like FMEA, FMECA and FTA. The logical framework of DCCA may be used to rigorously verify the results of these informal safety analysis techniques. [23].

ETA

Die Ereignisbaumanalyse (ETA) ist ein induktives logisches Verfahren, um die möglichen Ergebnisse zu modellieren, die sich aus dem Eintritt eines gegebenen Startereignisses und dem Zustand der schadensmindernden Faktoren ergeben; außerdem können die verschiedenen möglichen Ergebnisse eines gegebenen Startereignisses identifiziert und deren Häufigkeit oder Wahrscheinlichkeit bewertet werden. ...

Ausgehend vom Startereignis beschäftigt sich die Ereignisbaumanalyse mit der Frage „Was geschieht, falls ...“. Infolgedessen entwirft der Analytiker eine Art Baum mit den verschiedenen möglichen Ergebnissen. Daher ist es entscheidend, dass eine umfassende Liste der Startereignisse aufgestellt wird; somit kann sichergestellt werden, dass die Ereignisbäume alle wichtigen Ereignisfolgen des betrachteten Systems korrekt darstellen. Mit Hilfe dieser Vorwärtslogik kann die Ereignisbaumanalyse als Methode bezeichnet werden, die die schadensmindernden Faktoren, die einem Startereignis folgen, darstellt; hierbei können angemessene schadensmindernde Faktoren berücksichtigt werden. [19, Abschnitt 4].

FMECA

Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA) ist ein systematisches Vorgehen bei der Analyse eines Systems, um mögliche Fehlzustandsarten, ihre Ursachen und ihre Auswirkungen auf das Systemverhalten zu ermitteln (Verhalten der übergeordneten Baugruppe und des gesamten Systems oder eines Prozesses). Dabei wird die Benennung System verwendet als Platzhalter für Hardware, Software (und ihre Wechselwirkung) oder für einen Prozess ...

FMECA (Fehlzustandsart-, -auswirkungs- und -kritizitätsanalyse) ist eine Erweiterung der FMEA, die ein Mittel zur Klassifizierung der Schwere der Ausfallarten enthält, um die Einstufung der Dringlichkeit von Abhilfemaßnahmen zu ermöglichen. Dies geschieht durch Kombination des Maßes für die Schwere mit der (erwarteten) Eintrittshäufigkeit, um so eine 'Kritizität' genannte Metrik zu erzeugen. ...

FMEA behandelt üblicherweise einzelne Ausfallarten und die Auswirkung dieser Ausfallarten auf das System. Alle Ausfallarten werden als voneinander unabhängig angesehen. Das Verfahren ist daher ungeeignet für die Betrachtung abhängiger Ausfälle oder von Ausfällen, die sich aus einer Folge von Ereignissen ergeben. Um solche Situationen zu behandeln, können andere Methoden und Verfahren notwendig sein, wie etwa Markoff-Analyse (siehe IEC 61165) oder Störungsbaumanalyse (siehe IEC 61025). [13, Abschnitt 4.1].

FTA

Ein Fehlzustandsbaum ist eine geordnete graphische Darstellung der Bedingungen und Faktoren, die den Eintritt eines unerwünschten Ergebnisses verursachen oder dazu beitragen; dieses wird mit Hauptereignis bezeichnet. Sollte das Ergebnis ein Erfolg sein, dann wird aus dem Fehlzustandsbaum ein Erfolgsbaum, bei dem die Ereignisereignisse zu dem Haupterfolgsergebnis beitragen. ...

Die Fehlzustandsbaumanalyse kann zur Analyse von Systemen mit komplexen Wechselbeziehungen zwischen deren Subsystemen verwendet werden, wobei auch Wechselbeziehungen zwischen Hardware und Software berücksichtigt werden. [14, 5.1].

GAMAB

Vergleich von zwei Systemen: Das neue System muss insgesamt genauso sicher wie das vorhandene oder sicherer als dieses sein. [11, Tabelle A.1].

HAZOP

Ursprünglich wurde dieser Zugang zur Risikoidentifizierung als 'Hazard and Operability study' oder HAZOP-Studie ... bezeichnet. Diese ist ein strukturiertes und systematisches Verfahren zur Untersuchung eines definierten Systems mit dem Ziel:

- *Risiken, die mit dem Betrieb und der Wartung und Instandsetzung des Systems verbunden sind, auszumachen. Die beteiligten Gefahren oder andere Risikoquellen können jene enthalten, die hauptsächlich nur für den unmittelbaren Bereich des Systems von Bedeutung sind und jene, die einen viel größeren Wirkungsbereich haben, z. B. irgendwelche Umweltgefahren.*
- *Mögliche systembedingte Betriebsprobleme aufzudecken und insbesondere Ursachen von Betriebsstörungen und Produktabweichungen aufzufinden, die möglicherweise zu nichtkonformen Produkten führen.*

[17].

MEM

Berechnung des annehmbaren Risikos basierend auf der niedrigsten Mortalitätsrate für menschliche Individuen der Gesamtpopulation. ... Das vom System verursachte individuelle Risiko (Todesfälle je Person und Zeiteinheit) ist geringer als das aus der MEM abgeleitete vertretbare Risiko. [11, Tabelle A.1].

PHA

PHA is an inductive method of analysis whose objective is to identify the hazards, hazardous situations and events that can cause harm for a given activity, facility or system. [26, A.5].

SIL

3.70 Sicherheits-Integritätslevel (en: safety integrity level) eine aus einer Anzahl von definierten diskreten Stufen zur Festlegung der Anforderungen an die Sicherheitsintegrität von sicherheitsbezogenen Funktionen, die den sicherheitsbezogenen Systemen zugeordnet wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Sicherheits-Integritätslevel mit der höchsten Zahl stellt den höchsten Sicherheits-Integritätslevel dar.

