

TUTORIAL – EMPFEHLUNGEN UND HILFESTELLUNGEN ZUR AUSWAHL UND ANWENDUNG AUSGEWÄHLTER VERFAHREN, METHODEN UND MODELLE ZUR STÖRFALLRISIKOBEURTEILUNG

Vorbemerkungen

Das vorliegende Tutorial wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens

„Zusammenstellung, Prüfung und Bewertung von Verfahren zur Analyse von Gefahren, Untersuchung von Szenarien und Bewertung von Risiken“ (FKZ 3721 59 301 0)

erstellt.

Es soll primär Informationen und Hilfestellungen zu ausgewählten Verfahren, Methoden und Modellen bereitstellen und so den Betreibern, aber auch Behördenvertretern und Sachverständigen die Auswahl und Anwendung der Verfahren, Methoden und Modelle erleichtern.

Vorbemerkungen

Hinweise zur Handhabung des Tutorials:

- Primäres Ziel ist es, ein grundlegendes Verständnis zur Anwendung bzw. Anwendbarkeit ausgewählter Verfahren, Methoden und Modelle zur Störfallrisikobeurteilung im Kontext der Störfall-Verordnung zu schaffen. Für die Durcharbeitung des Tutorials sind keine besonderen Vorkenntnisse notwendig.
- Nach Möglichkeit sollen Orientierungshilfen zur Frage «Welche Verfahren sind für wen und was einsetzbar» gegeben werden.
- Zur Erreichung des primären Ziels stellt das Tutorial wesentliche Eckpunkte zusammen. Für vertiefende Ausführungen wird auf den Schlussbericht des Forschungsvorhabens verwiesen.
- Das Tutorial beinhaltet keine verbindlichen Handlungsempfehlungen für Betreiber, Behörden und Sachverständige, noch erhebt es einen Anspruch auf Vollständigkeit und detaillierte Betrachtung aller relevanten Aspekte. Das Dokument soll als Orientierungshilfe und Informationsquelle, insbesondere für Neu- und Quereinsteiger, in diese komplexe Thematik dienen.
- Weder das Tutorial noch der Schlussbericht können einen Ersatz für thematisch entsprechende Schulungen/Seminare darstellen. Für die Anwendung der Verfahren ist umfangreiches Fachwissen und die Einbeziehung von Methodenspezialisten notwendig.

Inhalte (1/2)

1. Regulierungsrahmen, Begrifflichkeiten und grundlegende Anforderungen (Folien 6 ff.)

- Störfall-Verordnung: Einführung; Begriffsbestimmungen, Allgemeine Betreiberpflichten, Anhang II Teil IV, Anhang II Teil V, Anhang III

2. Einleitung (Folien 16 ff.)

- Risikomanagement von Störfallrisiken
- Analyseschritte der Störfallrisikobeurteilung
- Übersicht ausgewählter Verfahren, Methoden und Modelle
- Kurzdarstellung der Verfahren
- Hinweise zur Auswahl geeigneter Verfahren
- Restriktionen und Kritikpunkte

Inhalte (2/2)

3. Vorstellung ausgewählter Verfahren, Methoden und Modelle ([Folien 30 ff.](#))

- [HAZOP-Verfahren \(PAAG-Verfahren\)](#), [Checklisten](#), [Risikomatrix](#), [Risikograph](#), [Layer Of Protection Analysis](#), [Fehlerbaumanalyse](#), [Ereignisbaumanalyse](#), [Bow-Tie-Analyse](#), [Szenarienanalyse/HAZOP-Master](#)
- [Zusammenhänge zwischen den Verfahren, Kombinationsmöglichkeiten](#)

4. Beispiel: Zusammenwirken ausgewählter Verfahren und Methoden ([Folien 63 ff.](#))

5. Anwendungshinweise zu ausgewählten Verfahren, Methoden und Modellen ([Folien 82 ff.](#))

- [Allgemeine Hinweise zur Risikobeurteilung von Störfällen](#)
- [Benötigte Qualifikationen und Kompetenzen für die Anwendung der Verfahren und Methoden, sinnvolle Teamzusammensetzungen](#)
- Verfahrensspezifische Hinweise (Relevante Literaturquellen, Ausbildungs- und Softwareangebote): [HAZOP](#), [Fehlerbaumanalyse](#), [Ereignisbaumanalyse](#), [Bow-Tie-Analyse](#), [Layer of Protection Analysis](#)

Quellenverzeichnis ([Folien 107 ff.](#))

1. Regulierungsrahmen, Begrifflichkeiten und grundlegende Anforderungen

Störfall-Verordnung - Einführung

Die Störfall-Verordnung (StörfallV) ist in Deutschland die zentrale Vorschrift zur technischen Sicherheit von Industriebetrieben oder Lägern, in denen größere Mengen gefährlicher Stoffe gehandhabt werden. Erstmals verabschiedet am 27. Juni 1980, ist die **Störfall-Verordnung** als **Zwölfte Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz** seit über 40 Jahren anzuwenden.

Die StörfallV gilt für alle **Betriebsbereiche** in denen **gefährliche Stoffe** oberhalb einer sog. Mengenschwelle (in der Regel mehrere Tonnen) vorhanden sind. Die Stoffe und Mengenschwellen sind dem Anhang I der StörfallV zu entnehmen.

Die Betreiber der betroffenen Betriebsbereiche müssen bestimmte **Grundpflichten** erfüllen, insbesondere sind als Teil des Sicherheitsmanagementsystems die Gefahren von Störfällen zu ermitteln und zu bewerten (§ 3 -§8 der Verordnung). In Abhängigkeit vom Gefahrenpotenzial der zu handhabenden Stoffmengen greifen **erweiterte Pflichten**, insbesondere sind dann ein **Sicherheitsbericht** sowie **Alarm- und Gefahrenabwehrpläne** zu erstellen (§ 9 -§12 der Störfall-Verordnung).

Störfall-Verordnung - §2 Begriffsbestimmungen (1/3)

1. **Betriebsbereich der unteren Klasse:** ein Betriebsbereich, in dem gefährliche Stoffe in Mengen vorhanden sind, die die in Spalte 4 der Stoffliste in Anhang I genannten Mengenschwellen erreichen oder überschreiten, aber die in Spalte 5 der Stoffliste in Anhang I genannten Mengenschwellen unterschreiten;
2. **Betriebsbereich der oberen Klasse:** ein Betriebsbereich, in dem gefährliche Stoffe in Mengen vorhanden sind, die die in Spalte 5 der Stoffliste in Anhang I genannten Mengenschwellen erreichen oder überschreiten;
3. **benachbarter Betriebsbereich:** ein Betriebsbereich, der sich so nah bei einem anderen Betriebsbereich befindet, dass dadurch das Risiko oder die Folgen eines Störfalls vergrößert werden;
4. **gefährliche Stoffe:** Stoffe oder Gemische, die in Anhang I aufgeführt sind oder die dort festgelegten Kriterien erfüllen, einschließlich in Form von Rohstoffen, Endprodukten, Nebenprodukten, Rückständen oder Zwischenprodukten;
5. **Vorhandensein gefährlicher Stoffe:** das tatsächliche oder vorgesehene Vorhandensein gefährlicher Stoffe oder ihr Vorhandensein im Betriebsbereich, soweit vernünftigerweise vorhersehbar ist, dass sie bei außer Kontrolle geratenen Prozessen, auch bei Lagerung in einer Anlage innerhalb des Betriebsbereichs, anfallen, und zwar in Mengen, die die in Anhang I genannten Mengenschwellen erreichen oder überschreiten;

Störfall-Verordnung - §2 Begriffsbestimmungen (2/3)

6. **Ereignis:** Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs in einem Betriebsbereich unter Beteiligung eines oder mehrerer gefährlicher Stoffe;

7. **Störfall:** ein Ereignis, das unmittelbar oder später innerhalb oder außerhalb des Betriebsbereichs zu einer ernsten Gefahr oder zu Sachschäden nach Anhang VI Teil 1 Ziffer I Nummer 4 führt;

8. **ernste Gefahr:** eine Gefahr, bei der

- a) das Leben von Menschen bedroht wird oder schwerwiegende Gesundheitsbeeinträchtigungen von Menschen zu befürchten sind,
- b) die Gesundheit einer großen Zahl von Menschen beeinträchtigt werden kann oder
- c) die Umwelt, insbesondere Tiere und Pflanzen, der Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur oder sonstige Sachgüter geschädigt werden können, falls durch eine Veränderung ihres Bestandes oder ihrer Nutzbarkeit das Gemeinwohl beeinträchtigt würde;

9. **Überwachungssystem:** umfasst den Überwachungsplan, das Überwachungsprogramm und die Vor-Ort-Besichtigung sowie alle Maßnahmen, die von der zuständigen Behörde oder in ihrem Namen durchgeführt werden, um die Einhaltung der Bestimmungen dieser Verordnung durch die Betriebsbereiche zu überprüfen und zu fördern;

Störfall-Verordnung - §2 Begriffsbestimmungen (3/3)

10. **Stand der Sicherheitstechnik:** der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme zur Verhinderung von Störfällen oder zur Begrenzung ihrer Auswirkungen gesichert erscheinen lässt. Bei der Bestimmung des Standes der Sicherheitstechnik sind insbesondere vergleichbare Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen heranzuziehen, die mit Erfolg im Betrieb erprobt worden sind.

Störfall-Verordnung - §3 Allgemeine Betreiberpflichten

§ 3 der StörfallV verpflichtet den Betreiber Störfällen zu verhindern, indem entsprechend der Art und des Ausmaßes der möglichen Gefahren Vorkehrungen getroffen werden.

Hierbei sind

1. betriebliche Gefahrenquellen,
2. umgebungsbedingte Gefahrenquellen und
3. Eingriffe Unbefugter

zu berücksichtigen, es sei denn, dass diese Gefahrenquellen oder Eingriffe als Störfallursachen vernünftigerweise ausgeschlossen werden können.

Darüber hinaus müssen vorbeugende Maßnahmen getroffen werden, um die Auswirkungen von Störfällen so gering wie möglich zu halten.

Die Beschaffenheit und der Betrieb der Anlagen des Betriebsbereichs müssen dem Stand der Sicherheitstechnik entsprechen.

Die Wahrung angemessener Sicherheitsabstände zwischen Betriebsbereich und benachbarten Schutzobjekten stellt keine Betreiberpflicht dar.

Störfall-Verordnung - Anhang II, Teil IV (1/2)

Anhang II „Mindestangaben im Sicherheitsbericht“, Teil IV „Ermittlung und Analyse der Risiken von Störfällen und Mittel zur Verhinderung solcher Störfälle“ fordert eine

1. Eingehende Beschreibung der Szenarien möglicher Störfälle nebst ihrer Wahrscheinlichkeit oder den Bedingungen für ihr Eintreten, einschließlich einer Zusammenfassung der Vorfälle, die für das Eintreten jedes dieser Szenarien ausschlaggebend sein könnten, unabhängig davon, ob die Ursachen hierfür innerhalb oder außerhalb des Betriebsbereichs liegen, insbesondere unter Berücksichtigung:

a) betrieblicher Gefahrenquellen,

b) umgebungsbedingter Gefahrenquellen, z. B. Erdbeben, Hochwasser oder Einwirkungen die von benachbarten Betriebsbereichen oder Betriebsstätten ausgehen können,

c) Eingriffe Unbefugter und

d) anderer Bereiche und Entwicklungen, die einen Störfall verursachen, die Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Störfalls erhöhen oder Auswirkungen eines Störfalls verschlimmern können.

Störfall-Verordnung - Anhang II, Teil IV (2/2)

2. Abschätzung des Ausmaßes und der Schwere der Folgen der ermittelten Störfälle, einschließlich Karten, Bilder oder gegebenenfalls entsprechender Beschreibungen, aus denen die Bereiche ersichtlich sind, die von derartigen Störfällen betroffen sein können.
3. Bewertung vergangener Ereignisse im Zusammenhang mit den gleichen Stoffen und Verfahren, Berücksichtigung der daraus gezogenen Lehren und ausdrückliche Bezugnahme auf die jeweiligen Maßnahmen, die ergriffen wurden, um entsprechende Ereignisse zu verhindern.
4. Beschreibung der technischen Parameter, sowie Ausrüstungen zur Sicherung der Anlagen.

Störfall-Verordnung - Anhang II, Teil V

In Anhang II, Teil V „Schutz- und Notfallmaßnahmen zur Begrenzung der Auswirkungen von Störfällen “ werden folgende Mindestangaben im Sicherheitsbericht gefordert:

1. Beschreibung der Einrichtungen, die in der Anlage zur Begrenzung der Auswirkungen von Störfällen vorhanden sind, beispielsweise Melde-/Schutzsysteme und technische Vorrichtungen zur Begrenzung von ungeplanten Stofffreisetzungen, einschließlich Berieselungsanlagen, Dampfabschirmung, Auffangvorrichtungen oder -behälter, Notabsperrventilen, Inertisierungssystemen, Löschwasserrückhaltung.
2. Alarmplan und Organisation der Notfallmaßnahmen.
3. Beschreibung der Mittel, die innerhalb oder außerhalb des Betriebsbereichs für den Notfall zur Verfügung stehen.
4. Beschreibung technischer und nicht technischer Maßnahmen, die für die Begrenzung der Auswirkungen eines Störfalls von Bedeutung sind.

Störfall-Verordnung - Anhang III „Sicherheitsmanagementsystem“, Teil 1 und 2b

1. Das Sicherheitsmanagementsystem ist den Gefahren, Tätigkeiten und der Komplexität der Betriebsorganisation angemessen und beruht auf einer Risikobeurteilung. In das Sicherheitsmanagementsystem ist derjenige Teil des allgemeinen Managementsystems einzugliedern, zu dem Organisationsstruktur, Verantwortungsbereiche, Handlungsweisen, Verfahren, Prozesse und Mittel gehören, also die für die Festlegung und Anwendung des Konzepts zur Verhinderung von Störfällen relevanten Punkte. Insbesondere bei bereits nach § 32 des Umweltauditgesetzes EMAS-registrierten Standorten kann auf deren Managementstrukturen und Vorgehensweisen aufgesetzt werden.

2. Folgende Punkte werden durch das Sicherheitsmanagementsystem geregelt (Auszug):

b) Ermittlung und Bewertung der Gefahren von Störfällen

Festlegung und Anwendung von Verfahren zur systematischen Ermittlung der Gefahren von Störfällen bei bestimmungsgemäßigem und nicht bestimmungsgemäßigem Betrieb, einschließlich von Tätigkeiten, die als Unteraufträge vergeben sind, sowie Abschätzung der Wahrscheinlichkeit und der Schwere solcher Störfälle.

2. Einleitung

Risikomanagement von Störfallrisiken

Bei der Erarbeitung sicherheitsgerichteter Konzepte sind unabhängig vom konkreten Anlass (z.B. Errichtung einer neuen Anlage, Modifikation oder Überprüfung einer bestehenden Anlage) die verschiedenen Komponenten des Risikomanagements zu berücksichtigen:

- Kommunikation und Beratung/Konsultation
- Beschreibung des Risiko-Kontextes
- Risikoermittlung (Risikoidentifizierung)
- Risikoanalyse
- Risikobewertung
- Risikobewältigung (Risikosteuerung)
- Risikoüberwachung

(Vgl. ISO 31000 - Risikomanagement – Leitlinien)

Die Gesamtheit der Komponenten Risikoermittlung, -analyse und –bewertung wird mitunter auch als Risikobeurteilung bezeichnet.

Analyseschritte der Störfallrisikobeurteilung

Für das Forschungsprojekt wurde eine – im Vergleich zur ISO 31000 – modifizierte Gliederung der Risikobeurteilung von Störfällen gewählt:

Analyseschritt	Beschreibung Analyseschritt	Bezug zur StörfallIV (nicht abschließend)
Gefahrenanalyse	a) Bewertung vergangener Ereignisse im Zusammenhang mit den gleichen Stoffen und Verfahren, Berücksichtigung der daraus gezogenen Lehren, b) Systematische Ermittlung von Gefahrenquellen, Ereignissen und Störfalleintrittsvoraussetzungen inklusive ihrer Eintrittswahrscheinlichkeiten. c) Klassifizierung der Gefahrenquellen als „vernünftigerweise auszuschließen: ja/nein“ *	Ad a) Anh. II Teil IV. 3 Ad b) § 8 (3) i. V. Anh. III Nr. 2b), Anh. II Teil IV. 1 Ad c) § 3 (2) i.V.m. (1)
Szenarien-entwicklung	Eingehende Beschreibung der Szenarien möglicher Störfälle nebst ihrer Wahrscheinlichkeit oder den Bedingungen für ihr Eintreten	§ 8 (3) i. V. Anh. III Nr. 2b), § 9 (1) 2., Anh. II Teil IV. 1, Anh. II Teil V. 1.
Auswirkungs-betrachtungen	Abschätzung der Auswirkungen je Szenario (z.B. toxische Emissionen, Brand und Explosion sowie deren Bewertung anhand von Kriterien wie z.B. AEGL-Werten oder anhand von Probit-Funktionen)	§ 8 (3) i. V. Anh. III Nr. 2b), §4 (1), (1a) Anh. II Teil IV 2.
Risikobewertung	(Unternehmensinterne) Entscheidung ob das ermittelte Risiko akzeptiert bzw. toleriert wird. Falls nicht, müssen weitere risikomindernde Maßnahmen festgelegt werden.	§ 3 (1), (3) und (4), § 8 (3) i. V. Anh. III Nr. 2b), § 9 (1) 3.

* Auf die Aspekte a) und c) geht das vorliegende Tutorial nicht ein. Es wird auf den Schlussbericht, Kapitel 3.2.2 „Gefahrenanalyse“ verwiesen.

Übersicht ausgewählter Verfahren, Methoden und Modelle

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden folgende Verfahren, Methoden und Modelle betrachtet:

Verfahren, Methode, Modell	Gefahren-analyse	Szenarien-entwicklung	Auswirkungs-betrachtungen	Risiko-bewertung
Im Tutorial vorgestellte Verfahren, Methoden und Modelle				
HAZOP-Verfahren (PAAG-Verfahren)	x	(x)	(x)	
Checklistenverfahren	(x)	(x)	(x)	(x)
Risikomatrix				X
Risikograph (nach VDI/VDE 2180)				(x)
Layer of Protection Analysis (LOPA)		(x)	(x)	X
Fehlzustandsbaumanalyse (FTA)	x	(x)		
Ereignisbaumanalyse (ETA)		X	(x)	
Bow-Tie-Analyse	(x)	(x)	(x)	
Szenarienanalyse/HAZOP-Master	x	x	(x)	
Im Rahmen des Forschungsprojektes betrachtete Verfahren, Methoden und Modelle, die im Tutorial nicht vorgestellt werden				
Quantitative Risk Assessment (QRA)-Verfahren in den Niederlanden und Flandern	(x)	x	X	x
Accident Risk Assessment Methodology for Industries (ARAMIS)	x	x	X	x
Failure Mode Effects (and Criticality) Analysis (FMEA bzw. FMECA), Risikoprioritätszahl	x	(x)	(x)	x
Zurich Hazard Analysis (ZHA)	x		(x)	x
Risikoorientierte Gefahrenanalyse (ROGA)	x		(x)	x
Ausbreitungs- und Auswirkungsmodelle nach DECHEMA-Process-Net, TÜV-Berlin, „ADAM“ (Softwaretool des EC JRC)			x	
„Rapid N“ (Softwaretool für Ausbreitungsrechnungen des EC JRC)	(x)		x	
Methoden und Verfahren in der Schweiz (u.a. BAFU / FOEN: „Handbuch Störfall-Verordnung“)		(x)		x

Legende: x = Verfahren, Methode, Modell deckt Analyseschritt ab, (x) = Verfahren, Methode, Modell unterstützt Analyseschritt.

Kurzdarstellung der Verfahren (1/3)

Das HAZOP/PAAG-Verfahren ist die klassische Team-orientierte Kreativtechnik zur Identifizierung möglicher Gefahren und Ableitung der notwendigen Gegenmaßnahmen unter Anwendung von Sollfunktionen und ihren Parameter und kombiniert mit Frage-/Leitworten. Dem Verfahren ist kein quantitatives bzw. wertendes Kalkül eigen, weshalb dieses häufig in Kombination mit einer Risikomatrix, einem Risikographen oder aber dem LOPA-Verfahren angewendet wird. HAZOP/PAAG fokussiert dabei auf Abweichungen aus prozesstechnischen Abläufen. Von außen bzw. extern eingetragene Gefahrenquellen sind eher kein Bestandteil der HAZOP. Die klassische HAZOP wird in der Praxis daher um weitere Analysetechniken (z.B. spezielle Checklisten) ergänzt.

Für verhältnismäßig weniger komplexe Themen bietet sich als Alternative zur HAZOP die Anwendung von Checklisten an. Dies setzt voraus, dass die Gefahren, sowie die Anforderungen im Umgang mit den Gefahren aus Erfahrungen und/oder Regelwerken bereits sehr gut bekannt sind. Durch gezielte Fragestellungen und einen konkreten Praxisbezug entfallen ausschweifende Diskussionen.

Eine Risikomatrix ist ein Instrument zur (unternehmensinternen) Bewertung von Risiken und basiert auf einer (semi-)quantitativen Abschätzung des Risikos.

Der Risikograph nach VDI/VDE 2180 gestattet die Einstufung einer sicherheitstechnischen Anforderung an eine PLT-Einrichtung mittels sog. Safety Integrity Levels (SIL), welche wiederum mit entsprechenden Verfügbarkeitsanforderungen verknüpft sind.

Kurzdarstellung der Verfahren (2/3)

Das LOPA-Verfahren beinhaltet keine Gefahrenanalyse, sondern dient der Beurteilung der angedachten Barrieren. Dazu wird je Einzelszenario – und unter Berücksichtigung der einzelnen Barrieren/Schutzebenen – eine (semi)quantitative Abschätzung des Risikos vorgenommen. Das LOPA-Verfahren greift wiederum auf die Ergebnisse einer vorhergehenden Sicherheitsstudie und auf eine Risikomatrix zur Risikobewertung zurück.

Die Fehlerbaumanalyse wird klassischerweise zur Analyse der Ursachen unerwünschter Systemzustände komplexer technischer Systeme (Systeme mit Redundanzen und Rückfallebenen) angewendet. Das Verfahren beinhaltet ein wahrscheinlichkeitstheoretisches Kalkül, welches eine Prognose der zu erwartenden Zuverlässigkeit des Systems auf Basis der Eintrittshäufigkeiten der Ursachen erlaubt. Das Top-Ereignis kann auch ein Brand, eine Explosion oder ein außer Kontrolle geratener Prozess sein. Für größere verfahrenstechnische Anlagen wird der Fehlerbaum sehr rasch umfangreich und komplex.

Die Ereignisbaumanalyse ist gewissermaßen das Pendant zur Fehlerbaumanalyse und dient der Analyse der Folgen unerwünschter Systemzustände.

Die Fehler- und Ereignisbaumanalyse baut häufig auf eine zuvor durchgeführte HAZOP-Studie auf, kann aber durchaus auch als Alternative zur HAZOP gedacht bzw. angewendet werden. Ein weiterer Einsatzzweck ist beispielsweise die Auswertung bzw. Ursachenanalyse von Ereignissen bzw. Beinaheereignissen im Betrieb.

Kurzdarstellung der Verfahren (3/3)

Die Bow-Tie-Analyse ist in erster Näherung eine Kombination aus Fehlerbaum- und Ereignisbaumanalyse, unterscheidet sich aber von diesen durch die Art der Analyse der Eintrittswahrscheinlichkeit von Ereignissen. Im Fokus der Bow-Tie-Methodik steht die Analyse der Versagensmöglichkeiten der ereignisverhindernden und auswirkungsbegrenzenden Maßnahmen (Barrieren) und der Ableitung von Maßnahmen, mit denen das Versagen der Barrieren vorgebeugt werden kann. Schlussendlich soll mit dem Verfahren eine Verknüpfung zum Sicherheitsmanagement hergestellt werden, welches die Effektivität der Barrieren aktiv kontrollieren und steuern soll. Die Bow-Tie-Analyse setzt typischerweise auf Ergebnissen der HAZOP/LOPA-Studie (oder vergleichbar) auf.

Das Verfahren Szenarienanalyse/HAZOP-Master ist ein EDV-gestütztes Verfahren, welches im Kern generische Ereignisabläufe bereitstellt, die auf technisch-naturwissenschaftlichen Grundlagen basieren. Durch die Anwender werden diese Szenarien dann durch die Suche nach den konkreten auslösenden Ursachen und die Festlegung von Sicherheitsmaßnahmen mit der zu untersuchenden Anlage verknüpft. Anwendungsmöglichkeiten sind:

- Unterstützung bei der Durchführung systematischer Störfallrisikobeurteilungen
- Qualitätscheck für ältere Sicherheitsstudien unter neuen Blickwinkel
- Prüfung von Sicherheitsberichten im Genehmigungsverfahren
- Prüfung von Sicherheitsberichten durch Sachverständige
- Grundlage für Risikobeurteilung im Rahmen von (Brand-)Versicherungsgeschäften
- Grundlage für probabilistische Untersuchungen

Hinweise zur Auswahl geeigneter Verfahren

Einbindung von Störfallrisikobeurteilungen im Projektablauf

Sicherheitsgerichtete Fragestellungen detaillieren sich mit fortschreitender Planung von allgemeinen Themen, wie der standort- (und prozess-)spezifischen Verfahrenswahl hin zu Fragen der konkreten Auslegung einzelner Sicherheitsmaßnahmen. Während für die anfänglichen Projektphasen eher Fragen der inhärenten Sicherheit und die Ableitung der Anforderungen an die Auslegung der Anlagen und Prozesse aus dem bestimmungsgemäßen Betrieb stehen, werden in den späteren Projektphasen Störungen bzw. Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb analysiert.

