TEXTE
13/2026

Schlussbericht

Zusammenstellung, Prüfung und Bewertung von Verfahren zur Analyse von Gefahren, Untersuchung von Szenarien und Bewertung von Risiken

von:

Dr. Harald Jung, Klaus Kühnert, Reiner Jugelt, Paul Granzin
IZP Dresden mbH

Ralf Woiwode
GICON®-Großmann Ingenieur Consult GmbH

Herausgeber:
Umweltbundesamt

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

TEXTE 13/2026

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3721 59 301 0

FB001590

Schlussbericht

Zusammenstellung, Prüfung und Bewertung von Verfahren zur Analyse von Gefahren, Untersuchung von Szenarien und Bewertung von Risiken

von

Dr. Harald Jung, Klaus Kühnert, Reiner Jugelt, Paul Granzin
IZP Dresden mbH

Ralf Woiwode
GICON®-Großmann Ingenieur Consult GmbH

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:
IZP Dresden mbH
Am Waldschlösschen 4
01099 Dresden

Abschlussdatum:
Oktober 2024

Redaktion:
Fachgebiet III 2.3 Anlagensicherheit
Sandra Jänicke

Publikationen als pdf:
http://www.umweltbundesamt.de/publikationen

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Januar 2026

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse des UBA-Forschungsprojektes „Zusammenstellung, Prüfung und Bewertung von Verfahren zur Analyse von Gefahren, Untersuchung von Szenarien und Bewertung von Risiken“ zusammen. Die Ausführungen geben einen Überblick zu Verfahren, Methoden und Modellen zur Störfallrisikobeurteilung. Durch die Darstellung von Vor- und Nachteilen, den kombinierten Anwendungsmöglichkeiten, sowie den grundlegenden Inhalten soll eine allgemeine Wegweisung bei der Auswahl und Anwendung der Verfahren, Methoden und Modelle gegeben werden. Der Bericht versucht dabei den notwendigen wissenschaftlichen Anspruch mit Praxisanforderungen zu verknüpfen.

Der Bericht beinhaltet keine verbindlichen Handlungsempfehlungen für Betreiber, Behörden und Sachverständige, noch erhebt er einen Anspruch auf Vollständigkeit und detaillierte Betrachtung aller relevanten Aspekte. Vielmehr soll das Dokument als Orientierungshilfe und Informationsquelle, insbesondere für Neu- und Quereinsteiger, in diese komplexe Thematik dienen. Dabei stehen die Interessen und Anforderungen von mittelständischen Unternehmen im Fokus, die keine eigenen Fachbereiche bzw. noch keine umfassenden Erfahrungen bei der Anwendung der Verfahren, Methoden und Modelle haben.

Abstract

This report summarizes the results of the UBA research project "Compilation, testing and evaluation of procedures for analyzing hazards, investigating scenarios and assessing risks". The explanations provide an overview of procedures, methods and models for accident risk assessment. By presenting advantages and disadvantages, combined application options and basic content, a general guide is provided for the selection and application of procedures, methods and models. The report attempts to combine the necessary scientific standards with practical requirements.

The report does not contain any binding recommendations for action for operators, authorities and experts, nor does it claim to be complete and to consider all relevant aspects in detail. Rather, the document is intended to serve as a guide and source of information, especially for newcomers and those changing careers, in this complex subject. The focus is on the interests and requirements of medium-sized companies that do not have their own specialist departments or do not yet have extensive experience in applying the procedures, methods and models.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis ... 5
Abbildungsverzeichnis ... 11
Tabellenverzeichnis ... 13
Abkürzungsverzeichnis ... 17
Glossar ... 21
Zusammenfassung ... 26
Summary ... 37
1 Hintergrund und Zielstellung des Vorhabens ... 46
1.1 Hintergrund und Problemstellung ... 46
1.2 Ziel und Gegenstand des Vorhabens ... 46
1.3 Aufgabenstellung und Arbeitsschritte ... 47
2 Regulierungsrahmen ... 49
2.1 Richtlinie 2012/18/EU („Seveso-III-Richtlinie“) ... 49
2.2 Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) ... 51
2.3 Störfall-Verordnung ... 53
2.3.1 Stellung im Ordnungsrahmen ... 53
2.3.2 Anforderungen an das Sicherheitsmanagement ... 54
2.3.3 Anforderungen an den Sicherheitsbericht ... 57
2.3.4 Zusammenfassung der Anforderungen der Störfall-Verordnung ... 58
3 Ablauf der Störfallrisikobeurteilung ... 60
3.1 Überblick ... 60
3.2 Betrachtung der einzelnen Schritte ... 61
3.2.1 Vorgelagerte Schritte ... 61
3.2.2 Gefahrenanalyse ... 63
3.2.3 Szenarienentwicklung ... 78
3.2.4 Auswirkungsbetrachtungen ... 81
3.2.5 Risikobewertung ... 82
4 Übersicht recherchierter Methoden, Verfahren und Modelle ... 85
4.1 Allgemeines ... 85
4.2 Bewertungskriterien für die Verfahren ... 85
4.3 HAZOP-Verfahren ... 87
4.3.1 Beschreibung ... 87
4.3.2 Bewertung ... 89

4.4 BASF-HAZOP und weitere Modifikationen des HAZOP-Verfahrens 90
4.4.1 BASF-HAZOP 90
4.4.2 HAZOP-Verfahren Betreiber no. 2 92
4.4.3 HAZOP-Verfahren Betreiber no. 3 93
4.4.4 HAZOP-Verfahren Betreiber no. 4 93
4.4.5 Weitere Modifikationen 93
4.5 Checklisten 94
4.5.1 Beschreibung 94
4.5.2 Bewertung 95
4.6 Risikomatrix 96
4.6.1 Beschreibung 96
4.7 Risikograph nach VDI 2180 98
4.7.1 Beschreibung 98
4.7.2 Bewertung 102
4.8 Layer of Protection Analysis 103
4.8.1 Beschreibung 103
4.8.2 Bewertung 106
4.9 Fehlerbaum- und Ereignisbaumanalyse, Bow-Tie-Analyse 107
4.9.1 Beschreibung 107
4.9.2 Bewertung 113
4.10 Szenarienanalyse - HAZOP-Master 114
4.10.1 Beschreibung 114
4.10.2 Bewertung 124
4.11 FMEA / FMECA und Risikoprioritätszahl 125
4.11.1 Beschreibung 125
4.11.2 Bewertung 126
4.12 Zurich Hazard Analysis 128
4.12.1 Beschreibung 128
4.12.2 Bewertung 129
4.13 Risikoorientierte Gefahrenanalyse 131
4.13.1 Beschreibung 131
4.13.2 Bewertung 132
4.14 Auswirkungsrechnungen nach DECHEMA 133
4.14.1 Beschreibung 133

4.14.2 Bewertung ... 134
4.15 Auswirkungsrechnungen nach TÜV Berlin ... 135
4.15.1 Beschreibung ... 135
4.15.2 Bewertung ... 136
4.16 Auswirkungsrechnungen gemäß Accident Damage Analysis Module ... 136
4.16.1 Beschreibung ... 136
4.16.2 Bewertung ... 137
4.17 Auswirkungsrechnungen gemäß Rapid N ... 137
4.17.1 Beschreibung ... 137
4.17.2 Bewertung ... 138
4.18 Methoden und Verfahren in den Niederlanden ... 138
4.18.1 Beschreibung ... 141
4.18.2 Bewertung ... 143
4.19 Methoden und Verfahren in Flandern ... 145
4.19.1 Beschreibung ... 146
4.19.2 Bewertung ... 149
4.20 Methoden und Verfahren in der Schweiz ... 150
4.20.1 Beschreibung ... 150
4.20.2 Bewertung ... 156
4.21 Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the framework of SEVESO II Directive ... 156
4.21.1 Beschreibung ... 156
4.21.2 Bewertung ... 159
4.22 Übersicht recherchierter Methoden, Verfahren und Modelle ... 161
5 Praxisuntersuchungen ... 162
5.1 Praxis der gegenwärtigen Anwendung von Verfahren, Methoden und Modellen ... 162
5.1.1 Aufgabenstellung ... 162
5.1.2 Umsetzung ... 162
5.1.3 Erkenntnisse ... 163
5.1.4 Methodenauswahl und Anwendung für Gefahrenanalysen im Bereich der Störfall-Verordnung aus Sicht eines Sachverständigen ... 170
5.2 Anwendbarkeit probabilistischer Verfahren ... 171
5.2.1 Aufgabenstellung ... 171
5.2.2 Umsetzung ... 172
5.2.3 Ergebnisse ... 173

5.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse und Erkenntnisse ... 229
6 Vergleichende Betrachtungen ausgewählter Verfahren ... 233
6.1 Auswahl der vergleichend zu betrachtenden Verfahren ... 233
6.2 Vergleichende Betrachtungen für die Analyseschritte „Gefahrenanalyse“ und „Bestimmung des Standes der Sicherheitstechnik“ ... 234
6.2.1 HAZOP-Verfahren ... 234
6.2.2 LOPA-Verfahren ... 235
6.2.3 Fehlerbaumanalyse und Ereignisbaumanalyse ... 236
6.2.4 QRA-Verfahren in den Niederlanden ... 237
6.2.5 QRA-Verfahren in Flandern ... 240
6.2.6 ARAMIS-Verfahren ... 241
6.3 Vergleichende Betrachtungen für den Analyseschritt „Szenarienentwicklung“ ... 245
6.3.1 HAZOP-Verfahren ... 245
6.3.2 LOPA-Verfahren ... 247
6.3.3 Fehlerbaumanalyse und Ereignisbaumanalyse ... 248
6.3.4 QRA-Verfahren in den Niederlanden ... 249
6.3.5 QRA-Verfahren in Flandern ... 254
6.3.6 ARAMIS-Verfahren ... 259
6.4 Vergleichende Betrachtungen für den Analyseschritt „Auswirkungsbetrachtungen“ ... 274
6.4.1 Stofffreisetzung aus einer Umschließung ... 276
6.4.2 Verdampfung und Verdunstung aus einer Lache ... 285
6.4.3 Gasausbreitung ... 291
6.4.4 Brände ... 297
6.4.5 Explosionen ... 312
6.4.6 Störfallbeurteilungswerte ... 318
6.4.7 Abschließende Bemerkungen zu den untersuchten Verfahren, Berichten, Computerprogrammen ... 326
6.4.8 Weiterführende Literatur ... 329
6.4.9 Fazit ... 329
6.5 Vergleichende Betrachtungen für den Analyseschritt „Risikobewertung“ ... 330
6.5.1 HAZOP-Verfahren ... 330
6.5.2 LOPA-Verfahren ... 330
6.5.3 Fehlerbaumanalyse und Ereignisbaumanalyse ... 330
6.5.4 Niederlande ... 331
6.5.5 Flandern ... 334

6.5.6 Schweiz ... 337
6.5.7 Exkurs – Minimale Endogene Mortalität ... 339
7 UNECE Forschungsprojekt "Risk Assessment Methodologies for Chemical Installations" ... 341
8 Empfehlungen und Hilfestellungen zum Einsatz der betrachteten Verfahren, Methoden und Modelle ... 344
8.1 Allgemeines ... 344
8.1.1 Klassifizierung der Verfahren, Methoden und Modelle ... 345
8.1.2 Entwicklung von Störfallablaufszenarien ... 346
8.1.3 Anwendbarkeit der Verfahren in Abhängigkeit der zu untersuchenden Anlagentypen ... 347
8.1.4 Probabilistik und Quantifizierungen ... 347
8.1.5 Vorkehrungen und Maßnahmen ... 347
8.1.6 Einbindung in den Projektablauf ... 349
8.2 Informationen und Hilfestellungen zur Auswahl und Anwendung der Verfahren, Methoden und Modelle ... 350
8.2.1 HAZOP-Verfahren ... 350
8.2.2 Checklisten ... 356
8.2.3 Layer of Protection Analysis ... 358
8.2.4 Fehlerbaumanalyse ... 360
8.2.5 Ereignisbaumanalyse ... 363
8.2.6 Bow-Tie-Analyse ... 366
8.2.7 Szenarienanalyse /HAZOP-Master ... 368
8.2.8 QRA-Verfahren in den Niederlanden und Flandern ... 369
8.2.9 ARAMIS ... 369
8.2.10 Zusammenhänge zwischen den Analysetechniken, Kombinationsmöglichkeiten ... 370
8.3 Hilfestellungen für die Erstellung von Teilen des Sicherheitsberichts ... 371
8.3.1 KAS-55 Leitfaden – Mindestangaben im Sicherheitsbericht ... 372
8.3.2 KAS-19 Leitfaden – Konzept zur Verhinderung von Störfällen und zum SMS ... 373
8.3.3 LANUV NRW – „Der Sicherheitsbericht nach Störfall-Verordnung – Eine Handlungshilfe für Behörden und Betreiber“ ... 374
8.3.4 LANUV NRW - „Musterinhaltsverzeichnis eines Sicherheitsberichts entsprechend § 9 Störfall-VO“ ... 374
8.3.5 LANUV NRW – Arbeitsblatt 41 „Darstellung des Sicherheitsmanagementsystems im Sicherheitsbericht“ ... 374
8.3.6 Checklisten zur Überprüfung von Sicherheitsberichten durch Behörden ... 375

8.3.7 Zusammenfassung ... 375
8.4 Softwareprogramme ... 377
8.4.1 Softwaretool für Gefahrenanalyse ... 377
8.4.2 Softwaretools für FMEA/FMECA/FTA/ETA ... 378
8.4.3 Softwaretools für QRA-Analysen ... 378
8.4.4 Softwaretools für Ausbreitungsrechnungen ... 379
8.5 Ausbildungs- und Qualifizierungsangebote ... 380
9 Quellenverzeichnis ... 382
A Praxisuntersuchungen – Praxis der Anwendung bei Betriebsbereichen – Blankefragenbögen ... 390
A.1 Fragenbogen für Betreiber ... 390
A.2 Fragenbogen für Behörden ... 399
B Deterministische und probabilistische Verfahren ... 406
B.1 Zur Begriffsbestimmung von deterministischen und probabilistischen Verfahren ... 406
B.2 Gründe für die Anwendung probabilistischer Verfahren ... 407
B.3 Unsicherheiten im Zusammenhang mit Risikoberechnungen ... 408
C Grundszenarien des Verfahrens „Szenarienanalyse - HAZOP-Master“ ... 409
D Checkliste „Wesentliche prozessspezifische Überprüfungspunkte zu systematischen Sicherheitsbetrachtungen bei Mehrzweckanlagen“ der Firma Compliance Management Kappelmaier ... 413
D.1 Punkte die für alle Apparate/Behälter gelten ... 413
D.2 Punkte für spezielle Apparate/Behälter/Prozesse ... 418
E Fragenkatalog des Wacker-Verfahrens der Firma Compliance Management Kappelmaier ... 420

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Risikominderung für identifizierte Gefahrenquellen 77
Abbildung 2: Struktur eines Störfallablaufszenarios für einen Dennoch-Störfall 80
Abbildung 3: Vom TÜV Austria entwickelte Risikoakzeptanzmatrix 97
Abbildung 4: Eine typische Risikomatrix gemäß TÜV Rheinland 97
Abbildung 5: Vorgehen bei der Ermittlung und Klassifizierung des Bedarfes von PLT-Sicherheitseinrichtungen nach VDI 2180.....99
Abbildung 6: Risikograph nach VDI/VDE 2180-1 (Stand April 2019) 101
Abbildung 7: Schematische Darstellung des LOPA-Verfahren.....105
Abbildung 8: Beispielfehlerbaum für ein Behälterversagen.....108
Abbildung 9: Beispielfehlerbaum für eine Brandmeldeanlage.....110
Abbildung 10: Ereignisbaum “Spontane Freisetzung eines brennbaren Gases (Instantaneous release of an inflammable gas)”.....111
Abbildung 11: Darstellung eines Bow-Tie-Diagramms 112
Abbildung 12: Logische Zusammenhänge des Anlagenbetriebs gemäß CMK 115
Abbildung 13: HAZOP-Master - grundsätzliche Struktur 116
Abbildung 14: Das 3-Ebenen-Grundmodell zur Ereignisentstehung beim Vorhandensein gefährlicher Stoffe.....120
Abbildung 15: Ergebnisse des HAZOP-Masters: Durchgängige Ereignisabläufe vom Störfallereignis zurück bis zum Einzelfehler 122
Abbildung 16: Tabellen der Rapid N - Datenbank.....137
Abbildung 17: Iso-Risiko-Linien 10^-5, 10^-6, 10^-7 and 10^-8 [Jahr-1] für eine fiktive Anlage 139
Abbildung 18: FN-Diagramm für eine fiktive Anlage und Akzeptanzlinie.....140
Abbildung 19: Ereignisbaum “Spontane Freisetzung eines brennbaren Gases (Instantaneous release of an inflammable gas)”.....142
Abbildung 20: Die Sterbewahrscheinlichkeit als Funktion des Abstandes (z.B. bei einer angenommenen Explosion).....143
Abbildung 21: Zuteilung von Störfallwerten.....153
Abbildung 22: Summenkurve.....154
Abbildung 23: Kontroll- und Beurteilungsverfahren gemäß schweizerischer Störfall-Verordnung.....155
Abbildung 24: Übersicht ARAMIS-Verfahren – Schritte MIMAH und Management & Safety Culture.....158
Abbildung 25: ARAMIS-Verfahren – Schritte MIRAS, Severity und Vulnerability 159
Abbildung 26: Schematische Darstellung Ausschleusung Kondensat 174
Abbildung 27: Betreiber 5 – Fehler- und Ereignisbaum Gefahrensituation no. 1 177

Abbildung 28: Betreiber 5 – Fehler- und Ereignisbaum Gefahrensituation no. 1 (alternative Darstellung mittels logischer Gatter).....179
Abbildung 29: Schematische Darstellung Ausschleusung Zwischenprodukt.179
Abbildung 30: Betreiber 5 – Fehler- und Ereignisbaum Gefahrensituation no. 2 181
Abbildung 31: Schematische Darstellung Ausschleusung Kondensat 183
Abbildung 32: Betreiber 6 – Fehler- und Ereignisbaum Gefahrensituation „Freisetzung Biogas“.....189
Abbildung 33: Betreiber 6 – Fehler- und Ereignisbaum Gefahrensituation „Freisetzung Biogas“ - Fortsetzung 189
Abbildung 34: In der Fehlerbaumanalyse betrachtete Wirkungskette 195
Abbildung 35: Abgebildete Wirkungskette in der Ereignisbaumanalyse 196
Abbildung 36: Auszug aus dem P&ID für den Flachbodentank 197
Abbildung 37: Fehlerbaum für das Top-Ereignis “ Freisetzung von Flüssigsauerstoff am Behälter (LOX-Tank)“) – Listenansicht in RAMS-Office NG 202
Abbildung 38: Ereignisbaum für die Auswirkungen der Freisetzung von Flüssigsauerstoff am Behälter (LOX-Tank) – Darstellung als Fehlerbaum in Baumansicht mit RAMS-Office NG.....206
Abbildung 39: Auszug aus dem P&ID für den vakuumisolierten Drucktank..210
Abbildung 40: Fehlerbaum LOC LOX (Drucktank) – Listenansicht in RAMS-Office NG 211
Abbildung 41: Ereignisbaum (Grafische Darstellung in RAMS-Office NG).....215
Abbildung 42: Matrix „Anlagentyp - kritisches Ereignis“.....242
Abbildung 43: Matrix „Phase - kritisches Ereignis“.....242
Abbildung 44: Ausschnitt Fehlerbaum für das kritische Ereignis " Großer Bruch am Gehäuse oder Leckage (Large breach on shell or leak)".....244
Abbildung 45: Spontane Freisetzung eines entflammbaren Gases (Instantaneous release of an inflammable gas) 250
Abbildung 46: Ereignisbaum „Spontane/kontinuierliche Freisetzung eines komprimierten brennbaren Gases (Instantaneous/continuous release of an inflammable gas)“.....256
Abbildung 47: Matrix "Tertiäres Ereignis - gefährliches Phänomen" 260
Abbildung 48: Ereignisbaum für das kritische Ereignis " Großer Bruch an der Hülle in flüssiger Phase (Large breach on shell in liquid phase)" gemäß ARAMIS-Methodik“ 261
Abbildung 49: Auszug Checkliste Sicherheitsfunktionen und -barrieren für die Gefahrenquelle Korrosion im ARAMIS-Verfahren.....263
Abbildung 50: Strukturelle Faktoren des Sicherheitsmanagementsystems..266
Abbildung 51: Auditkatalog Strukturfaktor „Monitoring, feedback, learning & change management.....267
Abbildung 52: Beispiel eines Ereignisbaumes mit Gegenmaßnahmen 269

Abbildung 53: Festlegung der Schwellenwerte für die unterschiedliche Effektschwere 270
Abbildung 54: Formel zur Berechnung der Severity für ein einzelnes kritisches Ereignis 271
Abbildung 55: Formel zur Berechnung der Severity für eine Menge kritischer Ereignisse 271
Abbildung 56: Berechneter Risikoschwereindex für eine Anlage für thermische Auswirkungen 272
Abbildung 57: Berechnung des Vulnerabilitätsindex im ARAMIS-Verfahren 273
Abbildung 58: Brandentwicklung nach Verlust der Eindämmung eines brennbaren Stoffes 311
Abbildung 59: Illustration – Kombination von individuellen Risikokonturen mit Fokusbereichen 333
Abbildung 60: Akzeptanzkriterien für das gesellschaftliche Risiko in Flandern - Stand 1994 336
Abbildung 61: W/A-Diagramm mit Kriterien zur Beurteilung des Risikos 338
Abbildung 62: Inhalt des Sicherheitsberichtes bezüglich der Detailliertheit.375
Abbildung 63: 4-stufiger Sicherheitsmanagementkreislauf 406

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Sicherheitsmanagement nach Anhang III der StörfallV 56
Tabelle 2: Analyseschritte der Störfallrisikobeurteilung 60
Tabelle 3: Schutzkriterien entsprechend Vollzugshilfe zur StörfallV 62
Tabelle 4: Informationsquellen zur Gefahrenermittlung 66
Tabelle 5: Beispiele für Gefahrenquellen aus Leitfaden KAS-55 68
Tabelle 6: Anforderungen an die Gefahrenermittlung 70
Tabelle 7: Ermittlung des Standes der Sicherheitstechnik (Definition aus SFK-GS-33) 75
Tabelle 8: Zusammenhänge Angaben aus Störfallszenarien und Planungsanteilen 80
Tabelle 9: Bewertungskriterien für die Auswahl der Methoden, Verfahren und Modelle 85
Tabelle 10: Bewertung des HAZOP-Verfahrens 89
Tabelle 11: Leitwort-Katalog BASF für stoffbedingte hypothetische Störungen 91
Tabelle 12: Leitwort-Katalog BASF für anlagenbedingte hypothetische Störungen 91
Tabelle 13: Leitwortsystem Betreiber no. 2 92
Tabelle 14: Bewertung des Checklisten-Verfahrens 95
Tabelle 15: Bewertung Risikograph nach VDI 2180 102
Tabelle 16: Bewertung des LOPA-Verfahrens 106
Tabelle 17: Darstellungselemente Fehlerbaum gemäß EN 61025:2007...108