Anmerkung 2 zum Begriff: Es ist nicht möglich, sicherheitsbezogenen Prozessen oder sonstigen Maßnahmen einen Sicherheits-Integritätslevel zuzuordnen. [10].

TFFR

Zunächst werden Sicherheitsintegritätsanforderungen, die auf der Systemebene für jede Gefährdung als THR ausgedrückt werden, mit einer spezifischen Kombination an Funktionen, die durch die gewählte Systemarchitektur bestimmt wird, verknüpft und somit für die Funktionen in TFFR übersetzt. ... Die TFFR ist eine Rate. Im Fall, dass Ausfallwahrscheinlichkeiten auf den Bedarf angegeben sind, können sie in ein geeignetes Modell für Dauerbetrieb transformiert werden. [11, Abschnitt 10.2.2].

THR

Quantifizierter Ausdruck der akzeptierten Gefährdungsrate..

— Leerseite —

Symbole

Griechische Symbole

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
β	–	Strukturfunktion $\beta(\mathbf{x}^{M_i})$ des Minimalpfades M_i
λ	–	Hazardfunktion
Ω	–	<i>Ergebnisraum</i> , welcher die Menge aller möglichen <i>Ergebnisse</i> eines <i>Zufallsexperimentes</i> umspannt
ω	–	<i>Ergebnis</i> eines <i>Zufallsexperimentes</i>
φ	–	Systemstrukturfunktion

Lateinische Symbole

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
A	–	<i>Unfall</i>
B	–	<i>Sicherheitsbarriere</i>
B_A	–	Abschnitt „Risikominderung“, der von den <i>Sicherheitsbarrieren</i> gebildet wird, deren Versagen zum <i>Unfall</i> führt
B_H	–	Abschnitt „Risikominderung“, der von den <i>Sicherheitsbarrieren</i> gebildet wird, deren Versagen zur <i>Gefährdung</i> führt
C	–	Abschnitt „Risikoerzeugung“
C_A	–	Abschnitt „Risikoerzeugung“, der von den <i>Ursachen</i> bzw. <i>Auslösern</i> gebildet wird, deren Wirksamkeit zum <i>Unfall</i> führt
C_H	–	Abschnitt „Risikoerzeugung“, der von den <i>Ursachen</i> bzw. <i>Auslösern</i> gebildet wird, deren Wirksamkeit zur <i>Gefährdung</i> führt
E	–	Erwartungswert der <i>Zufallsvariable</i>
$E(\tau)$	–	Erwartungswert der zeitabhängigen <i>Zufallsvariable</i>
F	–	Verteilungsfunktion
F_B	–	Versagens- / Fehlhandlungswahrscheinlichkeit F_{B_i} der einzelnen <i>Sicherheitsbarriere</i> i
F_{BA}	–	Versagenswahrscheinlichkeit des Abschnitts B „Risikominderung“ für die <i>Sicherheitsbarrieren</i> , deren Versagen zum <i>Unfall</i> führt
F_{BH}	–	Versagenswahrscheinlichkeit des Abschnitts B „Risikominderung“ für die <i>Sicherheitsbarrieren</i> , deren Versagen zur <i>Gefährdung</i> führt
f	–	Dichtefunktion
H	–	<i>Gefährdung</i>
h	–	Systemausfallwahrscheinlichkeit
K	–	Komponenten einer vernetzten Struktur
$k_A(N_A)$	–	Aversionsfaktor zum Ausdruck des empfundenen (kollektiven) <i>Risikos</i> beim Eintreten des <i>Unfalls</i>

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
$k_H(N_H)$	–	Aversionsfaktor zum Ausdruck des empfundenen (kollektiven) <i>Risikos</i> beim Eintreten der <i>Gefährdung</i>
M	–	<i>Minimalpfad</i>
N_A	–	Anzahl der geschädigten Personen bei Eintreten des <i>Unfalls</i>
N_H	–	Anzahl der Personen, die bei Eintreten der <i>Gefährdung</i> geschädigt werden könnten
P	–	Wahrscheinlichkeit
p	–	Komponentenausfallwahrscheinlichkeit
\mathbf{p}	–	Vektor der Komponentenausfallwahrscheinlichkeiten $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_n)$
R_e	–	<i>empfundenes (kollektives) Risiko</i>
R_{eA}	–	<i>empfundenes (kollektives) Risiko</i> bei Eintreten des <i>Unfalls</i>
R_{eH}	–	<i>empfundenes (kollektives) Risiko</i> bei Eintreten der <i>Gefährdung</i>
R_i	–	<i>individuelles Risiko</i>
R_{iA}	–	<i>individuelles Risiko</i> bei Eintreten des <i>Unfalls</i>
R_{iH}	–	<i>individuelles Risiko</i> bei Eintreten der <i>Gefährdung</i>
R_m	–	natürliche Sterblichkeitsrate der Altersgruppe der Fünf- bis Fünfzehnjährigen in wirtschaftlich gut entwickelten Ländern
R_o	–	<i>kollektives Risiko</i>
R_{oA}	–	<i>kollektives Risiko</i> bei Eintreten des <i>Unfalls</i>
R_{oH}	–	<i>kollektives Risiko</i> bei Eintreten der <i>Gefährdung</i>
S	–	Überlebensfunktion
S_A	–	Eintrittswahrscheinlichkeit des <i>Unfalls</i>
S_C	–	Eintrittswahrscheinlichkeiten S_{C_i} der einzelnen <i>Ursachen</i> bzw. <i>Auslöser i</i>
S_{CA}	–	Eintrittswahrscheinlichkeit des Abschnitts C „Risikoerzeugung“ für die <i>Ursachen</i> bzw. <i>Auslöser</i> , die zum <i>Unfall</i> führen.
S_{CH}	–	Eintrittswahrscheinlichkeit des Abschnitts C „Risikoerzeugung“ für die <i>Ursachen</i> bzw. <i>Auslöser</i> , die zur <i>Gefährdung</i> führen.
S_H	–	Eintrittswahrscheinlichkeit der <i>Gefährdung</i>
T	–	<i>Auslöser</i>
t	h	Zeit(punkt/-raum)
U	–	<i>Ursache</i>
V_A	–	Eintrittswahrscheinlichkeit der <i>Schwere</i> des Gesundheitsschadens, die eine Person bei Eintreten des <i>Unfalls</i> erleidet
V_H	–	Eintrittswahrscheinlichkeit der <i>Schwere</i> des Gesundheitsschadens, die eine Person als Folge der <i>Gefährdung</i> erleiden könnte
W	–	zulässige Wahrscheinlichkeit (<i>Häufigkeit</i>)
X	–	Indikatorvariable