Die im Forschungsprojekt betrachteten Verfahren lassen sich nur bedingt den einzelnen Projektphasen oder sicherheitstechnischen Fragestellungen zuordnen. Grundsätzlich sind die Verfahren so allgemein gehalten, dass diese während allen Lebenszyklusphasen inkl. der Betriebsphase angewendet werden können. Folgende Zuordnungen lassen sich dennoch treffen:

- Eine HAZOP-Studie baut in der Regel auf einem sicherheitstechnischen Grundkonzept auf und wird in der Regel erst zur Detailplanung angewendet.
- Für die Phase der Machbarkeitsstudie oder die Vorplanung können hingegen Screening-Techniken oder spezielle Checklisten zum Einsatz kommen, die strukturiert unterschiedliche Gefahrenfelder abfragen und somit gewissermaßen als vorläufige Gefahrenanalyse gelten können.

Eine beispielhafte Einbindung der sicherheitsgerichteten Aktivitäten in den Projektablauf wird in der Borschüre „Das PAAG- / HAZOP-Verfahren und weitere praxisbewährte Methoden “ der IVSS Sektion Chemie gegeben.

Hinweise zur Auswahl geeigneter Verfahren

Anwendung bei verschiedenen Anlagentypen, Kombination der Verfahren

Die im Rahmen des Forschungsprojektes ausgewertete Literatur gibt keine Hinweise, dass sich die Verfahren, Methoden und Modelle sinnvoll bestimmten Anlagentypen (z.B. im Sinne des 4. BImSchV, Anhang 1) zuordnen lassen. Unter gewissen Randbedingungen wird jedoch der Einsatz von checklistenbasierten Vorgehensweisen als sinnvolle bzw. zeitsparende Alternative zur HAZOP und ähnlich aufwändigen Verfahren angesehen.

Davon abgesehen ist es wichtig zu verstehen, dass in der Regel mehrere Verfahren, Methoden und Modelle in Kombination bzw. in Ergänzung (und nicht als Alternative) zueinander angewendet werden können und müssen, da einzelne Techniken in der Regel nicht alle Komponenten der Risikobeurteilung abdecken.

Hinweise zur Auswahl geeigneter Verfahren

Aufwand bei der Anwendung der Verfahren (1/3)

Dauer der Durchführung eines HAZOP-Workshops¹:

- Apparate mit einem Prozesszustand (z. B. kontinuierlich betriebene Anlagenteile): ca. 1-2 Stunden
- Apparate mit mehreren Prozesszuständen (z. B. batchweise betriebene Rührbehälter) ca. 3-4 Stunden

Die Vor- und Nachbereitung des Workshops durch den Moderator erfordert ebenso viel Zeit. Laut Abschätzung eines Praxispartners beträgt der Aufwand ca. die fünffache Dauer des HAZOP-Workshops.

Außerdem spielt der Teamleiter/Moderator eine entscheidende Rolle. Je erfahrener dieser ist, je rascher wird er relevante, aber auch unkritische Punkte erkennen und die Diskussionen entsprechend steuern. Eine ebenso entscheidende Rolle spielen die Motivation und Disziplin der Teammitglieder.

¹ gemäß Sommer, J. et al (2008): Das PAAG-Verfahren. Methodik, Anwendung, Beispiele. 4. Auflage, Internationale Vereinigung für soziale Sicherheit (IVSS), Sektion Chemie, Heidelberg

Hinweise zur Auswahl geeigneter Verfahren

Aufwand bei der Anwendung der Verfahren (2/3)

Der Aufwand einer Fehlerbaumanalyse ist stark abhängig vom Einsatzzweck bzw. den mit der Analyse verbundenen Zielstellungen (Umfang und Detailierungstiefe der zu untersuchenden Szenarien, ausschließlich qualitative oder auch quantitative Analyse) und den bereits vorliegenden Informationen (z.B. in Form von HAZOP/FMEA-Studien, Ausfallraten, Eintrittshäufigkeiten). Sind sämtliche Informationen bereitgestellt, können diese relativ zügig im Fehlerbaum abgebildet werden. Einen vergleichsweise großen Aufwand bedeutet dann eher die Schulung des Personals in der Anwendung in der Fehlerbaumtechnik sowie die Akquise eines geeigneten Softwareprogrammes (einfache Redundanzkonzepte können auch per Hand bzw. mit kostenfreien Online-tools gerechnet werden → <https://reliabilityanalyticstoolkit.appspot.com/>).

Vergleichbare Aussagen gelten für die Ereignisbaumanalyse und Layer of Protection Analyse.

Wenn die Fehlerbaum- und Ereignisbaumanalyse nicht ergänzend, sondern als Alternative zur HAZOP-Studie zur Anwendung kommen soll, dann sollte in erster Näherung mit einem vergleichbaren Gesamtaufwand gerechnet werden.

Hinweise zur Auswahl geeigneter Verfahren

Aufwand bei der Anwendung der Verfahren (3/3)

Verfahren die beim Störfallereignis ansetzen (z.B. FTA/ETA oder Szenarienanalyse/HAZOP-Master) sind im Vergleich zu fehlerorientierten Verfahren wie der HAZOP-Analyse aufwandstechnisch jedoch insofern im Vorteil, als dass die Diskussionen nicht sicherheitsrelevanter Aspekte auf ein Minimum reduziert werden können (die Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb in der HAZOP-Studie sind per se nicht zwingend sicherheitsrelevant). Außerdem kann mit den ereignisorientierten Ansätzen die Betrachtungstiefe von Fragestellung zu Fragestellung gezielt angepasst werden.

Beispiel : Kann das Überfüllen zu einem Störfallereignis führen und hat man eine geeignete Überfüllsicherung in angemessener Qualität, so ist es gleichgültig, von welchen Einzelfehlern ein solches Ereignis ausgelöst werden kann.

Restriktionen und Kritikpunkte

- HAZOP: Beschränkung auf die Analyse der Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb einer Anlage. Externe Gefahrenquellen, wie umgebungsbedingte Gefahrenquellen oder Eingriffe Unbefugter sowie Fehler in der Auslegung (z.B. unzureichende initiale mechanische Eigenschaften) werden nicht analysiert.
- HAZOP: Das Einfehlertoleranzprinzip, d.h. das Nichtberücksichtigen von Mehrfachfehlern kann zur Unterschätzung von Risiken führen (Kompensation durch Anwendung FTA/ETA denkbar).
- Checklisten: Müssen in der Regel durch den Anwender zunächst erst erstellt werden.
- FTA: Sollten stochastische Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Basisereignissen bestehen, so können diese mittels Fehlerbaumanalysetechnik nicht in allen Fällen sauber abgebildet werden, mit der Folge, dass das Berechnungsergebnis entweder zu optimistisch oder zu pessimistisch ausfällt. Beispiele für solche Abhängigkeiten sind Redundanzsysteme, bei denen die Belastungen der aktiven Komponenten mit der Anzahl ausgefallener Komponenten steigen (Beispiel Pumpensystem mehreren Pumpen), oder Instandsetzungsstrategien, bei der die Reaktionszeit mit der Anzahl ausgefallener Komponenten sinken (Ausfall der ersten Pumpe=Reduktion Redundanz->warten bis zu Jahreswartung, Ausfall zweite Pumpe=Wegfall Redundanz -> unmittelbarer Instandsetzungseinsatz). Solche Abhängigkeiten können mittels sogenannter Markovprozesse abgebildet und gerechnet werden.

Restriktionen und Kritikpunkte

Grenzen beim Arbeiten mit dem HAZOP-Master:

- Trotz der zugrundeliegenden systematischen Struktur der Ereignisabläufe mit ihren nachvollziehbaren Zusammenhängen kann eine Vollständigkeit nicht gewährleistet werden. Insbesondere gilt, dass auf sehr komplexen Zusammenhängen oder auch auf 'exotischen' Auslösern beruhende Ereignisabläufe existieren können, die nicht im Detail im HAZOP-Master hinterlegt sind. In diesen Fällen ist das betroffene Team - wie beim klassischen HAZOP auch - auf seine Erfahrung und die Expertise der teilnehmenden Experten angewiesen.
- Der HAZOP-Master hilft auch nicht bei der Festlegung geeigneter Sicherheitsmaßnahmen. Er enthält zwar wichtige Hinweise auf mögliche Schutzmaßnahmen oder begleitende organisatorische Regelungen, letztlich liegt es aber in der Verantwortung des Analyseteams, die notwendigen Maßnahmen und deren erforderliche Zuverlässigkeit festzulegen.
- Der HAZOP-Master ist ein Instrument zur Suche gefährlicher Ereignisabläufe, aber keines zur Beurteilung vorliegender Risiken.

3. Vorstellung ausgewählter Verfahren, Methoden und Modelle

HAZOP-Verfahren (PAAG-Verfahren)

Leitwort-gelenkte Kreativtechnik zur systematischen Ermittlung denkbarer Störfälle und deren Ursachen in einem interdisziplinären Team.

- Beschreibung der Sollfunktionen des bestimmungsgemäßen Betriebes
- Prognose (P): Analyse mögl. Abweichungen von den Sollfunktionen anhand sogenannter Leitworte
- Auffinden (A) möglicher Ursachen und Abschätzen (A) der Folgen
- Gegenmaßnahmen (G): Bestimmung geeigneter Vorkehrungen und Maßnahmen

Iteratives Verfahren: Zunächst erfolgt eine szenarische Betrachtung ohne Berücksichtigung von Vorkehrungen und Maßnahmen, um so deren Beitrag zur Risikoreduktion herausarbeiten zu können.

„Klassische“ Leitworte:

- Nein/Nicht: Verneinung der gesamten Sollfunktion: Die Sollfunktion wird nicht erfüllt;
- Mehr: Quantitative Größen der Sollfunktion nehmen zu, z. B. Menge (mehr bzw. weniger), Mengenstrom (größer bzw. kleiner), Temperatur, Druck (höher bzw. niedriger), Geschwindigkeit (schneller bzw. langsamer);
- Weniger: Quantitative Größen der Sollfunktion nehmen ab, analog „Mehr“;
- Sowohl als auch: „Die Sollfunktion wird erreicht, zusätzlich geschieht noch etwas anderes, z. B. zusätzliche Stoffe (Verunreinigungen, Korrosionsprodukte...), zusätzliche Wege (Leckagen, offene Armaturen);
- Teilweise: Die Sollfunktion wird nur unvollständig erreicht, z. B. fehlende Komponenten in einem Stoffgemisch;
- Umkehrung: Die Sollfunktion verläuft in umgekehrter Richtung, z. B. entgegengesetzte Fließrichtung, vertauschte Reihenfolge;
- Anders als: Einzelne Teile der Sollfunktion werden ausgetauscht, z. B. anderer Stoff, andere Stoffeigenschaften, anderer Zeitpunkt, anderer Ort

HAZOP-Verfahren (PAAG-Verfahren)

Die Anwendung der HAZOP dient dem rechtzeitigen Erkennen von Planungsfehlern und der Erstellung von Sicherheitskonzepten.

Das Verfahren kann grundsätzlich auf alle Anlagenarten in der Prozessindustrie, von großen kontinuierlichen Anlagen der Petrochemie über kleine diskontinuierliche Einheiten bis hin zu Einzelaggregaten, angewendet werden. Der typische Anwendungsfall liegt jedoch bei komplexen verfahrenstechnischen Anlagen bzw. in der chemischen Industrie.

Grundsätzlich können sämtliche Arten von Gefahrenquellen mit dem HAZOP-Verfahren betrachtet werden. In der Regel wird jedoch auf die Betrachtung von betrieblichen Gefahrenquellen (technisches Versagen und Fehlfunktionen von Anlagenteilen, sowie menschliche Fehlhandlungen) abgestellt. In diesen Fällen wird die HAZOP um weitere Tools (häufig Checklisten) ergänzt, um so themenspezifische Fragestellungen nachgehen zu können.

Welche Gefahrenquellen schlussendlich identifiziert werden, hängt dabei maßgeblich von der Zielstellung, der Projektphase und der Teamzusammenstellung ab, sowie von der Expertise der Teilnehmer.

Die klassischen Leitworte werden in vielen Fällen erweitert bzw. modifiziert, um so den Anforderungen und Bedürfnissen am Standort gerecht zu werden.

HAZOP-Verfahren (PAAG-Verfahren)

Beispiel eines modifizierten Leitwortsystems:

Abweichung Ebene 1	Abweichung Ebene 2
Durchfluss	zu viel, zu wenig, kein, anders herum, falscher Weg
Temperatur	Zu hoch, zu niedrig, Kühlungsausfall, Heizung gestört
Druck	zu hoch, zu niedrig, Vakuum falsch
Füllstand	zu hoch, zu niedrig, Phasentrennung falsch
Stoffe	Falscher Zugabeort, Verwechslung, Verunreinigungen, falsche Reihenfolge, Konzentration falsch, Viskosität falsch, pH-Wert falsch, Restmenge vorhanden,
Reaktionen	Dosierung zu früh, Dosierung zu spät, Durchmischung falsch, Aufschäumen, Exothermie möglich, Katalytische Effekte
Werkstoffauswahl	Werkstoff falsch, Korrosion, Abrasion möglich
Bedienung	Anfahren, Abfahren, Einblocken möglich
von Aussen	Ausfall Steuerluft, Ausfall Druckluft, Ausfall Strom, Ausfall Wasser, Ausfall vorgeschalteter Anlagen, Ausfall nachgeschalteter Anlagen
Leckagen	nach aussen, nach innen
Explosionsschutz	Ex-Atmosphäre möglich, statische Aufladung möglich, Zündquellen möglich
Brandschutz	Brandschutzwiderstandsklasse, Brand- & Rauchabschnitte, 1. und 2. Rettungsweg vorhanden, Flächen für Werkfeuerwehr / Zu- & Durchfahrten, Löschwasser-versorgung, Technische Einrichtungen & Anlagen zum Brandschutz, Löschwasserrückhaltung, Betriebliche & Organisatorische Maßnahmen zum Brandschutz
Arbeitsschutz	Bedienbarkeit
Gewässerschutz	Auffangraum
Anderes	TA-Luft Maßnahmen

Checklisten

Für verhältnismäßig weniger komplexe Themen bietet sich die Anwendung von Checklisten an. Dies setzt voraus, dass die Gefahren, sowie die Anforderungen im Umgang mit den Gefahren aus Erfahrungen und/oder Regelwerken bereits sehr gut bekannt sind. Durch gezielte Fragestellungen und einen konkreten Praxisbezug entfallen ausschweifende Diskussionen. Beispiele für Checklisten im Rahmen von Risikoanalysen:

- Checkliste für die Gefahrenanalyse (Abfrage möglicher Gefahrenquellen und Ereignisse, die zu einem Störfall führen können, Abfrage von Eintrittswahrscheinlichkeiten)
- Checkliste für die Bestimmung des Standes der Sicherheitstechnik (Abfragen zur Beschaffenheit und zum Betrieb der Anlagen)
- Checkliste für die Ableitung von Szenarien (Abfragen zur möglichen Verhinderung von Störfällen, zur Minderung von Störfallauswirkungen, zur Identifikation verbleibender Risiken, zur Bestimmung der Ausmaßschwere, zur Ableitung geeigneter Notfallmaßnahmen)
- Checkliste für Auswirkungsbetrachtungen (Abfrage zur Ereignisauswirkung und zur Einschätzung des Risikos)
- Checkliste für die Risikobewertung (Abfrage der Risikoakzeptanzkriterien und Abfrage zur Bewertung der verbleibenden Risiken)

Je nach gewünschter Beantwortung der Fragen wird die offene oder die geschlossene Fragetechnik genutzt.

Checklisten

Checklisten werden unter anderem im Kontext sog. Gefahrenfeldanalysen eingesetzt. Ziel hierbei ist es, in einem frühen Projektstadium das Vorhaben als solches (und weniger die verfahrenstechnischen Prozesse im Detail) zu untersuchen. Im Fokus stehen dabei die möglichen Wechselwirkungen der Anlage-bzw. des Prozesses mit der Umgebung.

Das Nadelöhr in der Anwendung von Checklisten ist die Erstellung oder Beschaffung eben dieser. Auch wenn es Bestrebungen gegeben hat, einheitliche bzw. standardisierte Listen für ein weites Anwendungsfeld zu erarbeiten finden in der Praxis hauptsächlich unternehmensintern erstellte Checklisten Anwendung. Diese spiegeln jedoch die Erfahrungswerte der Mitarbeiter bzw. des Unternehmens wieder und sind somit subjektiv.

Grundsätzlich gilt:

Checklisten können nie den Sachverstand bzw. gesunden Menschenverstand ersetzen. Mitdenken ist immer Pflicht!

Checklisten

Beispielhafte Checkliste für exotherme Reaktionen (Quelle: IVSS-Broschüre "Das PAAG- / HAZOP-Verfahren und weitere praxisbewährte Methoden")

Chemische Energie exothermer Reaktionen und thermisch sensibler Stoffe	Ja	Nein	Nicht zutreffend
Ist die thermische Stabilität der eingesetzten und gebildeten Stoffe einschließlich der Zwischenprodukte bekannt?			
Ist die Brutto-Reaktionswärme und der zeitliche Verlauf der Wärmeproduktion der exothermen Prozesse bekannt?			
Sind die Kühlkapazitäten der Anlage auf den anfallenden Wärmestrom abgestimmt?			
Wurde eine systematische Sicherheitsbetrachtung durchgeführt und abweichende Prozesszustände analysiert, die zu einer Vergrößerung des Wärmestroms, zu einer Verminderung der Wärmeabfuhr oder zu einer Akkumulation von Reaktionspotenzial führen können?			
Sind die Wechselwirkungen der eingesetzten und gebildeten Stoffe mit den Werkstoffen der Anlage bekannt?			
Gibt es ein Konzept zur Verhinderung von Chemikalienverwechslungen?			

Risikomatrix

Eine Risikomatrix, auch als Risikobewertungs-, Risikoakzeptanz- oder auch Risikobeurteilungsmatrix bezeichnet, ist ein Instrument zur Bewertung von Risiken und basiert auf einer (semi-)quantitativen Abschätzung des Risikos. Dabei kann es sich um Risiken von Störfällen, aber auch um andere Aspekte unternehmerischer Tätigkeiten handeln.

Eine Risikomatrix besteht meistens aus zwei Achsen:





- **Risikoeintrittshäufigkeit:** Diese Achse beschreibt, wie häufig/wahrscheinlich es ist, dass ein unerwünschtes Ereignis eintritt. Sie kann in numerischen Werten (z. B. „jährlich“, „alle 10 Jahre“) oder in qualitativen Begriffen (z. B. „sehr unwahrscheinlich“, „sehr wahrscheinlich“) ausgedrückt werden.
- **Risikoauswirkung:** Diese Achse beschreibt die potenziellen Auswirkungen oder Konsequenzen eines unerwünschten Ereignisses. Auch hier können numerische Werte (z. B. „1 Toter“, „mehrere Tote“) oder qualitative Begriffe (z. B. „geringfügig“, „verheerend“) verwendet werden.

Eine Risikomatrix weist jeder Kombination einen Akzeptanzwert zu (z.B. „Akzeptabel“, „weitere Maßnahmen sind zu prüfen“, „Nicht akzeptabel“). Die Risikomatrix dient damit als Entscheidungshilfe bei der Frage, ob weitere risikoreduzierende Maßnahmen ergriffen werden sollten, oder die bereits berücksichtigten Maßnahmen das Risiko ausreichend reduzieren. Sie ermöglicht eine klare Visualisierung bestehender Risiken und unterstützt Entscheidungsträger dabei, Ressourcen effektiv zu allokalieren.

Risikomatrizen werden in der Regel projekt- bzw. unternehmensspezifisch kalibriert, einheitliche Vorgaben existieren nicht.

Risikomatrix

Beispiel einer Risikomatrix:

[1/a]			
$10^{-2} - 10^{-3}$			
$10^{-3} - 10^{-4}$			
$10^{-4} - 10^{-5}$			
$10^{-5} - 10^{-6}$			
$10^{-6} - 10^{-7}$			
	C1	C2	C3
Konsequenz Personen- schaden	Verletzung mit > 24 Std. Krankenhaus und/oder reversible Beeinträchtigung/Verletzung	Irreversible Verletzungen oder Todesfall innerhalb bzw. reversible Verletzungen außerhalb des Betriebsgeländes	Irreversible Verletzungen oder Todesfall außerhalb oder mehrere Todesfälle innerhalb des Betriebsgeländes
Konsequenz Umwelt- schaden	Weitreichende Folgen möglich, lokale Intervention inner- oder Außerbetrieblicher Stelle erforderlich UND reversibler Schaden	Weitreichende Folgen möglich, überregionale Intervention (z. B. Verständigung der Landeswarnzentrale) erforderlich UND reversibler Schaden	Irreversible Umweltschäden möglich, überregionale oder nationale Intervention erforderlich
	 Nicht tolerierbar	 tolerierbar in Einzelfällen; nur anwendbar für Bestandsbetriebsanlagen, sonst nicht tolerierbar (rot)	 Akzeptabel  Zielwert

Quelle: Preiss, R., Struckl, M. (2017): Layer of Protection Analyse zur risikobasierenden Bewertung von Szenarien. TÜV Austria Akademie GmbH

Risikomatrix

Beispiel einer Risikomatrix:

Konsequenz					Häufigkeit			
Risiko-kontext \ Skalen-wert	Menschen	Anlagen	Umwelt	Reputation	A	B	C	D
					Ist bereits in der Industrie aufgetreten	Ist bereits beim Unternehmen aufgetreten	Tritt mehrmals jährlich beim Unternehmen auf	Tritt mehrmals jährlich beim Betriebsbereich auf
0	Keine Verletzungen	Kein Schaden	Kein Effekt	Keine Auswirkungen	Management für kontinuierliche Verbesserung			
1	Leichte Verletzungen	Leichter Schaden	Leichter Effekt	Leichter Auswirkungen				
2	Geringfügige Verletzungen	Geringfügiger Schaden	Geringfügiger Effekt	Begrenzte Auswirkungen	Risikomindernde Maßnahmen vornehmen			
3	Erbliche Verletzungen	Lokaler Schaden	Lokaler Effekt	Beachtliche Auswirkungen				
4	Einzelner Todesfall	Erheblicher Schaden	Erheblicher Effekt	Erhebliche nationale Auswirkungen	Screening-Kriterien sind nicht erfüllt			
5	Mehrfacher Todesfall	Umfangreicher Schaden	Umfangreicher Effekt	Erhebliche internationale Auswirkungen				

Quelle: IZP Eigendarstellung in Anlehnung an TÜV Rheinland:

<https://risktec.tuv.com/knowledge-bank/the-matrix-reloaded-our-guide-to-the-risk-assessment-matrix/>

Risikograph

Übernehmen PLT-Einrichtungen sicherheitsgerichtete Funktionen zur Verhinderung ernster Gefahren, sind diese als sicherheitsrelevante Anlagenteile im Sinne der StörfallV zu betrachten. In Abhängigkeit des abzudeckenden Risikos sind diese entsprechend verfügbar zu gestalten.

Der Risikograph nach VDI/VDE 2180 Blatt 1 „Funktionale Sicherheit in der Prozessindustrie Einführung, Begriffe, Konzeption “ gestattet die Einstufung einer sicherheitstechnischen Anforderung an eine PLT-Einrichtung mittels sog. Safety Integrity Levels (SIL), welche wiederum mit entsprechenden Verfügbarkeitsanforderungen verknüpft sind.

Wie bei der Risikomatrix setzt sich das Risiko beim Risikographen nach VDI/VDE 2180 aus der Häufigkeit des Schadenseintritts und des Schadensausmaßes zusammen.