Tabelle 18: Bewertung des FTA/ETA-Verfahrens 113
Tabelle 19: Grundszenarien des Verfahrens Szenarienanalyse - HAZOP-Master (Auszug) 116
Tabelle 20: Logische Grundlagen zu störfallrelevanten Freisetzungsszenarien 118
Tabelle 21: Die Anwendung der Leitworte auf die relevanten Prozessgrößen ergibt die grundsätzlichen Prozessfehler- bzw. Prozessabweichungsgruppen 120
Tabelle 22: Bewertung des Verfahrens Szenarienentwicklung und HAZOP-Master 124
Tabelle 23: Bewertung des FMEA/FMECA und Risikoprioritätszahl 126
Tabelle 24: Bewertung des Verfahrens Zurich Hazard Analysis (ZHA) 129
Tabelle 25: Bewertung des ROGA Verfahrens 132
Tabelle 26: Bewertung der Verfahren und Methoden in den Niederlanden 143
Tabelle 27: Bewertung der Verfahren und Methoden in Flandern 149
Tabelle 28: Kriterien für die schwere Schädigung 151
Tabelle 29: Bewertung des ARAMIS-Verfahrens 160
Tabelle 30: Übersicht über die identifizierten Methoden, Verfahren und Modelle 161
Tabelle 31: Ausfallraten der unerwünschten Ereignisse 176
Tabelle 32: Ausfallraten der unerwünschten Ereignisse 180
Tabelle 33: Ausfallraten „Defekter Kugelhahn - Dauerhaft geöffnetes Ventil OV-20201“ 185
Tabelle 34: Ausfallraten „Defekter Stellantrieb - Dauerhaft geöffnetes Ventil OV-20201“ 186
Tabelle 35: Ausfallraten „Defektes Magnetventil - Dauerhaft geöffnetes Ventil OV-20201“ 186
Tabelle 36: Ausfallraten „Defekter Niveaufühler - Dauerhaft geöffnetes Ventil OV-20201“ 187
Tabelle 37: Ausfallraten „Defekter Niveauschalter - Dauerhaft geöffnetes Ventil OV-20201“ 187
Tabelle 38: Ausfallraten „Defekte Steuerung- Dauerhaft geöffnetes Ventil OV-20201“ 188
Tabelle 39: Bewertungskatalog des TÜV-Austria zur Bewertung menschlicher Fehler 193
Tabelle 40: Erstellte Kalkulationsblätter für FTA/ETA-Analyse 193
Tabelle 41: Auszug Kalkulationsblatt zur Schätzung der Hardware- und Prozessausfallrate für das Elementarereignis „PV7016.2 ungewollt geschlossen (kein/geringer Durchfluss an der Entlüftungsleitung) (unwanted closed (no/less flow at vent line))“ 199

Tabelle 42: Auszug Kalkulationsblatt zur Schätzung der Eintrittshäufigkeiten manueller Aktivitäten für Elementarereignis „PV7016.2 ungewollt geschlossen (kein/geringer Durchfluss an der Entlüftungsleitung) (unwanted closed (no/less flow at vent line))“ 200
Tabelle 43 Auszug Kalkulationssheet zur Abschätzung des verbleibenden Risikos nach Risikomindernden Barrieren für Elementarereignis „PV7016.2 ungewollt geschlossen (kein/geringer Durchfluss an der Entlüftungsleitung) (unwanted closed (no/less flow at vent line))“ 200
Tabelle 44: Ergebnisse der quantitativen Betrachtung für das TOP Ereignis „Freisetzung von Flüssigsauerstoff am Behälter (LOX-Tank)“ – Darstellung der Elementareignisse und deren Auftretenshäufigkeiten 201
Tabelle 45: Szenarien für ein Behälterversagen nach (Purple Book CPR 18E) 203
Tabelle 46: Analyse der Ursachen von Leckagen in Offshore-Anlagen (HSE-Datenbasis für Offshore-Anlagen).....204
Tabelle 47: Konsequenzen des Störfalls „Freisetzung von Flüssigsauerstoff am Behälter (LOX-Tank)“.....205
Tabelle 48: Auszug aus der Bewertung der ausmaßreduzierenden Barrieren (Katastrophaler Vorfall) am Beispiel „Tod oder Verletzungen durch Verbrennungen durch LOX-Kontakt oder Erstickung“.....213
Tabelle 49: Quantitative Ergebnisse der Ereignisbaumanalyse (Stofffreisetzungsszenario LOX Drucktank).....216
Tabelle 50: Herangezogene Ereignisse aus der ZEMA-Datenbank 218
Tabelle 51: Gegenüberstellung von Maßnahmen aus den Ereignissen und dem an der Anlage realisierten Stand der Sicherheitstechnik (LOX-Flachbodentank).....221
Tabelle 52: Gegenüberstellung von Maßnahmen aus den Ereignissen und dem an der Anlage realisierten Stand der Sicherheitstechnik (LOX-Drucktank) 221
Tabelle 53: Nutzenkriterien für die Anwendung der FTA 224
Tabelle 54: Zielstellungen der Szenarienentwicklung – HAZOP-Verfahren 246
Tabelle 55: Zielstellungen der Szenarienentwicklung – LOPA-Verfahren.247
Tabelle 56: Zielstellungen der Szenarienentwicklung – Fehlerbaum- und Ereignisbaumanalyse.....248
Tabelle 57: Übersicht Anlagenteile und Loss of Containment-Ereignisse (Auszug) 249
Tabelle 58: Zielstellungen der Szenarienentwicklung – QRA-Verfahren Niederlande 253

Tabelle 59: Übersicht Anlagenteile und Loss of Containment-Ereignisse (Auszug) 254
Tabelle 60: Zielstellungen der Szenarienentwicklung – QRA-Verfahren Flandern 259
Tabelle 61: Zielstellungen der Szenarienentwicklung – ARAMIS-Verfahren 274
Tabelle 62: Vergleichende Darstellung – Stofffreisetzung aus einer Umschließung 278
Tabelle 63: Vergleichende Darstellung – Verdampfung und Verdunstung aus einer Lache 286
Tabelle 64: Vergleichende Betrachtung – Gasausbreitung 293
Tabelle 65: Vergleichende Darstellung – Brände 298
Tabelle 66: Vergleichende Darstellung – Explosionen 313
Tabelle 67: Vergleichende Darstellung – Störfallbeurteilungswerte für luftgetragene Schadstoffe 320
Tabelle 68: Vergleichende Darstellung – Störfallbeurteilungswerte für Wärmestrahlung 322
Tabelle 69: Vergleichende Darstellung – Störfallbeurteilungswerte für Überdruck 324
Tabelle 70: Zuverlässigkeitsabschätzungen menschlicher Handlungen gemäß Preiss (2017) 348
Tabelle 71: Grundsätzliche Schritte des Planungsverlaufs sowie deren wesentliche Inhalte unter Sicherheitsaspekten 349
Tabelle 72: Literaturhinweise HAZOP 355
Tabelle 73: Beispielhafte Checkliste für exotherme Reaktionen der IVSS-Broschüre "Das PAAG- / HAZOP-Verfahren und weitere praxisbewährte Methoden“ 357
Tabelle 74: Literaturhinweise LOPA-Verfahren 359
Tabelle 75: Literaturhinweise Fehlerbaumanalyse 362
Tabelle 76: Literaturhinweise Ereignisbaumanalyse 364
Tabelle 77: Barrierenzustände nach CCPS/EI 367
Tabelle 78: Literaturhinweise Bow-Tie-Analyse 368
Tabelle 79: Literaturhinweise QRA-Verfahren in den Niederlanden und Flandern 369
Tabelle 80: Fragenblock II 391
Tabelle 81: Fragenblock II – Fortsetzung 393
Tabelle 82: Fragenblock III 394
Tabelle 83: Fragenblock IV 395
Tabelle 84: Fragenblock V 396
Tabelle 85: Fragenblock VI 398
Tabelle 86: Fragenblock I – Angaben zur Behörde 399
Tabelle 87: Fragenblock II 399
Tabelle 88: Fragenblock II – Fortsetzung 400

Tabelle 89: **Fragenblock III** 401
Tabelle 90: **Fragenblock IV** 402
Tabelle 91: **Fragenblock V** 403
Tabelle 92: **Fragenblock VI** 405

Abkürzungsverzeichnis

12. BImSchV	Zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Störfall-Verordnung); siehe auch StörfallV
Abs.	Absatz
ADAM	Accident Damage Analysis Module
AEGL	Acute exposure guideline levels (Störfallbeurteilungswerte)
ALARA	As low as reasonably achievable
APV-LAGA	Ausschuss für Produktverantwortung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
ARAMIS	Accident Risk Assessment Methodology for Industries
AISV	Anlagenbezogener Immissionsschutz / Störfallvorsorge (AISV), Ausschuss innerhalb der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz
AS	Arbeitsschritt (s. Leistungsbeschreibung zu diesem Forschungsvorhaben)
AwSV	Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen
BAFU	Bundesamt für Umwelt, Bundesbehörde der schweizerischen Eidgenossenschaft
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
BHKW	Blockheizkraftwerk
BGAA	Biogasaufbereitungsanlage
BGBl	Bundesgesetzblatt
BfGA	Beratungsgesellschaft für Arbeits- und Gesundheitsschutz mbH
BImSchG	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz)
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BRZO	Besluit risico's zware ongevallen. Beschluss zur Umsetzung der Seveso-Richtlinie in den Niederlanden
CCPS	Center for Chemical Process Safety
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Électrotechnique (Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung)
CLP bzw. CLP-Verordnung	Die Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 (CLP) (auch CLP-Verordnung) ist eine EU-Chemikalienverordnung. CLP steht für Classification, Labelling and Packaging, also für die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen.

DECHEMA	DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V.
DIN	Deutsche Industrienorm
d. h.	das heißt
EC	European Commission
EEI	Emergency Exposure Indices (Störfallbeurteilungswerte)
EN	Europäische Norm (die Standardisierung des CEN, CENELEC und ETSI)
ERPG	Emergency Response Planning Guidelines (Störfallbeurteilungswerte)
ETA	Event Tree Analysis (Ereignisbaumanalyse)
EU	Europäische Union
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis (Ausfalleffektanalyse)
FTA	Fault Tree Analysis (Fehlerbaumanalyse)
ggü.	gegenüber
ggf.	gegebenenfalls
GICON	GICON-Großmann Ingenieur Consult GmbH
HAZAN	Hazard Analysis
HAZID	Hazard Identification
HAZOP	Hazard and Operability
i. V. (m.)	in Verbindung (mit)
IEC	International Electrotechnical Commission (Internationale Elektrotechnische Kommission)
IPL	Independent Protection Layer (Unabhängige Schutzebene)
IZP	Ingenieurgesellschaft für Zuverlässigkeit und Prozessmodellierung – IZP Dresden mbH
JRC	Joint Research Center
KAS	Kommission für Anlagensicherheit, beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Geschäftsstelle Bonn
LAI	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz (LAI)
LOC	Loss of Containment
LOPA	Layers of Protection Analysis
LUBW	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
LZA	Luftzerlegungsanlage
MIL-HDBK	Military Handbook
Natech	Durch natürliche Gefahren ausgelöste technische Unfälle
NRPD	Nonelectronic Parts Reliability Data
Nr.	Nummer
O&SHA	Operating & Support Hazard Analysis
OREDA	Offshore & Onshore Reliability Data
PAAG	Prognose, Auffinden der Ursachen, Abschätzen der Auswirkungen, Gegenmaßnahmen. Ein Synonym für HAZOP

PSQC	Process Safety Quick Check
PLT	Prozessleittechnik
QRA	Quantitative Risk Assessment (Quantitative Risikobeurteilung) bzw. Quantitative Risk Analysis (Quantitative Risikoanalyse)
RAMS	Akronym für Reliability, Availability, Maintainability, Safety (deutsch: Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit)
Rapid N	Rapid Natech Risk Analysis and Mapping System. Ein Online-Softwaretool für die schnelle Analyse und Kartierung des Natech-Unfallrisikos sowohl auf lokaler als auch auf regionaler Ebene
ROGA	Risikoorientierte Gefahrenanalyse
RPZ	Risikoprioritätszahl
SFK	Störfall-Kommission (Vorläufer-Organ der KAS)
s.	siehe
S.	Seite
SMS	Sicherheitsmanagementsystem
StFV	Störfallverordnung in der Schweiz
StörfallV	Zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Störfall-Verordnung); siehe auch 12. BImSchV
TEEL	Temporary Emergency Exposure Limits. Von dem US Department of Energy (DOE) veröffentlichte Störfallbeurteilungswerte
TNO	Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek (Niederländische Organisation für Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung)
TÜV	Technischer Überwachungsverein (eingetragene Vereine, die als technische Prüforganisation Sicherheitskontrollen durchführen)
TÜV Berlin	Abkürzend für TÜV Anlagentechnik GmbH + Technische Universität Berlin
u. a.	unter anderen/unter anderem
u.g.	Unten genannten
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
U.S. EPA	United States Environmental Protection Agency
Vgl.	Vergleiche!
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V
VDSI	Verband für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz bei der Arbeit e.V.
VROM	Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (Niederländisches Ministerium für Wohnungswesen, Raumordnung und Umweltschutz). Wurde 2010 mit dem Verkehrs- und Wasserwirtschaftsministerium Ministerie van Verkeer en Waterstaat

	zum Infrastrukturministerium Ministerie van Infrastructuur en Milieu (IenM) fusioniert
W/A-Diagramm	Wahrscheinlichkeit/Ausmaß-Diagramm
ZHA	Zürich Hazard Analysis

Glossar

Begriff	Definition
Anlage	Laut Definition des §3 Abs. 5 BImSchG 1. Betriebsstätten und sonstige ortsfeste Einrichtungen, 2. Maschinen, Geräte und sonstige ortsveränderliche technische Einrichtungen sowie Fahrzeuge, soweit sie nicht der Vorschrift des § 38 unterliegen, und 3. Grundstücke, auf denen Stoffe gelagert oder abgelagert oder Arbeiten durchgeführt werden, die Emissionen verursachen können, ausgenommen öffentliche Verkehrswege
Allgemein anerkannte Regeln der Technik	Unter den allgemein anerkannten Regeln versteht man technische Regeln oder Verfahrensweisen, die wissenschaftlich fundiert und in der Praxis allgemein bekannt sind und sich aufgrund der damit gemachten Erfahrungen bewährt haben. Als allgemeine anerkannte Regeln der Technik können unter anderem Normen (z. B. DIN-Normen), Richtlinien (z. B. VDI-Richtlinien) oder auch Unfallverhütungsvorschriften (z. B. DGUV-Vorschriften) gelten.
benachbarter Betriebsbereich	Ist entsprechend § 2 der StörfallV ein Betriebsbereich, der sich so nah bei einem anderen Betriebsbereich befindet, dass dadurch das Risiko oder die Folgen eines Störfalls vergrößert werden.
Bestimmungs-gemäßer Betrieb	Ist der Betrieb, für den die Anlage entsprechend der Prozessparameter ausgelegt und genehmigt ist. Ist nach VDI 2180:2019-04 der Betrieb einer Anlage, für den sie nach ihrem technischen Zweck bestimmt und ausgelegt ist. Der bestimmungsgemäße Betrieb umfasst den Normalbetrieb einschließlich betriebsnotwendiger Eingriffe, wie z. B. der Probenahme, und einschließlich der Lagerung mit Füll-, Umfüll- und Abfüllvorgängen, die Inbetriebnahme und den An- und Abfahrbetrieb, den Probebetrieb, Instandhaltungsvorgänge (Wartung, Inspektion, Instandsetzung, Verbesserung) und Reinigungsarbeiten sowie den Zustand bei vorübergehender Außerbetriebnahme. Die Definition für den bestimmungsgemäßen Betrieb gemäß Vollzugshilfe zur StörfallV, Abschnitt 2 ist in Details (z. B. Zustand bei vorübergehender Außerbetriebnahme) abweichend zur Definition aus VDI 2180 (s. VDI 2180, Abschnitt 2).
Betrieb	Ein Betrieb im Sinne der Seveso-Richtlinie umfasst den gesamten unter der Aufsicht eines Betreibers stehenden Bereich, in dem gefährliche Stoffe in einer oder in mehreren Anlagen, einschließlich gemeinsamer oder verbundener Infrastrukturen oder Tätigkeiten vorhanden sind.
Betriebsbereich	Ein Betriebsbereich ist nach § 3 (5a) des BImSchG der gesamte unter der Aufsicht eines Betreibers stehende Bereich, in dem gefährliche Stoffe im Sinne des Artikels 3 Nummer 10 der 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 (ABl. L 197 vom 24.7.2012, S. 1) in einer oder mehreren Anlagen einschließlich gemeinsamer oder verbundener Infrastrukturen oder Tätigkeiten auch bei Lagerung im Sinne des Artikels 3 Nummer 16

Begriff	Definition
	der Richtlinie in den in Artikel 3 Nummer 2 oder Nummer 3 der Richtlinie bezeichneten Mengen tatsächlich vorhanden oder vorgesehen sind oder vorhanden sein werden, soweit vernünftigerweise vorhersehbar ist, dass die genannten gefährlichen Stoffe bei außer Kontrolle geratenen Prozessen anfallen; ausgenommen sind die in Artikel 2 Abs. 2 der Richtlinie 2012/18/EU angeführten Einrichtungen, Gefahren und Tätigkeiten, es sei denn, es handelt sich um eine in Artikel 2 Abs. 2 UnterAbs. 2 der Richtlinie 2012/18/EU genannte Einrichtung, Gefahr oder Tätigkeit. Zu den zu betrachtenden Einzelfällen bezüglich der Abgrenzung von Betriebsbereichen im Sinne der StörfallV gibt die Arbeitshilfe SFK-GS-35 (Leitfaden SFK-GS-35 (2002)) der Störfall-Verordnung eine Orientierung. Der Begriff Betriebsbereich ist demnach keinesfalls zwingend gleichzusetzen mit einer (isoliert) zu errichtenden technischen Anlage. Die Arbeitshilfe SFK-GS-35 nennt hier folgende grundlegende Konstellationen: a) Betriebsbereich besteht aus nur einer Anlage bzw. Lager b) auf einem Betriebsbereich befinden sich mehrere räumlich auseinanderliegende Anlagen bzw. Läger c) Anlagen bzw. Lager eines Betreibers befinden sich auf (beispielsweise durch Verkehrswege) räumlich getrennten Betriebsgrundstücken. Entsprechend der in Anhang I der StörfallV genannten Stoffmengengrenzen für die gefährlichen Stoffe werden unterschieden: ► Betriebsbereiche der unteren Klasse und ► Betriebsbereiche der oberen Klasse. Für die jeweilige Klasse bestehen entsprechend des mit der Stoffmenge wachsenden Gefahrenpotenzials unterschiedlichen Anforderungen u. a. an die Dokumentation der Ergebnisse von Gefahren und Risikoanalysen im Sicherheitsbericht (s. Abschnitt 0). Beispiele für Betriebsbereiche können sein (s.a. Niedersächsische Gewerbeaufsicht (2021b)): ► Raffinerien ► Anlagen der Grundchemie ► Tankläger und Erdgasspeicher ► Gefahrstoffläger ► Kunststoffhersteller ► Galvaniken ► Biogasanlagen ► Propangasspeicher

Begriff	Definition
Betriebsbereich der oberen Klasse	Entsprechend § 2 der der StörfallV ein Betriebsbereich, in dem gefährliche Stoffe in Mengen vorhanden sind, die die in Spalte 5 der Stoffliste in Anhang I der StörfallV genannten Mengenschwellen erreichen oder überschreiten.
Betriebsbereich der unteren Klasse	Entsprechend § 2 der der StörfallV ein Betriebsbereich, in dem gefährliche Stoffe in Mengen vorhanden sind, die die in Spalte 4 der Stoffliste in Anhang I der StörfallV genannten Mengenschwellen erreichen oder überschreiten, aber die in Spalte 5 der Stoffliste in Anhang I der StörfallV genannten Mengenschwellen unterschreiten.
Emission	Sind entsprechend §3 Abs. 3 BImSchG die von einer Anlage ausgehenden Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen, Licht, Wärme, Strahlen und ähnlichen Erscheinungen.
Ereignis	Entsprechend §2 Nr. 6 der StörfallV eine Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs in einem Betriebsbereich unter Beteiligung eines oder mehrerer gefährlicher Stoffe. Bestimmte Ereignisse im Anwendungsbereich der StörfallV sind meldepflichtig (s. meldepflichtige Ereignisse).
ernste Gefahr	Entsprechend § 2 der der StörfallV 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
gefährliche Stoffe	Entsprechend § 2 der der StörfallV 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
gefährliches Ereignis (im Bereich Prozessindustrie)	Im Sinne der Norm VDI 2180:2019-04 (Prozessindustrie): Ereignis, das unmittelbar zu Personenschäden oder Umweltschäden oberhalb des Grenzrisikos führen kann, oder durch das eine „ernste Gefahr“ im Sinne der Störfall-Verordnung (12. BImSchV) entstehen kann.
Immissionen	Entsprechend §3 Abs. 2 BImSchG auf Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter einwirkende Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen, Licht, Wärme, Strahlen und ähnliche Umwelteinwirkungen.
Meldepflichtiges Ereignis	Meldepflichtige Ereignisse nach §19 i.V. Anhang VI StörfallV sind aufgetretene Ereignisse, welche zur Folge haben: ► Entzündung, Freisetzung oder Explosion eines gefährlichen Stoffes ► Schädigung von Personen oder Haus- und Grundeigentum

Begriff	Definition
	► Unmittelbare Umweltschädigungen ► Sachschäden ► Wenn durch ein Ereignis Schäden durch Stofffreisetzung (Stoffe nach Anhang I StörfallV) eingetreten sind, oder Gefahren für die Nachbarschaft und Allgemeinheit nicht ausgeschlossen werden können. Dabei definiert der Anhang VI der StörfallV Schadensausmaße, ab welchen die Ereignisse meldepflichtig werden. Weiterhin sind generell meldepflichtig: ► Alle Störfälle mit grenzüberschreitenden Schäden (d.h. jeder unmittelbar durch einen gefährlichen Stoff verursachte Störfall mit Folgen, die über das Hoheitsgebiet der Bundesrepublik Deutschland hinausgehen) ► Ereignisse, welche keine der o.a. Auswirkungen haben, aber für die Verhinderung von Störfällen und die Begrenzung der Auswirkungen besonders bedeutsam sind.
Nicht bestimmungs-gemäßer Betrieb	Entsprechend Nr. 2.2 der 1. StörfallVwV (nicht mehr in Kraft): „Betriebszustände, die der erteilten Genehmigung, vollziehbaren nachträglichen Anordnungen oder Rechtsvorschriften nicht entsprechen, gehören nicht zum bestimmungsgemäßen Betrieb.“
Sicherheitsrelevanter Anlagenteil	Anlagenteile sind sicherheitsrelevant, wenn bei deren Versagen oder Fehlen ein Störfall (s. Begriff Störfall) nicht auszuschließen ist. Dies sind Anlageteile, die aufgrund ihres Inventars an gefährlichen Stoffen als sicherheitsrelevant angesehen werden und solche, die aufgrund ihrer Funktion sicherheitsrelevant sind. Als sicherheitsrelevante Anlagenteile (SRA) sind alle Apparate, Maschinen, Systeme, Ausrüstungsteile und Einrichtungen anzusehen, von deren Auslegung, Beschaffenheit und Funktionsweise in besonderer Weise die Sicherheit der Anlage und die Begrenzung der Störfallauswirkungen abhängen und bei deren Versagen ein Störfall nicht ausgeschlossen werden kann. (Definition s. Bericht KAS-1, Nr. 2)
Sicherheitsrelevanter Teil des Betriebsbereiches	Für sicherheitsrelevante Teile eines Betriebsbereiches (SRB), wie sie in § 4 Nr. 4 und Anhang II Nr. III.1 der Störfall-Verordnung /1d/ genannt sind, werden keine Richtwerte vorgeschlagen. Hier sollte individuell mit der Behörde abgestimmt werden, welche Kriterien der Einstufung zugrunde gelegt werden. Denkbar wäre eine vom Gefahrenpotential abhängige, abgestufte Dokumentationstiefe, die für jedes Betriebsteil vom Betreiber nachvollziehbar begründet werden muss. SRB beinhalten ein oder mehrere SRA. (Definition s. Bericht KAS-1, Nr. 2)
Stand der Technik	Stand der Technik ist entsprechend der Definition des §3 Abs. 6 des Bundes-Immissionschutzgesetzes (BImSchG) der Entwicklungsstand

Begriff	Definition
	fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme zur Begrenzung von Emissionen in Luft, Wasser und Boden, zur Gewährleistung der Anlagensicherheit, zur Gewährleistung einer umweltverträglichen Abfallentsorgung oder sonst zur Vermeidung oder Verminderung von Auswirkungen auf die Umwelt zur Erreichung eines allgemein hohen Schutzniveaus für die Umwelt insgesamt gesichert erscheinen lässt. Für den Stand der Technik sind die in der Anlage des BImSchG genannten Kriterien heranzuziehen.
Stand der Sicherheitstechnik	Ist entsprechend § 2 der der StörfallV 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	Entsprechend § 2 der der StörfallV 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 der StörfallV führt.
Störfallrisiko-beurteilung	In Anlehnung des Begriffes Risikobeurteilung gemäß IEC 31010. Im Rahmen des Forschungsprojektes werden folgende Analyseschritte eingehend untersucht: Gefahrenanalyse, Bestimmung des Standes der Sicherheitstechnik, Szenarienentwicklung, Auswirkungsbetrachtungen und Risikobewertung (vgl. Kap. 4). Die Gesamtheit dieser Schritte soll im Folgenden mit Störfallrisikobeurteilung bezeichnet werden.
Überwachungssystem	Umfasst entsprechend § 2 der der StörfallV 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
Vorhandensein gefährlicher Stoffe	Entsprechend § 2 der der StörfallV 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

Zusammenfassung

Anknüpfung an Störfall-Verordnung, Forschungsprojekte und Literatur

Die Auswertung der Recherche in Gesetzestexten, Leitfäden, Fachliteratur, Forschungsergebnissen und Berichten hat gezeigt, dass die Störfall-Verordnung eine Reihe von Anforderungen enthält, welche die Beurteilung bzw. die Ermittlung, Analyse und Bewertung von Störfallrisiken betreffen.