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
x	–	Zustandsvariable
\mathbf{x}	–	Vektor der Zustandsvariablen $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$
y	–	Zustandsvariable
Z	–	<i>Zufallsvariable</i>
z	–	reelle Zahl

— Leerseite —

Abbildungsverzeichnis

1	<i>Minimalpfade</i> M_i einer Brückenschaltung ([34, Abschnitt 2.3, Bild 3]) . . .	22
2	Sterbewahrscheinlichkeiten in Deutschland, basierend auf der Sterbetafel der Jahre 2001/2003 für Personen im Alter von 0 bis 100 Jahren ([22, Abbildung „Schaubild 1“])	33
3	Links: stetige Gleichverteilung ($T = 4$) Rechts: Exponentialverteilung ($\lambda = 1, 2$)	42
4	Einklemmen an der nicht vollständig geschlossenen Fahrgastraumtür.	45
5	Einklemmen an der vollständig geschlossenen Fahrgastraumtür.	57
6	Notbetrieb: Einklemmen an der nicht vollständig geschlossenen Fahrgastraumtür bei aktivierter Überbrückung der Grünschleife.	66

— Leerseite —

Tabellenverzeichnis

1	Wahrheitstabelle der Brückenschaltung	26
2	Matrix zur Akzeptanz des <i>individuellen Risikos</i> unter Anwendung der <i>MEM</i> , eingeschränkt auf die Bedingung, dass keine Überlagerung von mehreren, gleichzeitig wirkenden Systemen vorliegt	37
3	<i>Häufigkeiten</i> zur <i>Gefährdung</i> , welche aus dem Versagen des Erkennens des Einklemmens mittels Grünschleife resultiert (die modifizierten Wahrschein- lichkeiten sind fett hervorgehoben)	53
4	<i>Häufigkeiten</i> zur <i>Gefährdung</i> , welche aus dem Versagen des Erkennens des Einklemmens mittels Mitschleiferkennung resultiert	63
5	<i>Häufigkeiten</i> zum <i>Unfall</i> , welcher aus dem Versagen des Erkennens des Einklemmens mittels Grünschleife resultiert	71

— Leerseite —

Anmerkungen

1. *Der risikobasierte Ansatz schließt das Management von RAMS-Aktivitäten auf Basis der aus den Risikobetrachtungen abgeleiteten Entscheidungen ein. Ziel dieses Ansatzes ist, Risiken zu ermitteln, Anforderungen abzuleiten und Maßnahmen zur Vermeidung oder Beherrschung dieser Risiken zu implementieren [10, Abschnitt 5.8].*
2. *Der risikobasierte Ansatz ist charakterisiert durch das Beurteilen der Akzeptanz des verbleibenden Risikos nach Umsetzen der risikobeherrschenden Maßnahmen. Die anzuwendenden Risikobewertungs- und -akzeptanzkriterien sind auf Basis der Systemdefinition festzulegen ... [10, Abschnitt 5.8].*
3. *Sofern dies zur Unterstützung der Gefährdungsermittlung, der Gefährdungsklassifizierung und der gewählten Risikoakzeptanzprinzipien notwendig ist, sollte ein Risikomodell definiert werden. [11, 8.2.2].*
4. *Bild 10 — Beziehung zwischen Ursache, Gefährdung und Unfall [10, Abschnitt 7.4.2.1].*
5. *zum Beispiel ausgedrückt als Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls p_{WSF} [10, Anhang B.6]*
6. *Tabelle C.9 — Risikoakzeptanzkategorien (Beispiel mit Bezug auf die Sicherheit) [10, Anhang C.4].*
7. *Weiterführende Informationen: Die Einteilung der Risiken in Unterkategorien [30, Abschnitt 3.5, Bild 5].*
8. *Das individuelle Risiko bezieht sich dabei auf ein einzelnes, repräsentatives Individuum. Dabei bleiben andere Personen (z.B. Mitreisende) außerhalb der Betrachtung. ... Bei der Bewertung des individuellen Risikos ist es ausreichend, nur diejenigen technischen Systeme zu betrachten, denen das jeweilige Individuum zur Zeit ausgesetzt ist. [29, Abschnitt 2.1.1].*
9. *Im Gegensatz zum individuellen Risiko umfasst das kollektive Risiko die Konsequenzen für alle Personen und die gesamte Umwelt. Das kollektive Risiko hingegen betrachtet damit auch Unfälle mit einer großen Anzahl von Toten und Verletzten, z.B. durch Zusammenprall oder Entgleisung von Zügen ... [29, Abschnitt 2.1.2].*
10. *Weiterführende Informationen: Individuelles, kollektives und empfundenes Risiko [30, Abschnitt 3.4, Bild 4].*
11. *Weiterführende Informationen: Für Unfälle geltende Sicherheitsziele [11, Abschnitt 8.4.1.2].*
12. *Ist beim individuellen Risiko eine quasi natürliche Größe vorhanden, nämlich die mittlere Todesfallwahrscheinlichkeit, so verliert sich diese beim Übergang zum Kollektiv. [30, Abschnitt 3.7].*
13. *Die Grenzkosten geben zum Ausdruck, wieviel man im Maximum gewillt ist auszugeben, um das kollektive Risiko um eine Einheit, hier also ein Todesopfer, zu senken. [30, Abschnitt 3.7].*
14. *Die Risikoanalyse ist die systematische Nutzung aller verfügbaren Information, um Gefährdungen oder deren RAM-Äquivalent und die entsprechenden potentiellen Verluste zu ermitteln und das damit verbundene Risiko zu bewerten [10, Abschnitt 6.3].*
15. *Weiterführende Informationen: Risikobeurteilung [11, Abschnitt 8].*
16. *Die Beziehungen zwischen Gefährdungen bzw. RAM-Äquivalenten und den damit verbundenen Folgen müssen unter Angabe der möglichen Kombinationen und der Folgen von beitragenden Ereignissen festgelegt werden [10, Abschnitt 7.4.2.1].*
17. *2. Ermittlung der Ursachen, d. h. der Komponenten-, Subsystem- oder Systemausfälle und der physischen Effekte, die, möglicherweise in Kombination mit menschlichen Fehlern oder Betriebsbedingungen, zu Verlusten führen können; [10, Abschnitt 7.4.2.1].*
18. *Alle vernünftigerweise vorhersehbaren Gefährdungen/RAM-Äquivalente, die mit dem System in seiner Anwendungsumgebung verbunden sind, müssen systematisch identifiziert werden. Diese Aktivität sollte Gefährdungen und deren RAM-Äquivalente umfassen, die sich aus Folgendem ergeben:*
 - a) *Normalbetrieb des Systems;*
 - b) *Fehlerbedingungen des Systems;*