Die Häufigkeit wird jedoch durch drei Faktoren genauer bestimmt:

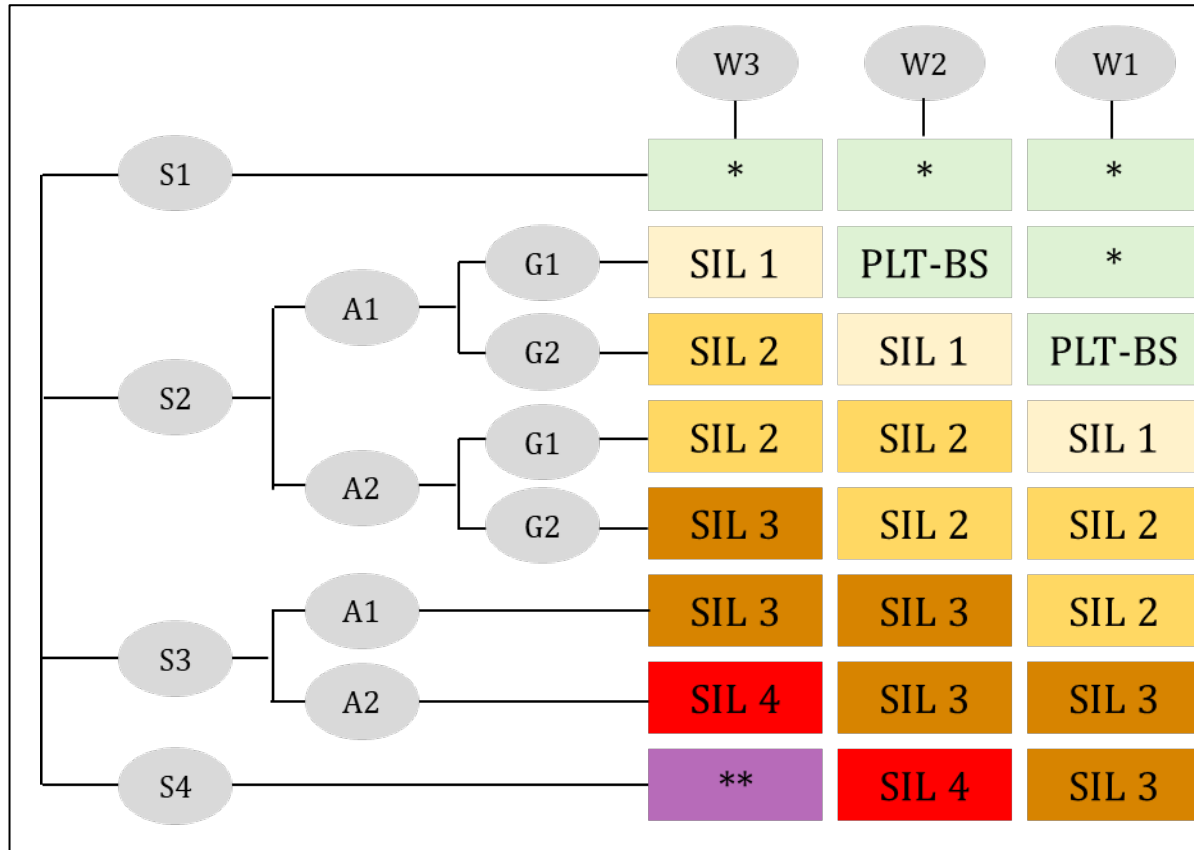
- A = Aufenthalt im Gefahrenbereich/in der gefährdeten Zone
- G = Möglichkeit der Gefahrenabwendung
- W = Eintrittswahrscheinlichkeit unerwünschter Ereignisse

In Abhängigkeit der konkreten Ausprägungen der Faktoren leitet sich das notwendige SIL-Level ab (siehe [folgende Folie](#)).

Die möglichen Ausprägungen der Faktoren werden im Risikographen nach VDI/VDE 2180 qualitativ beschrieben (siehe [Folie 42](#)).

Risikograph

Risikograph nach VDI/VDE 2180-1 (Stand April 2019):



Quelle: IZP Eigendarstellung in Anlehnung VDI/VDE 2180-1 (Stand April 2019)

Risikograph

Mögliche Ausprägungen der Faktoren nach VDI/VDE 2180:

- Schwere der Auswirkung des gefährlichen Ereignisses

S1: leichte Verletzung, kleinere Umwelteinflüsse (außerhalb Geltungsbereich StörfallV)

S2: schwere, bleibende Verletzung einer oder mehrerer Personen; Tod einer Person, vorübergehende größere schädliche Umwelteinflüsse, z.B. nach Störfall-Verordnung

S3: Tod mehrerer Personen, lang andauernde größere schädliche Umwelteinflüsse, z.B. nach Störfall-Verordnung

S4: katastrophale Auswirkungen, viele Tote

- Aufenthaltshäufigkeit im gefährlichen Bereich multipliziert mit Aufenthaltsdauer A

A1: seltener bis häufiger Aufenthalt in der gefährdeten Zone

A2: häufiger bis andauernder Aufenthalt in der gefährdeten Zone

- Möglichkeit, die Auswirkungen des gefährlichen Ereignisses zu vermeiden G

G1: unter bestimmten Bedingungen möglich

G2: fast unmöglich

- Eintrittswahrscheinlichkeit des gefährlichen Ereignisses (W)

W1: sehr geringe Wahrscheinlichkeit des unerwünschten Auftretens und nur sehr wenige unerwünschte Ereignisse sind im betrachteten oder in ähnlichen Prozessen wahrscheinlich

W2: geringe Wahrscheinlichkeit des unerwünschten Auftretens und nur wenige unerwünschte Ereignisse sind im betrachteten oder in ähnlichen Prozessen wahrscheinlich

W3: relativ hohe Wahrscheinlichkeit des unerwünschten Auftretens und häufige unerwünschte Ereignisse sind im betrachteten oder in ähnlichen Prozessen wahrscheinlich

Layer of Protection Analysis

Die Layer of Protection Analysis (LOPA) ist ein (semi-)quantitatives Analyseverfahren, das es ermöglicht, für prozesstechnische Einzelszenarien das mit ihnen verbundene Risiko abzuschätzen und zu bewerten. Als Einzelszenario wird dabei eine Kausalkette beginnend mit dem initialen Ereignis, welches sich durch weitere, kaskadierende Ereignisse, sowie unvorteilhafte Bedingungen zu einem Störfall entwickeln kann, verstanden.

Kerngedanke des LOPA-Verfahrens ist, dass das mit dem Szenario verbundene Risiko mittels verschiedener Vorkehrungen und Maßnahmen – die namensgebenden Layer of Protection (dt. Schutzebenen) - reduzierbar ist. Ziel des Verfahrens ist daher eine Bewertung der Gesamtheit der für das Szenario relevanten Vorkehrungen und Maßnahmen (Schutzebenen). Dazu werden das initiale Risiko (Risiko ohne Schutzebenen), sowie das Restrisiko (Risiko mit Schutzebenen) ermittelt und bewertet. Können die Vorkehrungen und Maßnahmen das Risiko nicht ausreichend reduzieren, spricht man von einer sogenannten Schutzlücke. Das Restrisiko ist in diesem Fall nicht akzeptabel. Die Bewertung erfolgt anhand einer vorab festgelegten Risikobewertungsmatrix oder alternativ mittels eines Systems aus Target- und Kreditfaktoren. Das LOPA-Verfahren bietet mit dem Konzept der Schutzlücke darüber hinaus einen Ansatz, erforderliche SIL-Level für PLT-Sicherheitseinrichtungen zu bestimmen. Das Ausmaß der Schutzlücke bestimmt dabei das erforderliche SIL-Level.

Die LOPA dient als Erkenntnisquelle zur Aufdeckung von Schwachstellen und Nachbesserung des Sicherheitskonzeptes, welches die Umsetzung des Standes der Sicherheitstechnik allein unter Umständen nicht gewährleisten kann.

Layer of Protection Analysis

Die LOPA baut, sofern vorhanden, auf den Erkenntnissen der Gefahrenanalyse auf. Im Rahmen der LOPA sind je Einzelszenario zu bestimmen:

- Eintrittshäufigkeit des Initialereignisses („Initial Event“)
- Bedingte Wahrscheinlichkeit, dass gleichzeitig ein „Enabling event“, d.h. eine weitere, für das Szenario notwendige Randbedingung vorliegt. Z.B.: Thermisches Durchgehen setzt das zeitliche Zusammentreffen eines hohen Reaktionsumsatzes (Enabling event) mit dem Ausfall der Kühlung des Behälters (Initialereignis) voraus
- Versagenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Barrieren bzw. Gegenmaßnahmen (engl. Independent Protection Layer (IPL))
- Eintrittswahrscheinlichkeiten sog. „Conditional modifier“. Z.B.: Anwesenheit von Personal im Gefahrenbereich

Aus den einzelnen Faktoren wird dann ein Produkt gebildet und so die zu erwartende Eintrittshäufigkeit des Störfalls berechnet*. In Kombination mit einer Abschätzung des Schadensausmaßes kann das Szenario anhand einer Risikobewertungsmatrix bewertet werden.

Die Barrieren bzw. Gegenmaßnahmen lassen unterschiedlichen Schutzebenen zuordnen:





- Beanspruchungsgerechte Auslegung
- PLT-Betriebseinrichtungen
- Eingriffe des Betriebspersonals
- PLT-Sicherheitseinrichtungen
- Druckentlastungseinrichtungen
- Schadensbegrenzungseinrichtungen
- Gefahrenabwehrorganisation

*Hierfür wird die Unabhängigkeit zwischen der einzelnen Schutzebenen/Gegenmaßnahmen untereinander und zum Initialereignis gefordert.

Fehlerbaumanalyse

Die Fehlerbaumanalyse (auch Fehlzustandsbaumanalyse genannt, engl. Fault Tree Analysis (FTA)) ist ein deduktives Verfahren zur Untersuchung von Ursachen eines unerwünschten Ereignisses (auch Top-Ereignis genannt). Als Top-Ereignis kann dabei beispielsweise ein unerwünschter Systemzustand (z.B. Versagen einer Sicherheitseinrichtung), aber auch ein Schlauchabriss, ein Behälterversagen oder eine Explosion angesehen werden. Im Allgemeinen können einem Top-Ereignis unterschiedliche bzw. mehrere Ursachen zugrunde liegen. Teilweise treten Top-Ereignisse erst dann auf, wenn mehrere Ursachen bzw. Umstände gleichzeitig, resp. zeitnah zueinander auftreten (Stichworte: Wegfall von Redundanzen, Versagen von Barrieren im Anforderungsfall). Mithilfe der FTA-Methodik können diese kausallogischen Zusammenhänge mittels boolescher Algebra modelliert und über den namensgebenden Fehlerbaum dokumentiert werden.

Die kausallogischen Zusammenhänge werden über sogenannte Gatter (engl. gates) dargestellt. In der EN 61025 (Fehlzustandsbaumanalyse (IEC 61025:2006); Deutsche Fassung EN 61025:2007) werden u.a. folgende Symbole verwendet:

Symbol	Erklärung
	Basisereignis; Primäres Ereignis, z.B. Ausfall einer Komponente
	ODER-Gatter; Es muss mindestens ein untergeordnetes Ereignis eintreten, damit das übergeordnete Ereignis eintritt
	UND-Gatter; alle untergeordneten Ereignisse müssen eintreten, damit das übergeordnete Ereignis eintritt
	VOTE-Gatter; Es müssen mindestens m untergeordnete Ereignisse eintreten, damit das übergeordnete Ereignis eintritt

Fehlerbaumanalyse

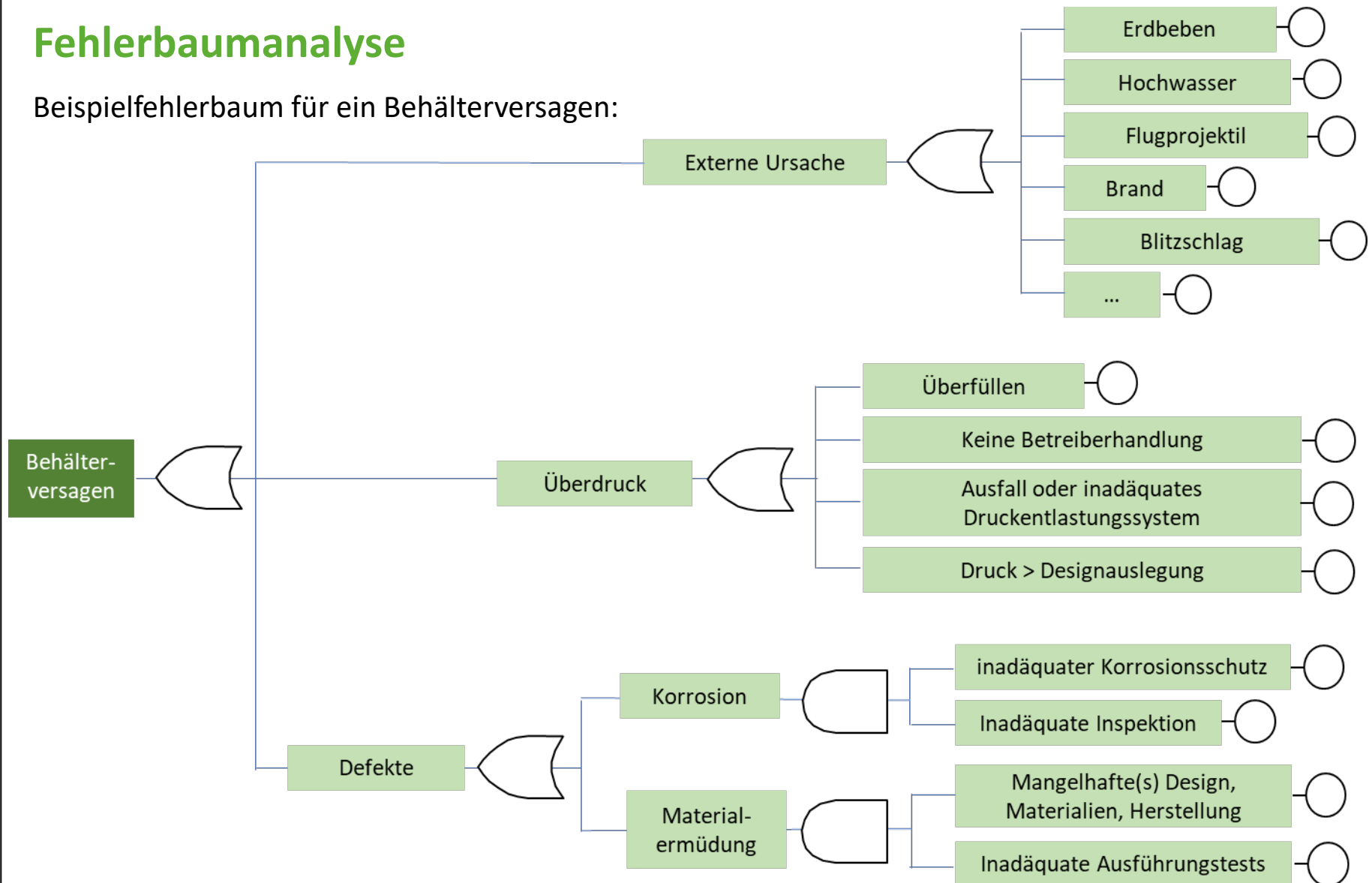
Der FTA-Technik ist ein wahrscheinlichkeitstheoretisches Kalkül eigen, welches die Berechnung der Eintrittshäufigkeit des Top-Ereignisses aus den Eintrittshäufigkeiten der einzelnen Ursachen (und deren Unklardauern) erlaubt, wobei etwaige Redundanzkonzepte bzw. Barrieren entsprechende Berücksichtigung finden können.

Die Berechnungen können entweder per Hand mittels Formeln, wie sie beispielsweise in der Fehlerbaumnorm DIN EN 61025:2007-08 „Fehlzustandsbaumanalyse“ beschrieben sind, oder unter Verwendung entsprechender Softwareprogramme durchgeführt werden.

Im Kontext sicherheitsgerichteter Betrachtungen sind Top-Ereignisse typischerweise seltene Ereignisse, zu welchen in der Regel kaum belastbare Daten über Eintrittshäufigkeiten vorliegen. Die Fehlerbaummethodik stellt eine Möglichkeit bereit, diese Eintrittshäufigkeiten abzuschätzen (es wird also angenommen, dass zumindest für die einzelnen Ursachen des Top-Ereignisses belastbare Daten vorliegen). Die FTA-Methodik leistet damit einen Beitrag zur Quantifizierung von Restrisiken.

Fehlerbaumanalyse

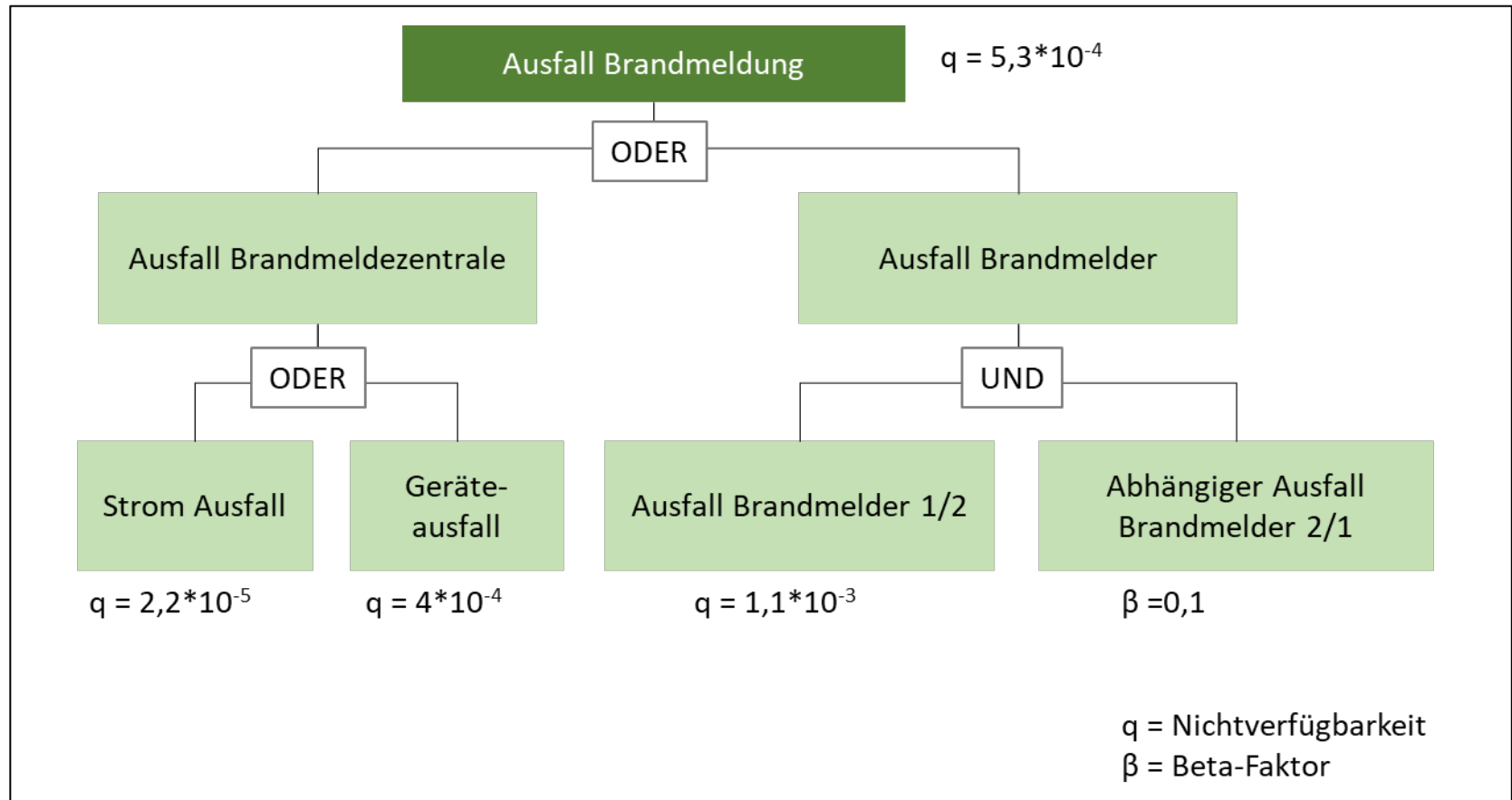
Beispielfehlerbaum für ein Behälterversagen:



Quelle: IZP Eigendarstellung in Anlehnung an „Failure frequencies for major failures of high pressure storage vessels at COMAH sites: A comparison of data used by HSE and the Netherlands“ von Clive Nussey, December 2006

Fehlerbaumanalyse

Beispielfehlerbaum für eine Brandmeldeanlage:



Quelle: IZP Eigendarstellung in Anlehnung an „Workshop – Risikomanagement. “Nutzung probabilistischer Methoden in der europäischen Genehmigungspraxis und deren Nutzbarkeit im deutschen Störfallrecht, insbesondere aus Sicht der Umweltverbände”, 2005, Bonn

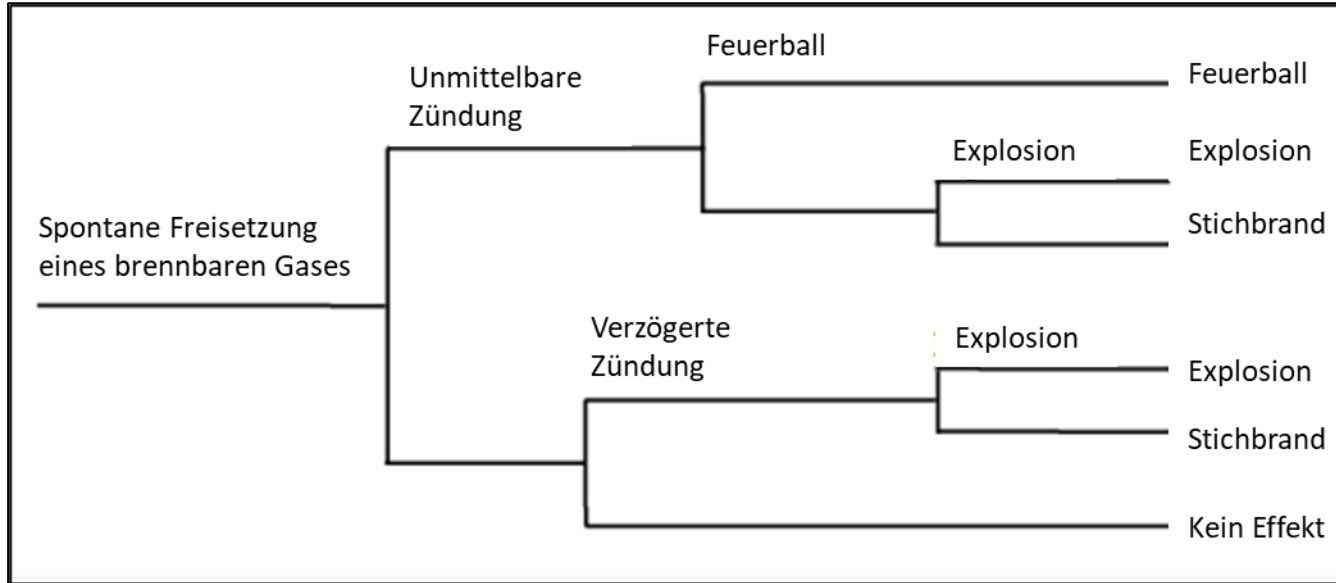
Ereignisbaumanalyse

Die Ereignisbaumanalyse (Event Tree Analysis (ETA)) stellt gewissermaßen das Pendant zur Fehlerbaumanalyse dar, welche von einem unerwünschten Ereignis ausgeht und strukturiert darstellt, welche weiteren Folgen denkbar sind (z.B.: Sicherheitssysteme greifen ja/nein, Stoff entzündet sich ja/nein, Explosion ja/nein, Berücksichtigung verschiedener Wettereinflüsse). Mittels Ereignisbaumanalyse wird somit untersucht, welche Verlaufsszenarien denkbar sind (induktive Methode) und welche Eintrittswahrscheinlichkeiten diese haben.

In diesem Sinne kann das TOP-Ereignis des Fehlerbaumes als „Pivotelement“ gedacht werden, über welches der Fehlerbaum und der Ereignisbaum zu einer gesamthaften Darstellung denkbarer Kausalketten verknüpft werden kann.