Beispielsweise wird die eingehende Beschreibung der Störfallszenarien möglicher Störfälle nebst ihrer Wahrscheinlichkeit oder den Bedingungen für ihr Eintreten gefordert. Hier werden u.a. Anforderungen an die zu analysierenden Gefahrenquellen und zu entwickelnden Störfallszenarien gemacht.

Der Stand der Sicherheitstechnik als zentraler Bewertungsmaßstab an die Beschaffenheit und den Betrieb der Anlagen fordert gleichfalls die Anwendung fortschrittlicher prozesstechnischer Verfahren, Betriebsweisen sowie Vorkehrungen zur Verhinderung und Maßnahmen zur Reduzierung der Auswirkungen von Störfallereignissen. Dies impliziert, dass die Störfallrisikobeurteilung keinesfalls ein einmaliger Vorgang ist. Störfallrisikobeurteilungen sind vielmehr in die regelmäßige Ermittlung bzw. Prüfung des Standes der Sicherheitstechnik eingebettet.

Entsprechend dem höheren Risikopotenzial bestehen für Betreiber von Betriebsbereichen der oberen Klasse zusätzliche Dokumentationspflichten in Form eines Sicherheitsberichtes.

Diese Anforderungen sind in der Vollzugshilfe der Störfall-Verordnung aus dem Jahre 2004 weiter konkretisiert bzw. kommentiert. Sie werden in den Leitfäden der Kommission für Anlagensicherheit (KAS), der Störfall-Kommission (SFK)[1] und weiteren Institutionen entsprechend aufgegriffen und praxistauglich kommentiert bzw. durch Empfehlungen weiter spezifiziert (z .B. KAS-55 „Mindestangaben im Sicherheitsbericht“, SFK-GAS-33 „Schritte zur Ermittlung des Standes der Sicherheitstechnik“ und SFK-GS-41 „Risikomanagement im Rahmen der Störfall-Verordnung“).

Die Recherche hat weiterhin gezeigt, dass in Deutschland, aber auch international eine Vielzahl an Verfahren, Methoden und Modellen zur Beurteilung von Störfallrisiken zur Anwendung kommen bzw. teilweise explizit für die Beurteilung von Störfallrisiken entwickelt worden sind.

Das HAZOP-Verfahren beispielsweise ist die klassische Team-orientierte Kreativtechnik zur Identifizierung möglicher Gefahren und Ableitung der notwendigen Gegenmaßnahmen unter Anwendung von Sollfunktionen und ihren Parametern 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. Das Verfahren fokussiert dabei auf Abweichungen aus prozesstechnischen Abläufen. Von außen bzw. extern eingetragene Gefahrenquellen sind in der Praxis häufig eher kein Bestandteil der HAZOP-Studien. Die klassische HAZOP wird 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

[1] Die Kommission für Anlagensicherheit ist das Nachfolgegremium der Störfall-Kommission (SFK) und des Technischen Ausschusses für Anlagensicherheit (TAA)

sind. Durch gezielte Fragestellungen und einen konkreten Praxisbezug sollen so ausschweifende Diskussionen entfallen.

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

Der Risikograph (hier 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.

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 (unternehmensinternen) 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 die Prognose der zu erwartenden Zuverlässigkeit des Systems auf Basis der Eintrittshäufigkeiten der Ursachen erlaubt. Das Top-Ereignis (der unerwünschte Systemzustand) 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.

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.

Verfahren zur quantitativen Risikobeurteilungen (QRA, Quantitative Risk Assessment) adressieren primär die externe Sicherheit. Die QRA-Verfahren in den Niederlanden und Flandern sind detaillierte Beschreibungen bzw. Vorgaben, wie das kumulative Risiko des Betriebsbereiches für die Umgebung in Form der Kenngrößen „Individualrisiko“ und „Gesellschaftliches Risiko“ zu berechnet ist. Die Ergebnisse werden primär für die externe Notfallplanung bzw. Bauleitplanung verwendet.

Ziel des ARAMIS-Projektes (Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the framework of SEVESO II Directive, Laufzeit 2002-2005) war es, die gängigen, angewendeten Methoden zu einer gesamtheitlichen und insbesondere einheitlichen Methodik der Risikoanalyse zu fusionieren. Dabei sollten die Stärken der einzelnen, bereits in ihrer Anwendung befindlichen, qualitativen und quantitativen Methoden übernommen und zu einem gesamtheitlichen Verfahren zusammengeführt werden. Das Verfahren stellt mit seinen generischen Fehler- und Ereignisbäumen eine Wissensdatenbank dar, die vom Anwender auf die zu untersuchende Anlage in einer Art Subtraktionsverfahren hin anzupassen sind. In der vollen Ausprägung erfordert das ARAMIS-Verfahren viele Ressourcen und Fachwissen und ist somit für den allgemeinen Einsatz eher unbedeutend.

Im vorliegenden Forschungsprojekt wurden diese und weitere Verfahren, Methoden und Modelle untersucht und dargestellt. Eine Übersicht wird in Kapitel 4.22 „Übersicht recherchierter Methoden, Verfahren und Modelle“ gegeben.

Diese Vielfalt an Verfahren, Methoden und Modellen erklärt sich somit einerseits durch die vielfältigen Anforderungen und Herausforderungen, mit denen sich Betreiber von Betriebsbereichen konfrontiert sehen und andererseits dadurch, dass (fast) keines dieses Verfahren sämtliche Aspekte der Störfallrisikobeurteilung abdecken kann.

Zunächst einmal lassen sich die Verfahren dahin gehend unterscheiden, ob mit diesen eine Gefahrenanalyse, eine Szenarienentwicklung, Ausbreitungs- und Auswirkungsbetrachtungen oder eine Bewertung der verbleibenden Restrisiken vorgenommen werden kann. Eine Begriffsbestimmung der einzelnen Schritte wird in Kapitel 3 „Ablauf der Störfallrisikobeurteilung“ gegeben.

Der Gefahrenanalyse lassen sich beispielsweise Verfahren wie das HAZOP-Verfahren, die Fehlerbaumanalyse und Checklisten zuordnen, eine Szenarienentwicklung kann beispielsweise mit einer Ereignisbaumanalyse erfolgen, Ausbreitungs- und Auswirkungsbetrachtungen erfolgen anhand mathematischer/physikalischer Modelle und die (unternehmensinterne) Bewertung der verbleibenden Restrisiken kann beispielsweise mittels Risikomatrizen, Risikographen oder der LOPA (Layer of Protection Analysis) erfolgen.

Die Verfahren der Gefahrenanalyse und Szenarienentwicklung unterscheiden sich unter anderem in der Vorgabe vordefinierter Störfallszenarien. Während Kreativtechniken wie HAZOP vollständig auf das naturwissenschaftliche, technische Wissen der beteiligten Teammitglieder im Zusammenhang mit denkbaren Störfallablaufszenarien aufbauen, geben andere Verfahren generische, d.h. vorformulierte Störfallablaufszenarien vor, die durch die Anwender auf die konkrete Situation beim Betreiber anzupassen sind. (z.B. Checklisten, Szenarienanalyse/HAZOP-Master, ARAMIS-Verfahren (Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the framework of SEVESO II Directive)).

Weitere Gründe für die Vielfalt der entwickelten bzw. zur Anwendung kommenden Verfahren, Methoden und Modelle sind unter anderem:

- Regulatorischer Rahmen: In einigen europäischen Ländern sind Risiken für die Umwelt (insbesondere für die Bevölkerung) zu quantifizieren. In diesem Zusammenhang sind in den entsprechenden Ländern quantitative Risikobeurteilungen (QRA, Quantitative Risk Assessment) mit länderspezifischen Ausprägungen entwickelt worden. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes sollten insbesondere die Verfahren in den Niederlanden, Flandern und der Schweiz betrachtet werden.

- Art der untersuchten Gefahrenquellen: Mit der HAZOP-Studie werden in der Praxis häufig nur betrieblich/technische Gefahrenquellen untersucht. In Ergänzung können

beispielsweise Checklisten für umgebungsbedingte Gefahrenquellen und Eingriffe Unbefugter zur Anwendung kommen.

- Unterschiedliche Anwendungszeitpunkte im Projektablauf begünstigen die Anwendung unterschiedlicher Verfahren: In Machbarkeitsstudien kommen in der Praxis mitunter spezielle Checklisten zu Einsatz, welche helfen sollen, das Planungsvorhaben im Zuge einer sogenannten „Gefahrenfeldanalyse“ bzw. eines „Screenings“ zu beurteilen. Eine HAZOP wird in der Praxis häufig erst während der Detailplanung angewendet, da diese auf ein bereits ausgearbeitetes sicherheitstechnisches Grundkonzept aufbaut. Zur Analyse der Ursachen von Ereignissen (bzw. Beinaheereignissen) im Betrieb wird mitunter die Fehlerbaumtechnik angewendet.
- Versuche der der Erarbeitung eines einheitlichen Verfahren: Ziel des ARAMIS-Projektes (Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the framework of SEVESO II Directive, Laufzeit 2002-2005) beispielsweise war es, die gängigen, angewendeten Methoden zu einer gesamtheitlichen und insbesondere einheitlichen Methodik der Risikoanalyse zu fusionieren, dem ARAMIS-Verfahren.

Das Forschungsprojekt hat weiterhin gezeigt, dass es ein einheitliches Checklistenverfahren bzw. einheitliche Checklisten für spezielle Fragestellungen nicht gibt. Vielmehr wurden und werden durch Institutionen und Unternehmen eine Vielzahl an Checklisten zu unterschiedlichen Themenkomplexen erarbeitet, welche mehr oder weniger verbreitet Anwendung finden. Z.B. wurden Checklisten erarbeitet für

- Gefahrenfeldanalysen bzw. vorläufige Gefahrenanalysen zur Bewertung eines Planungsvorhabens in seinem räumlichen Kontext,
- umgebungsbedingte Gefahrenquellen und Eingriffe Unbefugter (z.B. NAMUR-Arbeitsblatt NA 163),
- Technische Regeln für Maschinen- und Anlagenbau (VDMA-Einheitsblätter),
- Checklisten zur Erstellung von Explosions- und Brandschutzkonzepten (z.B. DGUV Information 213-106, DGUV Information 205-001),

Teilweise bauen die Verfahren und Methoden auf einander auf, bzw. enthalten Elemente anderer Verfahren und Methoden. So werden beispielsweise bei den oben genannten QRA-Verfahren und beim ARAMIS-Verfahren generische Störfallablaufszenarien in Form von Fehler- und Ereignisbäumen hinterlegt. Das Bow-Tie-Verfahren ist in erster Näherung eine Kombination aus Fehler- und Ereignisbaumanalyse. Die LOPA greift in der Regel auf eine Risikomatrix zurück. Das ARAMIS-Verfahren enthält Elemente von HAZOP, LOPA, Fehler- und Ereignisbäumen, Checklisten sowie eine Risikomatrix und einen Risikographen.

Die Auswahl der für die Störfallrisikobeurteilung anzuwendenden Verfahren, Methoden und Modelle obliegt grundsätzlich dem Betreiber, wobei sich in der Vergangenheit eine Reihe von Verfahren, Methoden bzw. Modellen etabliert haben, die von den Behörden akzeptiert werden. Grundsätzlich muss jedoch darauf geachtet werden, dass die Störfallrisikobeurteilung mit einem auf die Komplexität des Betriebsbereiches zugeschnittenen, systematischen Vorgehen erfolgt.

Erstes Fachgespräch

Während des 1. Fachgespräches im November 2021 mit Vertreter: innen des AISV[2],der KAS und der Industrie wurden die durch die Forschungsnehmenden recherchierten Methoden, Verfahren und Modelle vorgestellt und diskutiert, welche dieser Verfahren, Methoden und Modelle im weiteren Projektverlauf eingehend untersucht werden sollten.[3].

Mit den Aussagen der Fachexpert:innen hat sich die Annahme der Forschungsnehmenden bestätigt, dass gegenwärtig keine der etablierten Methoden und Verfahren anwendungsunabhängig favorisiert werden kann. Vielmehr wird mehrheitlich die These vertreten, dass für verschiedene Arten von Anwendungen (z. B. Typen von Anlagen oder Verfahren) im Bereich der Störfall-Verordnung unterschiedliche Vorgehensweisen vorteilhaft sind, wobei das Aufwand-Nutzen-Verhältnis, aber auch die Anwendbarkeit des Verfahrens bezogen auf die Fragestellung eine Rolle spielen. Insbesondere wurde hier auf den Gegensatz von eher zeitaufwändigen Kreativtechniken (wie z.B. HAZOP) einerseits und als zeitsparend wahrgenommene Alternativen wie beispielsweise das Checklistenverfahren abgestellt. Die HAZOP wird dabei als geeignete Methode für prozesstechnisch komplexere Verfahren angesehen, während die Stärke von Checklisten bei „einfacheren“ bzw. bereit gut verstandenen Anlagen gesehen wird. Gleichzeitig wurden Bedenken bzw. Vorbehalte seitens der Behörden formuliert, dass der Einsatz von Checklisten als Ersatz zu einer HAZOP dazu führt kann (und teilweise geführt hat), dass Betreiber sich nicht ernsthaft bzw. ausreichend mit den Störfallrisiken Ihrer Anlagen auseinander setzen (bzw. auseinander gesetzt haben).

Praxisuntersuchungen

Im Rahmen der Praxisuntersuchungen waren zunächst Interviews mit Betreibern und Behörden zur gegenwärtigen Praxis der Anwendung von Verfahren, Methoden und Modellen der Störfallrisikobeurteilung im Raum Deutschland zu führen.

Die Interviews mit ausgewählten Betreibern und Behörden haben gezeigt, dass Betreiber in der Regel eine Kombination bestehend aus HAZOP sowie einen der Ansätze LOPA, Risikograph und Risikomatrix anwenden. Das HAZOP-Verfahren wird dabei meist in einer modifizierten Variante angewendet, um so zielgerichteter die für den eigenen Betriebsbereich relevanten Fragenstellungen adressieren zu können. Die Modifikationen beziehen sich dabei auf das zur Anwendung kommende Leitwortsystem. Beispiele können dem Kapitel 4.4 „BASF-HAZOP und weitere Modifikationen des HAZOP-Verfahrens“ entnommen werden.

Ausbreitungsberechnungen werden für ausgewählte Störfallszenarien durchgeführt, diese werden in der Regel mit den zuständigen Behörden abgestimmt.

Weitere Analysetechniken werden angewendet, um so die Qualität der Analysen weiter zu erhöhen. Dies können beispielsweise ursachenunabhängige, systematische Gasausbreitungsrechnungen, Siting-Analysen (gemeint ist die Suche nach einer vorteilhaften Platzierung von Anlagenteilen innerhalb des Betriebsbereiches) oder spezielle Checklisten bzw. Fragenlisten zu bestimmten Themengebieten sein.

Weitere Themengebiete der Interviews umfassten angewendete Hilfsmittel bei der Durchführung der Störfallrisikobeurteilungen, den Bedarf an zusätzlichen, d.h. gegenwärtig

[2] Anlagenbezogener Immissionsschutz / Störfallvorsorge. Ausschuss der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz (LAI)

[3] QRA-Verfahren in den Niederlanden/Flandern, Methoden und Verfahren in der Schweiz, HAZOP/PAAG, Ausbreitungs- und Auswirkungsmodelle nach DECHEMA-Process-Net, TÜV-Berlin sowie die Computerprogramme des JRC „ADAM“ und „Rapid N“. Weiterhin: ZHA (Zurich Hazard Analysis), LOPA (Layer of Protection Analysis), ROGA (Risikobasierte Gefahrenanalyse), FTA/ETA (Fault Tree Analysis / Event Tree Analysis), FME(C)A (Failure Mode Effects and Criticality Analysis), Risikograph nach VDI 2180

nicht verfügbaren Hilfsmitteln, Einschätzungen zu probabilistischen Verfahren sowie die Bewertung der eingesetzten Verfahren und Methoden.

Für die Gefahrenanalyse und Szenarienentwicklung sowie für die Ausbreitungsrechnungen werden unterschiedliche Softwarelösungen angewandt, teilweise sind dies nichterwerbliche Speziallösungen.

Größere Firmen greifen bei der Durchführung von Störfallrisikobeurteilungen aufgrund begrenzter Kapazitäten auf externe Fachkräfte zurück, kleinere Firmen greifen auf externe Fachkräfte eher kompetenz- bzw. erfahrungsbedingt zurück.

Das Schulungsangebot wird aus Sicht der Betreiber als ausreichend angesehen und interne und externe Schulungen werden explizit gefördert. Von Behördenseite wird beim Schulungsangebot punktuell Verbesserungspotential gesehen (z.B. bei der Schulung zur Erstellung von Sicherheitsberichten).

Probabilistische Verfahren werden in der Regel eher in beschränkten Umfang angewendet, beispielsweise im Rahmen einer semiquantitativen Einschätzung des Risikos über einen Risikographen oder einer Risikomatrix.

Die von interviewten Betreibern angewendeten Verfahren werden von den Behörden als grundsätzlich geeignet angesehen, den entsprechenden Anforderungen aus der StörfallV nachzukommen.

Als schwierigster, bzw. anspruchsvollster Schritt der Störfallrisikobeurteilung wird mehrheitlich die Gefahrenanalyse angesehen.

Der zweite Teil der Praxisuntersuchungen umfasste die Erprobung probabilistischer Verfahren. Dies erfolgte anhand der Methoden Fehlerbaumanalyse und Ereignisbaumanalyse (FTA, ETA). Hierzu wurden in Zusammenarbeit mit mehreren Betreibern sogenannter Standardanlagen exemplarisch Störfallszenarien analysiert.

Die Erprobung hat ergeben, dass diese Methoden geeignete Analysetechniken zur Gefahrenanalyse und Entwicklung von Störfallszenarien darstellen. Vergleichbar mit dem HAZOP-Ansatz lassen sich beliebige Ursache-Wirkungsketten darstellen.

Mit der Quantifizierung der ermittelten Ursache-Wirkungsketten geht jedoch ein erheblicher Zeitaufwand einher. So bedarf es einer Reihe von Detailüberlegungen zur Quantifizierung der Eintrittswahrscheinlichkeiten einzelner Gefahrenquellen und Versagenswahrscheinlichkeiten der Barrieren bzw. Schutzmaßnahmen. Insbesondere die Etablierung solcher Analysetechniken in den Unternehmen würde aus Sicht der Forschungsnehmenden mit einem erhöhten Aufwand verbunden sein. Teilweise Abhilfe könnte hierbei die Erarbeitung einer einheitlichen und den Betreibern frei zugänglichen Datenbank schaffen.

Der Versuch der Quantifizierung der Eintrittshäufigkeiten hat die Vermutung der Forschungsnehmenden bestätigt, dass das Ergebnis stark abhängig von der ausgewählten Erkenntnisquelle ist. In der Regel geben unterschiedliche Erkenntnisquellen zu einem bestimmten Ereignis (z.B. technisches Versagen einer Apparatur, Störfall, menschliche Fehlhandlung) unterschiedliche Eintrittshäufigkeiten und Versagenswahrscheinlichkeiten an. Die Differenzen können dabei mehrere Größenordnungen betragen. Die Gründe dafür sind vielschichtig (z.B. unterschiedliche Branchen und Anwendungsbedingungen mit unterschiedlichen Belastungsprofilen, Unterschiede im Alter der Daten/Statistiken auf denen die Schätzungen der Eintrittshäufigkeiten und Versagenswahrscheinlichkeiten beruhen). Aus Sicht der Forschungsnehmenden sollten die berechneten Zahlenwerte daher eher für vergleichende

Betrachtungen (z.B. von alternativen Anlagendesigns) herangezogen und nicht als absolute bzw. notwendigerweise zutreffende Zahlen aufgefasst werden.

Ein den Praxisuntersuchungen nachgelagerter Workshop mit Vertreter: innen des AISV hat ergeben, dass es aus Sicht der Behörden grundsätzlich keine Vorbehalte gegen die Anwendung solcher Methoden gibt. Allerdings wurde klargestellt, dass der Einsatz von FTA und ETA zum Zwecke der Berechnung des kumulativen Risikos des Betriebsbereiches (wie es beispielsweise in den Niederlanden, Flandern und der Schweiz erforderlich ist) als nicht zielführend angesehen wird. Einem unklaren Verwertungszweck stünde hierbei ein beachtlicher Aufwand gegenüber. Zentraler Bewertungsmaßstab für den Standort Deutschland ist soll weiterhin der Stand der Sicherheitstechnik bleiben. Von der Einführung zusätzlicher quantitativer Risikoakzeptanzkriterien, wie sie in den o.g. Ländern gesetzlich verankert sind, raten die Vertreter: innen des AISV entschieden ab.

Auswahl der im weiteren Projektverlauf vertiefend zu untersuchenden Verfahren

Die Auswahl der im weiteren Projektverlauf vertiefend zu untersuchenden sechs Verfahren[4] beruht schlussendlich auf den Vorgaben der Leistungsbeschreibung, den Rechercheergebnissen, den Rückmeldungen aus dem 1. Fachgespräch, sowie den Praxisuntersuchungen.

Die Auswahl ist dabei wie folgt ausgefallen:

1. HAZOP
2. HAZOP-Modifikationen
3. Methoden und Verfahren in den Niederlanden / Flandern (u.a. VROM: „Guidelines for quantitative risk assessment“ und Departement Omgeving “RISK CALCULATIONS MANUAL - Guidelines for quantitative risk analysis, indirect risks and environmental risk analysis”)
4. Fehler- und Ereignisbaumanalyse (FTA und ETA)
5. Layer of Protection Analysis (LOPA)
6. Accidental Risk Assessment Methodology For Industries In The Context Of The Seveso II Directive (ARAMIS)

Gründe, die zur Aus- bzw. Abwahl einzelner Verfahren geführt haben, können dem Kapitel 6.1 entnommen werden.

Die vertiefende Untersuchung der ausgewählten Verfahren erfolgte dabei entlang der gedanklichen Gliederung der Störfallrisikobeurteilung in folgende Analyseschritte „Gefahrenanalyse“, „Szenarienentwicklung“, „Auswirkungsbetrachtungen“ und „Risikobewertung“.

Gefahrenanalyse

Zunächst waren die Verfahren auf den Analyseschritt der Gefahrenanalyse hin zu untersuchen und vergleichend darzustellen.