- c) *Notbetrieb des Systems;*
- d) *vorhersehbarer Systemmissbrauch, ausgenommen bewusster Missbrauch;*
- e) *Systemschnittstellen;*
- f) *Systemfunktionalität;*
- g) *Systemkonfigurationsparameter;*
- h) *Aspekte des Systembetriebs, der Instandhaltung und des Supports;*
- i) *Betrachtungen zur Entsorgung des Systems;*
- j) *menschliche Faktoren;*
- k) *Aspekte des Gesundheitsschutzes am Arbeitsplatz;*
- l) *mechanische Umgebung;*
- m) *elektrische Umgebung;*
- n) *natürliche Umweltbedingungen, wie z. B. Schnee, Überschwemmungen, Stürme, Regen, Erdbeben usw.*
[10, Abschnitt 7.4.2.1].

19. *Für die Erkennung von Gefährdungen/RAM-Äquivalenten ist es hilfreich, eine strukturierte Liste zu verwenden. Diese Liste dient als Grundlage und ist nicht erschöpfend. Wird eine solche Liste angewendet, so sollte sie anhand der Anwendung überprüft und gegebenenfalls angepasst werden.* [10, Abschnitt 7.4.2.1].
20. Zitat aus http://de.wikipedia.org/wiki/Top-down_und_Bottom-up
21. Weiterführende Informationen: *Das Risikomodell* [11, Abschnitt 8.2.2].
22. *Alle Ausfallarten werden als voneinander unabhängig angesehen. Das Verfahren ist daher ungeeignet für die Betrachtung abhängiger Ausfälle oder von Ausfällen, die sich aus einer Folge von Ereignissen ergeben.* [13, Abschnitt 4.1].
23. *... entwirft der Analytiker eine Art Baum mit den verschiedenen möglichen Ergebnissen.* [19, Abschnitt 4].
24. *Erkennbar am Beispiel der Transformation einer seriellen Systemkonfiguration: Bei der Zuverlässigkeitsmodellierung stehen die Baugruppen (Blöcke oder Komponenten in einem Zuverlässigkeitsblockdiagramm) dann in einer seriellen Konfiguration, wenn ein Ausfall irgendeines dieser Blöcke einen Systemausfall bewirken würde. In dem entsprechenden Fehlzustandsbaummodell würden in diesem Falle alle diese 'Blöcke' (Gatter oder Ereignisse) mittels Verbindungslinien in ein ODER-Gatter fließen.* [14, Abschnitt 7.5.2.2].
25. *Petrinetze sollten alle relevanten und möglichen Zustände und alle möglichen Ursache-Konsequenz-Relationen modellieren, die in Abhängigkeit von Bedingungen, d. h. Mengen von Zuständen, auftreten können.* [20, Anhang A.1.2].
26. *Damit kann das zeitliche Verhalten des Systems modelliert werden.* [16, Abschnitt 5].
27. *Zudem haben sich PNs als sehr effizient hinsichtlich der Analyse von sicherheitsrelevanten Systemen (SIL-Berechnungen) erwiesen ...* [20, Anhang A.3.3.1].
28. *Bei Sicherheitsbetrachtungen interessiert beispielsweise die Ermittlung und Berechnung ... der Gefährdungsrate (DFR) ...* [16, Abschnitt 9.4].
29. *Da Markov-Ketten konstante Übergangsraten, was ausschließlich exponentialverteilte Zustandsdauer-Verteilungen impliziert, voraussetzen, haben allgemeine stochastische Petrinetze eine höhere Modellierungsmächtigkeit.* [20, Abschnitt 6].
30. *Manchmal ist nur die Ursache-Wirkung-Kette eines beliebigen Ereignisses, wie der Ausfall in einem System, von Interesse. Oder umgekehrt sind die Gründe für einen System-Fehlzustand, d.h. ein globaler Zustand mittels eines Basis-Ereignisses oder Zustandes, von Interesse. Solche Analyseergebnisse erhält man durch FTA, ETA, RBD oder FMEA-Techniken. Der Erreichbarkeitsgraph enthält alle diese Informationen. Also*

können diese Ursache-Ereignis-Beziehungen aus dem EG abgeleitet und auf herkömmliche Weise dargestellt werden ... Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass die Modellierungsmächtigkeit von PN größer ist als die von FTA, ETA und RBD. Daher kann man zeigen, dass solche Modelle ohne Informationsverlust in Petrinetze transformiert werden können ... [20, Abschnitt 6].