Ereignisbaumanalyse

Beispielereignisbäume für verschiedene Stofffreisetzungsszenarien:



Ereignisbaum “Spontane Freisetzung eines brennbaren Gases (Instantaneous release of an inflammable gas)”.
Quelle: IZP Eigendarstellung in Anlehnung an „Reference Manual BEVI risk Assessments, Module B, Version 3.3” (REVI, 2015)

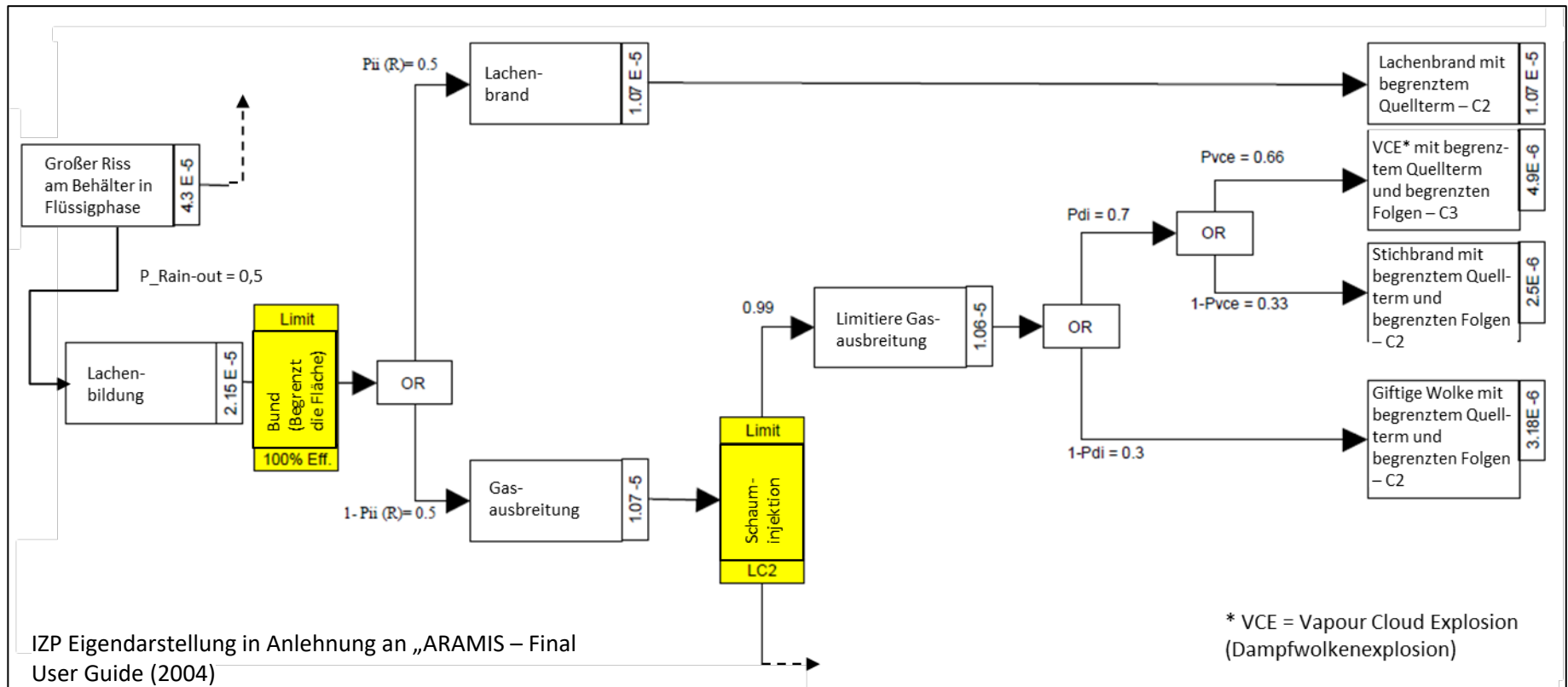
Phänomen		Wahrscheinlichkeit [-]					
Reaktivität → Freisetzungsmenge →		Hoch			Gering		
		Klein	Mittel	Groß	Klein	Mittel	Groß
Spontane Freisetzung	Kontinuierliche Freisetzung						
Feuerball	Freistrahflamme	0.2	0.5	0.7	0.02	0.04	0.09
Stichbrand	Stichbrand	0.0384	0.07	0.126	0.01568	0.03072	0.0728
Dampfwolken-explosion	Dampfwolken-explosion	0.0096	0.03	0.084	0.00392	0.00768	0.0182

Ereignisbaum “Spontane/kontinuierliche Freisetzung eines komprimierten brennbaren Gases (Instantaneous/continuous release of an compressed inflammable gas)”.
Quelle: IZP Eigendarstellung in Anlehnung an „Risk Calculations Manual, Version 2.0” (Department Omgeving, 2019)

Ereignisbaumanalyse

Auszugsweise Darstellung eines Ereignisbaumes im Verfahren "ARAMIS":

- Barrieren/Gegenmaßnahmen werden visuell hervorgehoben (gelbe Boxen)
- Verzweigungen sind logische Gatter. Angabe von Verzweigungswahrscheinlichkeiten



Bow-Tie-Analyse

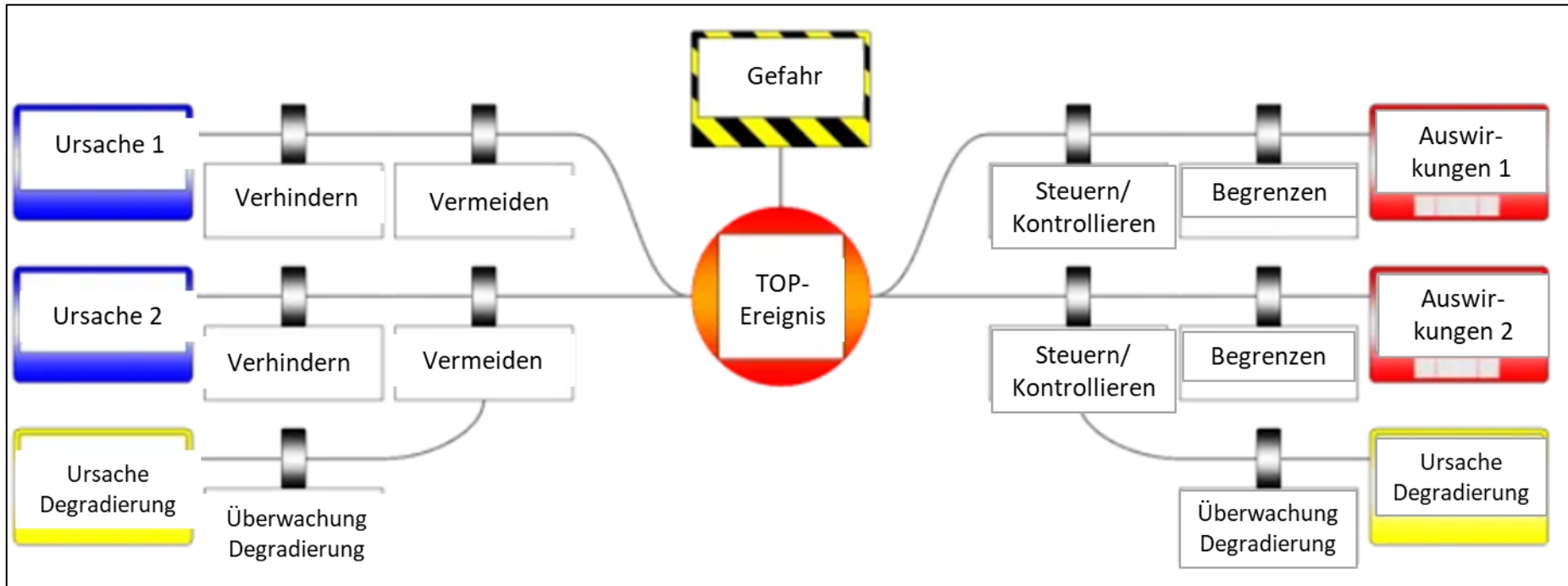
Wenn ein Fehlerbaum den Moment, in dem die Kontrolle über die zu analysierende Gefahr verloren geht, als TOP-Ereignis hat (und eben kein Versagen einer konkreten Sicherheitsmaßnahme zum TOP-Ereignis hat), dann wird die Kombination aus Fehlerbaum- und Ereignisbaumanalyse mitunter als Bow-Tie-Analyse bezeichnet.

Es gilt jedoch zu beachten, dass das CCPS (Center for Chemical Process Safety) gemeinsam mit dem EI (Energy Institute) die Bow-tie-Methode zu einer eigenständigen Methode weiterentwickelt hat:

- Eingehende Betrachtung der Barrieren: Analyse möglicher Ursachen von Degradationen in den Barrieren, welche die Effektivität und Zuverlässigkeit der einzelnen Barrieren einschränken können. Ableitung geeigneter Gegenmaßnahmen.
- Mit dem Begriff „Bow-Tie-Analyse“ wird eine konkrete Art der visuellen Darstellung von Barrieren verbunden. Während diese in der klassischen Darstellungsweise von Fehler- und Ereignisbaum zwar berücksichtigt, aber nicht explizit als solche herausgestellt werden (müssen), ist es das Anliegen der Bow-Tie-Analyse, diese grafisch prominent darzustellen.
- Keine Verwendung logischer Gatter.

Bow-Tie-Analyse

Beispielhafte Darstellung eines Bow-Tie-Diagramms (in Anlehnung an BOW TIE XP Software):



Beispiel: Top-Ereignis = Tanküberfüllung. Gefahr=Überdruck. Vermeidungsmaßnahme = High-high-level-alarm mit einem automatischen Unterbrechung des Zuflusses. Das zuverlässige Ansprechen der Vermeidungsmaßnahme im Anforderungsfall erfordert eine entsprechende Instandhaltung (Inspektionen, Wartung, präventives Tauschen).

Quelle: IZP in Anlehnung an die Darstellung eines Bow-Tie-Diagramms gemäß BOW TIE XP Software (Supplier: CGE RISK MANAGEMENT SOLUTIONS; <https://www.tuvsud.com/de-ch/ressourcen-center/stories/bowtie-fuer-risikoanalysen>)

Bow-Tie-Analyse

Das Anliegen des Bow-Tie-Verfahrens ist es, die Ursachen möglicher Degradierungen in den Barrieren zu identifizieren und diese während des gesamten Lebenszyklus hinreichend klein zu halten.

Bow-Tie-Software-Programme erlauben daher eine Zuweisung eines Statuswertes für den angenommenen, aktuellen Barrierenzustand.

Die Bow-Tie-Darstellung liefert damit einen gesamthaften Überblick über sämtliche Barrieren und deren Status. Kritische Pfade - im Sinne, dass wenige, bis keine voll funktionsfähigen Barrieren zwischen einer Gefahrenquellen und einer Auswirkung liegen – können so schnell erkannt werden.

Konzepte und Software-Lösung hin zu einer möglichst automatisierten Echtzeitdarstellung der Barrierenzustände sind entwickelt worden, sind in der Praxis aber nur schwierig umzusetzen.

Mit dem Bow-Tie-Verfahren erfolgt eine Verknüpfung zum Sicherheitsmanagementsystem, da mit dem Verfahren ersichtlich wird, was getan werden muss, um die Barrieren während der Betriebsphase möglichst effektiv zu halten bzw. die Versagenswahrscheinlichkeiten im Anforderungsfall möglichst gering zu halten.

Bow-Tie-Analyse

Aufgrund der grafischen Darstellung von Kausalketten unerwünschter Ereignisse und der das Risiko minimierenden Barrieren bietet sich das Verfahren vergleichsweise gut für die Risikokommunikation an. In der Praxis wird die Bow-Tie-Methode mitunter integrativ angewendet, im Sinne, dass mit den Barrieren nicht nur Anforderungen gemäß StörfallV, sondern auch gemäß Betriebssicherheitsverordnung, der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen, dem Gesetz über den Brandschutz, die Hilfeleistung und den Katastrophenschutz, etc. Rechnung getragen wird.

Bow-Ties können in allen Projektphasen erstellt und angewendet werden. In Abhängigkeit des Anwendungszeitpunktes ergeben sich unterschiedliche Schwerpunkte der Analyse und somit unterschiedliche Zielgruppen bzw. Adressaten:

- Entwurfsphase: Beurteilung der Angemessenheit von Barrieren. Führt vergleichsweise zu komplexeren und detaillierteren Bow-Ties. Zielgruppe ist das Designteam. Die Bow-Tie-Analyse muss mit anderen verwendeten Methoden der Prozessgefahrenanalyse (z.B. HAZOP und LOPA) verknüpft werden.

Bow-Tie-Analyse

- Betriebsphase: Mit dem Bow-Tie-Ansatz sollen die Bediener und Instandhalter am Prozess des Risikomanagements beteiligt werden. Die zu diesem Zwecke entwickelten Bow-Ties können vergleichsweise weniger detailliert sein (Ziel: Bewusstsein für die Wechselwirkungen ihrer Arbeit mit Risiken zu fördern.) Stärkere Detaillierungen der Bow-Ties können im Rahmen regelmäßigen Risikoüberprüfungssitzungen zielführend sein, da so etwaige neuer Gefahrenquellen und Degradationen in den Barrieren ersichtlich werden. Der Bow-Tie kann so dazu beitragen, das Wissen des O&M-Personals mit dem Wissen der Ingenieure und Manager zu verknüpfen und damit Entscheidungen treffen zu können wie beispielsweise a) die Fortsetzung oder Einstellung des Betriebs und b) die Zuweisung von Ressourcen für die Reparatur/Wiederherstellung der Stärke von Barrieren und c) Qualitätsminderungskontrollen.

Szenarienentwicklung/HAZOP-Master

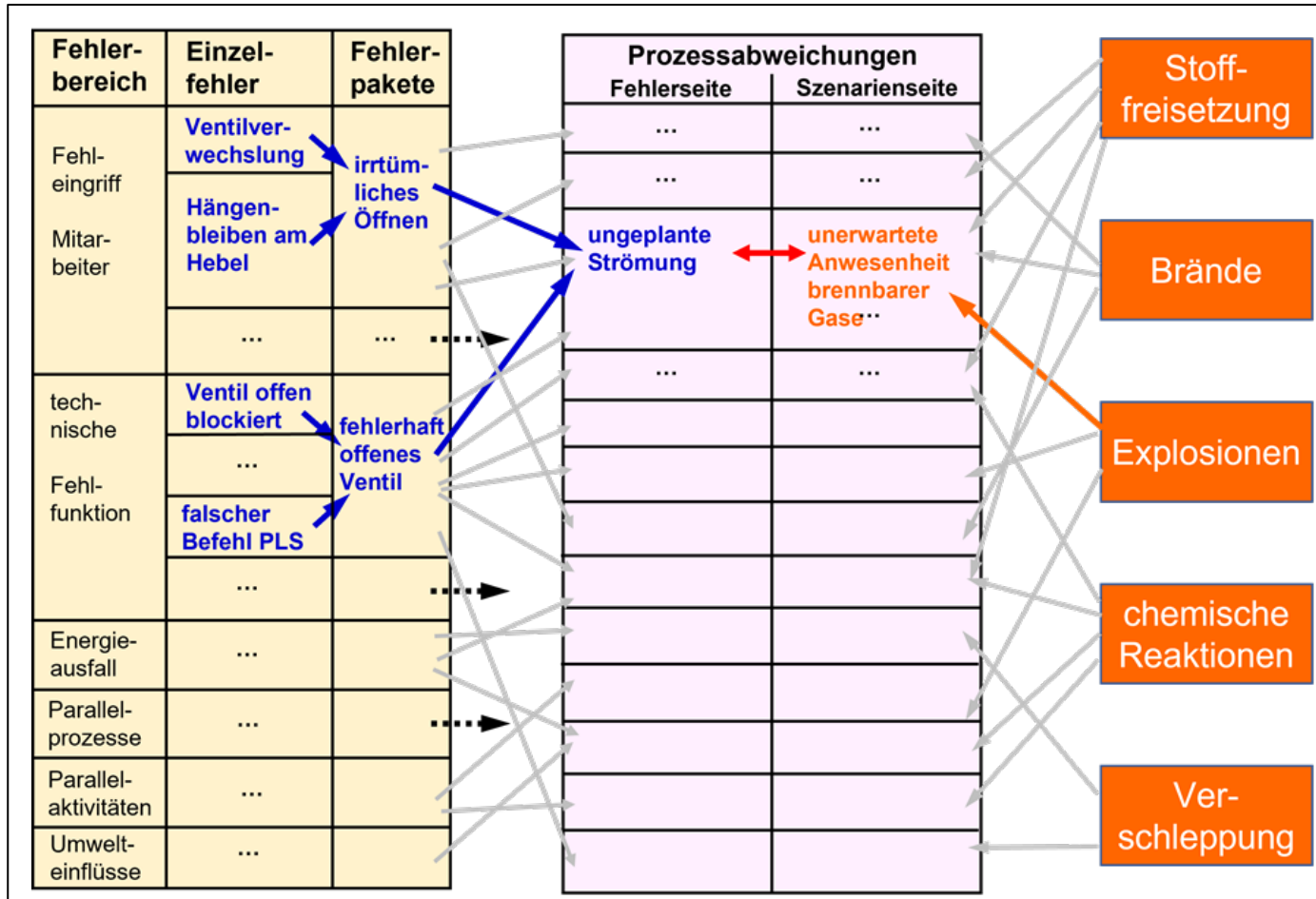
Das Verfahren Szenarienanalyse - HAZOP-Master ist ein von der CMK (Compliance Management Kappelmaier) entwickeltes EDV-gestütztes Verfahren zur Ermittlung relevanter Störfallszenarien und deren Ursachen. Dabei verbindet es Elemente bewährter Verfahren wie der Szenarienanalyse, der HAZOP-Analyse und checklistenbasierten Verfahren.

Startpunkte der Analyse bilden die im Rahmen der Szenarienanalyse definierten allgemeingültigen Grundszenarien, von denen aus die jeweiligen Ereignisabläufe bis zu auslösenden Basisfehlern zurückverfolgt werden.

Das zentrale Element des darauf aufbauenden HAZOP-Masters ist eine Wissensdatenbank, in welcher allgemeingültige kausale Zusammenhänge zwischen auslösenden Fehlern einerseits und Störfallereignissen (Grundszenarien) andererseits hinterlegt sind. Eine Schlüsselrolle kommt hierbei den Prozessgrößenabweichungen zu, über welche die auslösenden Fehler mit den Störfallereignissen verknüpft sind. Die im HAZOP-Master hinterlegten Zusammenhänge zwischen den einzelnen Szenarienarten und den Prozessgrößenabweichungen basieren auf technisch/naturwissenschaftlichen Grundlagen.

Szenarienentwicklung/HAZOP-Master

Ergebnisse des HAZOP-Masters: Durchgängige Ereignisabläufe vom Störfallereignis zurück bis zum Einzelfehler.



Quelle: CMK – Compliance Management Kappelmaier

Szenarienentwicklung/HAZOP-Master

Die so gebildeten, allgemeingültig beschriebenen Ereignisabläufe werden dem Analyseteam als Input zur Verfügung gestellt. Das Team muss dann die beschriebenen Ereignisabläufe auf Relevanz für die Betrachtungseinheit prüfen und die allgemein formulierten Fehler und Szenarienbeschreibungen auf die Gegebenheiten des betrachteten Systems hin konkretisieren.

Das Ergebnis ist eine szenarienorientierte Dokumentation, die die Ereignisabläufe der Szenarienanalyse systematisch mit der klaren Systematik einer strukturierten Fehlerliste verbindet.

Die Szenarien werden anschließend dazu genutzt, entsprechende Gegenmaßnahmen zur Reduzierung des Risikos abzuleiten. Hierbei können – im Rahmen der Verfahrensbeschreibung nicht näher spezifizierte – Risikographen oder auch Risikomatrizen zur Anwendung kommen.

Detailliertere Informationen zum Verfahren können dem Schlussbericht, Kap. 5.10 entnommen werden.

Zusammenhänge zwischen den Analysetechniken, Kombinationsmöglichkeiten

Zusammenhang zwischen HAZOP und weiteren Analysetechniken:

- Häufig anzutreffen sind erweiterte Leitwortsysteme, welche Fragestellungen adressieren sollen, die mit den klassischen HAZOP-Leitworten nur aufwendig hinterfragt werden können. Dies sind z.B. Fragestellungen zum Explosions- und Brandschutz, Elektrotechnik, zur manuellen Bedienung oder zu umgebungsbedingten Gefahrenquellen. Durch die Erweiterungen bekommt das HAZOP einen gewissen checklistenartigen Charakter.
- Ursachenbäume können mittels Fehlerbaumtechnik dargestellt (und bei Bedarf quantifiziert) werden. Durch die Kombination mit der Fehlerbaumtechnik kann das Einfehlertoleranzprinzip der HAZOP-Betrachtung aufgehoben werden.
- Die mit der HAZOP-Studie identifizierten bzw. beschriebenen Kausalketten können theoretisch ebenso mittels Kombination von Fehler- und Ereignisbaumtechnik ermittelt und dargestellt werden. Die Kombination der beiden Techniken FTA und ETA kann einerseits als Ergänzung, andererseits als Alternative zur HAZOP-Studie charakterisiert werden. Für eine Charakterisierung als „Ergänzung“ spricht, dass HAZOP primär prozessuale Phänomene adressieren möchte, während Fehlerbäume häufig (aber nicht ausschließlich) angewendet werden, um komplexe technische Systeme (Stichwort Redundanzen und Mehrfachereignisse) zu studieren und quantitative Aussagen zu Eintrittshäufigkeiten zu treffen.

Zusammenhänge zwischen den Analysetechniken, Kombinationsmöglichkeiten

Zusammenhang zwischen HAZOP und weiteren Analysetechniken:

- Weitere Unterschiede bestehen darin, dass a) mittels HAZOP/PAAG-Fragentechnik die Analysen mehr geführt werden und b) die Analyseausgangspunkte unterschiedlich sind (HAZOP: Abweichungen vom bestimmungsmäßigen Betrieb, FTA/ETA: TOP-Ereignis (z.B.: Verlust Kontrolle über den Prozess oder Versagen einer Barriere/eines komplexen technischen Systems)). Schlussendlich ist die Wahrnehmung der Unterschiedlichkeit zwischen den Methoden nicht ausschließlich auf methodeninhärente Eigenschaften zurückzuführen, sondern liegt auch in den Anwendungsgewohnheiten begründet.
- Ähnlich gelagert lässt sich der Zusammenhang zur FMEA beschreiben. FMEA'en werden klassischerweise zur Untersuchung technischer Erzeugnisse angewandt (Prüffrage FMEA: Auf welche Weisen kann ein technisches Erzeugnis versagen?). Tatsächlich sind die Ähnlichkeiten zur HAZOP aber sehr stark: Arbeit in interdisziplinären Teams, gemeinsame Sitzungen, Formulieren von Sollfunktionen mit Parametern, Ableiten denkbarer Abweichungen (Kreativtechnik), Analyse Ursache und Auswirkungen (Einfehlerprinzip), Maßnahmen ableiten, Anwendung einer Risikoprioritätszahl (Vgl. Risikomatrix und Risikograph). Eine Sonderform der FMEA's stellen Prozess-FMEA's dar, welche prozessuale Risiken adressieren.
- Die Festlegung der Gegenmaßnahmen erfolgt häufig anhand von Risikographen, -matrizen oder dem LOPA-Verfahren.

Zusammenhänge zwischen den Analysetechniken, Kombinationsmöglichkeiten

Zusammenhang zwischen Fehlerbaumanalyse und weiteren Analysetechniken:

- Im Kontext der Anlagensicherheit wird die Fehlerbaummethodik häufig gemeinsam mit der Ereignisbaumanalyse angewandt. In den Fehler- und Ereignisbäumen können Gegenmaßnahmen abgebildet werden. Der worst-case-Pfad eines kombinierten Fehler- und Ereignisbaumes stellt das Einzelszenario der LOPA.
- Die Bow-Tie-Analyse kann in erster Näherung als Kombination von Fehlerbaum- und Ereignisbaumanalyse verstanden werden. Im engeren Sinne wird mit der Bow-Tie-Analyse jedoch eine detaillierte Analyse der Barrieren assoziiert. (welche Prozesse können dazu führen, dass die Barrieren an Effektivität verlieren? Wie können diese Prozesse in der Betriebsphase überwacht, kontrolliert und gemanagt werden?)
- Mit der Analysetechnik FMEA werden primär Einzelfehler analysiert. Sicherheits- oder verfügbarkeitsrelevante Systemauswirkungen werden in manchen Fällen aber erst durch das zeitgleiche Auftreten mehrere Failure Modes verursacht (Stichwort: Redundanzen, Rückfallebenen, Gegenmaßnahmen). Die Redundanzen, Rückfallebenen und Gegenmaßnahmen können in einer Fehlerbaumanalyse abgebildet werden. Die Basisereignisse des Fehlerbaums sollten in diesem Fall weitestgehend den Failure Modes der FMEA entsprechen.

4. Beispiel: Zusammenwirken ausgewählter Verfahren und Methoden

Vorwort

Das folgende Beispiel soll verdeutlichen, wie die Verfahren, Methoden und Modelle der Störfallrisikobeurteilung kombiniert, aber auch alternativ zueinander angewendet werden können.

Dazu wird zunächst verbal ein Störfallszenario formuliert, welches zunächst mittels HAZOP und LOPA inklusive Risikomatrix analysiert und bewertet wird.

Anschließend wird dargestellt, wie das selbe Störfallszenario alternativ mittels

- Fehlerbaum- und Ereignisbaumanalyse, Bow-Tie-Analyse und Checklisten

untersucht bzw. dokumentiert werden kann.

Das Beispiel beabsichtigt hingegen nicht:

- Eine vollständige und korrekte Analyse eines spezifischen Anlagenteils oder verfahrenstechnischen Prozesses in einem konkreten Anwendungskontext abzubilden,
- den Stand der Sicherheitstechnik abzubilden,
- Risiken korrekt zu quantifizieren.