HAZOP und FTA sind klassische Kreativtechniken zur Identifizierung und Analyse von Gefahrenquellen. Unterschiede ergeben sich durch unterschiedliche Blickwinkel bzw. Anwendungskontexte. So ist bei der HAZOP der Analysestartpunkt die Abweichung vom bestimmungsmäßen Betrieb. Bei der FTA kann der Startpunkt hingegen beispielsweise das Loss of Containment-Ereignis oder der Ausfall eines komplexen technischen Systems sein. Für das HAZOP-Verfahren charakteristisch sind die zur Anwendung kommenden Leitworte und das iterative Vorgehen, in welchem vorhandene bzw. angedachte Gegenmaßnahmen zunächst

[4] Gemäß Leistungsbeschreibung sollten in dem Projekt aus der Gesamtheit der recherchierten Verfahren, Methoden und Modellen sechs vertiefend betrachtet werden. Drei Verfahren wurden bereits durch die Leistungsbeschreibung vorgegeben, drei weitere Verfahren waren durch die Forschungsnehmenden in Abstimmung mit dem UBA festzulegen.

weggelassen werden. Dies ermöglicht es, den Beitrag der Gegenmaßnahmen zur Risikoreduktion besser herausarbeiten zu können . Für die Fehlerbaumanalyse charakteristisch ist die Untersuchung von Mehrfachereignissen und darüber hinaus das mit der Fehlerbaumtechnik verknüpfte wahrscheinlichkeitstheoretische Kalkül zur Quantifizierung des Top-Ereignisses. Das HAZOP-Verfahren sowie die Fehlerbaumanalyse können grundsätzlich zur Analyse sämtlicher Arten an Gefahrenquellen angewendet werden, das HAZOP-Verfahren wird häufig nur für die Betrachtung betrieblich/technischer Gefahrenquellen genutzt.

Die LOPA stellt kein Verfahren der Gefahrenanalyse dar, sondern baut auf diese auf.

Die Ereignisbaumanalyse stellt kein Verfahren der Gefahrenanalyse dar.

Die QRA-Verfahren in den Niederlanden und Flandern zielen primär auf die externe Sicherheit ab. Hierzu erfolgt die Berechnung des kumulativen Risikos des Betriebsbereiches in Form der Kenngrößen „Individualrisiko“ und „Gesellschaftliches Risiko“ (zur Definition dieser Kenngrößen siehe Kapitel 4.18). Mit der Vorgabe anzuwendender Stofffreisetzungsszenarien (Loss of Containment-Ereignisse) und zugehörigen Eintrittshäufigkeiten zur Berechnung dieser Risikokenngrößen wird eine Gefahrenanalyse nicht forciert bzw. gefordert.

Das ARAMIS-Verfahren stellt für unterschiedliche Störfallszenarien generische Fehlerbäume bereit, die durch den Anwender in einem Subtraktionsverfahren (d.h. durch Streichen nichtrelevanter Ursachen) auf die eigene Anlage hin anzupassen sind.

Keines der genannten Verfahren liefert Hinweise bzw. Hilfestellungen, wie der Stand der Sicherheitstechnik ermittelt bzw. umgesetzt werden kann.

Szenarienentwicklung

Anschließend waren die Verfahren auf den Analyseschritt der Szenarienentwicklung hin zu untersuchen und vergleichend darzustellen.

Das HAZOP-Verfahren wie auch die Ereignisbaumanalyse als Kreativtechniken machen keine konkreten Vorgaben zur Entwicklung von Störfallszenarien,. In Kombination mit der Anwendung der LOPA, eines Risikographens oder einer Risikomatrix werden die entwickelten Kausalketten dazu verwendet, ausgewogene und verhältnismäßige Konzepte zur Verhütung von Störfallen bzw. zur Minderung der Auswirkungen zur erarbeiten. Die Analysen können darüber hinaus Ausgangspunkt zur Abschätzung des Ausmaßes und der Schwere von Störfällen und Ermittlung der von Störfällen betroffenen Gebiete, sowie zur Bestimmung der geeigneten Notfallmaßnahmen (incl. Alarm- und Gefahrenabwehrplanung) darstellen.

Zur Entwicklung der Szenarien werden in den Manuals der QRA-Verfahren in den Niederlanden und Flandern neben den zu berücksichtigenden Loss of Containment-Ereignissen weiterhin generische Ereignisbäume, potentiell zu berücksichtigende Gegenmaßnahmen und anzuwendende Modelle inkl. Parameter für Ausbreitungs- und Auswirkungsrechnungen bereitgestellt. Die Vorgaben zwischen den beiden QRA-Verfahren unterscheiden sich dabei eher in Details. In den Niederlanden ist das Softwareprogramm Safeti-NL anzuwenden, in Flandern steht die Auswahl der Programms frei.

Mit dem ARAMIS-Verfahren werden diverse Hilfsmittel bzw. Vorgaben zu Erarbeitung von Störfallablaufszenarien bereitgestellt. Dies sind insbesondere: Generische Fehlerbäume, Anleitungen zum Erstellen von Ereignisbäumen, Checklisten zu möglichen Sicherheitsfunktionen und Barrieren, Angaben zu Häufigkeiten und Wahrscheinlichkeiten, eine Anleitung zur Analyse der Leistungsfähigkeit des Sicherheitsmanagements und ein Risikograph zur Beurteilung der Gegenmaßnahmen. Das Verfahren zielt darauf ab, dass

a) ein ausgewogenes Sicherheitskonzept für die interne Sicherheit erarbeitet wird sowie

b) hinreichend detaillierte Informationen über zu erwartende, mögliche Schädigungen außerhalb des Betriebsbereiches bereitgestellt werden.

Auswirkungsbetrachtungen

Im nächsten Schritt waren die Verfahren auf den Analyseschritt der Auswirkungsbetrachtung hin zu untersuchen und vergleichend darzustellen.

Bei der Betrachtung wurde der Fokus auf eine Gegenüberstellung zur Anwendung kommender mathematischer Modelle gelegt. Berücksichtigt wurden hierbei neben den Modellen, die bei den QRA-Verfahren zur Anwendung kommen, die in dem Forschungsbericht des TÜV-Anlagenbaus „Ermittlung und Berechnung von Störfallablaufszenarien nach Maßgabe der 3. Störfallverwaltungsvorschrift“ sowie des Dechema Statuspapieres „Auswirkungsbetrachtungen bei störungsbedingten Stoff- und Energiefreisetzungen in der Prozessindustrie - Methodenübersicht und industrielle Anwendung“ diskutierten und in den Computerprogramme des EC JRC „ADAM“ und „Rapid-N“ implementieren Modelle.

Die Auswertung der verschiedenen Quellen offenbart eine teils erhebliche Vielfalt an entwickelten, vorgeschlagenen und zur Anwendung kommender Modelle. Dies ist unter anderem zu erklären durch unterschiedliche Überlegungen und Abwägungen. Zu nennen sind hierbei folgende Aspekte:

- Allgemeingültigkeit vs. Gültigkeit für ein spezifisches Szenario,
- Komplexitätsgrad der Modelle,
- Rechenaufwand: empirische Modelle bis hin zu CFD-Modellen,
- Kontinuität vs. Aktualität/Stand der Wissenschaft und Technik,
- freie Verfügbarkeit der Modelle.

Die in den QRA-Verfahren in den Niederlanden und Flandern angewandten Modelle sind Ergebnis vielfältiger Validierungsaktivitäten und berücksichtigen wissenschaftliche Untersuchungen und Erkenntnisse. Die Modelle der QRA-Verfahren sind weitestgehend Diskussionsgegenstand des Forschungsberichtes des TÜV-Anlagenbaus sowie des Dechema Statuspapieres und teilweise in den Computerprogrammen des EC JRC implementiert, was als weiteres positives Zeichen bezgl. der Validität gedeutet werden kann.

Risikobewertung

Abschließend waren die die final ausgewählten Verfahren auf den Analyseschritt der Risikobewertung hin zu untersuchen und vergleichend darzustellen.

Das HAZOP-Verfahren beinhaltet kein Element der Risikobewertung. Die Praxisuntersuchungen haben jedoch aufgezeigt, dass die HAZOP häufig in Kombination mit einer Risikomatrix, einem Risikographen bzw. dem LOPA-Verfahren zur Anwendung kommt.

Bei der LOPA erfolgt eine Risikobewertung entweder anhand von Risikomatrizen oder alternativ über einen Abgleich des Targetfaktoren mit den Kreditfaktoren (Vgl. Kapitel 4.8.1).

Die Fehlerbaumanalyse und Ereignisbaumanalyse dienen der Darstellung von Störfallszenarien, sowie der Berechnung derer Eintrittshäufigkeiten. Risikobewertungsansätze werden durch die Verfahren selbst nicht beschrieben.

Das LOPA-Verfahren sowie Risikomatrizen und -graphen adressieren grundsätzlich das interne sowie das externe Risiko. Betrachtet werden jedoch immer nur Einzelszenarien und kein

gesamthaftes bzw. auf Ebene „Betriebsbereich“ aggregiertes Risiko, wie dies mit dem Individualrisiko oder dem gesellschaftlichen Risiko der Fall ist. Die konkrete Ausgestaltung dieser Tools, d.h. insbesondere der Festlegung der Akzeptanzkriterien wird dabei konzernintern kalibriert. Ggf. erfolgt die Kalibrierung unter Abstimmung mit den zuständigen Behörden. Grundsätzlich gilt aber, dass die genannten Techniken mit dem Ziel einer unternehmensinternen Risikobewertung angewendet werden.

Die QRA-Verfahren in den Niederlanden und Flandern, sowie das QRA-Verfahren in der Schweiz adressieren primär die externe Sicherheit. Die Akzeptabilität des Restrisikos wird dabei an verschiedene Risikokenngrößen geknüpft. Während in den Niederlanden und Flandern dies das Individualrisiko und das gesellschaftliche Risiko sind, wird in der Schweiz eine Verallgemeinerung des Konzeptes des gesellschaftlichen Risikos angewandt. In den Niederlanden wird das gesellschaftliche Risiko ab 2024 durch sogenannten Fokusbereiche ersetzt. In der Schweiz werden im Vergleich zu den Niederlanden und Flandern nicht nur mögliche Todesopfer, sondern auch Verletzungen, sowie mögliche Boden und Gewässerverunreinigungen quantitativ analysiert. Die festgelegten Ziel- und Grenzwerte leiten sich in allen Ländern aus Überlegungen zu Mortalitätsraten ab und wurden in der Vergangenheit teilweise angepasst.

Zweites Fachgespräch

Im Oktober 2023 wurden die Ergebnisse der vertiefenden Untersuchungen mit Blick auf den zu diesem Zeitpunkt noch ausstehenden Arbeitsschritt „Erarbeitung von Empfehlungen und Hilfestellungen zum Einsatz der betrachteten Verfahren, Methoden und Modelle“ auf einem ganztätigen Fachgespräch vorgestellt und diskutiert.

Als wichtigste Erkenntnisse bzw. Forderungen hervorgegangen sind

a) die Weitung des Blicks bei der Bearbeitung des noch ausstehenden Arbeitsschrittes auf weitere Verfahren (u.a. das Checklistenverfahren) und

b) die Erarbeitung einer vergleichenden Darstellung ausgewählter Verfahren und Methoden mit Auswahlkriterien und Anwendungshinweisen. Die Ausarbeitungen sollten sich primär an Betreiber richten, welche mit Störfallrisikobeurteilungen bisher noch keine Erfahrungen gesammelt haben bzw. an Betreiber kleiner und mittlerer Unternehmen .

Empfehlungen und Hilfestellungen zum Einsatz der betrachteten Verfahren, Methoden und Modelle

Neben allgemeinen Hinweisen zum Einsatz der Verfahren, Methoden und Modelle sind konkrete Hilfestellungen bei der Auswahl und Anwendung für die jeweiligen Verfahren gegeben worden. Weiterhin wurde eine Übersicht zu bereits bestehenden Anwendungshilfen bei der Erstellung von Sicherheitsberichten, sowie zu Software- und Schulungsangeboten zusammengetragen.

Die ausgearbeiteten Empfehlungen und Hilfestellungen zum Einsatz der Verfahren und Modelle stellen im Wesentlichen eine Zusammenfassung von Aussagen entsprechender Literaturquellen dar. Eigene Erfahrungswerte der Forschungsnehmenden sind punktuell eingegangen.

Die Ergebnisse und Erkenntnisse des Projektes wurden zu einem schriftlichen Tutorial „Empfehlungen und Hilfestellungen zur Auswahl und Anwendung Ausgewählter Verfahren, Methoden und Modelle zur Störfallrisikobeurteilung“ ausgearbeitet, welches auf einem abschließenden Fachgespräch (Mai 2024) vorgestellt und diskutiert wurde. Das Tutorial wurde im Nachgang überarbeitet und soll der Öffentlichkeit frei zugänglich gemacht werden und so insbesondere kleineren und mittleren Unternehmen als Hilfestellung dienen.

Im Ergebnis hat das Forschungsprojekt dazu beigetragen, den aktuellen Stand der Störfallrisikobeurteilung im Raum Deutschland und insbesondere die dabei zur Anwendung kommenden Verfahren zu eruieren. Das Konzept des „Standes der Sicherheitstechnik" ist aus Sicht der Vertreter: innen des AISV und der KAS ein bewährtes Instrument zur Bewertung des Anlagenrisikos und sollte nicht um quantitative Ziel- und Grenzwerte, wie sie beispielsweise in den Niederlanden, Flandern oder der Schweiz angewendet werden, ergänzt werden. Probabilistische Analysen sollten demnach ausschließlich als Ergänzung deterministischer Analysen angewandt werden. Verschiedene Behördenvertreter: innen haben mehrfach die praktische Bedeutung von Checklisten-Verfahren hervorgehoben. In der Praxis zur Anwendung kommende Checklisten sind jedoch häufig unternehmensinterne Eigenkreationen und beruhen auf der Expertise der Unternehmen im Bereich der Störfallvorsorge. Inwiefern die Ausarbeitung von freiverfügbaren Checklisten (z.B. im Rahmen eines Forschungsprojektes) eine größere Verbreitung des Verfahrens, bzw. zu qualitätsgerechteren Analysen führen würde, konnte im Rahmen dieses Forschungsprojektes nicht abschließend geklärt werden.

Summary

Link to the Major Accident Ordinance, research projects and literature

The evaluation of research in legal texts, guidelines, specialist literature, research results and reports has shown that the Major Accident Ordinance (Störfall-Verordnung) contains a number of requirements relating to the assessment or identification, analysis and assessment of major accident risks.

For example, a detailed description of the major accident scenarios of possible major accidents is required, along with their probability or the conditions for their occurrence. This includes requirements for the sources of danger to be analyzed and the major accident scenarios to be developed.

The state of safety technology as a central assessment standard for the condition and operation of the systems also requires the use of advanced process engineering procedures, operating methods and precautions to prevent and measures to reduce the effects of major accidents. This implies that the major accident risk assessment is by no means a one-off process. Rather, major accident risk assessments are embedded in the regular determination of the state of safety technology.

In line with the higher risk potential, operators of upper-class operating areas have additional documentation obligations in the form of a safety report.

These requirements are further specified and commented on in the 2004 implementation guide to the Major Accident Ordinance ("Vollzugshilfe zur Störfall-Verordnung"). They are taken up accordingly in the guidelines of the Commission for Plant Safety (KAS), the Major Accident Commission (SFK)[5] and other institutions and commented on in a practical manner or further specified through recommendations (e.g. KAS-55 „Mindestangaben im Sicherheitsbericht", SFK-GAS-33 „Schritte zur Ermittlung des Standes der Sicherheitstechnik" and SFK-GS-41 „Risikomanagement im Rahmen der Störfall-Verordnung").

The research has also shown that in Germany and internationally a large number of procedures, methods and models are used to assess major accident risks or that some have been developed explicitly for the assessment of major accident risks.

The HAZOP procedure, for example, is the classic team-oriented creative technique for identifying possible hazards and deriving the necessary countermeasures. The method itself does not comprise any quantitative or evaluative calculations, which is why it is often used in combination with a risk matrix, a risk graph or the LOPA method. The method focuses on deviations from process-related processes. In practice, sources of danger introduced from outside or external sources are often not part of HAZOP studies. The classic HAZOP is therefore supplemented by other analysis techniques (e.g. special checklists).

For relatively fewer complex topics, the use of checklists is an alternative to HAZOP. This assumes that the dangers and the requirements for dealing with the dangers are already very well-known from experience and/or regulations. By asking specific questions and having a concrete practical relevance, lengthy discussions are avoided.

A risk matrix is an instrument for the (company-internal) assessment of risks and is based on a (semi-)quantitative assessment of the risk.

[5] The „Kommission für Anlagensicherheit" is the successor body to the „Störfall-Kommission (SFK)" and the „Technischer Ausschuss für Anlagensicherheit (TAA)"

The risk graph (here according to VDI/VDE 2180) allows the classification of a safety requirement for a process control system using so-called Safety Integrity Levels (SIL), which in turn are linked to corresponding availability requirements.

The LOPA method does not include a hazard analysis, but is used to assess the intended barriers. For this purpose, a (semi)quantitative assessment of the risk is carried out for each individual scenario - and taking into account the individual barriers/protection levels. The LOPA method in turn uses a risk matrix for (company-internal) risk assessment.

Fault tree analysis is traditionally used to analyze the causes of undesirable system states in complex systems (systems with redundancies and fallback levels). The probabilistic calculations underlying the method allow the expected reliability or availability of the system to be predicted based on the frequency of occurrence of the causes. The top event can not only be the failure of a (safety) function, but also, for example, the event or state in which the operator loses control of the process. The fault tree analysis (together with the event tree analysis) can therefore also be considered or used as an alternative to HAZOP. Another application is, for example, the evaluation or cause analysis of events or near-misses in operation.

The event tree analysis is in a sense the counterpart to the fault tree analysis and is used to analyze the consequences of undesirable system states.

The bow-tie analysis is, in a first approximation, a combination of fault tree and event tree analysis. The focus of the bow-tie methodology is the analysis of the failure possibilities of the barriers and the derivation of measures with which the failure of the barriers can be prevented. Ultimately, the procedure is intended to establish a link to safety management, which is intended to actively monitor and control the effectiveness of the barriers. The bow-tie analysis is typically based on the results of the HAZOP/LOPA study (or comparable).

The scenario analysis/HAZOP master procedure is a computer-based procedure that includes elements of HAZOP, fault tree analysis and checklists. At its core, it provides generic, i.e., pre-formulated fault trees that the user must specify for the system to be analyzed.

Procedures for quantitative risk assessments (QRA) primarily address external safety. The QRA procedures in the Netherlands and Flanders are detailed descriptions or specifications of how the cumulative risk of the Seveso establishments for the environment is to be calculated in the form of the parameters “individual risk” and “social risk”.

The aim of the ARAMIS project (Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the framework of SEVESO II Directive, duration 2002-2005) was to merge the commonly used methods into a holistic and, in particular, uniform methodology for risk analysis. The strengths of the individual qualitative and quantitative methods already in use were to be adopted and combined into a holistic procedure.

In the current research project, these and other procedures, methods and models were examined and presented. An overview is given in Chapter 4.22 "Übersicht recherchierter Methoden, Verfahren und Modelle ".

This variety of procedures, methods and models can be explained on the one hand by the diverse requirements and challenges that operators of Seveso establishments are confronted with and on the other hand by the fact that (almost) none of these procedures can cover all aspects of the accident risk assessment.

First of all, the procedures can be differentiated according to whether they can be used to carry out a hazard analysis, scenario development, consequence analysis calculations or an

assessment of the remaining residual risks. A definition of the individual steps is given in Chapter 3 "Ablauf der Störfallrisikobeurteilung".

Methods such as the HAZOP, fault tree analysis and checklists can be associated with the hazard analysis; scenario development can be carried out using an event tree analysis, consequence analysis calculations are carried out using mathematical/physical models and the (company-internal) assessment of the remaining residual risks can be carried out using risk matrices, risk graphs or LOPA (Layer of Protection Analysis).

The hazard analysis and scenario development methods differ, among other things, in the specification of predefined accident scenarios. While creative techniques such as HAZOP are based entirely on the scientific, technical knowledge of the team members involved, other methods provide generic, i.e. pre-formulated accident scenarios that the user must adapt to the specific situation at the operator. (e.g. checklists, scenario analysis/HAZOP master, ARAMIS method (Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the framework of SEVESO II Directive)).

Other reasons for the variety of procedures, methods and models developed or used include:

- Regulatory framework: In some European countries, risks to the environment (especially to the population) have to be quantified. In this context, procedures for quantitative risk assessments (QRA) with country-specific characteristics have been developed in the relevant countries. In the context of this research project, the procedures in the Netherlands, Flanders and Switzerland in particular should be considered.
- Type of hazard sources investigated: In practice, the HAZOP study often only investigates operational/technical hazard sources. In addition, checklists for environmental hazard sources and interventions by unauthorized persons can be used.
- Different phases in the project process favor the use of different methods: In practice, checklists are sometimes used in feasibility studies to help assess the planning project. In practice, a HAZOP is often only applied during the detailed planning phase, as this analysis is based on a basic safety concept that has already been developed. The fault tree technique is sometimes used to analyse the causes of events (or near-misses) during operation.
- Attempts to develop a uniform procedure: The aim of the ARAMIS project (Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the framework of SEVESO II Directive, duration 2002-2005), for example, was to merge the commonly used methods into a holistic and particularly uniform methodology for risk analysis, the ARAMIS procedure.

The research project also showed that there is no uniform checklist procedure or uniform checklists for specific questions. Rather, institutions and companies have developed and are developing a large number of checklists on different topics, which are used more or less widely. For example, checklists have been developed for

- Hazard field analyses or preliminary hazard analyses to evaluate a planning project in its spatial context,
- Environmental sources of danger and interventions by unauthorized persons (e.g. NAMUR worksheet NA 163),
- Technical rules for mechanical and plant engineering (VDMA standard sheets),

- Checklists for creating explosion and fire protection concepts (e.g. DGUV Information 213-106, DGUV Information 205-001),

The procedures and methods sometimes build on each other or contain elements of other procedures and methods. For example, in the QRA procedures and in the ARAMIS procedure the generic incident scenarios are depicted in the form of fault and event trees. The bow-tie procedure is, in a first approximation, a combination of fault and event tree analysis. The LOPA usually uses a risk matrix. The ARAMIS procedure contains elements of HAZOP, LOPA, fault and event trees, checklists as well as a risk matrix and a risk graph.

The selection of the procedures, methods and models to be used for the accident risk assessment is fundamentally the responsibility of the operator, although a number of procedures, methods and models have been established in the past and are accepted by the authorities. In principle, however, care must be taken to ensure that the accident risk assessment is carried out using a systematic approach tailored to the complexity of the Seveso establishment.

First technical discussion

During the 1st technical discussion in November 2021 with representatives of the AISV[6], the KAS and industry, the methods, procedures and models researched were presented and discussed which of these procedures, methods and models should be examined in detail in the further course of the project[7].

The statements of the technical experts confirmed the research participants' assumption that none of the established methods and procedures can currently be favored regardless of the application. Rather, the majority of respondents support the thesis that different approaches are advantageous for different types of applications (e.g. types of systems or processes) in the area of the Major Accident Ordinance, whereby the cost-benefit ratio and the applicability of the process in relation to the issue play a role. In particular, the contrast between more time-consuming creative techniques (such as HAZOP) on the one hand and alternatives perceived as time-saving, such as the checklist procedure, was highlighted. HAZOP is seen as a suitable method for more complex processes, while the strength of checklists is seen in "simpler" or already well-understood systems. At the same time, concerns or reservations were expressed by the authorities that the use of checklists as a replacement for HAZOP can lead (and in some cases has led) to operators not seriously or sufficiently dealing (or having dealt) with the major accident risks of their systems.

Practical investigations

As a first part of the practical investigations, interviews were conducted with operators and authorities on the current practice of applying procedures, methods and models for accident risk assessment in Germany.

The interviews with selected operators and authorities showed that operators generally use a combination of HAZOP and one of the LOPA, risk graph and risk matrix approaches. The HAZOP procedure is usually used in a modified version in order to be able to address the issues relevant to the company's own operating area in a more targeted manner. The modifications relate to the key word system used. Examples can be found in Chapter 4.4 "BASF-HAZOP und weitere Modifikationen des HAZOP-Verfahrens".

[6] Anlagenbezogener Immissionsschutz / Störfallvorsorge. Ausschuss der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz (LAI)

[7] QRA procedures in the Netherlands/Flanders, methods and procedures in Switzerland, HAZOP/PAAG, dispersion and impact models according to DECHEMA-Process-Net, TÜV-Berlin and the JRC computer programs “ADAM” and “Rapid N”. Also: ZHA (Zurich Hazard Analysis), LOPA (Layer of Protection Analysis), ROGA (Risk-based hazard analysis), FTA/ETA (Fault Tree Analysis / Event Tree Analysis), FME(C)A (Failure Mode Effects and Criticality Analysis), risk graph according to VDI 2180)

Dispersion calculations are carried out for selected accident scenarios, which are usually coordinated with the responsible authorities.