31. *Ein Zuverlässigkeitsblockdiagramm (ZBD) ist eine bildhafte Darstellung der Funktionsfähigkeit eines Systems. Es zeigt die logische Verknüpfung der (funktionierenden) Komponenten, die zur Erzielung des erfolgreichen Betriebs des Systems ... erforderlich ist. [15, Einleitung].*
32. *Da ein Zuverlässigkeitsblockdiagramm die für einen Systemerfolg erforderlichen logischen Beziehungen beschreibt, gibt es nicht notwendigerweise die physischen Hardwareverbindungen wieder. Ein ZBD folgt jedoch üblicherweise so weit wie möglich den physischen Systemverbindungen. [15, Abschnitt 6.1].*
33. *Zu den wesentlichsten Annahmen der in dieser Norm beschriebenen Prozeduren gehört die Annahme, dass Komponenten (oder sie darstellende Blöcke) nur zwei Zustände haben können: in Betrieb (Klarzustand) oder ausgefallener Zustand (Unklarzustand). [15, Abschnitt 5.1].*
34. *Eine weitere wichtige Annahme ist, dass ein Ausfall ... eines Blocks die Ausfallwahrscheinlichkeit ... irgend-eines anderen Blocks innerhalb des modellierten Systems nicht beeinflussen darf. [15, Abschnitt 5.1].*
35. *Bei Zuverlässigkeitsschaltbildern ist – im Gegensatz zu technischen Schaltbildern – die mehrfache Darstellung einer Komponente erlaubt, es gilt jedoch die Vereinbarung, dass sich identisch bezeichnete Komponenten auch identisch verhalten, d. h., es sind entweder alle gleichzeitig defekt oder gleichzeitig intakt. [2, Abschnitt 1].*
36. *Die ZBD-Technik der Modellerstellung ist primär für die Anwendung auf solche Systeme gedacht, die nicht repariert werden und bei denen die Reihenfolge der Ausfälle keine Rolle spielt. [15, 1 Anwendungsbereich].*
37. *Zuverlässigkeitsblockdiagramme sind zur Modellierung von Reihenfolge- oder zeitabhängigen Ereignissen ungeeignet. In solchen Fällen sollten andere Verfahren wie Markoffanalyse oder Petri-Netze verwendet werden. [15, Abschnitt 5.2].*
38. *Weiter wird darauf hingewiesen, dass ... die Überlebenswahrscheinlichkeit einer Einheit (Einheit B) davon abhängt, wann die andere Einheit (Einheit A) ausfällt. Anders ausgedrückt: A und B können nicht als voneinander unabhängige Einheiten betrachtet werden. Infolgedessen sollten andere Verfahren, wie z.B. Markoffanalyse, für die Analyse von Standby-Systemen verwendet werden. [15, Abschnitt 7.2.4].*
39. *Anmerkungen:*
 - a) *Ein System, bei dem alle Komponenten intakt sind, ist intakt, Gleichung (2.6). Ein System, bei dem alle Komponenten defekt sind, ist defekt, Gleichung (2.7). ...*
 - c) *Kohärenz bedeutet: Wenn wir in einem intakten System eine (oder mehrere) defekte Komponenten in den Intaktzustand bringen, so kann es dadurch niemals ausfallen. [34, Abschnitt 2.2].*
40. *Weiterführende Informationen: Reihenanzordnung, Parallelanordnung, Parallel-Reihenanzordnung, Reihen-Parallelanordnung, Vermaschung [33, Abschnitt 4], sowie Serien-Zuverlässigkeitsblockdiagramme, Dupliziertes (oder paralleles) Serien-Zuverlässigkeitsblockdiagramm, Serielles gedoppeltes (oder paralleles) Zuverlässigkeitsblockdiagramm, Zuverlässigkeitsblockdiagramm mit gemischter Redundanz, Zuverlässigkeitsblockdiagramm mit gemischter Redundanz anderer Art, Ein nicht einfach durch Serien-Parallel-Schaltungen von Blöcken darstellbares Diagramm [15, Abbildungen 1 bis 5 und 8]*
41. *Weiterführende Informationen sind [34, Abschnitte 2.3, 3.1, 3.2] zu entnehmen.*
42. *Die Schaltalgebra ist ein algebraisches System, das aus der Menge $\{0,1\}$ besteht und die folgenden Operationen hat: Disjunktion, Konjunktion, Negation. [34, Abschnitt 1.1].*
43. *a) Es muss ein kohärentes System vorliegen, das in zulässiger Weise das wirkliche System darstellt.
b) alle Komponentenausfälle müssen statistisch unabhängig sein ...
c) alle Reparaturen müssen voneinander statistisch unabhängig sein ... [34, Abschnitt 3.1].*
44. *Sowohl für das System, als auch für die Komponenten werden lediglich zwei Zustände — intakt und defekt — unterschieden. ...*

Anmerkungen:

- a) Diese Zuordnung (1 für defekt) nennt man auch „Negativ-Logik“. [34, Abschnitt 2.1].
45. Es zeigte sich, dass für jede Boolesche Funktion eine eindeutige Darstellung (dnf, cnf) existiert. ... Für eine kohärente Funktion besteht dazu noch eine wesentlich einfachere Darstellung, die Darstellung durch Minimalpfade und Minimalschnitte. [34, Abschnitt 2.3].
cnf - konjunktive Normalform, „conjunctive normal form“
dnf - disjunktive Normalform, „disjunctive normal form“ [34, Formelzeichen]
46. Der Erwartungswert (selten und doppeldeutig Mittelwert) ist ein Grundbegriff der Stochastik. Der Erwartungswert einer Zufallsvariablen beschreibt die Zahl, die die Zufallsvariable im Mittel annimmt. Er ergibt sich zum Beispiel bei unbegrenzter Wiederholung des zugrunde liegenden Experiments als Durchschnitt der Ergebnisse.
<https://de.wikipedia.org/wiki/Erwartungswert>
47. Additionsregel: Für disjunkte Ereignisse gilt $p(A \text{ oder } B) \equiv p(A \cup B) \equiv p(A \vee B) = p(A) + p(B)$
http://www.mathe-online.at/mathint/wstat1/i_formeln.html
48. ... es werden all jene Zeilen in der Tabelle addiert, in denen rechts bei der Systemstrukturfunktion der Wert $\gg 1 \ll$ steht, wobei die Faktoren links den Wert k_i haben, falls $\gg 1 \ll$ in der zugehörigen Spalte steht, bzw. $(1 - k_i)$, falls $\gg 0 \ll$ in der zugehörigen Spalte steht. [2, Abschnitt 1]
49. ... so erhalten wir die Systemstrukturfunktion aus der Addition all jener Terme, bei denen ... in der dritten Spalte ... $\gg 1 \ll$ steht, ... [2, Abschnitt 1]
50. Selbstverständlich gilt $P(\text{intakt}) + P(\text{defekt}) = 1$ [2, Abschnitt 1]
51. Für Serienmodelle ist die Systemüberlebenswahrscheinlichkeit R_S gegeben durch den einfachen Ausdruck:
 $R_S = R_A \cdot R_B \cdot R_C \cdot \dots \cdot R_Z$, ... d.h. durch das Produkt der Überlebenswahrscheinlichkeiten aller Blöcke, aus denen das System gebildet wird. [15, Abschnitt 7.2.1].
52. Additionsregel: Für disjunkte Ereignisse gilt $p(A \text{ oder } B) \equiv p(A \cup B) \equiv p(A \vee B) = p(A) + p(B)$
http://www.mathe-online.at/mathint/wstat1/i_formeln.html
53. r_i das individuelle Risiko ... entspricht der Todesfallwahrscheinlichkeit einer Einzelperson (z.B. pro Jahr) ...
 w_j die Eintretenswahrscheinlichkeit eines Ereignisses j
 v_{ij} die Wahrscheinlichkeit, dass eine Person i beim Ereignis j anwesend ist
 λ_{ij} die Wahrscheinlichkeit, dass eine Person i beim Ereignis j getötet wird
 R_0 Das kollektive Risiko ... zeigt den Standpunkt der Allgemeinheit und gibt die Zahl der Opfer an, die beim Betrieb eines Systems (z.B. pro Jahr) zu erwarten sind.
 A_j die Anzahl Todesopfer beim Ereignis j
 R_e Das empfundene (kollektive) Risiko ... berücksichtigt zusätzlich eine sogenannte Risikoaversion ...
 $\varphi(A_j)$ Durch den Aversionsfaktor ... werden Unfälle mit zunehmender Anzahl Opfer stärker gewichtet. [30, Abschnitt 3.4]
54. Weiterführende Informationen: Minimale endogene Mortalität (MEM) [11, Anhang A.4].
55. Für die Berechnung der MEM ist die Beziehung zwischen Todesfällen, schweren Verletzungen und leichten Verletzungen gegeben mit: ein Todesfall = 10 schwere Verletzungen = 100 leichte Verletzungen (schwere Verletzungen \Leftrightarrow Schwerbehinderte) [11, Anhang A.4].
56. Eine Sterbetafel ist ein demographisches Modell, das die zusammenfassende Beurteilung der Sterblichkeitsverhältnisse einer Bevölkerung unabhängig von ihrer Größe und Altersstruktur ermöglicht. [22]
57. die nach Begriffsdefinition explizit über die Ausfallrate definiert ist
58. - Eine große Anzahl an Personen betreffend und zu vielen Todesfällen führend; und/oder
- extremer Umweltschaden [10, Tabelle C.4].
59. - Eine sehr kleine Anzahl von Personen betreffend und zu mindestens einem Todesfall führend; und/oder

- schwerer Umweltschaden [10, Tabelle C.4].
- 60. - Keine Möglichkeit eines Todesfalls, nur schwere oder leichte Verletzungen; und/oder
- geringer Umweltschaden [10, Tabelle C.4].
- 61. - Möglicherweise leichte Verletzung [10, Tabelle C.4].
- 62. Das Auftreten ist sehr unwahrscheinlich. Es kann angenommen werden, dass das Ereignis nicht auftritt. [10, Tabelle C.1]
- 63. Das Auftreten ist unwahrscheinlich, aber möglich. Es kann angenommen werden, dass das Ereignis ausnahmsweise auftreten kann. [10, Tabelle C.1]
- 64. Wird wahrscheinlich irgendwann im Lebenszyklus des Systems auftreten. Es kann davon ausgegangen werden, dass das Ereignis auftreten wird. [10, Tabelle C.1]
- 65. Wird wahrscheinlich mehrere Male auftreten. Das Ereignis wird voraussichtlich mehrere Male auftreten. [10, Tabelle C.1]
- 66. Wird mehrere Male auftreten. wahrscheinlich Das Ereignis wird voraussichtlich oft auftreten. [10, Tabelle C.1]
- 67. Wird wahrscheinlich häufig auftreten. Das Ereignis wird häufig stattfinden. [10, Tabelle C.1]
- 68. siehe Tabelle 2 – SIL-bezogene quantitative und qualitative Maßnahmen [11, Abschnitt 10.2.7]:

$10^{-6} \leq \text{TFFR} [h^{-1}] < 10^{-5}$	(SIL 1)
$10^{-7} \leq \text{TFFR} [h^{-1}] < 10^{-6}$	(SIL 2)
$10^{-8} \leq \text{TFFR} [h^{-1}] < 10^{-7}$	(SIL 3)
$10^{-9} \leq \text{TFFR} [h^{-1}] < 10^{-8}$	(SIL 4)
- 69. Das Risiko muss eliminiert werden [10, Tabelle C.8].
- 70. Das Risiko darf nur dann akzeptiert werden, wenn eine Minderung nicht durchführbar ist und die Zustimmung des Bahnunternehmens oder der zuständigen Sicherheitsbehörde vorliegt [10, Tabelle C.8].
- 71. Das Risiko kann unter der Voraussetzung angemessener Kontrollen (z. B. Instandhaltungsverfahren oder -regeln) und mit Zustimmung der verantwortlichen Bahnunternehmen toleriert und akzeptiert werden [10, Tabelle C.8].
- 72. Das Risiko ist ohne Zustimmung der Bahnunternehmen akzeptabel [10, Tabelle C.8].
- 73. Eine Zufallsvariable X wird als **diskret** bezeichnet, wenn sie nur endlich viele oder abzählbar unendlich viele Werte annimmt. ... Diskrete Zufallsvariablen entstehen meist durch einen **Zählvorgang**. ... Daraus folgt, dass diskrete Zufallsvariablen in der Regel nur ganzzahlige Werte annehmen.
<http://www.mathebibel.de/diskrete-zufallsvariable.html>
- 74. Eine Zufallsvariable X wird als **stetig** bezeichnet, wenn sie überabzählbar unendlich viele Werte annimmt. ... Stetige Zufallsvariablen entstehen meist durch einen **Messvorgang**.
<http://www.mathebibel.de/stetige-zufallsvariable.html>
- 75. Die Dichtefunktion ist nur für stetige Zufallsvariablen definiert !
<http://www.mathebibel.de/dichtefunktion.html>
- 76. Die Verteilungsfunktion ist ein Hilfsmittel zur Beschreibung einer diskreten oder stetigen Wahrscheinlichkeitsverteilung.
<http://www.mathebibel.de/verteilungsfunktion.html>
- 77. in Anlehnung an <http://www.mathebibel.de/verteilungsfunktion.html>
- 78. Der Zusammenhang zwischen Verteilungsfunktion und Dichtefunktion ist sehr anschaulich dargestellt im Abschnitt 2 auf der Webseite:

<http://www.mathebibel.de/verteilungsfunktion.html>

79. Gelänge es, verschleißfreie Autos zu bauen, so wäre $\lambda(t) = \lambda$ konstant, aber nicht notwendig gleich Null, denn es ist denkbar, dass die Einzelteile einem "rein zufälligen" Zerfallsprozess ausgesetzt sind, der vom Gebrauch des Autos unabhängig ist. [24, Abschnitt 1.2.2]
80. Auch als „Survivor-Funktion“ bezeichnet: Die *Survivorfunktion* ... gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, daß ein Individuum den Zeitpunkt t „erlebt“, das heißt, daß bis zu diesem Zeitpunkt noch kein Ereignis eingetreten ist und die Episode noch andauert. [24, Abschnitt 3.2.1] Weiterhin wird sie auch als „Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ “ bezeichnet: Die *Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$* wird in der Zuverlässigkeitstheorie auch als „Zuverlässigkeit $R(t)$ “ (R von Reliability) bezeichnet. [3, Abschnitt 2.1.3]
81. Diese Eigenschaft ist in [31, Beispiel 1.1] sehr anschaulich dargestellt
82. Dies soll an dem Beispiel des **Sterberisikos** einer Population verdeutlicht werden. Die Hazardrate hat hier typischerweise einen „badewannenförmigen“ Verlauf ... [24, Abschnitt 3.2.1] und Die Ausfallrate zu einem Zeitpunkt t läßt sich interpretieren als ein Maß für das **Risiko** eines Teiles auszufallen, unter der Voraussetzung, dass es bereits bis zu diesem Zeitpunkt t überlebt hat. [3, Abschnitt 2.1.4]
83. Das 95 % Perzentil der Körpertiefe (stehend) beträgt 400 mm. [6, Tabelle 10]
84. In der Realität liegt die Schrittdauer eher bei 0,6 s... [28, Abschnitt 2b].
85. Das 95 % Perzentil der Brustkorbtiefe beträgt 285 mm nach Tabelle 9. Die Kopflänge (Kopftiefe) mit einem Wert von 205 mm nach Tabelle 65 und die Kopfbreite mit einem Wert von 165 mm nach Tabelle 67 für das 95 % Perzentil, überschreiten die Brustkorbtiefe nicht. [6]
86. Das 95 % Perzentil der Schulterbreite (bideltoid) beträgt 525 mm. [6, Tabelle 11]
87. Weiterführende Informationen: *Grundlagen bei nichtreparierbaren Systemen* [34, Abschnitt 4].