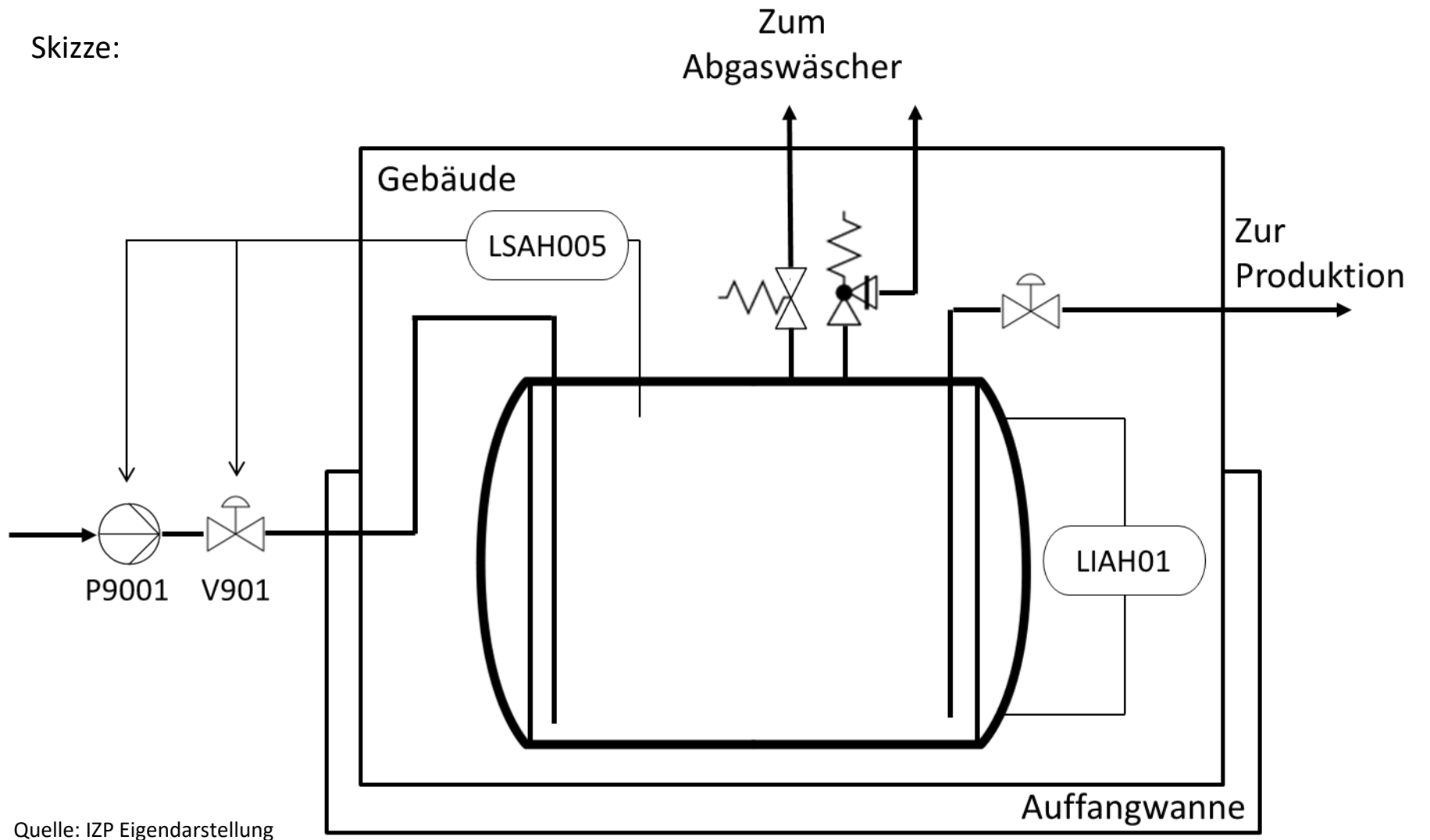
Vorstellung des zu analysierenden Szenarios (1/3)

Installation:

- Ein Behälter B001 (20 m³, -1/+3 bar) dient der Lagerung von 25%iger wässriger Ammoniaklösung, mit der eine angeschlossene Produktionsanlage versorgt wird. Die Ammoniaklösung ist stark umweltgefährdend.
- Er wird wöchentlich aus Bahnkesselwägen, die vor dem Gebäude im Freien stehen, mit Hilfe der Kreiselpumpe P9001 (6 bar) befüllt.
- Die verdrängten Gasmengen werden über eine Druckhaltung (-1/+2 bar) zum Abgaswäscher entspannt und von dort über Dach ins Freie geleitet.
- Bei Erreichen des zulässigen Füllstands erfolgt mittels LIAH01 ein Alarm und der Mitarbeiter schaltet die Befüllpumpe aus und schließt das Befüllventil V901.
- Bei weiterem Füllstandsanstieg stoppt die Überfüllsicherung LSAH005 automatisch die Befüllung, ebenfalls durch Abschalten von P9001 und Schließen von V901.
- B001 steht im Erdgeschoß eines Gebäudes in einer AwSV-konformen Auffangwanne und ist mit einem Sicherheitsventil mit +3 bar Ansprechdruck abgesichert.
- Das Sicherheitsventil ist für die maximale Förderleistung der Befüllpumpe ausgelegt.
- Bei Ansprechen des Sicherheitsventils tritt die Ammoniaklösung ebenfalls über Dach aus.

Vorstellung des zu analysierenden Szenarios (2/3)

Skizze:



Quelle: IZP Eigendarstellung

Vorstellung des zu analysierenden Szenarios (3/3)

Szenario: Überfüllen im Behälter B001 führt zum Flüssigkeitsaustrag über den Wäscher ins Freie.

Ursachen:

- a) Bei Erreichen des zulässigen Füllstands bleibt die Alarmierung mittels LIAH01 aus (z.B. aufgrund technischer Ausfall Steuerstrom für PLT-Schaltgänge)
- b) Bei Erreichen des zulässigen Füllstands wird eine fehlerhafte Handlung seitens des Mitarbeiters vorgenommen (kein Abschalten der Befüllpumpe, kein Schließen des Befüllventils V901)
- c) Der Überfüllalarm wurde falsch eingestellt

Folgen: Die Ammoniaklösung tritt über Dach aus und könnte über die Regenwasserableitung unzulässigerweise in das öffentliche Kanalsystem gelangen und zu einer größeren, aber lokalen Verunreinigung des Vorfluters, in den das Regenwasser über das Kanalsystem eingeleitet wird, führen.

Gegenmaßnahmen:

- Die Überfüllsicherung LSAH005 stoppt automatisch den Befüllvorgang
- Steuerstrom mit Batteriepufferung; Sicherheitsstellung V901 `ZU`

Analyse und Darstellung des Szenarios mittels HAZOP

Analyse und Darstellung mittels **HAZOP**:

Funktion: Befülle Behälter B001 mit 20 m³ 25%iger wässriger Ammoniaklösung und stoppe den Befüllvorgang, wenn der Füllstandsalarm LIAH01 ausgelöst worden ist.

Leitwort	Abweichung	Ursache	Auswirkung	Gegenmaßnahme
Nein/ nicht	Keine Alarmierung	a) Defekt/Störung LIAH01 (z.B. aufgrund technischer Ausfall Steuerstrom für PLT-Schaltgänge)	Überfüllen des Behälters B001, Stoff-austrag über Wäscher und evtl. auch über Sicherheitsventil über Dach Sicherheitsrelevant	Allgemein: Überfüllsicherung LSAH005 stoppt automatisch Befüllvorgang. Gegen den Ausfall Steuerstrom: Batteriepufferung; Sicherheitsstellung V901 'ZU'
Nein/ nicht	Kein Schließen der Armatur V90/ kein Abschalten P9001	b) Fehler seitens des Mitarbeiters	Siehe oben	Siehe oben
Anders als	Grenzwert falsch eingestellt	c) Fehleingabe des Mitarbeiters	Überfüllalarm kommt zu spät; Sonst wie oben	Siehe oben

Analyse und Darstellung des Szenarios mittels LOPA (1/4)

Bewerten der Gegenmaßnahmen mittels **LOPA**:

- „Initial events“ = Ursachen in der HAZOP. Abschätzungen der Eintrittshäufigkeiten:
 - a) Defekt/Störung LIAH01 → 0,1 Auftritte je Jahr*
 - b) Fehlerhafte Handlung des Mitarbeiters. Annahme: Die Befüllunterbrechung wird als einfache, häufig durchgeführte Tätigkeit ohne besonderen Stress klassifiziert. Im Durchschnitt kommt es daher bei einem von tausend Befüllvorgängen zu einer solchen Fehlhandlung. → Bei 52 Befüllvorgängen je Jahr tritt dieses Ereignis somit durchschnittlich 0,052 mal je Jahr auf.
 - c) Fehleingabe des Mitarbeiters. Annahme: Die Eingabe wird als einfache, selten durchgeführte Tätigkeit ohne besonderen Stress klassifiziert. Im Durchschnitt kommt es daher bei einem von hundert Eingaben zu einer solchen Fehleingabe. → Bei einer Eingabe alle 5 Jahre** tritt dieses Ereignis somit durchschnittlich 0,002 mal je Jahr auf.
- „Enabling events“: Es müssen keine weiteren Randbedingungen gegeben sein, damit das Auftreten einer beiden der Ursachen die beschriebenen Auswirkungen zur Folge hat.

* Die in diesem Beispiel verwendeten Eintrittshäufigkeiten- und wahrscheinlichkeiten sind weitestgehend dem Buch „Layer of Protection Analyse (LOPA) zur risikobasierenden Bewertung von Szenarien“ von Reinhard Preiss entnommen. In dem Buch werden Standardwerte für Zuverlässigkeiten technischer Erzeugnisse sowie menschlicher Handlungen formuliert.

** Beispielhafter Zahlenwert, der den Betrieb einer „Konti-Anlage“ unterstellt. Bei Mehrzweckanlagen mit regelmäßigen Produktumstellungen können das durchaus auch mehrere Eingaben pro Jahr sein

Analyse und Darstellung des Szenarios mittels LOPA (2/4)

Bewerten der Gegenmaßnahmen mittels **LOPA**:

- „Independent protection Layers“ = Gegenmaßnahmen in HAZOP. Abschätzung der Verfügbarkeiten:
 - Überfüllsicherung LSAH005 → Ausführung hartverdrahtet, unabhängig von PLT-Betriebseinrichtung (LSAH005), ohne SIL-Nachweis, Fail-Safe-Verhalten, Verwendung betriebsbewährter Komponenten und wiederkehrende regelmäßige dokumentierte Überprüfung → Probability of Failure on Demand (PFD) der Überfüllsicherung = 0,1
- „Conditional modifier“ = Keine Conditional modifier identifiziert
- Bestimmung der Eintrittshäufigkeit der mit dem Szenario verbundenen Auswirkungen:

(Eintrittshäufigkeit Initial Event a + Eintrittshäufigkeit Initial Event b + Eintrittshäufigkeit Initial Event c) * PFD_Überfüllsicherung
= (0,1 Auftritte je Jahr + 0,052 Auftritte je Jahr + 0,002 Auftritte je Jahr) * 0,1 = $1,54 \cdot 10^{-2}$

Analyse und Darstellung des Szenarios mittels LOPA (3/4)

Bewerten der Gegenmaßnahmen mittels **LOPA**:

- Bewertung des analysierten Restrisikos anhand einer Risikomatrix

[1/a]			
$10^{-1} - 10^{-2}$			
$10^{-2} - 10^{-3}$			
$10^{-3} - 10^{-4}$			
$10^{-4} - 10^{-5}$			
$10^{-5} - 10^{-6}$			
$10^{-6} - 10^{-7}$			
	C1	C2	C3
Konsequenz Personenschaden	Verletzung mit > 24 Std. Krankenhaus und/oder reversible Beeinträchtigung/Verletzung	Irreversible Verletzungen oder Todesfall innerhalb bzw. reversible Verletzungen außerhalb des Betriebsgeländes	Irreversible Verletzungen oder Todesfall außerhalb oder mehrere Todesfälle innerhalb des Betriebsgeländes
Konsequenz Umweltschaden	Weitreichende Folgen möglich, lokale Intervention inner- oder Außerbetrieblicher Stelle erforderlich UND reversibler Schaden	Weitreichende Folgen möglich, überregionale Intervention (z. B. Verständigung der Landeswarnzentrale) erforderlich UND reversibler Schaden	Irreversible Umweltschäden möglich, überregionale oder nationale Intervention erforderlich

 Nicht tolerierbar	 tolerierbar in Einzelfällen; nur anwendbar für Bestandsbetriebsanlagen, sonst nicht tolerierbar (rot)	 Akzeptabel	 Zielwert
--	---	---	--

Häufigkeit des Szenarios = $1,54 \cdot 10^{-2}$; Schadensausmaß = Größere, aber lokale Verunreinigung des Vorfluters → C1
 → Risiko nicht tolerierbar
 → Risikoreduktion erforderlich

Quelle: IZP Eigendarstellung in Anlehnung an Preiss, R., Struckl, M. (2017): Layer of Protection Analyse zur risikobasierenden Bewertung von Szenarien. TÜV Austria Akademie GmbH

Randnotiz: Wenn man das Risiko für jedes initial event einzeln betrachtet, fällt das Risiko jeweils geringer aus. Das kann dazu führen, dass die Einzelrisiken als akzeptabel (grünes Feld) bewertet werden, während die gesamthafte, d.h. ursachenunabhängige Betrachtung des Szenarios dazu führt, das Risiko also als nichttolerierbar zu bewerten (gelbes oder rotes Feld). Bei der Entscheidung, ob die angedachten Vorkehrungen und Maßnahmen ausreichend sind, sollte die gesamthafte Betrachtung des Szenarios bevorzugt werden.

Analyse und Darstellung des Szenarios mittels LOPA (4/4)

Risikoreduktion mittels **LOPA** :

- Ansatz 1: Beaufschlagung der Überfüllsicherung mit einem Sicherheitsintegritätslevel (SIL). Gemäß IEC 61508 „Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/ programmierbarer elektronischer Systeme“ sind dann in Abhängigkeit des SIL folgende PFD-Werte einzuhalten bzw. zu realisieren:

SIL	PFD _{avg} – Mittlere Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls bei Anforderung	Erforderliche Risikominimierung
4	$\geq 10^{-5}$ bis $< 10^{-4}$	> 10000 bis ≤ 100000
3	$\geq 10^{-4}$ bis $< 10^{-3}$	> 1000 bis ≤ 10000
2	$\geq 10^{-3}$ bis $< 10^{-2}$	> 100 bis ≤ 1000
1	$\geq 10^{-2}$ bis $< 10^{-1}$	> 10 bis ≤ 100

Quelle Abbildung:
https://de.wikipedia.org/wiki/Funktionale_Sicherheit

Eine Realisierung der Überfüllsicherung als SIL4-Ausführung würde die notwendige Risikoreduktion sicherstellen:

(Eintrittshäufigkeit Initial Event a + Eintrittshäufigkeit Initial Event b + Eintrittshäufigkeit Initial Event c) * PFD_Überfüllsicherung $< (0,1 \text{ Auftritte je Jahr} + 0,052 \text{ Auftritte je Jahr} + 0,002 \text{ Auftritte je Jahr}) * 10^{-4} = 1,54 * 10^{-5} \rightarrow$ Das Risiko für das Szenario verschiebt sich in der Risikomatrix auf ein grünes Feld

- Ansatz 2: Beaufschlagung der Überfüllsicherung mit einem geringeren SIL, gepaart mit weiteren Maßnahmen. Z.B. Reduktion der Eintrittshäufigkeit der Ursache a) durch eine redundante Ausführung der Alarmierung

Analyse und Darstellung des Szenarios mittels Risikographen

Die Anwendung des Risikographens nach VDI/VDE 2180-1 würde in diesem Beispiel zu einer anderen SIL-Einstufung der Überfüllsicherung führen:

S: Vorübergehende, größere schädliche Umwelteinflüsse → S2

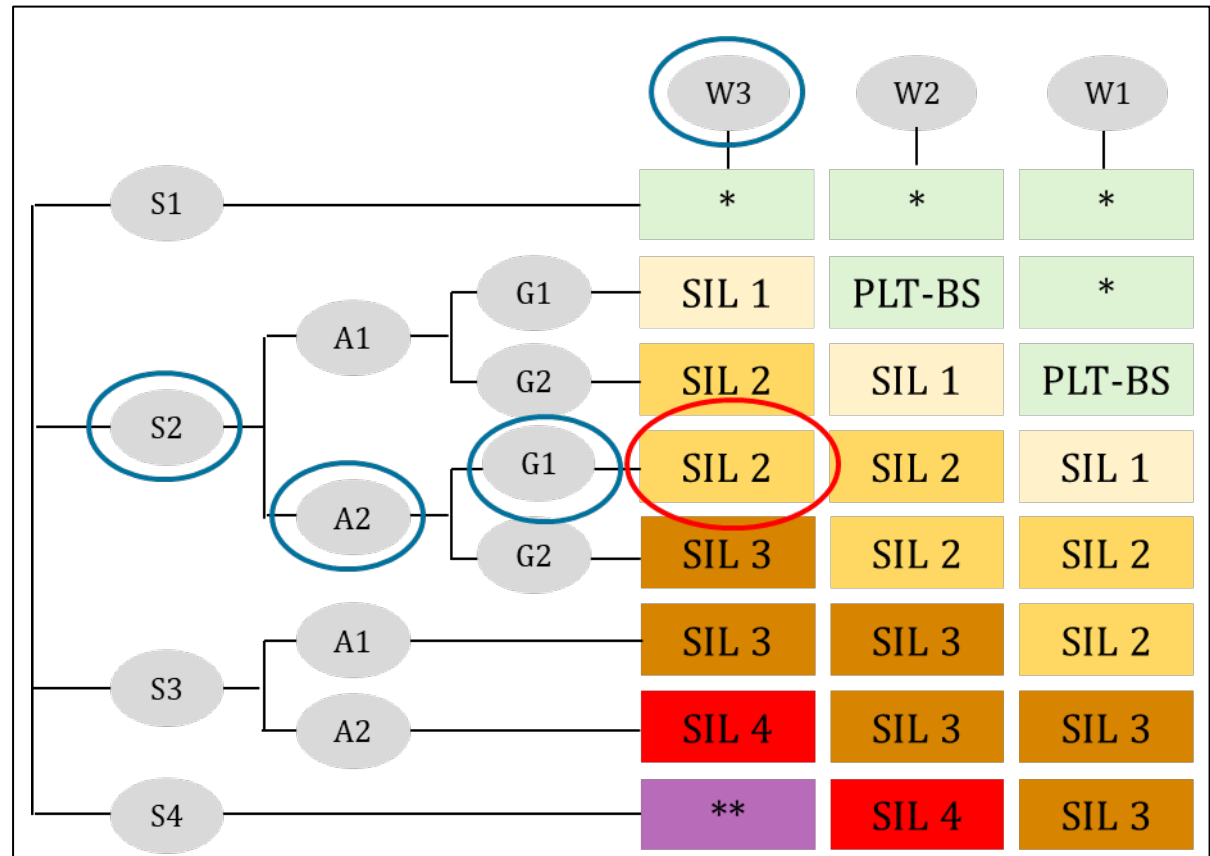
A: Umweltgefahr → A2

G: Auswirkungsreduzierende Maßnahmen denkbar: Rückhaltebecken, Reaktion Personal aufgrund stechenden Geruchs der freigesetzten Ammoniaklösung, ... → G1

W: 0,153 Auftritte je Jahr → W3

→ SIL 2

Hinweis: Andere Resultate sind bei der Anwendung eines Risikographen grundsätzlich denkbar. Gerade der Risikograph nach VDI/VDE 2180 mit seinen qualitativ formulierten Risikoparametern lässt größere Interpretationsspielräume zu. Ein SIL4 wäre in diesem Beispiel aber nicht begründbar, da bereits die S-Bewertung mit S2 konservativ gewählt ist.



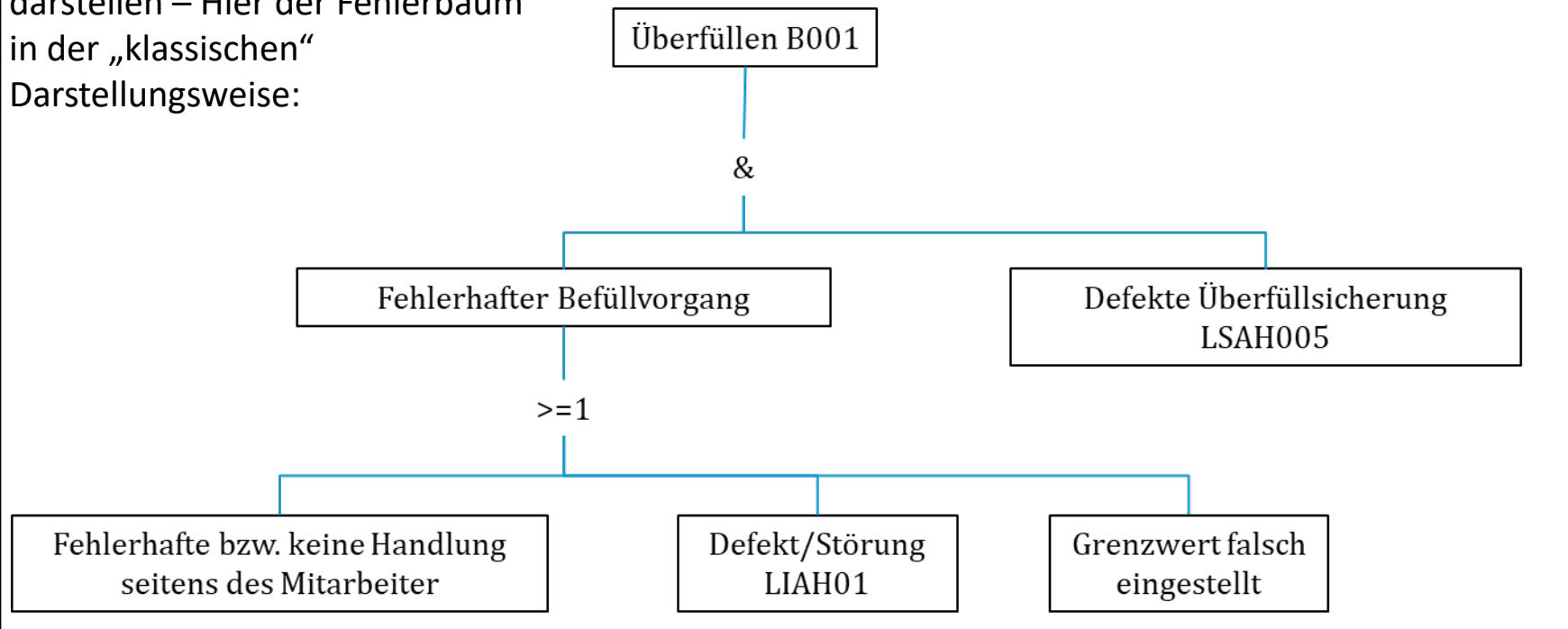
Quelle: IZP Eigendarstellung in Anlehnung an VDI/VDE 2180-1 (Stand April 2019)

Analyse und Darstellung des Szenarios mittels FTA/ETA (1/3)

Das eben analysierte Szenario ließe sich ebenso als Kombination aus Fehlerbaum und Ereignisbaum mit dem Top-Ereignis „Überfüllen B001“ darstellen – Hier der Fehlerbaum in der „klassischen“ Darstellungsweise:

Legende:

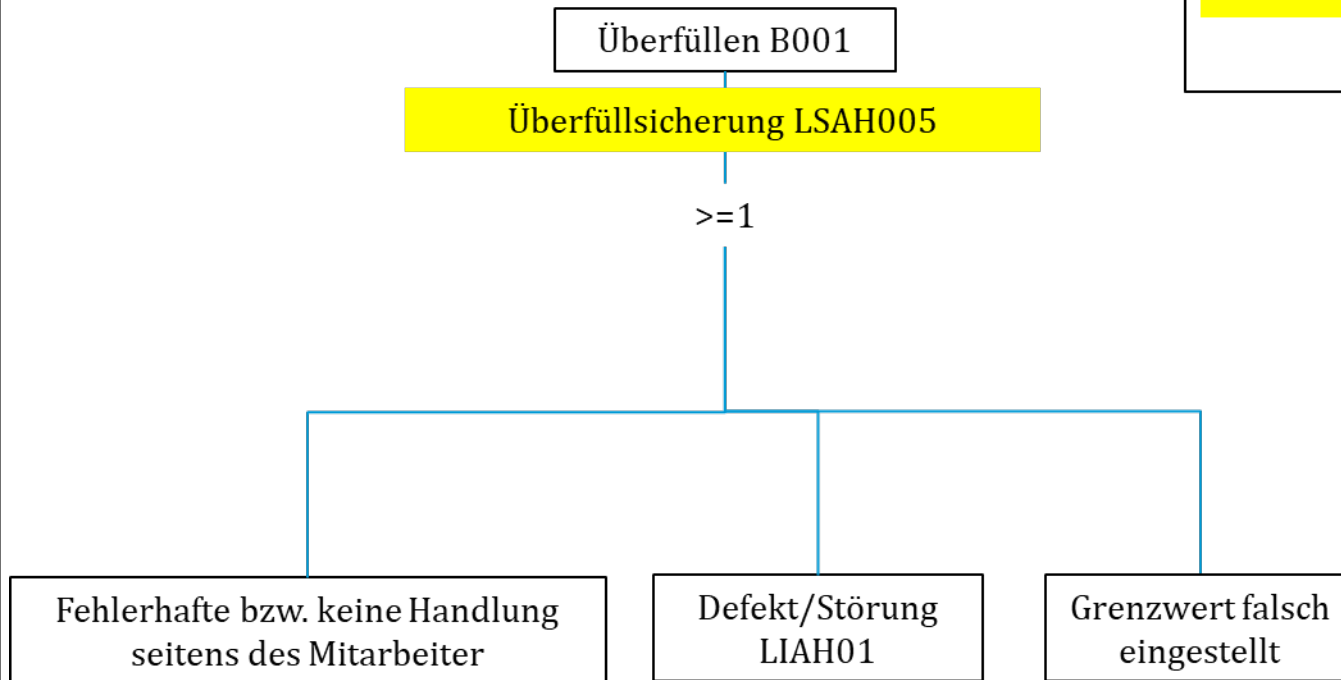
Unerwünschtes
Ereignis/unerwünschter
Zustand



Quelle: IZP Eigendarstellung

Analyse und Darstellung des Szenarios mittels FTA/ETA (2/3)