Other analysis techniques are used to further increase the quality of the analyses. These can be, for example, cause-independent, systematic gas dispersion calculations, siting analyses (meaning the search for an advantageous placement of plant components within the operating area) or special checklists or lists of questions on certain topics.

Other topics covered in the interviews included tools used in carrying out accident risk assessments, the need for additional tools, i.e. tools that are not currently available, assessments of probabilistic procedures and the evaluation of the procedures and methods used.

Different software solutions are used for hazard analysis and scenario development as well as for dispersion calculations, some of which are special solutions that cannot be purchased.

Larger companies rely on external specialists to carry out accident risk assessments due to limited capacity, while smaller companies rely on external specialists based on their skills or experience.

The operators consider the training offer to be sufficient and internal and external training is explicitly encouraged. The authorities see potential for improvement in the training offered in some areas (e.g. training in the preparation of safety reports).

Probabilistic methods are generally used to a limited extent, for example as part of a semi-quantitative assessment of the risk using a risk graph or a risk matrix.

The methods used by the operators interviewed are considered by the authorities to be fundamentally suitable for meeting the relevant requirements of the Major Accident Ordinance.

The majority of people consider the hazard analysis to be the most difficult or demanding step in the major accident risk assessment.

The second part of the practical investigations involved testing probabilistic methods. This was done using the methods of fault tree analysis and event tree analysis (FTA, ETA). For this purpose, exemplary major accident scenarios were analyzed in collaboration with several operators of so-called standard plants.

The testing has shown that these methods represent suitable analysis techniques for hazard analysis and the development of major accident scenarios. Any cause-effect chains can be represented in a similar way to the HAZOP approach.

However, quantifying the identified cause-effect chains takes a considerable amount of time. A number of detailed considerations are therefore required to quantify the probability of occurrence of individual sources of danger and the probability of failure of barriers or protective measures.

In particular, the establishment of such analysis techniques in companies would, from the perspective of the research participants, involve increased effort. This could be partially remedied by developing a uniform database that is freely accessible to operators.

The attempt to quantify the frequency of occurrence has confirmed the research participants' suspicion that the result is highly dependent on the source of knowledge selected. As a rule, different sources of knowledge give different frequencies of occurrence and probabilities of failure for a specific event (e.g. technical failure of an apparatus, malfunction, human error). The differences can be several orders of magnitude. The reasons for this are complex (e.g. different industries and application conditions with different load profiles, differences in the age of the

data/statistics on which the estimates of the frequency of occurrence and probabilities of failure are based).

From the perspective of the researchers, the calculated numerical values should therefore be used for comparative considerations (e.g. of alternative plant designs) and not viewed as absolute or necessarily correct figures.

A workshop with representatives of the AISV following the practical investigations showed that from the point of view of the authorities there are basically no reservations about the use of such methods. However, it was made clear that the use of FTA and ETA for the purpose of calculating the cumulative risk of the Seveso establishment (as is required in the Netherlands, Flanders and Switzerland, for example) is not considered to be expedient. An unclear purpose of use would be offset by considerable effort. The central evaluation standard for Germany as a location should continue to be the state of safety technology. The representatives of the AISV strongly advise against the introduction of additional quantitative risk acceptance criteria, as enshrined in law in the above-mentioned countries.

Selection of the procedures to be examined in more detail in the further course of the project

The selection of the six procedures to be examined in more detail in the further course of the project is ultimately based on the specifications of the service description, the research results, the feedback from the first technical discussion and the practical investigations[8].

The selection was as follows:

1. HAZOP
2. HAZOP modifications
3. Methods and procedures in the Netherlands / Flanders (including VROM: “Guidelines for quantitative risk assessment” and Departement Omgeving “RISK CALCULATIONS MANUAL - Guidelines for quantitative risk analysis, indirect risks and environmental risk analysis”)
4. Fault and event tree analysis (FTA and ETA)
5. Layer of Protection Analysis (LOPA)
6. Accidental Risk Assessment Methodology For Industries In The Context Of The Seveso II Directive (ARAMIS)

The reasons that led to the selection or de-selection of individual procedures can be found in Chapter 6.1.

The in-depth investigation of the selected procedures was carried out along the conceptual structure of the accident risk assessment in the following analysis steps: "hazard analysis", "scenario development", "consequence analysis calculations" and "risk assessment".

Hazard analysis

First, the procedures were to be examined and compared in terms of the analysis step of the hazard analysis. HAZOP and FTA are classic creative techniques for identifying and analyzing sources of danger. Differences arise from different perspectives or application contexts. For HAZOP, the starting point of the analysis is the deviation from normal operation. For FTA, however, the starting point can be, for example, the loss of containment event or the failure of a complex technical system. The HAZOP procedure is characterized by the key words used and the iterative procedure in which existing or planned countermeasures are initially omitted. This makes it possible to better work out the contribution of the countermeasures to risk reduction.

[8] According to the terms of reference, six of the researched procedures, methods and models were to be examined in more detail in the project. Three procedures were already specified in the terms of reference, and three further procedures were to be determined by the research participants in consultation with the UBA.

The fault tree analysis is characterized by the investigation of multiple events and, in addition, the probabilistic calculation linked to the fault tree technique for quantifying the top event. The HAZOP method and the fault tree analysis can in principle be used to analyze all types of hazard sources; the HAZOP method is often only used to consider operational/technical hazard sources.

The LOPA is not a hazard analysis method, but builds on it.

The event tree analysis is not a hazard analysis method.

The QRA methods in the Netherlands and Flanders are primarily aimed at external safety. To this end, the cumulative risk of the operating area is calculated in the form of the parameters "individual risk" and "social risk" (for the definition of these parameters, see Chapter 4.18). The specification of applicable substance release scenarios (loss of containment events) and associated occurrence frequencies for calculating these risk indicators does not force or require a hazard analysis.

The ARAMIS method provides generic fault trees for different accident scenarios, which the user can adapt to their own system using a subtraction method (i.e. by deleting irrelevant causes).

None of the methods mentioned provides information or assistance on how the state of the art safety technology can be determined or implemented.

Scenario development

The methods were then examined and presented in comparison for the analysis step of scenario development.

The HAZOP method and the event tree analysis as creative techniques do not provide any specific specifications for the development of accident scenarios. In combination with the application of the LOPA, a risk graph or a risk matrix, the causal chains developed are used to develop balanced and proportionate concepts for preventing accidents or for reducing their effects. The analyses can also serve as a starting point for estimating the extent and severity of accidents and identifying the areas affected by accidents, as well as for determining suitable emergency measures (including alarm and hazard prevention planning).

To develop the scenarios, the QRA procedure manuals in the Netherlands and Flanders provide not only the loss of containment events to be taken into account, but also generic event trees, potential countermeasures to be taken into account and models to be used, including parameters for dispersion and impact calculations. The specifications between the two QRA procedures differ in the details. In the Netherlands, the Safeti-NL software program is to be used, while in Flanders the choice of program is free.

The ARAMIS procedure provides various tools and specifications for developing incident scenarios. These are in particular: generic fault trees, instructions for creating event trees, checklists for possible safety functions and barriers, information on frequencies and probabilities, instructions for analyzing the performance of safety management and a risk graph for assessing the countermeasures. The aim of the procedure is to ensure that

a) a balanced safety concept for internal safety is developed and

b) sufficiently detailed information is provided about expected, possible damage outside the operating area.

Consequence analysis calculations

The next step was to examine the procedures for the analysis step of consequence analysis calculations and to present them in a comparative manner.

The focus of the analysis was on a comparison of the mathematical models that are to be used. In addition to the models used in the QRA procedures, the models discussed in the TÜV Plant Engineering research report "„Ermittlung und Berechnung von Störfallablaufszenarien nach Maßgabe der 3. Störfallverwaltungsvorschrift“ and the Dechema status paper „Auswirkungsbetrachtungen bei störungsbedingten Stoff- und Energiefreisetzungen in der Prozessindustrie - Methodenübersicht und industrielle Anwendung" and models implemented in the EC JRC computer programs "ADAM" and "Rapid-N" were taken into account.

The evaluation of the various sources reveals a sometimes considerable variety of models that have been developed, proposed and used. This can be explained, among other things, by different considerations and assessments. The following aspects should be mentioned here:

- General validity vs. validity for a specific scenario,
- Degree of complexity of the models,
- Computational effort: empirical models up to CFD models,
- Continuity vs. topicality/state of the art science and technology,
- Free availability of the models.

The models used in the QRA procedures in the Netherlands and Flanders are the result of a wide range of validation activities and take scientific studies and findings into account. The models of the QRA procedures are largely the subject of discussion in the TÜV plant engineering research report and the Dechema status paper and are partly implemented in the EC JRC computer programs, which can be interpreted as another positive sign with regard to validity.

Risk assessment

Finally, the finally selected procedures were to be examined for the analysis step of risk assessment and presented in a comparative manner.

The HAZOP procedure does not include any element of risk assessment. However, practical studies have shown that HAZOP is often used in combination with a risk matrix, a risk graph or the LOPA procedure.

With LOPA, a risk assessment is carried out either using risk matrices or alternatively by comparing the target factors with the credit factors (see Chapter 4.8).

The fault tree analysis and event tree analysis are used to represent accident scenarios and to calculate their frequency of occurrence. Risk assessment approaches are not described by the procedures themselves.

The LOPA procedure as well as risk matrices and graphs basically address internal and external risk. However, only individual scenarios are considered and not an overall risk or risk aggregated at the "Seveso establishment" level, as is the case with individual risk or social risk. The specific design of these tools, i.e. in particular the definition of the acceptance criteria, is calibrated within the company. If necessary, calibration is carried out in coordination with the responsible authorities. In principle, however, the techniques mentioned are used with the aim of an internal company risk assessment.

The QRA procedures in the Netherlands and Flanders, as well as the QRA procedure in Switzerland, primarily address external security. The acceptability of the residual risk is linked to various risk parameters. While in the Netherlands and Flanders these are the individual risk and the societal risk, in Switzerland a generalization of the concept of societal risk is applied. In

the Netherlands, the societal risk will be replaced by so-called focus areas from 2024. In Switzerland, in comparison to the Netherlands and Flanders, not only possible fatalities, but also injuries, as well as possible soil and water contamination are quantitatively analyzed. The target and limit values set in all countries are derived from considerations of mortality rates and have been partially adjusted in the past.

Second technical discussion

In October 2023, the results of the in-depth investigations were presented and discussed at a full-day technical discussion. This happened with a view to the remaining work step "Development of recommendations and assistance for the use of the procedures, methods and models under consideration" that was still outstanding at that time.

The most important findings and demands that emerged were

a) broadening the perspective when processing the outstanding work step to include other procedures (including the checklist procedure) and

b) developing a comparative presentation of selected procedures and methods with selection criteria and application instructions. The elaborations should primarily be aimed at operators who have not yet gained any experience with accident risk assessments or at operators of small and medium-sized companies.

Recommendations and assistance for the use of the procedures, methods and models under consideration

In addition to general information on the use of the procedures, methods and models, specific assistance was given in the selection and application of the respective procedures. Furthermore, an overview of existing application aids for the preparation of safety reports, as well as software and training offers, was compiled.

The recommendations and assistance for the use of the procedures and models essentially represent a summary of statements from corresponding literature sources. The research participants' own experiences were included at certain points.

The results and findings of the project were compiled into a written tutorial "Recommendations and assistance for the selection and application of selected procedures, methods and models for accident risk assessment", which was presented and discussed at a final technical discussion (May 2024). The tutorial was subsequently revised and is to be made freely available to the public and thus serve as an aid in particular for small and medium-sized companies.

As a result, the research project has contributed to determining the current state of accident risk assessment in Germany and in particular the procedures used. From the point of view of the representatives of the AISV and the KAS, the concept of the "state of the art safety technology" is a proven instrument for assessing plant risk and should not be supplemented by quantitative target and limit values, such as those used in the Netherlands, Flanders or Switzerland, for example. Probabilistic analyses should therefore only be used as a supplement to deterministic analyses. Various representatives of authorities have repeatedly emphasized the practical importance of checklist procedures. In practice, however, checklists used are often internal company creations and are based on the companies' expertise in the field of accident prevention. To what extent the development of freely available checklists (e.g. as part of a research project) would lead to a wider dissemination of the procedure or to higher quality analyses could not be conclusively clarified within the framework of this research project.

1 Hintergrund und Zielstellung des Vorhabens

1.1 Hintergrund und Problemstellung

Für die Umsetzung der Anforderungen der ersten Störfall-Verordnung (StörfallV) 1980 wurden verschiedene methodische Vorgehensweisen zur Beurteilung von Störfallrisiken entwickelt oder aus anderen Technologiebereichen übertragen.

In den ersten Jahren wurden einfache Verfahren bevorzugt (vgl. Mond-Index, „Tabellenverfahren“) und Hilfestellungen, unter anderem im Auftrag des UBA, erarbeitet (vgl. Muster-Sicherheitsanalysen). Als erheblich anspruchsvolleres Verfahren wurde von den Berufsgenossenschaften das HAZOP-Verfahren bevorzugt. Seine vom BMU vorgesehene verbindliche Einführung scheiterte jedoch. Heute sind chemiespezifische HAZOP-Ableger entwickelt . Entsprechend rechtlichen Vorgaben sowie dem traditionell stark entwickelten Regelwerk wurden in Deutschland deterministische (d.h. regelwerksbasierende) Verfahren bevorzugt.

Im Gegensatz dazu wurden in anderen Staaten probabilistische (risikobasierte) Verfahren entwickelt und bevorzugt. Vor allem in deren Anfangsphase wurden die probabilistischen Verfahren jedoch in Deutschland z.T. heftig kritisiert und abgelehnt. Die Kritik richtete sich insbesondere auf die genutzten Daten für Eintrittswahrscheinlichkeiten von technischem Versagen:

- Die Daten wurden in anderen Technikbereichen gewonnen und übertragen.
- Die Daten basieren immer auf Fehlern in der Vergangenheit, die jedoch bei technischen Weiterentwicklungen berücksichtigt („abgestellt“) wurden.
- Die Daten berücksichtigen die spezielle Auslegung und den speziellen Betrieb der betrachteten Anlage einschließlich Instandhaltung nicht (Theorie von der chemischen Anlage als Unikat).

Zudem müssten Risikoanalysen nicht nur mögliche technische Fehler, sondern auch menschliche Faktoren und das Versagen von Organisationen berücksichtigen. Erhebliche Bedenken bestanden a) gegen deren methodische Behandlung wie technische Fehler und b) die Verfügbarkeit zutreffender Daten zum Eintritt von organisatorischen oder menschlichen Fehlern.

Der Versuch der EU-Kommission durch Projekte des Joint Research Centers zu einer Vereinheitlichung der Verfahren auf der Basis probabilistischer Methoden zu gelangen, deren Ergebnisse auch noch vergleichbar sein sollten, scheiterte deutlich. Vielmehr zeigte sich, dass an gleichen Anlagen je nach Verfahren ein unterschiedlicher Kreis von Gefahrenquellen gefunden wurde oder Gefahrenquellen unterschiedlich bewertet wurden. „Ein“ optimales Verfahren ließ sich bei einigen Verfahrensvergleichsstudien (durchgeführt insbesondere im Zeitraum 1985 bis 1990) nicht finden (Vgl. Amendola et. al. (1992)).

1.2 Ziel und Gegenstand des Vorhabens

Gegenstand des Forschungsvorhabens sind Verfahren, Methoden und Modelle zur Beurteilung von Störfallrisiken. Das Forschungsvorhaben hat insofern die einschlägigen Vorgaben der StörfallV zu berücksichtigen; sein Ziel ist jedoch weder die Erarbeitung einer Interpretation der StörfallV noch die Erstellung eines Leitfadens zur Umsetzung der Anforderungen der StörfallV an Sicherheitsberichte.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist demnach auch nicht die Bestimmung einer optimaler Verfahrensart oder eines optimalen Verfahrenstyps. Vielmehr soll dem jeweiligen Betreiber[9], der Risikobeurteilungen zu erstellen hat, die Auswahl der jeweiligen Verfahren, Methoden und Modellen überlassen bleiben und nur durch die Ausarbeitung von Informationen und Hilfestellungen zu den methodischen Verfahren die Auswahl und Anwendung von Verfahren, Methoden und Modellen erleichtert werden.

1.3 Aufgabenstellung und Arbeitsschritte

Das Vorhaben beinhaltet folgende Aufgaben bzw. Arbeitsschritte:

1. Anknüpfung an Störfall-Verordnung, Forschungsprojekte und Literatur (Kapitel 2, Kapitel 3, Kapitel 4, Kapitel 7).
2. Praxisuntersuchungen: Untersuchung, welche Verfahren, Methoden und Modelle im Raum Deutschland gegenwärtig Anwendung finden. Erprobung probabilistischer Verfahren in Zusammenarbeit mit Betreibern und Anlagenherstellern (Kapitel 5).
3. Festlegung, welche Verfahren, Methoden, und Modelle im weiteren Projektverlauf vertiefend betrachtet werden sollen (Kapitel 6.1).

Die weiteren Arbeitsschritte dienen der vertiefenden Untersuchung und vergleichenden Darstellung der gemäß Arbeitsschritt 3 ausgewählten Verfahren, Methoden und Modelle. Die Arbeitsschritte gliedern sich dabei gemäß einer gedanklichen Gliederung des Analyseprozesses der Störfallrisikobeurteilung:

4. Methoden und Verfahren zur Ermittlung von Gefahrenquellen und Ereignissen, die zu einem Störfall führen können (Gefahrenanalyse) (Kapitel 6.2)
5. Methoden und Verfahren für die Entwicklung von Szenarien (Kapitel 6.3)
6. Methoden und Verfahren zur Abschätzung möglicher Auswirkungen (Kapitel 6.4)
7. Modelle zur Risikobewertung (Kapitel 6.5)

Der abschließende Arbeitsschritt beinhaltet die Erarbeitung von Empfehlungen und Hilfestellungen für Betreiber zum Einsatz der betrachteten Verfahren, Methoden und Modelle (Kapitel 8).

Damit ergeben sich unter anderem folgende, im Laufe des Vorhabens zu klärenden Fragen:

1. Welche Verfahren, Methoden und Modelle der Störfallrisikobeurteilung kommen in der gegenwärtigen Praxis zur Anwendung bzw. werden durch die wissenschaftliche Gemeinschaft diskutiert? (Kapitel 4.3 ff.)
2. Welche Schritte der Störfallrisikobeurteilung decken die Verfahren, Methoden und Modelle jeweils ab? (Übersicht in Kapitel 4.21)
3. Nach welchen Gesichtspunkten sind die Verfahren, Methoden und Modelle zu bewerten? (Kapitel 4.2)
4. Welche Verfahren, Methoden und Modelle sind für eine vertiefende Betrachtung geeignet? (Kapitel 6.1)

Und für die vertiefend zu betrachtenden Verfahren, Methoden und Modelle:

5. Welchen Beitrag leisten die Verfahren der Gefahrenanalyse zur Erfüllung entsprechender Anforderungen der StörfallV? (z.B. Ermittlung von dem Stand der Sicherheitstechnik entsprechenden Vorkehrungen und Maßnahmen. Ermittlung relevanter Gefahrenquellen,

[9] Die Bezeichnung Betreiber kann in der deutschen Sprache auch in der femininen Form „Betreiberin“ gebraucht werden. Da der Gesetzgeber jedoch einheitlich die maskuline Bezeichnung verwendet, wurde von der Verwendung der aktuellen Regeln des Dudens zur geschlechtergerechten Sprache (Betreiber/-in) hier und in ähnlichen Fällen abgesehen.

Ereignisse, Störfalleintrittsvoraussetzungen inklusive Eintrittswahrscheinlichkeiten. Berücksichtigung organisatorischer und menschlicher Fehler) (Kapitel 6.2)

6. Welchen Beitrag leisten die Verfahren der Szenarienentwicklung zur Erfüllung entsprechender Anforderungen der StörfallV? (Ermittlung von Vorkehrungen und Maßnahmen zur Reduzierung des Restrisikos. Abschätzung des Restrisikos. Bestimmung geeigneter Notfallmaßnahmen) (Kapitel 6.3)
7. Bis zu welchem Grad lassen sich Unterschiede in Analyseergebnissen durch die Wahl der Verfahren, Methoden und Modelle erklären? Wie werden Validität und Sensitivität der einzelnen Verfahren, Methoden und Modelle eingeschätzt? (Kapitel 6.3, Kapitel 6.4, Kapitel 6.5)
8. Welche Empfehlungen und Hilfestellungen können den Betreibern bei der Auswahl und Anwendung der zur Verfügung stehenden Verfahren, Methoden und Modelle gegeben werden? (Kapitel 8)
9. Welche Schlussfolgerungen bzw. Empfehlungen können für die Arbeit des Gesetzgebers und für die Arbeit in den Normungsgruppen bzw. Gremien abgegeben werden?

2 Regulierungsrahmen

In diesem und dem folgenden Kapitel sollen auf Basis einer Recherche in Gesetzestexten, Leitfäden, Fachliteratur, Forschungsergebnissen und Berichten

- die wichtigsten Anforderungen an Störfallrisikobeurteilungen aus der StörfallV zusammentragen werden,
- ergänzende Anforderungen mit Relevanz für die praktische Durchführung einer Störfallrisikobeurteilung aus Leitfäden gesammelt werden, sowie
- eine Reflektion der Umsetzbarkeit dieser Anforderungen vorgenommen werden.

Ziel dieser Ausarbeitung soll es sein,

- die gewonnenen Erkenntnisse zum Stand der Anwendung von Methoden, Verfahren und Modellen vor dem Hintergrund der Anforderungen einordnen zu können und so
- bei der späteren Erstellung von praxistauglichen Empfehlungen zur Verfahrensauswahl und -anwendung berücksichtigen zu können.

2.1 Richtlinie 2012/18/EU („Seveso-III-Richtlinie“)

Das deutsche Störfallrecht als Teil des Immissionsschutzrechtes und Chemikalienrechtes ist dem europäischen Umweltgemeinschafts- und Immissionsschutzrecht sowie Chemikalienrecht mit den dafür geltenden Richtlinien und Verordnungen nachgeordnet.

Hierbei ist insbesondere die EU-Richtlinie 2012/18/EU zur Beherrschung der Gefahren schwerer Unfälle mit gefährlichen Stoffen von Bedeutung (genauer: „Richtlinie 2012/18/EU vom 4. Jul 2012 zur Beherrschung der Gefahren schwerer Unfälle mit gefährlichen Stoffen, zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinie 96/82/EG des Rates“, umgangssprachlich auch „Seveso-III-Richtlinie“ genannt[10]).

Die Richtlinie fordert von den Betreibern und zuständigen Behörden für Betriebsbereiche, in welchen bestimmte Mengen von gefährlichen Stoffen vorhanden sind bzw. sein können , dass die notwendigen Maßnahmen ergriffen werden, um schwere Unfälle zu verhüten und deren Folgen für die menschliche Gesundheit und die Umwelt zu begrenzen.

Die Verordnung adressiert u.a. folgende Punkte:

- Die Pflicht zur Erstellung eines Konzeptes zur Verhütung schwerer Unfälle (Artikel 8 der Richtlinie)
- Notwendige Zusammenarbeit zwischen Betreibern und Behörden zur Vermeidung von Dominoeffekten (Artikel 9 der Richtlinie)
- Pflicht der Prüfung und ggf. Änderungen von Konzepten und Berichten bei geplanten Änderungen von Anlagen, Betrieben oder Lägern (Artikel 9 der Richtlinie)
- Die Pflicht der Erstellung von Sicherheitsberichten (Artikel 10 der Richtlinie)
- Erstellung interner und externer Notfallpläne (Artikel 12 der Richtlinie)

[10] Der fachsprachliche Name Seveso-Richtlinie geht auf den bekannten Chemieunfall in der italienischen Stadt Seveso im Jahre 1976 zurück, welcher zu einer stärkeren Regulierung des Sektors Chemieanlagen in Bezug auf deren Sicherheit führte

- Aspekte der Flächennutzung (Artikel 13 der Richtlinie)
- Die Unterrichtung der Öffentlichkeit über die von Betrieben ausgehenden Gefahren und das Verhalten bei Unfällen (Artikel 14 der Richtlinie)
- Öffentliche Konsultationen und Öffentlichkeitsbeteiligung am Entscheidungsverfahren (Artikel 15 der Richtlinie)
- Maßnahmen, welche von Betreibern und Behörden und ggf. Mitgliedsstaaten nach einem schweren Unfall zu ergreifen sind (Artikel 16 – 18 der Richtlinie)
- Inspektionspflichten der Behörden (Artikel 20).