Literatur

- [1] Albrecht Hinzen. Der Einfluß des menschlichen Fehlers auf die Sicherheit der Eisenbahn. *Eisenbahntechnische Rundschau*, Oktober 1996.
- [2] Andreas Nowak. Zuverlässigkeit von Netzwerken. University of Vienna, Dept. of Business Administration, <https://homepage.univie.ac.at/andreas.nowak/stw03e.pdf>.
- [3] Autorenkollektiv. *Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie — Zuverlässigkeits-sicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten — Teil 2*. Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), 2000.
- [4] M. Bellair. Universelle Gefahrenanalyse für Stadtbahnfahrzeuge. <http://freenet-homepage.de/bellair/latex/index.html>, 26. Juni 2008.
- [5] CLC/TR 50 126-2:2007. *Railway applications — The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) — Part 2: Guide to the application of EN 50126-1 for safety*, February 2007.
- [6] DIN 33402-2. *Ergonomie — Körpermaße des Menschen — Teil 2: Werte*, Dezember 2005.
- [7] DIN EN 1 050. *Sicherheit von Maschinen - Leitsätze zur Risikobeurteilung*, Januar 1997.
- [8] DIN EN 31010. *Risikomanagement — Verfahren zur Risikobeurteilung*, November 2010.
- [9] DIN EN 50 126. *Bahnanwendungen — Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS)*, März 2000.
- [10] DIN EN 50 126-1:2018-07. *Bahnanwendungen — Spezifikation und Nachweis von Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS) — Teil 1: Generischer RAMS-Prozess; Deutsche Fassung EN 50126-1:2017*, Juli 2018.
- [11] DIN EN 50 126-2:2018-07. *Bahnanwendungen — Spezifikation und Nachweis von Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS) — Teil 2: Systembezogene Sicherheitsmethodik; Deutsche Fassung EN 50126-2:2017*, Juli 2018.
- [12] DIN EN 60 300-3-1. *Zuverlässigkeitsmanagement — Teil 3-1: Anwendungsleitfaden — Verfahren zur Analyse der Zuverlässigkeit — Leitfaden zur Methodik*, Mai 2005.
- [13] DIN EN 60 812. *Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen — Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)*, November 2006.
- [14] DIN EN 61 025. *Fehlzustandsbaumanalyse (IEC 61025:2006)*, August 2007.
- [15] DIN EN 61 078. *Techniken für die Analyse der Zuverlässigkeit — Verfahren mit dem Zuverlässigkeitsblockdiagramm und Boole'sche Verfahren*, Oktober 2006.
- [16] DIN EN 61 165. *Anwendung des Markoff-Verfahrens*, Februar 2007.

- [17] DIN EN 61882. *HAZOP-Verfahren (HAZOP-Studien) — Anwendungsleitfaden*, November 2014.
- [18] DIN EN 62 267. *Bahnanwendungen — Automatischer städtischer schienengebundener Personennahverkehr (AUGT) — Sicherheitsanforderungen*, July 2010.
- [19] DIN EN 62 502. *Verfahren zur Analyse der Zuverlässigkeit — Ereignisbaumanalyse (ETA)*, Juni 2011.
- [20] DIN EN 62 551. *Analysemethoden für Zuverlässigkeit — Petrinetze*, August 2013.
- [21] DIN EN ISO 12 100. *Sicherheit von Maschinen — Allgemeine Gestaltungsleitsätze — Risikobeurteilung und Risikominderung (ISO 12100:2010)*, März 2011.
- [22] Dipl.-Kaufmann Matthias Eisenmenger. Sterbetafel 2001/2003. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, <http://www.destatis.de>, Mai 2005.
- [23] Frank Ortmeier, Wolfgang Reif, Gerhard Schellhorn. Formal Safetyanalysis of a radio-based railroad crossing using Deductive Cause-Consequence Analysis (DCCA). Universität Augsburg, Lehrstuhl für Softwaretechnik und Programmiersprachen.
- [24] Hans-Peter Blossfeld, Alfred Hamerle, Karl Ulrich Mayer. *Ereignisanalyse — Statistische Theorie und Anwendung in den Wirtschafts- und Sozialwissenschaften*. Campus Verlag GmbH, Frankfurt/Main, 1986.
- [25] Hermann Himmelbauer, Albert Treytl. Fehlerbaumanalyse — Fault Tree Analyses (FTA). http://www.qwer.tk/dusty_neutral/fta.pdf, Sommer 1996.
- [26] IEC 60 300-3-9. *Zuverlässigkeitsmanagement — Teil 3-9: Anwendungsleitfaden — Analyse des Risikos technischer Systeme*, Dezember 1995.
- [27] Prof. Dr. Thomas Richthammer. Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie. Technische Universität München, Lehrstuhl für Wahrscheinlichkeitstheorie <https://www-m14.ma.tum.de/fileadmin/w00biy/www/pdf/Propaedeutikum/sto11skript.pdf>.
- [28] Rainer Müller. Die Physik des Gehens als Unterrichtsgegenstand. <https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/ifdn-physik/gehen-und-laufen.pdf>, 25. September 2006.
- [29] D. rer. nat. habil Hendrik Schäbe. Neue Ansätze zur Systemsicherheit in der Bahntechnik. *Eisenbahntechnische Rundschau*, April 2001.
- [30] Thomas Oettli, Charles Fermaund, Hans Bohnenblust, Hans-Heinrich Grauf. Risikoorientierte Sicherheitsnachweise im Eisenbahnbetrieb. *Eisenbahntechnische Rundschau*, August/September 1998.
- [31] Uwe Mortensen(Prof. a.D.). Ereignis- und Zeitreihenanalyse — Skriptum zu den Vorlesungen Evaluation und Forschungsmethoden (Statistik III + IV). Westfälische Wilhelms-Universität, Fachbereich Psychologie und Sportwissenschaften, Institut III, <http://www.uwe-mortensen.de/timeevent.pdf>, 16. Juli 2014.

- [32] VDI 4006 Blatt 2. *Menschliche Zuverlässigkeit - Methoden zur quantitativen Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit*, Februar 2003.
- [33] VDI 4008 Blatt 2. *Boolesches Modell*, Mai 1998.
- [34] VDI 4008 Blatt 7. *Strukturfunktion und ihre Anwendung*, Mai 1986.
- [35] V. D. V. (VDV). *Der Straßenbahner — Handbuch für U-Bahner, Stadt- und Straßenbahner*. beka, 2001.