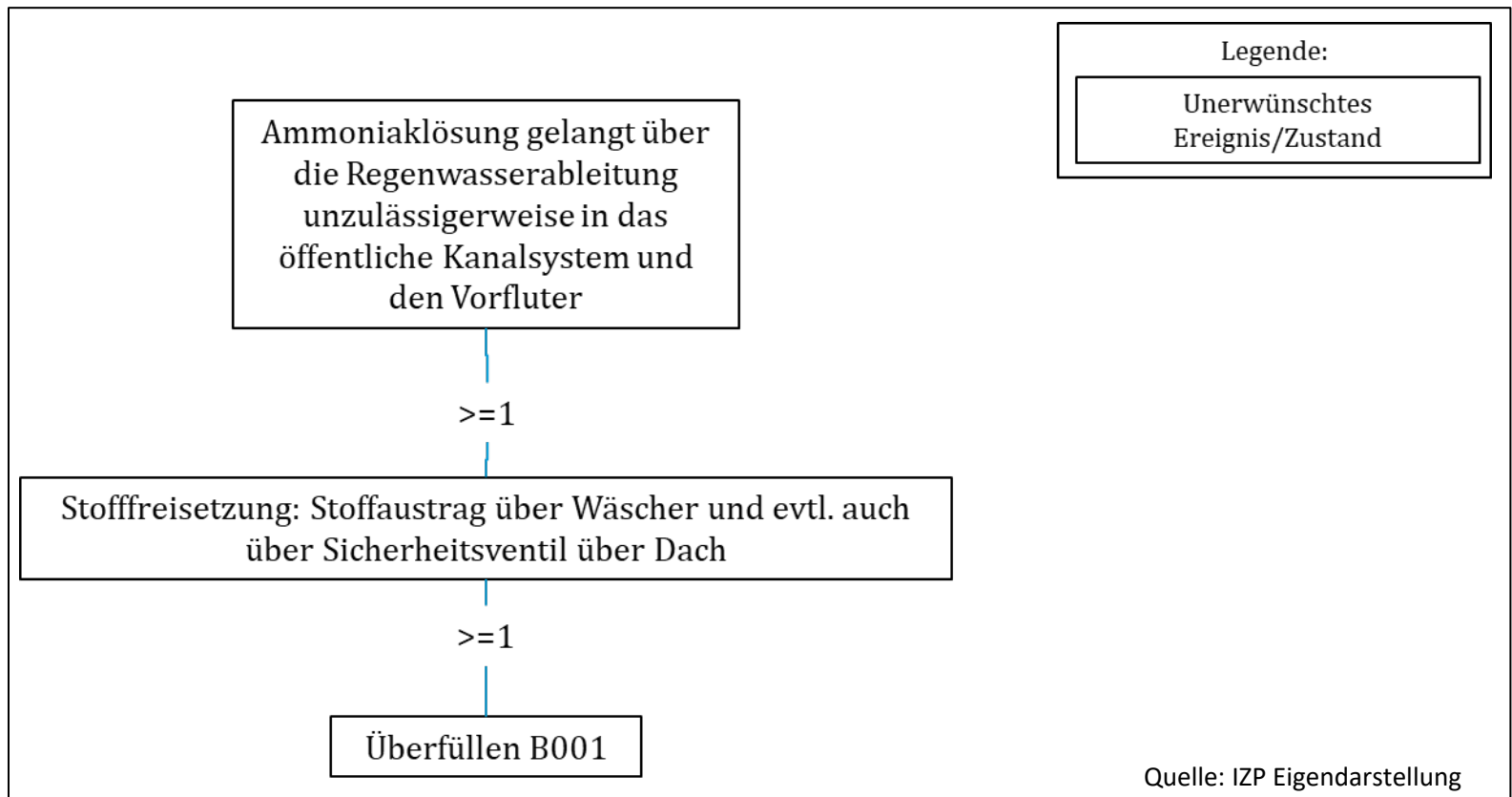
Das eben analysierte Szenario ließe sich ebenso als Kombination aus Fehlerbaum und Ereignisbaum mit dem Top-Ereignis „Überfüllen B001“ darstellen – Hier der Fehlerbaum in einer Darstellung angelehnt an das ARAMIS-Verfahren:



Quelle: IZP Eigendarstellung

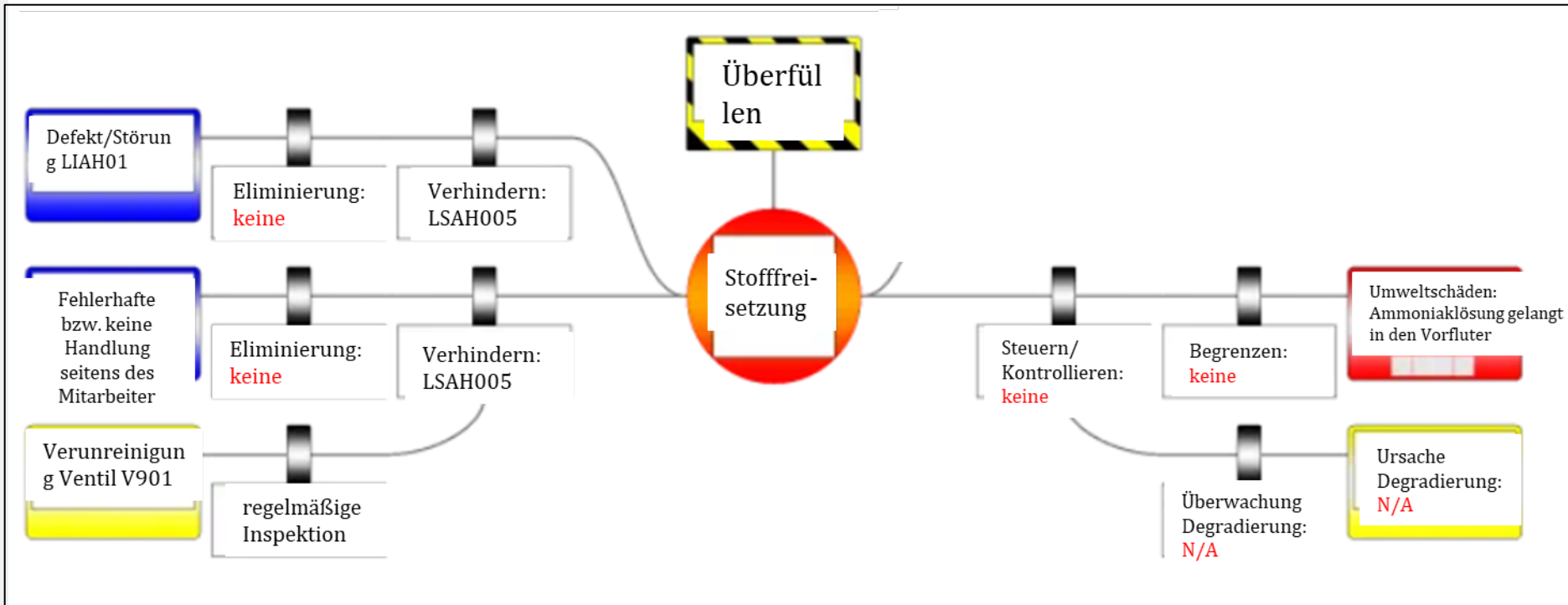
Analyse und Darstellung des Szenarios mittels FTA/ETA (3/3)

Das eben analysierte Szenario ließe sich ebenso als Kombination aus Fehlerbaum und Ereignisbaum mit dem Top-Ereignis „Überfüllen B001“ darstellen – Hier der Ereignisbaum in der „klassischen“ Darstellungsweise :



Analyse und Darstellung des Szenarios mittels Bow-Tie-Analyse

Das selbe Szenario würde in der Bow-Tie-Analyse wie folgt dargestellt werden:



Quelle: IZP Eigendarstellung in Anlehnung an BOW TIE XP Software (Supplier: CGE RISK MANAGEMENT SOLUTIONS; <https://www.tuvsud.com/de-ch/ressourcen-center/stories/bowtie-fuer-risikoanalysen>)

Eine Ursache einer Degradierung der Überfüllsicherung **LSAH005** könnte eine Verunreinigung des Ventils V901 sein. Die Entsprechende Überwachung eine regelmäßige Inspektion des Ventils.

Analyse und Darstellung des Szenarios mittels einer Checkliste (1/4)

Exemplarisch soll hier die Checkliste (Fragenkatalog) der sog. Wacker-Analyse aus dem Hause CMK - Compliance Management Kappelmaier herangezogen werden. Das Verfahren wurde unter anderem in der IVSS-Broschüre „Gefahrenermittlung und Gefahrenbewertung in der Anlagensicherheit - Praxisbewährte Methoden“ vorgestellt.

Der Fragenkatalog soll ein systematisches Abfragen möglicher Störfallursachen (Gefahrenquellen) gewährleisten und besteht im Kern aus einer Liste generischer Gefahrenquellen, die durch den Anwender auf das konkret zu betrachtende Anlagenteil zu übertragen sind. Jede Gefahrenquelle ist einer der folgenden Kategorien zugeordnet:

- Versagen von Anlagenteilen
- Energieausfall
- Menschliche Fehlhandlungen
- Unerwünschte Stoffpaarungen
- Abweichung betrieblicher Parameter

Die beiden letzten Kategorien sind dabei gewissermaßen als Redundanz zu den ersten drei Kategorien zu verstehen, da bei einer umfassenden Abarbeitung der ersten drei Kategorien „eigentlich“ alle Gefahrenquellen gefunden werden sollten.

Analyse und Darstellung des Szenarios mittels einer Checkliste (2/4)

Der vollständige Fragenkatalog:

1. Versagen von Anlagenteilen	
1.1 Ausfall aktiver Aggregate (z. B. Pumpen, Rührwerke, Verdichter, Knetter, Zentrifugen)	1.5 Aktivierung wirksamer Zündquellen in Ex-Zone 0/1 bzw. 20/21 (z. B. heißgelaufene Teile, mechanische Funken, elektrische Funken, statische Elektrizität)
1.2 Bruch von Einbauteilen (z. B. Rührer, Statikmischer, Filter, Propellerschaufeln, Antriebswellen, Kolonnenböden)	1.6 Versagen innerer Trennwände (z. B. Kühlschlangen, Heizmantel, Mehrkammertankabtrennungen)
1.3 Blockierter Durchfluss (z. B. Verstopfung, blockierte Ventile, verklebte Ventile, vergessene Steckscheiben, blockierte Explosionsdruckentlastungen)	1.7 Versagen Durchfluss verhindernder Maßnahmen (z. B. Rückschlagventile, Absperrventile, Flammendurchschlagsicherungen, Zerfallssperren)
1.4 Ausfall von PLT-Einrichtungen (z. B. Überfüllsicherungen, Druck-/Temperaturbegrenzer, Durchflussmesser, Regler, Analysegeräte, Explosionsunterdrückung)	1.8 Versagen der äußeren Umschließung (z. B. Behälterwandung, Rohrleitungen, Flanschverbindungen, Wellendichtungen, Druckentlastungseinrichtungen, Absperrereinrichtungen)

2. Energieausfall	
2.1 Elektrische Energie für Antriebe/Heizung	2.6 Kühlsolekreislauf
2.2 Elektrische Energie für PLT	2.7 Kälteanlagen
2.3 Steuerluft	2.8 Dampf
2.4 Druckluft	2.9 Heizkreislauf
2.5 Kühlwasser	2.10 Inertgas (u. a. Stickstoff)

3. Menschliche Fehlhandlungen	
3.1 Unterlassen notwendiger Handgriffe (z. B. nicht abschalten, nicht zudosieren, nicht umschalten)	3.3 Falsches Ausführen von Eingriffen (z. B. falscher Ort, Zeitpunkt, Handgriff, Stoff, Ablauf, falsche Verbindung, Zeitspanne)
3.2 Ausführen unzulässiger Handlungen (z. B. absperren, Heizung starten, Anlageteile öffnen, überbrücken, mechanisch beschädigen)	3.4 Wartungs-/Reparaturfehler (z. B. falsches Einbauteil, unvollständige Montage, vergessene Hilfsmittel, übersehener Fehler)

Analyse und Darstellung des Szenarios mittels einer Checkliste (3/4)

Der vollständige Fragenkatalog (Fortsetzung):

4. unerwünschte Stoffpaarungen

4.1 Vermischung miteinander reagierender Stoffe

(z. B. Säuren/Laugen)

4.2 Reaktionsauslösende Verunreinigungen

(z. B. Korrosionsprodukte, katalytisch wirkende Verunreinigungen, Kristallkeime, Polymerkeime, Produkt)

4.3 Falsche Produkt-/Werkstoffpaarung

(z. B. Chlor mit Buntmetallen)

4.4 Heiße und kalte Flüssigkeiten

(Wasser in (Metall-)Schmelze oder in heißes Produkt)

4.5 Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre in inertisierten Anlagenteilen

(eingedrungene Luft, freigesetzter Sauerstoff, angesaugte, nicht verdrängte Luft, Überschreiten der Sauerstoffgrenzkonzentration)

4.6 Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre durch zu hohe/niedrige Stoffkonzentration innerhalb/außerhalb von Anlagenteilen

(z. B. Über-/Unterschreiten der Explosionsgrenzen, aufgewirbelter Staub, Gasfreisetzung)

5. Abweichung betrieblicher Parameter

5.1 Druck (-differenz)

5.2 Temperatur (-differenz)

5.3 Füllstand (max./min.)

5.4 Durchflussmenge (max./min.)

5.5 Durchflussrichtung

5.6 Reaktionszeit

5.7 Verweilzeit

5.8 Viskosität

5.9 pH-Wert

5.10 Mischungsverhältnis/Konzentration (z. B. zu hoch, zu niedrig, Entmischung)

Analyse und Darstellung des Szenarios mittels einer Checkliste (4/4)

Auf das Beispiel angewendet könnte das Analyseergebnis folgendermaßen dargestellt werden:

Betrachtete Gefahrenquelle (generisch)	Betrachtete Gefahrenquelle (konkret)	Mögliche Folgen	Störfall- bzw. Ereigniseintrittsvoraussetzungen	Störfall- bzw. ereignisverhindernde und – begrenzende Vorkehrungen
1.4 Ausfall von PLT-Einrichtungen	Defekt/Störung LIAH01 (z.B. aufgrund technischer Ausfall Steuerstrom für PLT-Schaltgänge)	Überdruck im Behälter B001. Ansprechen des Sicherheitsventils. Sicherheitsrelevant	Ammoniakaustrag über Dach ins Kanalsystem)	Überfüllsicherung LSAH005 stoppt Befüllvorgang; Batteriepufferung Sicherheitsstellung V901 'ZU'
2.2 Ausfall PLT-Energie	Ausfall Steuerstrom für PLT-Einrichtungen	Siehe 1.4	Siehe 1.4	Regelmäßige Funktionstest
3.1 Unterlassen notwendiger Handgriffe und 3.3 Falsches Ausführen von Eingriffen		Überdruck im Behälter B001. Ansprechen des Sicherheitsventils. Sicherheitsrelevant	Siehe 1.4	Überfüllsicherung LSAH005 stoppt automatisch den Befüllvorgang
5.3 Füllstand zu hoch	Überfüllen B001	Ansprechen der Druckhaltung/Si-Ventil	Siehe 1.4	

5. Anwendungshinweise zu ausgewählten Verfahren, Methoden und Modellen

Allgemeine Hinweise zur Risikobeurteilung von Störfällen – Erfolgsfaktoren (1/3)

Störfallrisikobeurteilungen sollten immer als grundlegende Unternehmensaufgabe verstanden werden. Damit diese mehrwerterzeugend durchgeführt werden können, bedarf es eines starken Rückhalts im Unternehmen und der Bereitschaft des Managements, Planungen bzw. bestehende Anlagen sicherheitstechnisch in Frage zu stellen und für entsprechende Überprüfungen finanzielle, zeitliche und personelle Ressourcen bereitzustellen.

Der Erfolg einer Störfallrisikobeurteilung hängt darüber hinaus von mehreren Faktoren ab:

- Klare Formulierung der mit der Beurteilung verbundenen Zielstellungen bzw. Verwendungszwecke
- Auswahl geeigneter Verfahren, Methoden und Modelle
- Geeigneter Anwendungszeitpunkt (Projektphase)
- Systematische Anwendung
- Fachwissen, Erfahrungswerte und Zusammenspiel der an den Analysen beteiligten Personen
- Verfügbarkeit aktueller/korrekturer/vollständiger Informationen bzw. Unterlagen. U.a.:
 - Stoffdaten, einschließlich Sicherheitsdatenblätter für alle Einsatzstoffe, Zwischenprodukte, Lösungsmittel, Endprodukte usw.
 - Reaktionsdaten, einschließlich Nebenreaktionen
 - Anlagendaten einschließlich aktuellen R+I-Fließbilder, Schnittzeichnungen, Aufstellungspläne, Umgebungspläne, Werkstoffe, Dimensionen, Auslegungsgrenzen usw.
 - Beschreibung des Soll-Prozesses mit den relevanten Parametern sowie Reihenfolgen von Prozessschritten für allen Anlagen bzw. Anlagenteilen
- Nachvollziehbare sowie plausible Dokumentation der Analysen

Allgemeine Hinweise zur Risikobeurteilung von Störfällen – Erfolgsfaktoren (2/3)

Im Zuge der Formulierung der Zielstellungen ist nicht nur der Analyseumfang (betrachtete Anlagenteile, verfahrenstechnische Prozesse, Arten von Gefahren, Schutzgüter) herauszuarbeiten, sondern auch, wie mit den Ergebnissen und Erkenntnissen der Analyse(n) umgegangen werden soll:

- Überprüfung Standortwahl, Überprüfung verfahrenstechnischer Prozesse
- Überprüfung von Design und betriebliche Prozesse (Vorkehrungen und Maßnahmen); Erreichen eines ausreichenden Sicherheitsniveaus (Entsprechung des Standes der Sicherheitstechnik)
- Bereitstellung von Informationen für Alarm- und Gefahrenabwehrplanung
- Ableitung eines Instandhaltungskonzepts,
- Bereitstellung von Informationen für die Aus- und Weiterbildung der Beschäftigten

Allgemeine Hinweise zur Risikobeurteilung von Störfällen – Erfolgsfaktoren (3/3)

Das Vorgehen zur Auswahl und Anwendung der Verfahren, Methoden und Modelle ist in entsprechenden unternehmensinternen Prozessbeschreibungen festzuhalten. Dies soll gewährleisten, dass die Verfahren und Methoden in angemessener Weise zur Anwendung kommen und aus den Betrachtungen abgeleitete Maßnahmen umgesetzt werden können. Insbesondere ist sicherzustellen, dass die verantwortlichen Personen mit den notwendigen Autoritäten bzw. Befugnissen ausgestattet sind.

Der Erfolg der Anwendung der Analysen hängt wesentlich von den involvierten Personen ab. Rechtzeitige und aufgabengerechte Schulungen und Qualifizierungen der beteiligten Mitarbeiter stellen somit einen Erfolgsfaktor dar, wobei berücksichtigt werden muss, dass auch mehrtägige Schulungen allein noch keine Experten machen.

Bei Einführungen neuer Methoden und Verfahren bieten sich grundsätzlich Pilotstudien an, bei denen die Anwendung bzw. Anwendbarkeit der Methoden und Verfahren erprobt und bewertet werden, bevor diese dann in einem größeren Umfang ausgerollt bzw. angewendet werden. Hierbei sollten nach Möglichkeit erfahrene Experten (inhouse oder extern) in unterstützender Funktion hinzugezogen werden und involvierte Mitarbeiter ihren angedachten Funktionen entsprechend geschult (oder zumindest eingewiesen) werden. Analoge Überlegungen gelten für die Anschaffung von Softwaretools, welche die Erstellung und Aktualisierung der Analysen erleichtern sollen.

Allgemeine Hinweise zur Risikobeurteilung von Störfällen

Probabilistik und Quantifizierungen

Bei der Quantifizierung der Eintrittshäufigkeiten von Gefahrenquellen und der Verfügbarkeit von Barrieren muss berücksichtigt werden, dass genaue Schätzungen in der Regel nicht möglich sind und die Übernahme von statistisch ermittelten Referenzwerten oder Herstellerangaben mit großen Unsicherheiten verbunden sind. Die Unterschiede sind unter anderem darauf zurückzuführen, dass die Daten in unterschiedlichen Kontexten entstanden sind: Unterschiede in Branche, Umgebungsbedingungen, konkreten Einsatzbedingungen, Instandhaltungsregimes. Außerdem können das Alter der Referenzdaten und eventuelle Filterungen der Daten nach bestimmten Fehlerursachen oder anderen Aspekten für weitere Unsicherheiten sorgen.

In der Vergangenheit sind viele Datensammlungen in unterschiedlichsten Kontexten und Branchen erarbeitet worden. Aus den oben genannten Gründen wird hier auf die Nennung einzelner Sammlungen verzichtet. Datenblätter mit Zuverlässigkeitskennwerten der Komponentenhersteller stellen – wenn vorhanden – eine sinnvolle Alternative dar.

Um das Risiko einer Fehleinschätzung und -schlussfolgerung aufgrund falscher Eingangswerte zu minimieren, bietet es sich an, diese zu variieren und den Einfluss auf das Analyseergebnis bzw. die Analyseschlussfolgerung zu betrachten.

Bei der Verwendung von quantitativen Daten ist zu dokumentieren, welche Erkenntnisquelle und welcher Wert aus der Erkenntnisquelle mit welcher Begründung herangezogen wurde.

Bei regelmäßiger Verwendung quantitativer Werte bietet sich der Aufbau einer unternehmensinternen Wissensdatenbank an.

Allgemeine Hinweise zur Risikobeurteilung von Störfällen

Berücksichtigung von Vorkehrungen und Maßnahmen (1/2)

Störfallrisikobeurteilungen motivieren sich zu einem Großteil aus der Bewertung der angedachten Schutzkonzepte. Vorkehrungen und Maßnahmen (Barrieren) sind dabei auf ihre Effektivität, Unabhängigkeit (untereinander und zum auslösenden Ereignis) und Auditierbarkeit hin zu prüfen und zu bewerten. Ineffektive, abhängige oder nicht auditierbare Vorkehrungen und Maßnahmen sollten tendenziell nicht in Analysen aufgenommen werden, um so

- a. keinen falschen Eindruck von Sicherheit zu erzeugen und
- b. die Analysen kompakt und übersichtlich zu halten.

Insbesondere bei (semi-)quantitativen Abschätzungen (LOPA, FTA/ETA, Bow-Tie...) führt eine Nichtberücksichtigung der genannten Aspekte zu einer zu optimistischen Schätzung des verbleibenden Risikos.

Zu beachten ist, dass Barrieren/sicherheitsgerichtete Funktionen in der Regel durch mehrere Komponenten (Sensorik, Logik, Aktorik) realisiert werden. Eine einzelne Komponente (z.B. Notabschaltventil) stellt somit noch keine eigenständige Barriere dar.

Damit Risiken nicht über- oder unterschätzt werden, ist es hilfreich, die Betriebsarten der Schutzebenen (engl. „demand modes“) richtig einzuschätzen. Folgende Unterteilung ist häufig anzutreffen: „Low demand mode“ mit einer Anforderungsrate < 1 per Jahr und nach „High/continuous demand mode“ mit einer Anforderungsrate > 1 per Jahr.

Allgemeine Hinweise zur Risikobeurteilung von Störfällen

Berücksichtigung von Vorkehrungen und Maßnahmen (2/2)

Eine Intervention des Bedienungspersonals kann grundsätzlich als Schutzbarriere angesehen werden, sofern gewisse Randbedingungen gegeben sind und diese in ihrer Zuverlässigkeit nicht zu optimistisch geschätzt werden. Gleichzeitig können menschliche Fehler Auslöseereignisse darstellen. Zuverlässigkeitsabschätzungen menschlicher Handlungen sollten folgende Parameter berücksichtigen: Komplexität, Häufigkeit der Durchführung und Stress. (Vgl. VDI 4006 Blatt 2 – „Menschliche Zuverlässigkeit – Methoden zur qualitativen Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit“).

Benötigte Qualifikationen und Kompetenzen für die Anwendung der Verfahren und Methoden, sinnvolle Teamzusammensetzungen (1/2)

Die Teamzusammensetzung sollte in Abhängigkeit der konkreten Aufgabenstellung und der betrachteten Funktionseinheit festgelegt werden. Das Team sollte über Kompetenzen aus den Bereichen Management, Betrieb, Entwicklung und Service verfügen und kann dabei aus Planern, Betriebsleiter, Verfahrensentwicklern, Betriebsingenieuren, Technikern (Prozessleitetechniker), Sicherheitsfachkräften, Anlagenfahrern und Experten in Umweltschutz, Brandschutz, Logistik bestehen.

Bei moderierten/workshop-orientierten Methoden (z.B. HAZOP) wird eine Teamstärke von ca. 5 Mitgliedern als ideal angesehen. Bei der Zusammensetzung des Teams ist auf Ausgewogenheit bezgl. Erfahrung und Wissen zu den einzelnen Fragestellungen und Themengebieten zu achten. Die Auswahl sollte so getroffen werden, dass ein Großteil der auftretenden Fragestellungen durch die anwesenden Teammitglieder beantwortet werden können und möglichst wenig Fragestellungen delegiert werden müssen. Weiterhin wird ein Moderator, sowie ein Schriftführer (ggf. in Personalunion realisiert) benötigt. Das Team muss in der Lage sein, hypothetische Störungen auf Basis möglicher Fehlhandlungen und Fehler bei Mensch und Maschine ersinnen zu können. Der Moderator muss ausreichend Vorkenntnisse in der Anwendung der entsprechenden Methodik mitbringen und Gespräche zwischen den Experten zielführend bzw. ergebnisorientiert lenken können. Weiterhin sollte der Moderator nach Möglichkeit eine gewisse Distanz zum Betrachtungsobjekt aufweisen, um so möglichst objektiv und unvoreingenommen die Analyse leiten zu können.

Eine Vorbereitung der Teammitglieder in Form einer Schulung/Einweisung in die Methodik ist von Vorteil.