Die Richtlinie unterscheidet zwischen Betrieben der unteren und oberen Klasse (je nach Menge der im Betrieb vorhandenen gefährlichen Stoffe – s. Artikel 3 und Anhang I der Richtlinie). Die Anforderungen an die Betriebe der oberen Klasse sind strenger, sie müssen zum Beispiel einen Sicherheitsbericht erstellen (s. Artikel 10 der Richtlinie i.V. Anhang II der Richtlinie).

Das Sicherheitsmanagementsystem muss – unabhängig von der Einstufung als Betrieb der unteren oder oberen Klasse – auf einer Risikobeurteilung beruhen (s. Anhang III – Buchstabe a) der Richtlinie). Dies soll sicherstellen, dass die Ausprägung des Sicherheitsmanagementsystems den Gefahren, Industrietätigkeiten und der Komplexität der Betriebsorganisation angemessen ist.

Die aktuell geltende Richtlinie (Richtlinie 2012/18/EU) ist seit 01. Juni 2015 gültig. Sie ersetzt die seit 1985 bzw. seit den 90er Jahren geltenden Vorgänger. Ein wesentlicher Aktualisierungsanlass war die Anpassung der Gesetzgebung an das Global Harmonisierte System (GHS) zur Einstufung gefährlicher Stoffe. Die wichtigsten Änderungen betreffen u.a. (s.a. BDE (2018)):

- Änderungen Anwendungsbereich des Störfallrechts
- Anpassung von Stoffarten und Stoffmengen
- störfallrechtliches Genehmigungsverfahren für immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftige Anlagen
- neue Regelungen für die Öffentlichkeitsbeteiligung
- Weiterentwicklung der Regelungen zu Sicherheitsabständen

In Abhängigkeit der verwendeten Stoffe entlastet die Verordnung einige Betreiber um bislang bestehende Berichtspflichten und viele Betreiber fielen aus dem Anwendungsbereich der Störfall-Verordnung heraus (Vgl. ZVO (2023)).

Allerdings wurden mit der Umsetzung der Seveso-III-Richtlinie in deutsches Recht erstmalig auch Betriebe, welche bisher nicht immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftig waren, unter bestimmten Konstellationen störfallrechtlich genehmigungsbedürftig (z. B. Läger mit umweltgefährlichen Stoffen (Vgl. Mittendorf (2021))).

Verordnungen gelten im Europarecht unmittelbar, während Richtlinien in nationales Recht umgesetzt werden müssen und demzufolge an die Mitgliedsstaaten adressiert sind.

Die Bestimmungen der Seveso-Richtlinien sind im deutschen Recht hauptsächlich

- Mit der Störfall-Verordnung (12. BImSchV) und

- dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG),

aber auch mit dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) sowie Gesetzen auf Länderebene (z.B. Landes-Immissionsschutzgesetzen, Katastrophenschutzgesetzen) umgesetzt.

2.2 Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)

Mit seiner Einführung im Jahr 1974 sollte das „Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge“ (oder kurz Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)) die Grundlage für ein bundeseinheitliches Regelwerk für den Kernbereich des Umweltschutzes schaffen.

Da es um die Vermeidung negativer Auswirkungen der Existenz und des Betriebes von Anlagen, Produkten oder Verkehrssystemen geht, handelt es sich beim Bundes-Immissionschutzgesetz um technisches Recht, das zur Vermeidung regional unterschiedlicher Belastungen, wie in allen entsprechenden Bereichen technischen Rechts auch, bundeseinheitlich sein musste.

Im Laufe der Jahre wurde das Gesetz stetig weiterentwickelt und außerdem an das geltende Europäische Recht angepasst. Dies betrifft vor allem die Umsetzung der den Rechtsgegenstand des Gesetzes berührenden Richtlinien, wie z.B. Richtlinie 2002/49/EG „Umgebungslärmrichtlinie“ und die Richtlinie 2012/18/EU „Seveso-III-Richtlinie“.

Mit dem BImSchG sollen schädlichen Umweltauswirkungen menschlicher Tätigkeiten auf Menschen, Atmosphäre, Flora und Fauna sowie Kultur- und Sachgütern vermieden werden. Der Immissionsschutz soll vor allem dadurch gewährleistet werden, dass Emissionen verhindert werden, weshalb Genehmigungen an entsprechende Auflagen gekoppelt sind.

Das Bundes-Immissionsschutzgesetz dient als Genehmigungsrecht für Industrie- und Gewerbeanlagen sowie auch in privaten Haushalten genutzte technische Einrichtungen jeglicher Art (z.B. Rasenmäher, Laubbläser, Kaminöfen, Altglassammelbehälter, Pistenraupe, Sportanlagen, Hoch- und Niederfrequenz sowie Gleichstromanlagen).

Das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) besteht aus mehreren Teilen:

- **Erster Teil:** Allgemeine Vorschriften (inkl. Begriffsbestimmungen)
- **Zweiter Teil:** Errichtung und Betrieb von Anlagen (genehmigungsbedürftig und nicht genehmigungsbedürftig)
- **Dritter Teil:** Beschaffenheit von Anlagen, Stoffen, Erzeugnissen, Brennstoffen, Treibstoffen und Schmierstoffen; Treibhausgasminderung bei Kraftstoffen
- **Vierter Teil:** Beschaffenheit und Betrieb von Fahrzeugen, Bau und Änderung von Straßen und Schienenwegen
- **Fünfter Teil:** Überwachung und Verbesserung der Luftqualität, Luftreinhalteplanung, Lärmminderungspläne
- **Sechster Teil:** Lärmminderungsplanung
- **Siebenter Teil:** Gemeinsame Vorschriften
- **Achter Teil:** Schlussvorschriften

Das Genehmigungsverfahren ist vergleichsweise anspruchsvoll, da sämtliche Umweltaspekte (Luftqualität, Lärm, Stoffemissionen, elektromagnetische Strahlung usw.) zu berücksichtigen sind.

Die Genehmigung ist dabei an eine Vielzahl von Pflichten gebunden, deren Einhaltung im Gegenzug einen Rechtsschutz für den Betreiber von Analgen gegen privatrechtliche und öffentlich rechtliche Forderungen garantiert.

Die Betreiber von Anlagen müssen für Errichtung, Betrieb und Stilllegung nach §5 Nr. 1 BImSchG „Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen“ treffen. Dies muss insbesondere durch dem „Stand der Technik“ entsprechende Maßnahmen gewährleistet werden.

Der Begriff „Stand der Technik“ wird in §3 Abs. 6 BImSchG erläutert (s. Glossar). In der Anlage zum BImSchG werden dazu entsprechende Kriterien definiert, welche für die Bestimmung des Standes der Technik heranzuziehen sind.

Der Stand der Technik unterliegt einer dynamischen Weiterentwicklung, d.h. die von den Normungsgremien herausgegebenen Normen als „Allgemein anerkannte Regeln der Technik“ sind nur dann maßgebend, wenn Sie den erreichten Stand der Technik auch abbilden. Zum Stand der Technik bzw. dem Stand der Sicherheitstechnik als dessen Teilmenge sei hierbei auch auf die folgenden Kapitel verwiesen (s.a. Abschnitt 3.2.2.5).

Insbesondere hat der Betreiber entsprechend §5 BImSchG dafür zu sorgen, dass „von der Anlage oder dem Anlagengrundstück keine schädlichen Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft hervorgerufen werden können“.

Dazu gehört auch „die Notwendigkeit, Unfällen vorzubeugen und deren Folgen für den Menschen und die Umwelt“ zu verringern (BImSchG; Anlage (zu § 3 Abs. 6) - Kriterien zur Bestimmung des Standes der Technik).

In diesem Zusammenhang haben die Betreiber genehmigungsbedürftiger Anlagen einen (oder mehrere) Störfallbeauftragte zu bestellen, sofern dies im Hinblick auf die Art und Größe der Anlage wegen der bei einer Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs auftretenden Gefahren für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft erforderlich ist (§58a BImSchG). Die Bundesregierung bestimmt nach Anhörung der beteiligten Kreise (§ 51 BImSchG) durch Rechtsverordnung mit Zustimmung des Bundesrates diejenigen genehmigungsbedürftigen Anlagen, deren Betreiber Störfallbeauftragte zu bestellen haben.

Die bzw. der zu bestellende Störfallbeauftragte hat entsprechend der Vorgaben des §58b BImSchG folgende Aufgaben.

Aufgaben des bzw. der Störfallbeauftragten (§58b BImSchG)
► auf die Verbesserung der Sicherheit der Anlage hinwirken
► dem Betreiber unverzüglich ihm bekannt gewordene Störungen des bestimmungsgemäßen Betriebs mitteilen, die zu Gefahren für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft führen können
► die Einhaltung der Vorschriften des BImSchG und der auf Grund dieses Gesetzes erlassenen Rechtsverordnungen (insbesondere die Störfall-Verordnung im folgenden Abschnitt) sowie die Erfüllung erteilter Bedingungen und Auflagen im Hinblick auf die Verhinderung von Störungen des bestimmungsgemäßen Betriebs der Anlage überwachen, insbesondere durch Kontrolle der

Betriebsstätte in regelmäßigen Abständen, Mitteilung festgestellter Mängel und Vorschläge zur Beseitigung dieser Mängel,

- Mängel, die den vorbeugenden und abwehrenden Brandschutz sowie die technische Hilfeleistung betreffen, unverzüglich dem Betreiber melden

Da das deutsche Bundes-Immissionschutzgesetz nur allgemeine Regelungen enthält, wird es durch derzeit etwa 40 untergesetzlichen Regelungen (Verordnungen) mit Anforderungen an Geräte, Fahrzeuge, Anlagen und Genehmigungsverfahren ergänzt. Diese beinhalten eine Vielzahl von sektorspezifischen Teilaspekten.

Diese Verordnungen werden mit Ermächtigung des § 7 BImSchG („Rechtsverordnungen über Anforderungen an genehmigungsbedürftige Anlagen“) vom Bund mit Anhörung durch den Bundesrat erlassen.

Zu diesen Verordnungen zählt auch die Störfall-Verordnung als 12. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (12. BImSchV), dessen Einhaltung von der bzw. dem Störfallbeauftragten zu überwachen ist.

Neben den Verordnungen ist die Bundesregierung entsprechend §48 BImSchG gleichfalls ermächtigt, Verwaltungsvorschriften zur Durchführung des BImSchG zu erlassen. Dazu gehört auch die den Bereich der Störfall-Verordnung berührende, im Zuge der Anpassung des deutschen Rechtsrahmens an die Anforderungen der Seveso-III-Richtlinie geplante, TA Abstand (Technische Anleitung Abstand), welche Kriterien zur Festlegung zulässiger Mindestabstände zwischen Betriebsbereichen bzw. Anlagen und Gebiete öffentlichen Interesses beinhalten sollte (Vgl. Müggenborg (2021)).

2.3 Störfall-Verordnung

2.3.1 Stellung im Ordnungsrahmen

Die Störfall-Verordnung (StörfallV[11]) ist in Deutschland die zentrale Vorschrift zur technischen Sicherheit von Industriebetrieben oder Lägern, in denen größere Mengen gefährlicher Stoffe gehandhabt werden (Vgl. LUBW (2021)). Erstmals verabschiedet am 27. Juni 1980, ist die Störfall-Verordnung als Zwölfte Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz seit über 40 Jahren anzuwenden.

Mit der Novellierung der Störfall-Verordnung 2000 erfolgte insbesondere die Abkehr von der bis dahin üblichen anlagenbezogenen Sicherheitsanalyse hin zur betriebsbereichsbezogenen Betrachtung (s.a. Leitfaden KAS-55 (2021); Einleitung) entsprechend der im Rahmen des örtlichen Verantwortungsbereiches der Betreiber dort insgesamt vorhandenen Stoffmengen, Anlagen und Nutzungen.

Im Jahre 2017 erschien die jüngste Neufassung der Verordnung, welche die Änderungen im Zuge des Ersatzes der Seveso-II-Richtlinie (Richtlinie 96/82/EG) durch die Seveso-III-Richtlinie (2012/18/EU) in nationales Recht umsetzt. Wesentliche Änderungen betrafen u. a. die Angleichung der Einstufung von Stoffen und Gemischen an die CLP-Verordnung (Anhang I) und die Informationspflichten der Öffentlichkeit für Betriebsbereiche der unteren Klasse. Seit 2017 sind im Zuge der Umsetzung dieser Anforderungen auch Betriebsbereiche bzw. Anlagen in Betriebsbereichen, welche vorher nicht immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftig waren, bei bestimmten Konstellationen störfallrechtlich genehmigungsbedürftig (Vgl.

[11] In den folgenden Ausführungen wird die Störfall-Verordnung einheitlich mit StörfallV abgekürzt, auch wenn sich in den Kurzbezeichnungen gelegentlich Unterschiede finden (z. B. s. BfGA (2021)).

Mittendorf (2021)). 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 durch die Störfall-Verordnung bestimmte Betreiberpflichten erfüllen (s. § 3 ff. der Verordnung), wobei in Abhängigkeit vom Gefahrenpotenzial der zu handhabenden Stoffmengen erweiterte Pflichten greifen können (§ 9 - §12 der Störfall-Verordnung).

2.3.2 Anforderungen an das Sicherheitsmanagement

Alle Betreiber müssen entsprechend § 8 der StörfallV ein Konzept zur Verhinderung von Störfällen vorlegen, welches Bestandteil des Sicherheitsberichtes sein kann, den Betreiber von Betriebsbereichen der oberen Klasse erstellen müssen.

Das Konzept ist vor der Inbetriebnahme der Anlage auszuarbeiten und der zuständigen Behörde auf Verlangen vorzulegen.

§ 8 der StörfallV verpflichtet die Betreiber von Betriebsbereichen der oberen und unteren Klasse, die Umsetzung dieses Konzeptes grundsätzlich durch ein Sicherheitsmanagementsystem sicherzustellen, dass den Anforderungen des Anhang III der StörfallV genügen muss.

Insbesondere muss das Sicherheitsmanagementsystem den Gefahren, Tätigkeiten und der Komplexität der Betriebsorganisation angemessen sein und auf einer Risikobeurteilung beruhen.

Im Rahmen dieses Sicherheitsmanagementsystems ist die Ermittlung und Bewertung von Gefahren (Anhang III StörfallV; Abs. 2 b) sicherzustellen. Gefordert ist:

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

Die StörfallV macht keine Angaben zu zulässigen Verfahren der Gefahrenanalyse.

Die StörfallV lässt gleichfalls offen, wie eine Abschätzung der Wahrscheinlichkeit und Schwere solcher Vorfälle zu erfolgen hat. Anhang II Teil IV der StörfallV formuliert eine etwas abgeschwächt Anforderung, indem sie eine „Eingehende Beschreibung der Szenarien möglicher Störfälle nebst ihrer Wahrscheinlichkeit oder (!) den Bedingungen für ihr Eintreten“ fordert. Der KAS-Leitfaden 55 („Mindestangaben im Sicherheitsbericht) stellt klar, dass in der Regel qualitative Angaben (z.B. „sehr gering“, „gering“ oder „hoch“) gemacht werden (und ausreichend sind). Begriffsbestimmungen, z.B. zu den Begriffen „Tätigkeit“ und „bestimmungsgemäßer Betrieb“ sind in der Vollzugshilfe zur StörfallV[12] bereitgestellt (s. Abschnitt 2 der Vollzugshilfe).

§ 8 Abs. 4 der StörfallV fordert eine anlassbezogene Anpassung des Konzeptes zur Verhinderung von Störfällen und des Sicherheitsmanagementsystems sowie der Verfahren zu dessen Umsetzung:

[12] Vollzugshilfe zur Störfall-Verordnung vom März 2004. Herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

- mindestens alle fünf Jahre (nach erstmaliger Erstellung oder Änderung)
- vor einer Änderung nach § 7 Abs. 3 StörfallV
- bei einem meldepflichtigen Ereignis
  (entsprechend Anhang VI Teil 1 StörfallV; s. Glossar)

Als Änderung kann hier – insofern sie störfallrelevant ist – verstanden werden[13]:

- Änderung der Menge, Art oder physikalischen Form eines gefährlichen Stoffes gegenüber den Angabe nach § 7 Abs. 1 der Störfall-Verordnung, insbesondere wenn damit eine Änderung der Einstufung in obere und untere Klasse nach § 2 StörfallV einhergeht (s.a. Glossar)
- Alle baulichen Änderungen, sofern sie die Zone des explosionsgefährdeten Bereichs ändern
- Änderung von Verfahren, Rezepturen oder Betriebsparametern
- Änderungen an technischen Einrichtungen wie PLT-Einrichtungen (Achtung: nicht nur Sicherheitseinrichtungen) oder Feuerlöschanlagen.
- Stilllegung Anlage oder Anlagenteil, Betreiberwechsel.

Zur Bestimmung meldepflichtiger Ereignisse und der aus so einem Ereignis entstehenden Verpflichtungen für Behörden und Betreiber wurde von der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz ein Leitfaden zur Erfassung, Aufklärung und Auswertung von meldepflichtigen Ereignissen im Sinne der Störfall-Verordnung erarbeitet[14]..

Hinsichtlich des Sicherheitsmanagements geht aus Anhang III der StörfallV hervor, welche Aspekte im Rahmen des Sicherheitsmanagements geregelt sein müssen:

[13] Gemäß Vollzugshilfe Störfall-Verordnung

[14] Leitfaden der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz zur Erfassung, Aufklärung und Auswertung von meldepflichtige Ereignisse im Sinne der Störfall-Verordnung („LAI-Leitfaden meldepflichtige Ereignisse im Sinne der Störfall-Verordnung"). 1993 erstellt und 2018 vom AISV (Anlagenbezogener Immissionsschutz/Störfallvorsorge) aktualisiert: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3225/dokumente/lai_leitfaden_meldepflichtige_ereignisse_stoerfall-verordnung_stand_april_2018.pdf

Tabelle 1: Sicherheitsmanagement nach Anhang III der StörfallV

Bereich	Zu behandelnde Informationen
Organisation und Personal	• Aufgaben und Verantwortungsbereiche • Maßnahmen, zur Sensibilisierung der Mitarbeiter/-innen und Verantwortlichen, ggf. der Mitarbeiter/-innen von Subunternehmen • Ausbildungs- und Schulungsbedarf • Nachweis der erforderlichen Ausbildungs- und Schulungsmaßnahmen
Ermittlung und Bewertung der Gefahren von Störfällen	• systematische Ermittlung der Gefahren von Störfällen bei bestimmungsgemäßem und nicht bestimmungsgemäßem Betrieb, • Ermittlung von Gefahren bei Tätigkeiten, die als Unteraufträge vergeben sind • Wahrscheinlichkeit und der Schwere solcher Störfälle (Schätzung)
Überwachung des Betriebs	• Verfahren und Anweisungen für den sicheren Betrieb, • Verfahren und Anweisungen für Wartung der Anlagen, • Alarmmanagement und zeitlich begrenzten Unterbrechungen, • Überwachungs- und Prüfverfahren, mit denen die Wahrscheinlichkeit von Systemausfällen sinkt, • Risiken durch Alterung oder Korrosion von Anlagenteilen und Maßnahmen dagegen, • Anlagenteilen im Betriebsbereich sowie Strategie und Methodik zu deren Überwachung und Prüfung, • erforderlichen Schutzmaßnahmen
Sichere Durchführung von Änderungen	• Festlegung und Anwendung von Verfahren zur Planung von Änderungen bestehender Anlagen oder Verfahren oder zur Auslegung einer neuen Anlage oder eines neuen Verfahrens
Planung für Notfälle	• Verfahren, mit denen vorhersehbare Notfälle ermittelt werden • Alarm- und Gefahrenabwehrpläne (Analyse, Erstellung, Erprobung und Überprüfung) • Ausbildung für alle Beschäftigten des Betriebsbereichs, einschließlich des relevanten Personals von Subunternehmen
Überwachung der Leistungsfähigkeit des Sicherheitsmanagementsystems	• Kontrolle, wie das Konzept zur Verhinderung von Störfällen und das Sicherheitsmanagementsystem wirken • Mechanismen zur Untersuchung und Korrektur, falls die Wirkung nicht erzielt wird • System für die Meldung von Ereignissen, vor allem wenn Schutzmaßnahmen versagt haben§ Untersuchungen und Folgemaßnahmen, bei denen Erfahrungen aus betrieblichen und außerbetrieblichen Ereignissen genutzt werden
Systematische Überprüfung und Bewertung	• Verfahren, mit denen regelmäßig und systematisch das Konzept zur Verhinderung von Störfällen überprüft und Wirksamkeit und Angemessenheit des Sicherheitsmanagementsystems kontrolliert werden • Dokumentation zur Leistungsfähigkeit des Konzepts und des Sicherheitsmanagementsystems • Aktualisierung und ggf. Änderungen des Konzeptes

Durch die StörfallV werden keine bestimmten Vorgaben zur Dokumentation des Sicherheitsmanagementsystems gemacht. Es sollten jedoch allgemein anerkannte Regeln der Technik beachtet werden - z.B. KAS-19 (siehe auch Kap. 8.3.2), VDI 2180 und ggf. weitere relevante Anforderungen.

Aus den Bestimmungen der StörfallV lassen sich für die Störfallrisikobeurteilung Aktualisierungszeitpunkte ableiten. Zu diesen Zeitpunkten soll die Ermittlung und Bewertung der Gefahren überprüft und bei Bedarf fortgeschrieben werden. Nicht immer wird hierbei ein Anpassungsbedarf bestehen. Anlässe sind:

- Im Zuge der Neuplanung einer Anlage: Vor der Fertigstellung des Konzeptes zur Verhinderung von Störfällen bzw. vor der Fertigstellung des Sicherheitsberichtes
- mindestens alle 5 Jahre nach erstmaliger Erstellung (§ 8 Abs. 4 StörfallV bzw. § 9 Abs. 5 StörfallV)
- bei einer störfallrelevanten Änderung nach § 3 Absatz 5b BImSchG
- Bei neuen Erkenntnissen zum Stand der Sicherheitstechnik (z.B. neue Normenstände, Störfälle bei vergleichbaren Verfahren/Anlagen, …)
- nach einem Ereignis gemäß Anhang VI Teil 1 der StörfallV sowie nach „Beinahe-Störfällen“ und Störungen mit Beteiligung gefährlicher Stoffe
- zu jedem anderen Zeitpunkt, wenn neue Umstände dies erfordern, oder um den neuen sicherheitstechnischen Kenntnisstand sowie aktuelle Erkenntnisse zur Beurteilung der Gefahren zu berücksichtigen

Die Störfallrisikobeurteilung ist somit ein fortlaufender Prozess im gesamten Anlagenlebenszyklus.

2.3.3 Anforderungen an den Sicherheitsbericht

Betreiber von Betriebsbereichen der oberen Klasse haben vor Inbetriebnahme einen Sicherheitsbericht zu erstellen und diesen über die Betriebsphase hinweg aktuell zu halten. Die Mindestangaben für den Sicherheitsbericht sind in Anhang II der StörfallV definiert:

I. Informationen über das Managementsystem und die Betriebsorganisation im Hinblick auf die Verhinderung von Störfällen (Sicherheitsmanagement nach Anhang III)

II. Umfeld des Betriebsbereichs

III. Beschreibung der Anlagen des Betriebsbereichs

IV. Ermittlung und Analyse der Risiken von Störfällen und Mittel zur Verhinderung solcher Störfälle

V. Schutz- und Notfallmaßnahmen zur Begrenzung der Auswirkungen von Störfällen

Anhang II Abschnitt III begrenzt die zu leistende Beschreibung auf sicherheitsrelevante Teile des Betriebsbereiches. Anlagenteile sind sicherheitsrelevant, wenn bei deren Versagen oder Fehlen ein Störfall nicht auszuschließen ist.