Benötigte Qualifikationen und Kompetenzen für die Anwendung der Verfahren und Methoden, sinnvolle Teamzusammensetzungen (2/2)

Abhängig davon, ob eine Fehlerbaumanalyse, Ereignisbaumanalyse oder LOPA auf einer bereits ausgeführten HAZOP, FMEA oder ähnliches aufbaut, oder aber die Fehlerursachen und -folgen für ein zu betrachtendes TOP-Ereignis erst ermittelt und analysiert werden müssen, sind entsprechende Teamzusammensetzungen notwendig. Sofern sämtliche für die Erstellung und Berechnung der Fehler- und Ereignisbäume notwendigen Eingangsinformationen bereits vorliegen, können diese Aktivitäten durch eine einzelne (geschulte) Person durchgeführt werden.

HAZOP - Relevante Normen, Richtlinien, weitere Literaturhinweise

Literatur	Thematisierte Aspekte
DIN EN 61882:2017-02 VDE 0050-8:2017-02 HAZOP-Verfahren (HAZOP-Studien) - Anwendungsleitfaden (IEC 61882:2016); Deutsche Fassung EN 61882:2016 Kostenpflichtig bei den entsprechenden Verlagen erhältlich	Hauptmerkmale HAZOP, HAZOP-Anwendungen (Allgemeines, Zusammenhang mit anderen Werkzeugen, Grenzen der HAZOP-Studie, Einbindung in Systemlebenszyklusphasen, ...), Vorgehen bei der HAZOP-Studie (Festlegungen, Vorbereitung, Untersuchung, Dokumentation und Nachverfolgung). Dokumentationsbeispiele, Beispiele für verschiedenartige Anwendungen
Sommer, J. (2020): Das PAAG-/HAZOP-Verfahren und weitere praxisbewährte Methoden – Risikobeurteilung in der Anlagensicherheit. 5. Ausgabe, jedermann-Verlag GmbH, Heidelberg Frei verfügbar: https://www.bgrci.de/anlagensicherheit/fachwissen/prozesssicherheit/broschueren-ivss	Grundlagen HAZOP, Vorbereitende Arbeiten, Rolle des Moderators, Rolle der Teammitglieder, Ablauf und Dokumentation der HAZOP-Studie, Modifikationen und Erweiterungen des PAAG-/HAZOP-Verfahrens
HAZOP: Guide to Best Practice, Elsevier; 3. Edition (21. April 2015); ISBN-13: 978-0323394604 (englischsprachig)	The HAZOP Study Method, The Detailed HAZOP Study Procedure, Organizing a HAZOP Study, Carrying Out a Study, Recording and Auditing, Training, Company Procedures for HAZOP Study, Advanced Aspects of HAZOP Study, Specific Applications of HAZOP, Factors for a Successful HAZOP Study, The Guideword-First Approach to HAZOP, The Use of Checklists Within HAZOP Study, Illustrations

HAZOP - Schulungen und Seminare

Die nachfolgende Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Mit der Nennung bzw. Nichtnennung einzelner Institute oder Angebote ist keine Wertung eben dieser verbunden.

- Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie:
 - PAAG/HAZOP I - Eine Methode zur Sicherheitsbetrachtung an verfahrenstechnischen Anlagen – Basisseminar
 - PAAG/HAZOP II - Eine Methode zur Sicherheitsbetrachtung an verfahrenstechnischen Anlagen – Aufbauseminar
 - <https://seminare.bgrci.de/de/>
- Verein Deutscher Ingenieure:
 - HAZOP (PAAG) und LOPA - Methoden der Gefährdungs- und Risikoanalyse
 - Methoden der Sicherheitsanalyse für verfahrenstechnische Anlagen
 - <https://www.vdi-wissensforum.de/weiterbildung-prozessindustrie/>
- Center of Safety Excellence (CSE)
 - Sicherheitskonzepte: Risikomanagement und HAZOP
 - <https://cse-engineering.de/academy/>

HAZOP - Softwaretools

Die nachfolgende Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Mit der Nennung bzw. Nichtnennung einzelner Angebote ist keine Wertung eben dieser verbunden.

- Hazop+ von Isograph
- PHA Pro von sphere
- PHA-Tool von BakerRisk
- PHAWorks von Primatech

Zur Dokumentation von Gefahrenanalysen, die nach dem PAAG-/HAZOP-Verfahren erstellt werden, sind auf der Homepage der BG RCI Formblätter auf der Basis von WORD und EXCEL abrufbar.

<https://www.bgrci.de/anlagensicherheit/fachwissen/prozesssicherheit/arbeitshilfen>

Fehlerbaumanalyse - Relevante Normen, Richtlinien und weitere Literaturhinweise

Literatur	Thematisierte Aspekte
Fehlzustandsbaumanalyse (IEC 61025:2006), Deutsche Fassung EN 61025:2007. Kostenpflichtig bei den entsprechenden Verlagen erhältlich	Beschreibung und Aufbau eines Fehlzustandsbaums, Zielsetzung, Anwendungsgebiete, Kombinationen mit anderen Zuverlässigkeitsanalyseverfahren, Entwicklung und Beurteilung des Fehlzustandsbaums, Hinweise zur Betrachtungstiefe (Granulierung des Fehlerbaumes), Bericht/Dokumentation
Fault Tree Handbook (NUREG-0492:1981); herausgegeben durch die U.S. Nuclear Regulatory Commission. Das englischsprachige Handbuch steht kostenfrei zur Verfügung: https://www.nrc.gov/docs/ML1007/ML100780465.pdf	Basic Concepts, The Basic Elements of a Fault Tree, Fault Tree Construction Fundamentals, Probability Theory – The Mathematical Description of Events, Boolean Algebra and Application to Fault Tree Analysis, Examples
ARAMIS Final user Guide – Appendix 4 of deliverable D.1.C.: Generic fault trees. Englischsprachig, kostenfrei: (Rückmeldung vom EC JRC über Ort/Plattform der Bereitstellung steht noch aus)	Generische Fehlerbäume für unterschiedliche Stofffreisetzungsszenarien (Beispielsweise Decomposition, Explosion, Breach on the shell in vapour phase, Breach on the shell in liquid phase, Leak from liquid pipe, Leak from gas pipe, Catastrophic rupture).
Methodikbeispiel für eine Risikoermittlung einer Flüssiggas-Tankanlage (Störfallverordnung); Bundesamt für Umwelt BAFU, 1996. Kostenfrei verfügbar: https://www.bafu.admin.ch/dambafu/de/dokumente/stoerfallvorsorge/uv-umwelt-vollzug/methodikbeispielfuereinerisikoermittlungeneinerfluessiggastankanl.pdf.download.pdf/methodikbeispielfuereinerisikoermittlungeneinerfluessiggas-tankanl.pdf	Anwendung der Fehlerbaum- und Ereignisbaumanalysemethodik für Flüssiggas-Tankanlagen im Kontext der schweizerischen Störfall-Verordnung

Fehlerbaumanalyse - Schulungen und Seminare

Die nachfolgende Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Mit der Nennung bzw. Nichtnennung einzelner Institute oder Angebote ist keine Wertung eben dieser verbunden.

- Verein Deutscher Ingenieure:
 - Methoden der Sicherheitsanalyse für verfahrenstechnische Anlagen
 - <https://www.vdi-wissensforum.de/weiterbildung-prozessindustrie/>

Fehlerbaumanalyse - Softwaretools

Die nachfolgende Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Mit der Nennung bzw. Nichtnennung einzelner Angebote ist keine Wertung eben dieser verbunden.

- CAFTA von EPRI
- ITEM ToolKit von ITEM Software
- Reliability Workbench / FaultTree+ von Isograph
- RAM Commander von ALD Software Limited
- RiskSpectrum von Lloyd's Register

Eine kostenfreie Alternative zur Berechnung einfacher Redundanzkonzepte bietet

[https://reliabilityanalyticstoolkit.appspot.com/.](https://reliabilityanalyticstoolkit.appspot.com/)

Ereignisbaumanalyse - Relevante Normen, Richtlinien und weitere Literaturhinweise

Literatur	Thematisierte Aspekte
<p>Verfahren zur Analyse der Zuverlässigkeit - Ereignisbaumanalyse (ETA) (IEC 62502:2010); Deutsche Fassung EN 62502:2010</p> <p>Kostenpflichtig bei den entsprechenden Verlagen erhältlich</p>	<p>a) Definition der essentiellen Begriffe sowie Beschreibung der Verwendung von Formelzeichen und Arten der graphischen Darstellungen; b) Spezifizierung der Verfahrensschritte für die Aufstellung eines Ereignisbaums; c) Ausarbeitung der Annahmen, Einschränkungen und Vorteile bei der Durchführung der Analyse; d) Ermittlung der Beziehungen zu anderen Zuverlässigkeits- und risikobezogenen Verfahren sowie Erläuterung geeigneter Anwendungsgebiete; e) Bereitstellung von Leitlinien für die qualitativen und quantitativen Aspekte der Auswertung; f) Auflistung praktischer Beispiele.</p>
<p>Reference Manual Bevi Risk Assessments (QRA-Verfahren in den Niederlanden); herausgegeben vom National Institute of Public Health and the Environment (RIVM);</p> <p>Die Version 3.2 vom 1.7.2009 ist als englischsprachiges Dokument kostenfrei verfügbar (auf niederländisch sind neuere Versionen verfügbar):</p> <p><u>https://www.rivm.nl/documenten/reference-manual-bevi-risk-assessments-version-32</u></p>	<p>a) Generische Stofffreisetzungsszenarien (Reference Manual; Module C – Kap. 3.3 ff)</p> <p>b) Ereignisbäume für Stofffreisetzungen entflammbarer Stoffe, Verzweigungswahrscheinlichkeiten (Reference Manual; Module B – Kap. 3.4.6)</p>

Ereignisbaumanalyse - Relevante Normen, Richtlinien und weitere Literaturhinweise

Literatur	Thematisierte Aspekte
<p>RISK CALCULATIONS MANUAL (QRA-Verfahren in Flandern); herausgegeben vom flämischen Department für Umwelt und Gesundheit (Department Omgeving)</p> <p>Die Version 2.0 vom 1.4.2019 ist als englischsprachiges Dokument kostenfrei verfügbar (auf niederländisch sind neuere Versionen verfügbar):</p> <p>https://omgeving.vlaanderen.be/sites/default/files/2021-10/2020%2007%2013%20-%20Risk%20Calculations%20Manual.pdf</p>	<p>a) Generische Stofffreisetzungsszenarien (Risk Calculation Manual; Module 5 ff)</p> <p>b) Ereignisbäume für Stofffreisetzungen entflammbarer Stoffe, Verzweigungswahrscheinlichkeiten (Risk Calculation Manual; Module 14.4 ff)</p>
<p>ARAMIS Final user Guide Appendix – Appendix 6 of deliverable D.1.C.: Generic event trees generated</p> <p>Englischsprachig, kostenfrei: (Rückmeldung vom EC JRC über Ort/Plattform der Bereitstellung steht noch aus)</p>	<p>Generische Ereignisbäume für unterschiedliche Stofffreisetzungsszenarien (Beispielsweise Decomposition, Explosion, Breach on the shell in vapour phase, Breach on the shell in liquid phase, Leak from liquid pipe, Leak from gas pipe, Catastrophic rupture).</p>
<p>Methodikbeispiel für eine Risikoermittlung einer Flüssiggas-Tankanlage (Störfallverordnung); Bundesamt für Umwelt BAFU, 1996</p> <p>Kostenfrei verfügbar:</p> <p>https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/stoerfallvorsorge/uv-umwelt-vollzug/methodikbeispielfuereinerisikoermittlungeneinerfluessiggas-tankanl.pdf.download.pdf/methodikbeispielfuereinerisikoermittlungeneinerfluessiggas-tankanl.pdf</p>	<p>Anwendung der Fehlerbaum- und Ereignisbaumanalysemethodik für Flüssiggas-Tankanlagen im Kontext der schweizerischen Störfall-Verordnung</p>

Ereignisbaumanalyse - Schulungen und Seminare

Die nachfolgende Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Mit der Nennung bzw. Nichtnennung einzelner Institute oder Angebote ist keine Wertung eben dieser verbunden.

- Verein Deutscher Ingenieure:
 - Methoden der Sicherheitsanalyse für verfahrenstechnische Anlagen
 - <https://www.vdi-wissensforum.de/weiterbildung-prozessindustrie/>

Ereignisbaumanalyse - Softwaretools

Die nachfolgende Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Mit der Nennung bzw. Nichtnennung einzelner Angebote ist keine Wertung eben dieser verbunden.

- CAFTA von EPRI
- ITEM ToolKit von ITEM Software
- Reliability Workbench / FaultTree+ von Isograph
- RAM Commander von ALD Software Limited
- RiskSpectrum von Lloyd's Register

Bow-Tie-Analyse - Relevante Normen, Richtlinien und weitere Literaturhinweise

Literatur	Thematisierte Aspekte
Bow Ties in Risk Management - A Concept Book for Process Safety, CCPS (Center for Chemical Process Safety). 1. Auflage Dezember 2018, 224 Seiten, Hardcover, Wiley & Sons Ltd, ISBN: 978-1-119-49039-5	Concept of bow tie barrier analysis, pitfalls, examples, application throughout an organization, human and organizational factors
Bow Tie for Covid-19 (as per CCPS/EI guidance). Published by the Energy Institute and the American Institute of Chemical Engineers' Center for Chemical Process Safety (April 2020) https://www.energyinst.org/_data/assets/pdf_file/0005/726377/Bow-Tie-for-Covid-19-EI-and-CCPS-April-9-2020.pdf	Beispiel einer Bow-Tie-Analyse
Sound Barriers Management in Process Safety: Bow-tie Approach According to the First Official AIChE - CCPS Guidelines, Fiorentini L., Marmo L., 2018, Chemical Engineering Transactions, 67, 253-258. Englischsprachig, frei verfügbar: https://www.aidic.it/cet/18/67/043.pdf	Anwendungshinweise zur Erstellung einer Bow-Tie Analyse: Definition of Hazards an Top Events, Definition of Threats and Consequences, Definition of Barriers, Degradation factors and degradation controls. Hinweise zum Management der Barrieren
Bow Ties in Risk Management; using the new CCPS-EI book to avoid pitfalls, Johnson. M., Manton, M., Cowley, C., Scanlon, M. (2018); HAZARDS 28, IChemE Symposium Series No. 163 Englischsprachig, frei verfügbar: https://www.icheme.org/media/16937/hazards-28-paper-31.pdf	Kurzdarstellung häufiger Anwendungsfehler (Pitfalls)

Bow-Tie-Analyse - Schulungen und Seminare

Die nachfolgende Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Mit der Nennung bzw. Nichtnennung einzelner Institute oder Angebote ist keine Wertung eben dieser verbunden.

- - (im Zuge der Recherche konnten keine Schulungen oder Seminare ausgemacht werden)

Bow-Tie-Analyse - Softwaretools

Die nachfolgende Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Mit der Nennung bzw. Nichtnennung einzelner Angebote ist keine Wertung eben dieser verbunden.

- BowtieXP von CGE Risk Management Solutions

Layer of Protection Analysis - Relevante Normen, Richtlinien und weitere Literaturhinweise

Literatur	Thematisierte Aspekte
Layer of Protection Analysis – Simplified Process Risk Assessment 2001, Center for Chemical Process Safety	Leitpfaden zur Anwendung LOPA-Verfahrens. Beschreibung von Regeln und Ansätzen für die Verwendung von LOPA
Guidelines for Initiating Events and Independent Protection Layers in Layer of Protection Analysis 2015, (Center for Chemical Process Safety)	Leitpfaden zur Anwendung LOPA-Verfahrens. In diesem Buch wird erläutert, wie sich die Bereiche menschliche Zuverlässigkeitsanalyse, Fehlerbaumanalyse, inhärente Sicherheit, Audits und Beurteilungen, Instandhaltung und Notfallreaktionen auf LOPA und SIS beziehen.
Guidelines for Enabling Conditions and Conditional Modifiers in Layer of Protection Analysis 2013, (Center for Chemical Process Safety)	Der Hauptzweck des Buches besteht darin, Beispiele für CMs (conditional modifier) und ECs (enabling conditions) bereitzustellen und konkrete Leitlinien zu den Protokollen bereitzustellen, die befolgt werden müssen, um diese Konzepte zu verwenden.
Layer of Protection Analyse (LOPA) zur risikobasierenden Bewertung von Szenarien. Guideline zur Anwendung für prozessbedingte Störungen bei der Sicherheitsanalyse von technischen Anlagen 2. Auflage 2017, Dipl.-Ing. Dr. Reinhard Preiss und Dipl.-Ing. Dr. Michael Struckl, TÜV AUSTRIA AKADEMIE GMBH Kostenpflichtig	Praxisnaher Leitpfaden für eine konsistente Anwendung des LOPA-Verfahrens. Formulierung von Standard- und Mindestwerten für Eintrittshäufigkeiten und Zuverlässigkeiten für ausgewählte Initiale Ereignisse, Schutzbarrieren und conditional modifier. Anwendungsbeispiele

Layer of Protection Analysis - Schulungen und Seminare

Die nachfolgende Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Mit der Nennung bzw. Nichtnennung einzelner Institute oder Angebote ist keine Wertung eben dieser verbunden.

- Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie:
 - Risikobeurteilung in der Anlagensicherheit
 - <https://seminare.bgrci.de/de/>

- Verein Deutscher Ingenieure:
 - HAZOP (PAAG) und LOPA - Methoden der Gefährdungs- und Risikoanalyse
 - Methoden der Sicherheitsanalyse für verfahrenstechnische Anlagen
 - <https://www.vdi-wissensforum.de/weiterbildung-prozessindustrie/>

Layer of Protection Analysis - Softwaretools

Die nachfolgende Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Mit der Nennung bzw. Nichtnennung einzelner Angebote ist keine Wertung eben dieser verbunden.

- LOPAWorks von Primatech
- BowtieXP von CGE Risk Management Solutions

Quellenverzeichnis

Das Tutorial stellt eine Zusammenfassung der Aussagen des Schlussberichtes dar. Für eine bessere Lesbarkeit wurde im Tutorial auf die Angabe von Querweisen zu den Quellen verzichtet. In die Erstellung des Schlussberichtes sind folgende Quellen eingegangen:

Gesetzliche Grundlagen

2012/18/EU (2012): Richtlinie 2012/18/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 zur Beherrschung der Gefahren schwerer Unfälle mit gefährlichen Stoffen, zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinie 96/82/EG des Rates Text von Bedeutung für den EWR (Seveso-III-Richtlinie). <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/18/oj>

StörfallV (2017): Zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Störfall-Verordnung - 12. BImSchV) vom 15. März 2017 (BGBl. I Abs. 13, S. 483), die zuletzt durch Artikel 107 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I Abs. 29, S. 1328) geändert worden ist. https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_12_2000/

BImSchG (2013): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG) vom 17. Mai 2013 (BGBl. I, Abs. 25, S. 1274) zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I Abs. 59, S. 3901). <https://www.gesetze-im-internet.de/bimschg/>

Druckgeräteverordnung (2015): Vierzehnte Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (Druckgeräteverordnung - 14. ProdSV), vom 13. Mai 2015, zuletzt geändert gem. BGBl. I Abs. 15 vom 08.04.2016 S. 597. https://www.gesetze-im-internet.de/gsgv_14_2016/

Quellenverzeichnis

Normen, Richtlinien und Leitfäden

BMU (2004): Vollzugshilfe zur Störfall-Verordnung. 1. Auflage, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin.

<https://www.umweltbundesamt.de/dokument/vollzugshilfe-zur-stoerfallvorsorge-2004>

SFK (1999): ABSCHLUSSBERICHT SFK-GS-26 „Schadensbegrenzung bei Dennoch-Störfällen - Empfehlungen für Kriterien zur Abgrenzung von Dennoch-Störfällen und für Vorkehrungen zur Begrenzung ihrer Auswirkungen“, verabschiedet auf der 31. Sitzung der SFK am 12. Oktober 1999, Störfall-Kommission, Bonn.

https://www.kas-bmu.de/415.html?file=files/publikationen/SFK-Publikationen/Berichte/sfk_gs_26.pdf&cid=22122

SFK (2002): LEITFADEN SFK-GS-33 „Schritte zur Ermittlung des Standes der Sicherheitstechnik“, verabschiedet auf der 39. SFK-Sitzung am 16. Januar 2002, Störfall-Kommission, Bonn.

https://www.kas-bmu.de/sfk-leitfaeden-arbeits-und-vollzugshilfen.html?file=files/publikationen/SFK-Publikationen/Leitfaeden%2C%20Arbeits-%20und%20Vollzugshilfen%20%28aktuell%29/sfk_gs_33.pdf&cid=1654

SFK (2002b): ARBEITSHILFE SFK-GS-35 „Systematisierung von Fragestellungen und Antworten zum Begriff „Betriebsbereich“ des § 3 Abs. 5a BImSchG“, erstellt durch den Arbeitskreis SEVESO RICHTLINIE der Störfall-Kommission, verabschiedet auf der 39. SFK-Sitzung am 16. Januar 2002, Störfall-Kommission, Bonn.

https://www.kas-bmu.de/sfk-leitfaeden-arbeits-und-vollzugshilfen.html?file=files/publikationen/SFK-Publikationen/Leitfaeden%2C%20Arbeits-%20und%20Vollzugshilfen%20%28aktuell%29/sfk_gs_35.pdf&cid=1650

SFK (2002c): ARBEITSHILFE SFK-GS-38 „Maßnahmen gegen Eingriffe Unbefugter“, erstellt von der ad-hoc Arbeitsgruppe „Eingriffe Unbefugter“, verabschiedet auf der 41. Sitzung der SFK am 23. Oktober 2002, Störfall-Kommission, Bonn.

https://www.kas-bmu.de/414.html?file=files/publikationen/SFK-Publikationen/Leitfaeden%2C%20Arbeits-%20und%20Vollzugshilfen%20%28aktuell%29/sfk_gs_38.pdf&cid=22091

Quellenverzeichnis

Normen, Richtlinien und Leitfäden

SFK (2004): BERICHT SFK-GS-41 „Risikomanagement im Rahmen der Störfall-Verordnung“, erarbeitet vom Arbeitskreis Technische Systeme, Risiko und Verständigungsprozesse (AK-TRV) der Störfall-Kommission, am 21.04.2004 von der SFK zustimmend zur Kenntnis genommen, Bonn. https://www.kas-bmu.de/sfk-berichte.html?file=files/publikationen/SFK-Publikationen/chronologische%20Reihenfolge/sfk_gs_41.pdf&cid=23720

TAA (2003): Bericht TAA-GS-29 „Ganzheitliche Anlagenüberwachung“. Erarbeitet vom Arbeitskreis Anlagenüberwachung des Technischen Ausschusses für Anlagensicherheit, Bonn. https://www.kas-bmu.de/taa-leitfaeden-arbeits-und-vollzugshilfen.html?file=files/publikationen/TAA-Publikationen/chronologische%20Reihenfolge/taa_gs_29.pdf&cid=23730

KAS (2017): Bericht KAS-1 „Sicherheitsrelevante Teile eines Betriebsbereiches und Richtwerte für sicherheitsrelevante Anlagenteile (SRA)“, verabschiedet auf der 33. KAS-Sitzung am 02.06.2015, redaktionell angepasst auf der 39. Sitzung des Ausschuss Seveso-Richtlinie am 05.10.2017, Störfall-Kommission, Bonn. https://www.kas-bmu.de/files/publikationen/KAS-Publikationen/chronologische%20Reihenfolge/KAS_1_neu.pdf

KAS (2018): Leitfaden KAS-19 „Leitfaden zum Konzept zur Verhinderung von Störfällen und zum Sicherheitsmanagementsystem“, erarbeitet von dem Arbeitskreis „Überarbeitung und Zusammenführung der Leitfäden SFK-GS-23 und -24“, überarbeitet von dem Ausschuss „Seveso-Richtlinie“, 3. Überarbeitete Fassung, im November 2018 von der KAS verabschiedet, Störfall-Kommission, Bonn. <https://www.kas-bmu.de/kas-leitfaeden-arbeits-und-vollzugshilfen.html?file=files/publikationen/KAS-Publikationen/Leitfaeden%2C%20Arbeits-%20und%20Vollzugshilfen/KAS19Ueb.pdf&cid=1533>

KAS (2018b): TRAS 120: „Sicherheitstechnische Anforderungen an Biogasanlagen“. https://www.kas-bmu.de/tras-endgueltige-version.html?file=files/publikationen/TRAS/TRAS%20%28endgueltige%20Fassung%29/BAntz_AT_21_01_2019_B4.pdf&cid=20556

Quellenverzeichnis

Normen, Richtlinien und Leitfäden

KAS (2021): Leitfaden KAS-55 „Leitfaden Mindestangaben im Sicherheitsbericht“, erarbeitet von dem Ausschuss „Seveso-Richtlinie“, am 15.04.2021 von der KAS verabschiedet, Störfall-Kommission, Bonn. https://www.kas-bmu.de/kas-leitfaeden-arbeits-und-vollzugshilfen.html?file=files/publikationen/KAS-Publikationen/Leitfaeden%2C%20Arbeits-%20und%20Vollzugshilfen/KAS_55.pdf&cid=26260

KAS (2021b): Leitfaden KAS-56 „Bericht 2019. Auswertung der Erfahrungsberichte über Prüfungen der Sachverständigen im Sinne von § 29a BImSchG und Veranstaltungen zum Meinungs- und Erfahrungsaustausch im Jahr 2019“, erarbeitet vom Ausschuss „Erfahrungsberichte“, im September 2021 von der KAS verabschiedet. https://www.kas-bmu.de/kas-chronologische-reihenfolge.html?file=files/publikationen/KAS-Publikationen/Berichte/KAS_56.pdf&cid=26946

KAS (2022): TRAS 310 – Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Niederschläge und Hochwasser. <https://www.kas-bmu.de/tras-endgueltige-version.html?file=files/publikationen/TRAS/TRAS%20%28endgueltige%20Fassung%29/BAAnz%20AT%2012.01.2023%20B5.pdf&cid=1788>

KAS (2022b): TRAS 320 – Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Wind sowie Schnee- und Eislasten. <https://www.kas-bmu.de/tras-endgueltige-version.html?file=files/publikationen/TRAS/TRAS%20%28endgueltige%20Fassung%29/BAAnz%20AT%2018.07.2022%20B5.pdf&cid=1798>

LANUV (2023): Der Sicherheitsbericht nach Störfall-Verordnung - Eine Handlungshilfe für Behörden und Betreiber - Stand: 22.11.2023. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/anlagen/pdf/Sicherheitsbericht_Stoerfallverordnung.pdf

Quellenverzeichnis

Normen, Richtlinien und Leitfäden

ISO (2018): ISO 31000:2018 (en) Risk management — Guidelines. 2. Auflage

IEC (2019): IEC 31010:2019 (en) – Risk management — Risk assessment techniques. 2. Auflage

VDI (2019): Richtlinie VDI/VDE 2180:2019 – Blatt 1 „Funktionale Sicherheit in der Prozessindustrie“, VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA), Fachbereich Engineering und Betrieb automatisierter Anlagen, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf

VDI (2003): VDI 4006 Blatt 2 – „Menschliche Zuverlässigkeit – Methoden zur qualitativen Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit“, VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf

DIN e.V. (2011): DIN EN 61508:2011, Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme, Beuth-Verlag, Berlin

DIN e.V. (2009): DIN EN 61511:2009, Funktionale Sicherheit - PLT-Sicherheitseinrichtungen für die Prozessindustrie, Beuth-Verlag, Berlin

DIN e.V. (2006): DIN EN 60812:2006, Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen – Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA), Beuth-Verlag, Berlin

DIN e.V (2007): DIN EN 61025:2007-08, Fehlzustandsbaumanalyse, Beuth-Verlag, Berlin

DIN e.V (2011): DIN EN 62502:2011-06 (VDE 0050-3:2011-06): Verfahren zur Analyse der Zuverlässigkeit - Ereignisbaumanalyse (ETA) (IEC 62502:2010); Deutsche Fassung EN 62502:2010, Beuth-Verlag, Berlin

DIN e.V (2017): (DIN EN 61882 (VDE 0050-8):2017): HAZOP-Verfahren (HAZOP-Studien) – Anwendungsleitfaden (IEC 61882:2016), Beuth-Verlag, Berlin

Quellenverzeichnis

Normen, Richtlinien und Leitfäden

BAFU (2018): Handbuch zur Störfallverordnung (StFV), Allgemeiner Teil. Bundesamt für Umwelt BAFU. Bern.

https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/stoerfallvorsorge/uv-umwelt-vollzug/handbuch-zur-stoerfallverordnung-stfv-allgemeiner-teil.pdf.download.pdf/uv-1807-d_HBStFV_allgemein.pdf

BAFU (2018b): Beurteilungskriterien zur Störfallverordnung (StFV). Ein Modul des Handbuchs zur Störfallverordnung (StFV). Bundesamt für Umwelt BAFU. Bern. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/stoerfallvorsorge/publikationen-studien/publikationen/beurteilungskriterien-zur-stoerfallverordnung-stfv.html>

BAFU (2018c): Betriebe mit chemischem Gefahrenpotenzial, Ein Modul des Handbuchs zur Störfallverordnung (StFV). Bundesamt für Umwelt BAFU. Bern. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/stoerfallvorsorge/publikationen-studien/publikationen/betriebe-mit-chemischem-gefahrenpotenzial.html>

Gmünder, F.; Fierz, H.; Marugg, C.; Wolfer, M. (1992): Rahmenbericht Flüssiggas-Tankanlagen – zum Kurzbericht und zur Risikoermittlung im Hinblick auf die Störfallvorsorge, Basler&Hofmann, Zürich

Wettstein, W.; Heinemann, N.; Pfäffli, D. (2023): Störfallvorsorge bei Kälteanlagen. EBP Schweiz AG im Auftrag des Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Gefahrenprävention, Sektion Störfall- und Erdbebenvorsorge, Bern.

https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/stoerfallvorsorge/externe-studien-berichte/bericht_stoerfallvorsorgebeikaelteanlagen.pdf.download.pdf/bericht_stoerfallvorsorgebeikaelteanlagen.pdf

RIVM (2015): Reference Manual Bevi Risk Assessments, Version 3.3, National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven. In der Originalsprache liegt das Dokument unter dem Namen „Handleiding Risicoberekeningen Bevi“ in der Version 4.3 von 1.1.2021 vor. Englischsprachig ist die Version 3.2 von 2009 abrufbar: <https://www.rivm.nl/documenten/reference-manual-bevi-risk-assessments-version-32>

Quellenverzeichnis

Normen, Richtlinien und Leitfäden

Departement Omgeving (2019): RISK CALCULATIONS MANUAL - Guidelines for quantitative risk analysis, indirect risks and environmental risk analysis, Version 2.0, Government of Flanders, Department of the Environment, Brüssel. In der Originalsprache liegt das Dokument unter dem Namen "Handboek Risicoberekeningen" in der Version 3.2 vom 1.12.2022 vor. Englischsprachig ist die Version 2.0 von 2019 abrufbar: <https://omgeving.vlaanderen.be/sites/default/files/2021-10/2020%2007%2013%20-%20Risk%20Calculations%20Manual.pdf>

Hoorelbeke, L.; Vancayseele, C.; Cnudde, W.; De Regt, C. (1994): Milieurapport Vlaanderen 1994, Anhang III.10A - Hinder: risico's, DNV Industry N.V.

LNE (2006): Code Risicocriteria, Een code van goede praktijken aangaande risicocriteria voor externe mensrisico's van Seveso-inrichtingen, Version 1.0, Flämische Regierung, Ministerium für Umwelt, Natur und Energiepolitik

Andersen, H.; Casal, J.; Dandrieux, A.; Debray, B.; De Dianous, V.; Duijm, N.J.; Delvosalle, C.; Fievez, C.; Goossens, L.; Gowland, R.T.; Hale, A.J.; Hourtolou, D.; Mazzarotta, B.; Pipart, A.; Planas, E.; Prats, F.; Salvi, O.; Tixier, J. (2004): Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the context of the SEVESO II directive, User Guide.
https://safetybarriermanager.duijm.dk/files/aramis/ARAMIS_FINAL_USER_GUIDE.pdf

Quellenverzeichnis

Monografien und Sammelbände, Studien, Vergleichende Betrachtungen, Technische Dokumentationen

Ale, B. J. M. (2023): Third-Party Risk Policies in the Netherlands: A Historical Sketch, 1. Auflage, Cambridge Scholars Publishing, Newcastle upon Tyne

Amendola, A.; Contini, S.; Ziomas, I. (1992): Uncertainties in chemical risk assessment: Results of a European benchmark exercise; Journal of Hazardous Materials Volume 29, Issue 3. [https://doi.org/10.1016/0304-3894\(92\)85041-X](https://doi.org/10.1016/0304-3894(92)85041-X)

Arnold, J.; Niehoff, A. (2005): Praxis bei der Ermittlung von Betrieben nach der Seveso-II-Richtlinie in Europa und entsprechenden Betrieben in Nordamerika. DNV Consulting im Auftrag der Gesellschaft für Infrastruktur und Umwelt mbH, Bonn. https://www.kas-bmu.de/studien-ergaenzende-dokumente.html?file=files/publikationen/Studien_Ergaenzende%20Dokumente/DNV_14102005.pdf&cid=1862

Bennett, J. F., Cowley, L. T., Davenport, J. N., and Rowson, J. J. (1991): Large scale natural gas and LPG jet fires final report to the CEC, TNER 91.022. <https://doi.org/10.1205/095758297528977>

Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie; Verband für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz bei der Arbeit in Kooperation mit Verband der Betriebsbeauftragten (2015): Ratgeber Anlagensicherheit. Universum Verlag GmbH, Wiesbaden

Block, F.-J.; Haferkamp, K.; Mistele, J.; Shahvardian, A. (2006): ROGA – Eine neue Methode der risikoorientierten Gefahrenanalyse zur Erfüllung der Anforderung der Störfall-Verordnung. Technische Überwachung, Düsseldorf. <https://www.tuv.com/content-media-files/master-content/services/industrial-services/0036-tuv-rheinland-plant-safety/tuv-rheinland-roga-methode-artikel.pdf>

Block, F.-J.; Haferkamp, K.; Häberlein, A. (2010): ROGA und LOPA – ein Vergleich zweier Methoden zur Risikobewertung von chemischen Prozessanlagen. Technische Überwachung, Düsseldorf. <https://www.tuv.com/content-media-files/master-content/services/industrial-services/0036-tuv-rheinland-plant-safety/tuv-rheinland-roga-lopa-fachartikel.pdf>

Quellenverzeichnis

Monografien und Sammelbände, Studien, Vergleichende Betrachtungen, Technische Dokumentationen

Chamberlain, G. A. (1987): Developments in design methods for predicting thermal radiation from flares, Chem. Eng. Res. Des., Vol. 65, Seiten 299-309. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/6154885>

Cook, J.; Bahrami, Z.; Whitehouse, R. J. (1990): A comprehensive program for calculation of flame radiation levels. J. Loss Prev. Process Ind., 3, Seiten 150-155. [https://doi.org/10.1016/0950-4230\(90\)85039-C](https://doi.org/10.1016/0950-4230(90)85039-C)

Drewitz, Y. (2012): Methodik zur Durchführung einer Quantitativen Risikoanalyse unter Berücksichtigung des Standes der Sicherheitstechnik bei Störfall-Anlagen in Deutschland. Dissertation, Berlin. <https://doi.org/10.14279/depositonce-3116>

Drewitz, Y.; Schalau B. (2009): Erstellung quantitativer Risikoanalysen für ausgewählte sächsische Betriebe mittels einer durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung entwickelten Methodik und Vergleich der Ergebnisse mit den Ergebnissen qualitativer Risikoanalysen auf Basis vorliegender Sicherheitsberichte. Erschienen als Heft 22/2009 in der Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/15004/documents/18014>

Fabbri, L.; Binda, M.; Bruinen de Bruin, Y. (2017): Accident Damage Analysis Module (ADAM) – Technical Guidance Software tool for Consequence Analysis calculations, Publications Office of the European Union, Luxembourg. <https://dx.doi.org/10.2760/523638>

Fabbri, L.; Binda; M. Wood, M. (2018): Evaluation of the Accident Damage Analysis Module (ADAM) Tool - Verification and Validation of implemented models in ADAM for Accident Consequence Analysis, Publications Office of the European Union, Luxembourg. <https://dx.doi.org/10.2760/582513>

Hansler, R.J.; Stam, G.; Van Vliet, A.A.C. (2016): A revised method for assessing acute inhalation toxicity in quantitative risk analysis, National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven. <https://www.icheme.org/media/11820/hazards-26-poster-15-a-revised-method-for-assessing-acute-inhalation-toxicity-in-quantitative-risk-analysis.pdf>

Quellenverzeichnis

Monografien und Sammelbände, Studien, Vergleichende Betrachtungen, Technische Dokumentationen

Hauptmanns, U. (2020): Prozess- und Anlagensicherheit. 2. Auflage, Springer Berlin Heidelberg

Johnson, M.; Manton, M.; Cowley, C.; Scanlon, M. (2018): Bow Ties in Risk Management; using the new CCPS-EI book to avoid pitfalls. SYMPOSIUM SERIES NO 163, IChemE. <https://www.icheme.org/media/16937/hazards-28-paper-31.pdf>

Kaiser, W.; Rogazewski, P.; Schindler, M.; Acikalin, A.; Albrecht, M.; Lambert, M.; Steinbach, J. (2000): Ermittlung und Berechnung von Störfallablaufszenarien nach Maßgabe der 3. Störfallverwaltungsvorschrift. UBA-Forschungsbericht 29748 428, Umweltbundesamt, Berlin. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/1831.pdf>

Sommer, J.; Kappelmaier, R.; Poschenreithner, G.; Rossinelli, L.; Uhlmann, G. (2008): Das PAAG-Verfahren. Methodik, Anwendung, Beispiele. 4. Auflage, Internationale Vereinigung für soziale Sicherheit (IVSS), Sektion Chemie, Heidelberg

Kappelmaier, R., Moch, E., Piringer, R., Sommer, J., Stephan, T., Uhlmann, G., Arend, M., Bronner, W., Koinig, H., Meeßen, C., Rust, S., Salzmann, G. (2012): Gefahrenermittlung und Gefahrenbewertung in der Anlagensicherheit – Praxisbewährte Methoden. 2. Auflage, Internationale Vereinigung für soziale Sicherheit (IVSS), Sektion Chemie, Heidelberg

Martinsen, W. E., and Marx, J. D. (1999): An improved model for the prediction of radiant heat from fireballs, International conference and workshop on modelling the consequences of accidental releases of hazardous materials, San Francisco California, Seiten 605-621. <https://www.questconsult.com/pdf/paper55.pdf>

Miller, D. (2017): New model for predicting thermal radiation from flares and high pressure jet fires for Hydrogen and Syngas, Process Safety Progress, Vol. 36, No. 3, Seiten 237 – 251. <https://doi.org/10.1002/prs.11867>

Mudan, K.S. (1995): Fire hazard calculations for large open hydrocarbon fires, Kapitel 3-11 in “SFPE handbook of fire protection engineering”, Zweite Edition, National Fire Protection Association, Quincy, MA. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0_66

Quellenverzeichnis

Monografien und Sammelbände, Studien, Vergleichende Betrachtungen, Technische Dokumentationen

Necci, A.; Krausmann, E. (2022): How to use RAPID-N Methodology, models, technical information and tutorials.

<https://dx.doi.org/10.2760/231493>

Nussey, C. (2006): Failure frequencies for major failures of high pressure storage vessels at COMAH sites: A comparison of data used by HSE and the Netherlands. <https://www.yumpu.com/en/document/view/22334788/failure-frequencies-for-major-failures-of-high-pressure-storage-hse>

Preiss, R., Struckl, M. (2017): Layer of Protection Analyse (LOPA) zur risikobasierenden Bewertung von Szenarien – Guideline zur Anwendung für prozessbedingte Störungen bei der Sicherheitsanalyse von technischen Anlagen. TÜV Austria Akademie GmbH

Preiss, R., Struckl, M. (2017b): Methoden der Risikoanalyse in der Technik – Systematische Analyse komplexer Systeme, 2. Auflage 2017. TÜV Austria Akademie GmbH

ProcessNet (2010): „Anwendung von Quantitativen Risikoanalysen (QRAs) – Positionspapier der Fachgemeinschaft Sicherheitstechnik – Arbeitsausschuss Risikomanagement“.

https://processnet.org/processnet_media/FG+Sicherheitstechnik/Positionspapier+Anwendung+von+QRAs+20101109_FINAL2.pdf

Schalaus, B.; Zach, U. (2005): Kurzfassung des Abschlussberichtes zum Vorhaben „Einführung eines Informationsnetzwerkes zum Stand der Sicherheitstechnik nach Störfall-Verordnung“. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Arbeitsgruppe 0205-II.14-0068, Anlagensicherheit; Sicherheitstechnik und Risikobewertung, Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin.

<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/short/k3176.pdf>

Quellenverzeichnis

Monografien und Sammelbände, Studien, Vergleichende Betrachtungen, Technische Dokumentationen

Schalau, B.; Acikalin, A.; Ballast, H.; Ballenweg, R.; Bordin, P.; Buhn, J.; Gosewinkel, M.; Hahn, M.; Hailwood, M.; Jablonski, D.; Schönbucher, A.; Seifert, U.; Westphal, F.; Wörsdörfer, K.; Zinke, R. (2017): Statuspapier – Auswirkungsbetrachtungen bei störungsbedingten Stoff- und Energiefreisetzungen in der Prozessindustrie – Methodenübersicht und industrielle Anwendung. Dritte Auflage, DECHEMA e.V., Frankfurt am Main. https://dechema.de/processnet_media/auswirkungsbetrachtungen.pdf

Schmidt, N. (2021): „Ergebnisbericht – Studie zur Anwendung des Softwarepakets ADAM (Accident Damage Analysis Module) bei der Durchführung von Störfallauswirkungsbetrachtungen in der Raum- und Bauleitplanung und Vergleich mit verschiedenen Softwaretools und Modellen. Berichtsnummer: 2021/CSEe-R012“. CSE-Engineering Center of Safety Excellence GmbH

Semmler, R.; Schwarz, H.; Fischer, K. M. (2012) HAZOP+, Process Safety und Operational Excellence. Werbebroschüre, TÜV Süd Chemie Service GmbH. https://www.tuvsud.com/de-de/-/media/de/chemie-service/pdf/broschueren-und-flyer/branchen/chemie-prozessindustrie/tcs_hazopplus_pb_052023.pdf

Sommer, J.; Arend, M.; Boßler, G.; Bronner, W.; Buhn, J.; Diehl, F.; Fiedler, A.; Hahn, M.; Kappelmaier, R.; Klein, T.; Meeßen, C.; Oertel, R.; Rust, S.; Schäfer, J.; Schwarz, H.; Siegel, H.; Stutzmann, S.; Thies, A. (2020): Das PAAG-/HAZOP-Verfahren und weitere praxisbewährte Methoden – Risikobeurteilung in der Anlagensicherheit. 5. Ausgabe, jedermann-Verlag GmbH, Heidelberg. https://www.bgrci.de/fileadmin/BGRCI/Microsites/Anlagensicherheit/Onlineportal_Anlagensicherheit/issa-01_Gesamtdokument.pdf

Uijt de Haag, P.; Gooijer, L.; Kooi, E; Spoelstra, M. (2013): Evaluation of the Use of the Prescribed Quantitative Risk Assessment Method for Land Use Planning in the Netherlands. <https://doi.org/10.3303/CET1331019>

U.S. EPA (1999): Risk Management Program Guidance for Offsite Consequence Analysis. EPA 550-B-99-009, Chemical Emergency Preparedness and Prevention Office, U.S.A. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2013-11/documents/oca-chps.pdf>

Quellenverzeichnis

Monografien und Sammelbände, Studien, Vergleichende Betrachtungen, Technische Dokumentationen

Workshop – Risikomanagement. “Nutzung probabilistischer Methoden in der europäischen Genehmigungspraxis und deren Nutzbarkeit im deutschen Störfallrecht, insbesondere aus Sicht der Umweltverbände”, 2005, Bonn. https://www.kas-bmu.de/studien-ergaenzende-dokumente.html?file=files/publikationen/Studien_Ergaenzende%20Dokumente/ws_risiko.pdf&cid=1852

VdTÜV (1990): Forschungsbericht 315; Aufstellen eines Leitfadens zur Erstellung und Prüfung von Sicherheitsanalysen nach §7 Störfall-Verordnung“. Bonn.

VITO (2018): Opstellen van toxiciteitsprobitfuncties [Eindrapport TWOL-project, herziene versie]. Brussel: Vlaamse overheid, Departement Omgeving.

Xu Y., Worthington D. und Oke O. (2022): Developing a solid-flame model for assessing consequences of large-scale rectangular pool fires and trench fires. Hazards Conference Proceedings

Wood, M.; Dräger, D.; Hailwood, M. (2014): Assessment of safety management systems of major hazard sites : key points and conclusions : mutual joint visit on Seveso inspections : 27-29 October 2010, Fulda, Germany, Publications Office.
<https://data.europa.eu/doi/10.2788/13139>

Quellenverzeichnis

Internetadressen

LUBW (2021): Störfall-Verordnung. <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/betrieblicher-umweltschutz/stoerfall-verordnung> (18.10.2021)

BfGA (2021): Störfall-Verordnung StöV (Definition). <https://www.bfga.de/arbeitsschutz-lexikon-von-a-bis-z/fachbegriffe-s-u/stoev-fachbegriff/> (18.10.2021)

BfGA (2021): Allgemein anerkannte Regeln der Technik - Definition. <https://www.bfga.de/arbeitsschutz-lexikon-von-a-bis-z/fachbegriffe-a-b/allgemeine-regeln-technik-fachbegriff/> (19.10.2021)

Hauptmanns, U.; Stephan, U.M Herrmann, J. (2018): Wissen / Informationen Anlagen(-sicherheit) und Technik - HAZOP - LOPA - SIL kombiniert. [http://www.en-s.de/HAZOP-LOPA-SIL kombiniert.html](http://www.en-s.de/HAZOP-LOPA-SIL_kombiniert.html) (20.09.2022)

Imfeld (2013): »Stand der Technik« – Vorsicht bei der Formulierung im Vertrag. <https://www.daniel-hagelskamp.de/standpunkte/stand-der-technik-formulierung-vertrag> (19.10.2021)

Niedersächsische Gewerbeaufsicht (2021a): Was ist ein Ereignis und was ist ein Störfall?, https://www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de/startseite/gefaherschutz/anlagensicherheit_storfallvorsorge/fachinformationen/was-ist-ein-ereignis-und-was-ist-ein-stoerfall-169925.html (18.10.2021)

Niedersächsische Gewerbeaufsicht (2021b): Was ist ein Betriebsbereich? https://www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de/startseite/gefaherschutz/anlagensicherheit_storfallvorsorge/fachinformationen/was-ist-ein-ereignis-und-was-ist-ein-stoerfall-169925.html (18.10.2021)

SGS-TÜV Saar (2021): HAZOP. <https://www.sgs-tuev-saar.com/de/funktionale-sicherheit/sicherheitsanalytik/hazop-paag.html> (26.10.2021)

Quellenverzeichnis

Internetadressen

Semmler, R. (2014): Risiken mit dem erweiterten Hazop-Verfahren quantifizieren. <https://www.chemietechnik.de/sicherheit-umwelt/risiken-mit-dem-erweiterten-hazop-verfahren-quantifizieren.html> (21.10.2021)

MANGAN Software Solutions (2021): SLM Safety Lifecycle Manager <https://mangansoftware.com/slm-v2/> (22.10.2021)

INGENIEUR.de (2017): Mehr Prozesssicherheit mit Hazop und PAAG. <https://www.ingenieur.de/fachmedien/technischesicherheit/anlagensicherheit/hazop-und-paag-sind-tragende-saeulen-in-der-prozesssicherheit/> (26.10.2021)

Wilrich, T. (2010): Fachinformationen zum Begriff "Stand der Technik", verfasst am 25.05.2010, <https://www.ibf-solutions.com/fachbeitraege/was-bedeutet-stand-der-technik>, (27.10.2021)

Semmler, R. (2014): Risiken mit dem erweiterten Hazop-Verfahren quantifizieren. <https://www.chemietechnik.de/sicherheit-umwelt/risiken-mit-dem-erweiterten-hazop-verfahren-quantifizieren.html> (26.10.2021)

Mittendorf, D. (2021): Anwendung der Störfall-Verordnung / 6 Störfallrechtliches Genehmigungsverfahren nach § 23b BImSchG, veröffentlicht als Beitrag in Arbeitsschutz-Office Professionell, https://www.haufe.de/arbeitsschutz/arbeitsschutz-office-professional/anwendung-der-stoerfall-verordnung-6-stoerfallrechtliches-genehmigungsverfahren-nach-23b-bimschg_idesk_PI13633_HI13401592.html (28.10.2021)

MANGAN Software Solutions (2021): SLM Safety Lifecycle Manager, <https://mangansoftware.com/slm-v2/> (22.10.2021)

Quellenverzeichnis

Internetadressen

Girgin, S. (2011): RAPID-N Rapid Natech Risk Assessment Tool User Manual Version 1.0,
https://rapidn.jrc.ec.europa.eu/download?loc=references&__data=RAPID-N_Manual_1-0.pdf (16.11.2021)

JRC of EC (2020): JRC ADAM, <https://adam.jrc.ec.europa.eu/en/adam/content> (16.11.2021)

JRC of EC (2021): JRC Rapid N, <https://rapidn.jrc.ec.europa.eu> (16.11.2021)

Safety Xperts (2021): Wie die Störfallverordnung Industrieunfälle verhindert, erstellt am 21.01.22 von Redaktionsteam Safety Xperts,
<https://www.safetyxperts.de/arbeitsschutz/gesetze-und-verordnungen/stoerfallverordnung-industrieunfaelle/> (20.04.2022)

ZVO (2023): Zentralverband Oberflächentechnik e.V. - Seveso-III-Richtlinie, Alter des Beitrages unbekannt
<https://www.zvo.org/politik/national/seveso-iii-richtlinie>, (16.02.2023)

BDE (2018): Nationale Umsetzung der Seveso-III-Richtlinie, Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Kreislaufwirtschaft e.V., Beitrag vom 25.06.2018, <https://www.bde.de/presse/nationale-umsetzung-der-seveso-iii-richtlinie/#:~:text=Das%20Artikelgesetz%20zur%20Umsetzung%20der,14.01.2017%20in%20Kraft%20getreten>, (16.02.2023)

Müggenborg (2021): Sicherheitsabstände in Chemieparks nach Seveso-III-Richtlinie; Internet-Beitrag vom 03. August 2017 in der aktuellen Fassung vom 29.07.2021; <https://www.chemietechnik.de/service-standorte/chemieparks-unter-der-lupe-sicherheitsabstaende-in-chemieparks-nach-seveso-iii-richtlinie-306.html>, (21.02.2023)