Die in Anhang II aufgeführten Dokumentationspflichten sind als eine Anforderung zur sachgerechten Dokumentation im Rahmen der Berichtspflichten gegenüber den Behörden zu

verstehen, nicht aber als Vorgabe, mit welchen Verfahren und Methoden die Gefahrenanalysen und Risikobewertungen im Rahmen eines Sicherheitsmanagementsystems zu verfertigen sind.

Erstellung- und Aktualisierunganlässe:

- Der Betreiber hat der zuständigen Behörde den Sicherheitsbericht innerhalb einer angemessenen, von der zuständigen Behörde gesetzten Frist vor Inbetriebnahme vorzulegen (§ 9 Abs. 4 StörfallV).
- Der Betreiber hat den Sicherheitsbericht bei Änderungen jeglicher Art zu aktualisieren (u.a. Anpassung SMS/Konzept Verhinderung von Störfällen, neue/andere Anlagenteile, neue/andere verfahrentechnische Prozesse, veränderte Umgebungsbedingungen).
- Der Betreiber hat den Sicherheitsbericht bei meldepflichtigen Ereignissen, bzw. bei neuen sicherheitstechnischen Kenntnisstand zu aktualisieren.

Weitere Hinweise zur Erstellung von Sicherheitsberichten können dem Kapitel 8.3 entnommen werden.

2.3.4 Zusammenfassung der Anforderungen der Störfall-Verordnung

Folgende Bestimmungen der Störfall-Verordnung sind von besonderer Bedeutung für die Störfallrisikobeurteilung:

- Um die Betreiberpflichten des § 3 der StörfallV erfüllen zu können, sind Risiken von Störfällen zu ermitteln und zu analysieren. Insbesondere sind Mittel zur Verhinderung solcher Störfälle sowie Schutz- und Notfallmaßnahmen zur Begrenzung der Auswirkungen von Störfällen festzulegen.

Als zentraler Bewertungsmaßstab für die Angemessenheit der Vorkehrungen und Maßnahmen dient der Stand der Sicherheitstechnik, der aus einer Vielzahl von Erkenntnisquellen zu bestimmen und iterativ mit dem Bearbeitungsstand der Gefahrenanalyse abzugleichen ist.

- Die Einhaltung bestimmter Risikogrenzwerte wird hingegen nicht gefordert (s.a. Bericht SFK-GS-41, Abschnitt 1 „Ziel, Zweck und Grenzen des Berichtes“). Probabilistische Forderungen nach einem bestimmten Sicherheitsniveau (z. B. 1 Ausfall bei 1000 Anforderungen) werden in der StörfallV oder in Verwaltungsvorschriften, Richtlinien und Leitfäden, welche die Verordnung konkretisieren, nicht gestellt.
- Die Störfall-Verordnung schließt keinesfalls aus, dass neben der in Deutschland angewendeten deterministischen Vorgehensweise auch probabilistische Elemente oder quantitative Betrachtungen in den Risikoanalysen enthalten sein dürfen bzw. nach Stand der Sicherheitstechnik auch enthalten sein müssen (s. dazu auch Leitfaden SFK-GS-41).
- Solche Betrachtungen sind beispielsweise im Bereich der funktionalen Sicherheit für PLT-Sicherheitseinrichtungen zum Nachweis der Sicherheitsintegrität Standard (s.a. Abschnitt 4.7).
- Die StörfallV beinhaltet eine Reihe von Anforderungen mit Bezug zur Methodik und dem Analyseumfang, zu den zu analysierenden Gefahrenquellen und Störfallablaufszenarien und zu den Dokumentationspflichten gegenüber den Behörden im Sicherheitsbericht bzw. dem Konzept zur Verhinderung von Störfällen.

- § 9 der StörfallV stellt an die Betreiber der oberen Klassen besondere Dokumentationspflichten und fordert den Nachweis der Umsetzung der entsprechend der StörfallV notwendigen Maßnahmen in einem anlassbezogen zu aktualisierenden Sicherheitsbericht, der von den Behörden geprüft wird. Dessen Gegenstand sind auch Ausführungen zur Gefahrenanalyse und Risikobewertung entsprechend des Anhang III der StörfallV.

3 Ablauf der Störfallrisikobeurteilung

3.1 Überblick

Allgemeine Ablaufschemata deterministischer sowie probabilistischer Störfallrisikobeurteilungen sind unter anderem im SFK-Bericht SFK-GS-41 erarbeitet worden. Für das vorliegende Projekt wird anhand einer weniger detaillierten Gliederung dargestellt, inwiefern die im Rahmen des Forschungsprojektes identifizierten Methoden, Verfahren und Modelle einen Beitrag zu den einzelnen Analyseschritten leisten können:

Tabelle 2: Analyseschritte der Störfallrisikobeurteilung

Analyseschritt	Beschreibung Analyseschritt	Bezug zur StörfallV (nicht abschließend)	Vergl. SFK-GS-41, Kap. 4.1
Gefahren-analyse	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)	Schritte 4 und 5
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. Vollzugshilfe zur Störfall-Verordnung Kap. 9.2.6.2	Schritt 6
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.	Schritte 7, 8 und 9
Risiko-bewertung	(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.	Schritt 10

Die der Störfallrisikobeurteilung vor- und nachgelagerten Schritte wurden im Rahmen des Projektes nicht vertiefend untersucht.

Vorgelagerte Schritte:

- Zielvereinbarung (Schutzziel, etc.),

- Systembeschreibung und
- Bestimmung sicherheitsrelevanter Anlagenteile.

Nachgelagert (bzw. prozessbegleitend):

- Risikokommunikation (heute: begleitender Zwei-Wegeprozess).

3.2 Betrachtung der einzelnen Schritte

Nachfolgend werden die aus der StörfallV resultierenden Anforderungen an die einzelnen Schritte dargestellt und Empfehlungen zu deren Umsetzung aufgezeigt. Inwiefern die verschiedenen Verfahren, Methoden und Modelle ihren jeweiligen Beitrag zur Umsetzung der Anforderungen leisten können, wird in Kapitel 4 dargestellt.

3.2.1 Vorgelagerte Schritte

Ziel der Durchführung der Gefahrenanalyse bis Störfallrisikobewertung ist generell die Freiheit des analysierten Systems von nicht akzeptablen Risiken.

Um zu prüfen, welche Risiken akzeptabel sind, benötigt es

1. einer Definition der Schutzziele
2. einer Festlegung der Risikoakzeptanzkriterien (z.B.: Einhaltung des Standes der Sicherheitstechnik, Einhaltung von Grenz- und Zielwerten für Individual- und Gruppenrisiko)

3.2.1.1 Schutzziel

Die zu schützenden Güter der Störfall-Verordnung ergeben sich aus der Definition der „ernsten Gefahr“ (s. Glossar) in §2 der StörfallV.

Schutzgüter nach §2 der StörfallV:

- Schutz von Leben und vor schwerwiegende Gesundheitsbeeinträchtigungen von Menschen
- Schutz vor Beeinträchtigung der Gesundheit einer großen Zahl von Menschen
- Schutz der Umwelt (insbesondere: Tiere, Pflanzen, Boden, Wasser, Atmosphäre)
- Schutz von Kulturgütern
- Schutz sonstige Sachgüter

Die Störfall-Verordnung fordert den Schutz von Umwelt und Gütern dann, wenn durch eine Veränderung ihres Bestandes oder deren Nutzbarkeit das Gemeinwohl beeinträchtigt würde.

Die Vollzugshilfe zur StörfallV definiert die Schutzziele noch genauer, wobei jedoch die Umwelt- und Sachschutzziele weniger genau abgegrenzt sind. Insbesondere die Begriffe „nachhaltige Gefährdung“, „schwerwiegende Beeinträchtigung“ sind nicht weiter spezifiziert:

Tabelle 3: Schutzkriterien entsprechend Vollzugshilfe zur StörfallV

Schutzziel	Kriterium für eine ernste Gefahr	Beispiel
Leben und Gesundheit von Menschen	Das Leben nur eines Menschen ist konkret gefährdet.	-
	Schwerwiegende Gesundheitsbeeinträchtigungen für einen Menschen sind zu befürchten.	Verlust von Körperteilen oder Körperfunktionen (z.B. Sehfähigkeit oder Gehör), die dauernde Entstellung oder eine unheilbare oder erst nach längerer Zeit heilbare Verletzung oder Erkrankung
	nicht schwerwiegende Gesundheitsbeeinträchtigung für das Vorliegen einer ernsten Gefahr aus, wenn eine größere Zahl von Menschen betroffen ist	Schwelle zur Gesundheitsbeeinträchtigung wird überschritten, wenn bestimmte Körperfunktionen ausgelöst oder gehemmt werden (z.B. durch eine Emission unmittelbar ausgelöster Brechreiz, Erbrechen). Für die Bewertung, ob eine Zahl von beeinträchtigten Personen als groß anzusehen ist, ist in erster Linie die Schwere der Gesundheitsbeeinträchtigung maßgebend. Bei größeren Gesundheitsbeeinträchtigungen, die an die Grenze zu schwerwiegenden Gesundheitsbeeinträchtigungen heranreichen, kann daher auch bei einer geringeren Zahl von betroffenen Personen eine ernste Gefahr vorliegen.
Umweltschäden	nachhaltige Gefährdung des Bestandes einer Tier- oder Pflanzenpopulation in einem von einem Ereignis betroffenen Gebiet, nachhaltige Schädigung von unter Landschafts- oder Naturschutz stehenden Gebieten sowie von Wasserschutzgebieten oder Grundwasserbeständen	Wird erreicht durch Freisetzung gefährlicher Stoffe in Luft, Wasser oder Boden
Sachschäden	schwerwiegenden Schädigung von unter Denkmalschutz stehenden Gebäuden oder Sachen, nachhaltige Störung der Funktionsfähigkeit einer bedeutsamen öffentlichen Einrichtung	Größere von Gebäuden oder Verkehrswegen mit öffentlichem Interesse (z.B. Bildungseinrichtungen und Krankenhäuser, Eisenbahnen, Straßen- und Autobahnen, touristisch genutzte Einrichtungen bzw. Freizeit- und Erholungseinrichtungen…), welche z.B. durch Brand- und Explosionsauswirkungen oder Gefahr für Leben und Gesundheit (s.o.) unbenutzbar werden

3.2.1.2 Bestimmung der sicherheitsrelevanten Anlagenteile

Die Bestimmung der sicherheitsrelevanten Anlagenteile (resp. Teil-Betriebsbereiche, vgl. Glossar) dient unter anderem der Festlegung der zu untersuchenden Anlagenteile bzw. Teil-Betriebsbereiche. Damit wird eine Reduzierung des Analyseaufwandes angestrebt, gleichzeitig eine gewisse Unvollständigkeit bezgl. der analysierten Risiken in Kauf genommen.

Anlagenteile gelten als sicherheitsrelevant entweder aufgrund ihres Stoffinhaltes oder aufgrund ihrer Funktion:

- Stoffinhalt: Lagerbehälter oder verfahrenstechnische Apparate wie Reaktoren, Behälter, Kolonnen, Öfen, Pumpen, Verdichter, Wärmetauscher oder Rohrleitungen
- Funktion: Fackeln, Druckentlastungseinrichtungen (Berstscheiben, Sicherheitsventile, …), Not-Energie-Einrichtungen, PLT-Sicherheitseinrichtungen entsprechend IEC 61511 resp. VDI/VDE 2180, Not-Aus-Einrichtungen, Auffangbehälter, Wasserberieselungen, Gaszäune, Dampfwände

Im Bericht KAS-1 („Sicherheitsrelevante Teile eines Betriebsbereiches und Richtwerte für sicherheitsrelevante Anlagenteile (SRA)“) sind mengenmäßige Grenzwerte für Stoffe gemäß Anhang I Störfall-Verordnung) festgelegt, anhand welcher die Klassifizierung der Anlagenteile als sicherheitsrelevant erfolgen kann. Die Grenzwerte haben lediglich empfehlenden Charakter.

Darüber hinaus haben sich diverse Konzepte zur gezielten Exklusion von Anlagenteilen etabliert (siehe beispielsweise die QRA-Verfahren in den Niederlanden und Flandern).

3.2.2 Gefahrenanalyse

Die Gefahrenanalyse im Anwendungsbereich der StörfallV bezweckt, aus der Menge möglicher Ereignisse im Lebenszyklus einer Anlage diejenigen Ereignisse zu identifizieren, welche als Gefahrenquellen zu einer ernsten Gefahr (s. Glossar) führen können.

Für eine ernste Gefahr bedarf es gemäß § 4 StörfallV einer Gefahrensituation, die üblicherweise bei

- Freisetzung gefährlicher Stoffe (in Atmosphäre, Gewässer, Boden),
- Brand oder
- Explosion

entsteht.

Als Gefahrenquellen sind entsprechend der StörfallV § 3 Abs. 1 zu berücksichtigen:

- Betriebliche Gefahrenquellen
- Umgebungsbedingte Gefahrenquellen
- Eingriffe Unbefugter

Es sei denn, sie können als Störfallursachen vernünftigerweise ausgeschlossen werden.

Bei der Einstufung, ob eine Gefahrenquelle oder ein Eingriff als Störfallursache vernünftigerweise ausgeschlossen werden kann, ist nicht nur deren Auftrittswahrscheinlichkeit relevant, sondern auch

- der allgemeine wissenschaftliche Kenntnisstand,

- Erfahrungen, die in Anlagen dieser oder vergleichbarer Art gewonnen wurden oder
- Rechnungen, Abschätzungen oder Übertragungen von Erkenntnissen.

Außerdem sind nicht nur offensichtliche Gefahrenquellen (d.h. Gefahrenquellen im Erfahrungsbereich des Betreibers), sondern auch andere Ereignisse, wie „unzureichende Vorkehrungen“ oder „grobes menschliches Fehlverhalten“ zu berücksichtigen (vgl. Vollzugshilfe StörfallV, Kap. 9.2.6.1).

Weiterhin sind systematische Auswertungen von aufgetretenen Störungen und Störfällen (bzw. meldepflichtigen Ereignissen) vorzunehmen, was im Hinblick auf die Anforderungen an „Anlagen dieser oder vergleichbarer Art“ eine Auswertung veröffentlichter Ereignisberichte einschließt (s. dazu auch Empfehlungen im Leitfaden KAS-19).

Als auszuschließende Gefahrenquellen gibt die Vollzugshilfe an:

- das gleichzeitige Wirksamwerden verschiedener, *voneinander unabhängiger* umgebungsbedingter Gefahrenquellen, wie Erdbeben und Hochwasser;
- das gleichzeitige, *voneinander unabhängige* Freiwerden von Stoffen, welche erst im Zusammenwirken einen gefährlichen Stoff im Sinne der Störfall-Verordnung bilden können.

Sofern von Tätigkeiten in Verbindung mit Gefahren gesprochen wird, sind jeweils die Tätigkeiten unter Beteiligung von gefährlichen Stoffen zu betrachten (Vollzugshilfe zur StörfallV, Abschnitt 2.3). Diese Tätigkeiten können im Rahmen einer Gefahrenanalyse zu betrachten sein, wenn sie in Verbindung mit gefährlichen Stoffen im Betriebsbereich anfallen.

Als Beispiele für gefahrenrelevante Tätigkeiten gibt die Vollzugshilfe zur StörfallV an:

- innerbetrieblicher Transport, Bereitstellung,
- Lagern, Be- und Entladen von Stoffen und Zubereitungen,
- Herstellen von Stoffen durch chemische Umwandlung,
- Umgang mit Stoffen (Mahlen, Mischen, Umfüllen, Abpacken etc.),
- Synthese und Analytik von Stoffen, z. B. in Laboratorien,
- Aufbringen von metallischen Schutzschichten auf Metalloberflächen
- Lackieren
- Betrieb von Kälteanlagen

Als menschliche Fehlerquellen sind in die Gefahrenanalyse entsprechend einzubeziehen:

- Außerachtlassen von öffentlich-rechtlichen Sicherheitsvorschriften,
- Außerachtlassen von berufsgenossenschaftlichen Vorschriften oder Betriebsvorschriften,
- Bedienungsfehler, einschließlich Stoffverwechslungen
- Fehler bei Überwachung und Instandhaltung, z. B. bei der Kontrolle des Betriebs sicherheitsrelevanter Anlageteile oder

- der Versorgung der Anlage mit sicherheitsrelevanten Betriebsmitteln

Für Betriebsbereiche in Chemie- bzw. Industrieparks sind die Schnittstellen zu weiteren Betreibern von mittelbarer Relevanz. Die Gefahrenanalyse muss die Möglichkeit der gegenseitigen Beeinflussung in Fällen von Störfällen Rechnung tragen. Benachbarte Betriebsbereiche sind als Gefahrenquellen zu berücksichtigen („Domino-effekt"). Ebenso sind Anlagen, die nicht der StörfallV unterliegen und weniger als 200m zum Betriebsbereich entfernt sind, auf mögliche Gefahrenquellen zu prüfen. Die Zuständigkeiten bzw. Verantwortlichkeiten müssen lückenlos geklärt werden (siehe auch Leitfaden KAS-55, Kap. 8).

Die Vollzugshilfe zur StörfallV gibt weitere Empfehlungen und Beispiele zu betrieblichen und umgebungsbedingten Gefahrenquellen (insbesondere Gefahren durch Verkehrswege und Verkehr), welche die Gefahrenanalyse vereinfachen bzw. deren Vollständigkeit gewährleisten sollen. Bezüglich des Szenario Erdbebens wird auf die Erdbeben-Norm DIN 4149-1 und auf die dort als erdbebengefährdet aufgeführten Gebiete abgestellt. Dies schließt nicht aus, dass ähnliche Ereignisse, wie zum Beispiel durch Bergbau verursachte Gebirgsschläge, auch außerhalb dieser Gebiete eine vergleichbare Gefahrenquelle sein können.

Bezüglich Eingriffen Unbefugter wird auf den Leitfaden SFK-GS-38 „Maßnahmen gegen Eingriffe Unbefugter" als Maßstab verwiesen.

3.2.2.1 Informationsquellen für die Ermittlung von Gefahrenquellen

Zur Ermittlung derjenigen Ereignisse, welche zu einer ernsten Gefahr im Sinne der StörfallV führen können, sind Informationen aus verschiedenen Erkenntnisquellen heranzuziehen und hinsichtlich Ihrer Relevanz für den zu analysierenden Betriebsbereich zu prüfen.

Anderenfalls wird man kaum zeigen können, dass die Gefahrenermittlung für den Betriebsbereich vollständig ist, und damit alle Vorkehrungen entsprechend des Standes der Sicherheitstechnik getroffen wurden.

Der Leitfaden SFK-GS-33 konstatiert, dass Informationen zu Gefahrenquellen aus verschiedenen Erkenntnisquellen erlangt werden können.

Tabelle 4: Informationsquellen zur Gefahrenermittlung

Informationsquelle	Beispiel	Anwendung Ersterstellung Gefahrenanalyse	Anwendung Fortschreibung Gefahrenanalyse
Expertenwissen und Expertenurteil	Risikoermittlung Gefahrenanalyse	Zwingend notwendig	Zwingend notwendig
Vorhandene Risikoanalysen aus anderen betrieblichen Managementprozessen	Gefahrenanalyse im Management der funktionalen Sicherheit, Risikoanalysen Arbeitssicherheit, QM-Berichte und Verfahrensabläufe, HAZOP, Analysen und Dokumente nach 10 Abs. 1 BImSchG, § 7 Abs. 1 der Störfall-Verordnung, Betriebssicherheitsverordnung. Gefahrstoffverordnung Arbeitsschutzgesetz (s.a. Vollzugshilfe zur StörfallV	Zwingend notwendig	Bei technischen Änderungen oder Fortschreibung
Prognosen und Analysen zu Störungen im Anlagenbetrieb	Prognosen: DFMEA, Prozess-FMEA, FMECA/FTA/ETA/ HAZOP	Dringend empfohlen	Bei technischen Änderungen oder Fortschreibung
Analyse von Normen, Richtlinien und gesetzlichen Vorgaben	z. B. DIN EN61511; StörfallV	Ergänzend empfohlen	Bei neuem Ausgabestand
Analysen von Sicherheitsdatenblättern zu gefahrbringenden Stoffen und Sicherheits-handbüchern (z.B. Maschinen und Anlagen)	Sicherheitshandbücher von Maschinen und Anlagen, Sicherheitshinweise für die Verwendung gefährlicher Stoffe	Ergänzend empfohlen	Bei neuem Ausgabestand oder neuen Verfahren
Auswertungen von Ereignissen und Störfällen an der eigenen Anlage	Betriebliche Aufzeichnungen, Meldungen über Ereignisse nach StörfallV, Informationen der Mitarbeiter/-innen, Vorschlags- und Beschwerdewesen	Nicht möglich	Zwingend notwendig
Auswertungen von Ereignissen und Störfällen an gleichartigen Anlagen	Betriebliche Aufzeichnungen, Meldungen über Ereignisse nach StörfallV, Fachliteratur, Fachpresse, Gremienarbeit und Internetportale	Ergänzend empfohlen	Ergänzend empfohlen
Recherche und Auswertungen von Ereignissen und Störfällen an Anlagen anderer Technologien	Statistiken, Unfallberichte, Presse, Auswertungen von Ereignissen nach StörfallV, Fachliteratur, Fachpresse, Gremienarbeit und Internetportale	Ergänzend empfohlen	Ergänzend empfohlen

Informationsquelle	Beispiel	Anwendung Ersterstellung Gefahrenanalyse	Anwendung Fortschreibung Gefahrenanalyse
Gutachten, Studien, Verfahrensanweisungen, welche den eigenen Betriebsbereich betreffen	Prozessanalysen, Machbarkeitsstudien, Baugutachten, Erdbebensicherheit, Standsicherheit, Begutachtungen im Bereich der Anlagensicherheit und Arbeitssicherheit	Zwingend notwendig	Bei Änderungen oder neuen Dokumenten
Informationen von Behörden und Bevölkerung	Beschwerden und Hinweise, Rückfragen von Behörden, Mängellisten, Auflagen usw., Veröffentlichung von Behörden (z.B. Erdbebenzonen)	Nicht möglich	Zwingend notwendig
Informationen aus der Zusammenarbeit der Betreiber	Informations- und Kooperationspflichten der Betreiber untereinander nach § 6 Abs. 3 der Störfall-Verordnung	Wenn eine Zusammenarbeit erfolgt	Wenn eine Zusammenarbeit erfolgt

Das Recherchieren und Auswerten der Informationsquellen ist dabei weitgehend unabhängig vom konkret angewendeten Verfahren der Gefahrenanalyse zu sehen.

Vielmehr ist die Frage zu stellen, welche Informationsquellen aus dem innerbetrieblichen Betriebs- und Managementprozessen zur Verfügung stehen.

Zur Berücksichtigung vergangener Ereignisse, welche in die Gefahrenanalyse einfließen müssen, verweist der Leitfaden KAS-55, Abschnitt 6 auf die Datenbanken, die entsprechende Informationen der Fachöffentlich kostenlos zur Verfügung stellen:

- Zentrale Melde- und Auswertestelle für Störfälle und Störungen in verfahrenstechnischen Anlagen (ZEMA) (https://www.infosis.uba.de)
- Ausschuss Ereignisauswertung der KAS (https://www.infosis.uba.de)
- Ereignis-Datenbank (ProcessNet) (http://processnet.org/ereignisdb.html)
- OECD- und UNECE-Staaten: Major Accident Reporting System - eMARS (https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars)
- Frankreich: ARIA (http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/?lang=en)
- USA: US Chemical Safety Board (CSB) (http://www.csb.gov)

3.2.2.2 Beispiele Gefahrenquellen

Der Leitfaden KAS-55, Abschnitt 6.1 „Systematische Gefahrenanalyse“ gibt Beispiele für Gefahrenquellen zu

- betriebliche Gefahrenquellen,
- umgebungsbedingte Gefahrenquelle und
- Eingriffen Unbefugter

Tabelle 5: Beispiele für Gefahrenquellen aus Leitfaden KAS-55

Art der Gefahrenquelle	Beispiele
Betriebliche Gefahrenquellen	• mechanisches Versagen von Wandungen, z.B. infolge Korrosion oder Wechselbeanspruchung • Versagen von Maschinen, z.B. Pumpen, Kompressoren, Ventilatoren, Rührer • Ausfall von Energien, z.B. Strom, Steuerluft • Versagen von PLT-Einrichtungen, z.B. für Messung, Steuerung und Regelung von Druck, Temperatur, Füllstand, Menge, Konzentration, Verweilzeit • Störungen in der Wärmezu- oder -abfuhr • unbeabsichtigte Energiezufuhr, z.B. Reibungswärme, Heißlaufen drehender Teile • Leckagen • Verstopfungen, z.B. von Ausblase- oder Entspannungsleitungen • Unfälle beim innerbetrieblichen Transport • Außerachtlassen von Sicherheits- oder Betriebsvorschriften • Bedienungsfehler, einschließlich Stoffverwechslungen • Fehler bei Überwachung und Instandhaltung, z.B. bei der Kontrolle des Betriebs sicherheitsrelevanter Anlageteile oder der Versorgung der Anlage mit sicherheitsrelevanten Betriebsmitteln
Umgebungsbedingte Gefahrenquellen	• Naturbedingte Gefahrenquellen: • Hochwasser oder Flutwellen, Starkregenereignisse • Witterungseinflüsse (z.B. Extremtemperaturen, Sturm, Gewitter, Eis- und Schneelasten)2, • Waldbrandgefahr, • Wildtiere • Erdrutsche, Erdabsenkungen oder Gebirgsschläge • Erdbeben • Aus menschlicher Aktivität resultierende Gefahrenquellen: • Gefährdungen, die durch benachbarte Betriebsbereiche oder Anlagen hervorgerufen werden • Gefährdungen, die durch benachbarte Verkehrsanlagen hervorgerufen werden
Eingriffe Unbefugter	• Vorsätzliche Handlungen mit dem Ziel unmittelbar, oder mittelbar einen Schaden zu verursachen

Nach Ansicht der Autoren sind als betriebs- und umgebungsbedingte Gefahrenquellen auch Gefährdungen, welche durch das Handeln nicht autorisierter Personen oder durch fahrlässiges Handeln entstehen, zu berücksichtigen, wenn diese einen Störfall verursachen können.

Dies können etwa sein:

- Nicht bestimmungsgemäße Verwendung von Stoffen oder Einrichtungen, soweit diese vorhersehbar ist.
- Zugang und fahrlässige Handlungen nicht autorisierter Personen, auch wenn das Ziel der Handlungen nicht zwangsläufig ein Schaden sein muss (d.h. ein Eingriff Unbefugter im Sinne der Störfall-Verordnung)

- Beispiele: Klettern und Spielen, Handlungen bei Bauarbeiten, wie das Zerschneiden von Erdkabeln und Rohrleitungen, abweichende Verwendung oder Aneignung von gefährlichen Stoffen

3.2.2.3 Anforderung an die Dokumentation der Gefahrenanalyse

Der Leitfaden KAS-55 stellt klar, dass der Sicherheitsbericht die Gefahrenanalyse nur auszugsweise enthalten muss: „Vielmehr ist deren Ergebnis für die als sicherheitsrelevant eingestuften Anlageteile dort so zu dokumentieren, dass der Schluss gezogen werden kann, dass alle zutreffenden Gefahrenquellen betrachtet und die notwendigen störfallverhindernden und -begrenzenden Maßnahmen abgeleitet wurden, um einen Störfall vernünftigerweise zu verhindern bzw. die Folgen eines dennoch auftretenden Störfalls so gering wie möglich zu halten.“

Außerdem wird darauf verwiesen, dass die Dokumentation für jeden sicherheitsrelevanten Anlagenteil (im Betriebsbereich) erfolgen muss.

Bewährt hat sich dazu nach Auffassung der KAS die Dokumentation einer Kausalkette (s. Beispiel im Leitfaden KAS-55, Abschnitt 6): Gefahrenquelle ➔ Ursache ➔ Erkennen ➔ mögliche Auswirkungen ohne Gegenmaßnahmen ➔ ergriffene Maßnahmen

3.2.2.4 Durchführung Gefahrenanalyse - Checkliste

Die folgende Liste fasst die in diesem Kapitel genannten Punkte in einer Übersicht zusammen, welche bei der Durchführung einer Gefahrenanalyse zu beachten sind.

Tabelle 6: Anforderungen an die Gefahrenermittlung

Kategorie	Kurzbeschreibung der Anforderung	Bezug zur StörfallV	untere Kl.	obere Kl.
Methodik/ Umfang	Einzubeziehende Betriebsarten (Definition bestimmungsgemäßer Betrieb)	§ 8 Absatz 3 StörfallV i. V. Anhang III Nr. 2 b) StörfallV i. V. Vollzugshilfe zur StörfallV Abschnitt 1.2	x	x
Methodik/ Umfang	systematisches Vorgehen	§ 8 Absatz 3 StörfallV i. V. Anhang III Nr. 2 b) StörfallV	x	x
Bewertungs-maßstab	Bewertung vergangener Ereignisse im Zusammenhang mit den gleichen Stoffen und Verfahren einfließen (eigene oder andere Anlage)	§ 9 Abs. 1 Nr. 2 i. V. Anhang II Abschnitt IV Nr. 3 StörfallV		x
Methodik/ Umfang	Betrachtung sicherheitsrelevanter Anlagenteile im Betriebsbereich	§ 3 Abs. 3 StörfallV i. V. § 6 Nr. 1 StörfallV	x	x
Methodik/ Umfang	Betrachtung anderer Anlagenteile (Bereiche) im Betriebsbereich, die einen Störfall verursachen, die Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Störfalls erhöhen oder Auswirkungen eines Störfalls verschlimmern können.	§ 8 Absatz 3 StörfallV i. V. Anhang II Ziffer IV Buchstabe d) StörfallV		x
Gefahren-quellen	Anforderungen zur Verhinderung von Störfällen: Betrachtung von Bränden und Explosionen, Freisetzungen gefährlicher Stoffe in Luft, Wasser oder Boden	§ 4 Nr. 1 StörfallV	x	x
Gefahren-quellen	Betrachtung sicherheitsrelevanter Anlagenteile im Betriebsbereich und anderer Anlagenteile, die einen Störfall verursachen können oder die Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Störfalls erhöhen.	§ 3 Abs. 3 StörfallV i. V. § 6 Nr. 1 StörfallV; § 9 Abs. 1 StörfallV i. V. Anhang II Ziffer IV Buchstabe d) StörfallV		
Gefahren-quellen	Die Betrachtungen sind für den bestimmungsgemäßen und nicht bestimmungsgemäßen Betrieb durchzuführen.	§ 8 Abs. 3 StörfallV i. V. Anhang III Nr. 2 Buchstabe b) StörfallV	x	x

Kategorie	Kurzbeschreibung der Anforderung	Bezug zur StörfallV	untere Kl.	obere Kl.
Gefahren-quellen	Betrachtung betrieblicher Gefahrenquellen, umgebungsbedingter Gefahrenquellen und Eingriff Unbefugter	§ 3 Abs. 2 StörfallV	x	x
Gefahren-quellen	Betrachtung von Gefahrenquellen, die zu Freisetzungen gefährlicher Stoffe in Luft, Wasser oder Boden und zu Bränden oder Explosionen führen können.	§ 4 Abs. 1 StörfallV		
Gefahren-quellen	Betrachtung vernünftigerweise nicht auszuschließender Gefahrenquellen für Maßnahmen zur Störfallvermeidung	§ 3 Abs. 3 StörfallV	x	x
Gefahren-quellen	Definition eines Störfalles und einer ernsten Gefahr als Betrachtungsgegenstand der Gefahrenanalyse bis Störfallrisikobewertung	§ 2 Nr. 7 und 8 StörfallV i. V. Anhang VI Teil 1 Ziffer I	x	x
Gefahren-quellen	Beteiligung gefährlicher Stoffe	§ 2 Nr. 4 und 5 StörfallV i. V. Anhang I StörfallV und Abschnitt 2 der Vollzugshilfe zur StörfallV	x	x
Gefahren-quellen	Verwendung gefährlicher Stoffe als Rohstoff, Endprodukt, Nebenprodukt, Rückstand oder Zwischenprodukt	§ 2 Nr. 4 und 5 StörfallV i. V. Anhang I StörfallV und Abschnitt 2 der Vollzugshilfe zur StörfallV	x	x
Gefahren-quellen	tatsächliches, vorgesehenes und mögliches Vorhandensein gefährlicher Stoffe	§ 2 Nr. 5 StörfallV i. V. Abschnitt 2 Vollzugshilfe zur StörfallV	x	x
Gefahren-quellen	Sofern von Tätigkeiten in Verbindung mit Gefahren gesprochen wird, sind jeweils die Tätigkeiten unter Beteiligung von gefährlichen Stoffen zu betrachten. Tätigkeiten sind z.B.: - innerbetrieblicher Transport, Bereitstellung, - Lagern, Be- und Entladen von Stoffen und Zubereitungen, - Herstellen von Stoffen durch chemische Umwandlung, - Umgang mit Stoffen (Mahlen, Mischen, Umfüllen, Abpacken etc.), - Synthese und Analytik von Stoffen, z.B. in Laboratorien, - Aufbringen von metallischen Schutzschichten auf Metalloberflächen, - Lackieren, - Betrieb von Kälteanlagen.	Abschnitt 2 Vollzugshilfe zur StörfallV	x	x

Kategorie	Kurzbeschreibung der Anforderung	Bezug zur StörfallV	untere Kl.	obere Kl.
Gefahren-quellen	Berücksichtigung menschlicher Fehlerquellen, d.h. Fehlbedienung und sicherheitswidrige Handlungen, wie: - Außerachtlassen von öffentlich-rechtlichen Sicherheitsvorschriften, - berufsgenossenschaftlichen Vorschriften oder Betriebsvorschriften, - Bedienungsfehler, einschließlich Stoffverwechslungen - Fehler bei Überwachung und Instandhaltung, z. B. bei der Kontrolle des Betriebs, sicherheitsrelevanter Anlageteile oder der Versorgung der Anlage mit sicherheitsrelevanten Betriebsmitteln	§ 6 Abs. 1 Nr. 3 StörfallV und Vollzugshilfe zur StörfallV, Abschnitt 9.2.6.1.1	x	x
Anforderungen an Maßnahmen	Anforderungen zur Verhinderung von Störfällen: technische Schutzeinrichtungen als Maßnahme vorsehen: ausreichende Warn-, Alarm- und Sicherheitseinrichtungen als Vorkehrungen vorsehen	§ 4 Nr. 2 StörfallV	x	x
Anforderungen an Maßnahmen	Die Anlagen des Betriebsbereichs mit zuverlässigen Messeinrichtungen und Steuer- oder Regeleinrichtungen auszustatten, die, soweit dies sicherheitstechnisch geboten ist, jeweils mehrfach vorhanden, verschiedenartig und voneinander unabhängig sind	§ 4 Nr. 3 StörfallV (Hinweis: sicherheitstechnisch geboten = Maschinensicherheit/ Funktionale Sicherheit)	x	x
Anforderungen an Maßnahmen	Anforderungen zur Begrenzung von Störfällen: Maßnahmen zu treffen, damit durch die Beschaffenheit der Fundamente und der tragenden Gebäudeteilebei Störfällen keine zusätzlichen Gefahren hervorgerufen werden können	§ 3 Abs. 3 StörfallV i. V. § 5 StörfallV	x	x
Anforderungen an Maßnahmen	Anforderungen zur Verhinderung von Störfällen	Anhang 1 Abschnitt 1 der Vollzugshilfe zur StörfallV	x	x
Anforderungen an Maßnahmen	Anforderungen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen	Anhang 1 Abschnitt 2 der Vollzugshilfe zur StörfallV	x	x
Anforderungen an Maßnahmen	Ergänzende Anforderungen an Maßnahmen	Anhang 1 Abschnitt 3 der Vollzugshilfe zur StörfallV	x	x
Methodik/ Umfang	Pflicht zur Risikoermittlung: Abschätzung der Wahrscheinlichkeit und der Schwere der Folgen der ermittelten Störfälle	§ 8 Absatz 3 StörfallV i. V. Anhang III Buchstabe b) StörfallV	x	x

3.2.2.5 Bestimmung des Standes der Sicherheitstechnik

Die StörfallV definiert den Stand der Sicherheitstechnik als 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 (Vgl. §2, no. 10).

Der Stand der Sicherheitstechnik zielt damit auf ein materiell anspruchsvolles Sicherheitsniveau ab, welches über die allgemein anerkannte Regeln der Technik[15] hinausgeht und eine dynamische Entwicklung forciert, welche sicherstellt, dass sich der Maßstab des rechtlich gebotenen am technischen Fortschritt orientiert. Der Stand der Sicherheitstechnik muss damit im Einzelfall festgestellt werden.

Die StörfallV fordert, dass die Beschaffenheit und der Betrieb der Anlagen des Betriebsbereichs dem Stand der Sicherheitstechnik entsprechen müssen (Vgl. §3 StörfallV, Abs. 4).

Die Ermittlung des Standes der Sicherheitstechnik erfolgt zum Zeitpunkt der Errichtung bzw. Genehmigungsprüfung einer Anlage (Erstprüfung), sowie in regelmäßigen Nachprüfungen aufgrund der dynamischen Weiterentwicklung des Standes der Sicherheitstechnik.

Die Umsetzung dieser Betreiberpflicht erfolgt gemäß SFK-GS-33 in drei Stufen:

- Stufe 1: Ermittlung einer Vergleichsgröße, d.h. Ermittlung der Vorkehrungen und Maßnahmen, welche – bezogen auf eine sicherheitstechnische Schutzaufgabe – den Stand der Sicherheitstechnik darstellen.
- Stufe 2: Entsprechungsprüfung, d.h. Prüfung, ob die konkret zu beurteilende Anlage die Schutzaufgabe vergleichbar gut bewältigt.
- Stufe 3: Rechtsfolge. Im Kontext eines Genehmigungsverfahrens sind Entscheidungen über Genehmigungen (ggf. mit Auflagen) zu treffen. Im Kontext des Aufsichtsverfahren können nachträgliche Anordnungen erlassen werden.

Auf der Stufe der Rechtsfolge ist der Verhältnismäßigkeits-Grundsatz[16] anzuwenden. Auf den beiden ersten Stufen ist dieser Grundsatz nicht anzuwenden. Diese Stufen stellen die Tatbestandsseite dar.

Der Leitfaden SFK-GS-33 fordert, dass die Ermittlung des Standes der Sicherheitstechnik methodisch, nachvollziehbar und mit der gebotenen Sorgfalt vorzunehmen ist.

Dabei ist es nur in bestimmten Fällen möglich, den Stand der Sicherheitstechnik auf Basis technischer Regeln (->TRAS'en), Verwaltungsvorschriften oder Leitfäden festzustellen.

[15] Unter den allgemein anerkannten Regeln versteht man technische Regeln oder Verfahrensweisen, die wissenschaftlich fundiert und in der Praxis allgemein bekannt sind, sowie sich aufgrund der damit gemachten Erfahrungen bewährt haben.

Als allgemeine anerkannte Regeln der Technik können Normen (z. B. DIN-Normen), Richtlinien (z. B. VDI-Richtlinien) oder auch Unfallverhütungsvorschriften (z. B. DGUV-Vorschriften) gelten. Dazu zählen auch die verabschiedeten Leitfäden oder Arbeitshilfen von Expert:innen-Gremien und -Gruppen (wie z. B. Kommission für Anlagensicherheit).

[16] Im Falle die bestehende Anlage oder vorhandene Komponente nicht dem Stand der Sicherheitstechnik entspricht, so ist die Verhältnismäßigkeit einer Änderung zu prüfen (Vgl. SFK-GS-33, Kap. 4). Diese Prüfung umfasst 3 Teilaspekte: 1) Die vorgeschlagene Änderung (Maßnahme bzw. techn. Lösung) muss zwecktauglich sein, b) sie muss erforderlich sein (d.h. im Vergleich zu gleich zu wirksamen Mitteln kostenminimal sein) und c) verhältnismäßig im engeren Sinne sein (Verhältnis Kosten/Nutzen)

In den meisten Fällen muss eine Ermittlung des Standes der Sicherheitstechnik in einem Ermittlungsprozess erfolgen (SFK-GS-33, 2002). Dies beinhaltet die Auswertung weiterer Informationsquellen[17]. Dabei sind nicht nur direkt vergleichbare Anlagen, sondern auch ähnliche Gefahrensituationen bzw. Technologien zu berücksichtigen. Diese Sicherheitstechniken müssen nicht zwangsläufig nur im Bereich der StörfallV zur Anwendung kommen. Insbesondere muss die Ermittlung des Standes der Sicherheitstechnik mit einer Gefahrenanalyse verknüpft sein.

Dabei ist ein iterativer Abgleich zwischen Gefahrenanalyse und Stand der Sicherheitstechnik in Bezug auf die ermittelten Gefahren erforderlich. (s.a. Abschnitt 2.2 des Leitfadens SFK-GS-33).

Bezüglich der zur Verhinderung bzw. Auswirkungsbegrenzung von Störfällen zu treffenden Vorkehrungen und Maßnahmen stellt die Vollzugshilfe zur Störfall-Verordnung fest: „Je größer die mögliche Gefahr, desto mehr Aufwand ist nach dem Stand der Sicherheitstechnik erforderlich."

Im Ergebnis zielt die Anforderung, dass Beschaffenheit und Betrieb der Anlagen dem Stand der Sicherheitstechnik zu entsprechen haben, darauf ab, dass nach vernünftigen Gesichtspunkten und unter Wahrung der Verhältnismäßigkeit anwendbare Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Auswirkungsbegrenzung von Störfällen umgesetzt werden.

Dieser Bewertungsansatz ist vergleichbar mit dem sogenannten ALARP-Prinzip (As low as reasonably practicable). Das ALARP-Prinzip ist ein Prinzip der Risikoreduzierung. Es besagt, dass Risiken auf ein Maß zu reduzieren sind, welches den höchstens Sicherheitsgrad garantiert, der vernünftigerweise noch praktikabel, demnach finanziell und/oder mit technisch vertretbarem Aufwand zu verwirklichen ist.

Zur Wahrung des Verhältnismäßigkeitsprinzips ist der Stand der Sicherheitstechnik dabei nicht losgelöst von der Eintrittswahrscheinlichkeit und des zu erwartenden Schadensausmaßes zu beurteilen. Einen explizit formulierten Ausschluss ökonomischer Überlegungen, wie dies etwa im Bereich der Medizintechnik der Fall ist, gibt es im Bereich der Störfall-Verordnung nicht.

Gleichfalls werden keine konkreten Kosten-Nutzen-Kriterien genannt.

Zu beachten ist, dass es in der Sicherheitstechnik allgemein üblich ist, Risiken durch eine Kombination von Vorkehrungen und Maßnahmen zu senken, wobei die Anforderungen mit steigendem Risiko wachsen – bis hin zur Forderung nach Anwendung diverser Technologien.

Das angestrebte Sicherheitsniveau kann nur erreicht werden, wenn Planung, Konstruktion und Anwendung der Sicherheitstechnik mit entsprechenden Prozessen (Qualitätssicherung, Konformitäts- und Sicherheitsbewertung) zur Vermeidung von systematischen und zufälligen Fehlern erfolgen.

Entsprechende Anforderungen finden sich daher beispielsweise in den Normen zur funktionalen Sicherheit (wenn SIL/PL für die Sicherheitsfunktion gefordert), für Planung und Auslegung und des Qualitätsmanagements (alle Sicherheitseinrichtungen).

[17] Als wesentliche Erkenntnisquellen werden genannt: 1) EU-Recht, Gesetze und Verordnungen, 2) Verwaltungsvorschriften sowie Bundes- und Ländererlässe, 3) Bekannt gegebenes Regelwerk und in Bezug genommene Normen, 4) Leitfäden, Richtlinien und Empfehlungen, 5) Genehmigungsanträge, Genehmigungsbescheide und Sicherheitsberichte/Sicherheitsanalysen, 6) Sachverständigengutachten, Prüfberichte staatlicher und privater Stellen, 7) Information von „Inverkehrbringern" nach Chemikalien-Gesetz, 8) Veröffentlichungen wie Forschungsberichte des Bundes, der Länder, staatlicher Stellen und aus der Wirtschaft, 9) Sonstige Fachliteratur, 10) Expertenwissen aus Behörden ;Wirtschaft und Wissenschaft sowie von Sachverständigen, 11) Schadensauswertungen, 12) Veranstaltungen und Tagungen, 13) Datenbanken, Online-Dienste und spezielle Software, 14) Patentschriften, Angebote und sonstige Firmenschriften, 15) Eigene Organisation, eigenes Unternehmen etc., 16) Sonstige Medien und mündliche Auskünfte

Tabelle 7: Ermittlung des Standes der Sicherheitstechnik (Definition aus SFK-GS-33)

Checkfrage	Erläuterung	Erforderliche Begründung zur Anwendung
Was hat sich bei vergleichbaren Anlagen im Betrieb bewährt?	Technologie wird bei vergleichbaren Anlagen praktisch angewendet oder ist in anwendbaren allgemein anerkannten Regeln der Technik definiert… (z.B. Normen und Leitfäden)	Verweis auf technische Regeln und ggf. konkrete Anwendung
Welche Techniken wurden bei vergleichbaren Anlagen erfolgreich erprobt?	Die Technologie wurde bei vergleichbaren Anwendungen auf Eignung getestet, aber wird noch nicht oder nur selten angewendet bzw. ist noch nicht in allgemein anerkannten Regeln der Technik definiert	Verweis auf erfolgreiche Erprobung einer neuen Technologie, ggf. unter Nennung der relevanten technischen Regeln
Was kann aus dem Allgemeinen technischen Entwicklungsstand praktisch abgeleitet werden?	Die Technologie erscheint zur Anwendung geeignet, da in anderen Bereichen erprobt oder praktisch angewendet bzw. in dort anwendbaren allgemein anerkannten Regeln der Technik definiert (z.B. Normen und Leitfäden)	Verweis auf erfolgreiche Erprobung bzw. Anwendung und Ableitung der Eignung für den vorgesehenen Anwendungszweck mit Verweis auf relevante technische Regeln

3.2.2.5.1 Grundsätzliche Anforderungen an Vorkehrungen und Maßnahmen

§ 4 der StörfallV verpflichtet den Betreiber, dafür zu sorgen, dass Brände und Explosionen

a) innerhalb des Betriebsbereiches vermieden werden,

b) nicht in einer die Sicherheit beeinträchtigenden Weise von einer Anlage auf andere Anlagen des Betriebsbereichs einwirken können und

c) nicht in einer die Sicherheit des Betriebsbereichs beeinträchtigenden Weise von außen auf ihn einwirken können.

Außerdem sind Maßnahmen zu treffen, damit Freisetzungen gefährlicher Stoffe in Luft, Wasser in Boden vermieden werden.

Dies wird neben der Auslegung der Anlage durch ergänzende technische Maßnahmen (§ 4 Abs. 2 und 3), wie

- die Anlagen mit ausreichenden Warn-, Alarm- und Sicherheitseinrichtungen auszurüsten,
- die Anlagen des Betriebsbereichs mit zuverlässigen Messeinrichtungen und Steuer- oder Regeleinrichtungen auszustatten, die, soweit dies sicherheitstechnisch geboten ist, jeweils mehrfach vorhanden (Redundanz), verschiedenartig (diverse Technologien) und voneinander unabhängig sind (funktionale Trennung und Resilienz gegenüber Common-Cause-Fehlern)

sichergestellt.

Dieser Forderung wird in der Praxis neben der Anwendung bewährter Konstruktionsprinzipien üblicherweise dadurch entsprochen, dass für die PLT-Sicherheitseinrichtungen die Aspekte der Normen zur funktionalen Sicherheit entsprechend dem geforderten Schutzniveau (Sicherheitsintegritätslevels) umgesetzt werden, welches auf Basis der Gefahrenanalyse

ermittelt wird. Weitere Ausführungen dazu im Abschnitt zur Richtlinie VDI 2180 in Abschnitt 4.7.

Darüber hinaus sind die sicherheitsrelevanten Teile der Anlage vor Eingriffen Unbefugter zu schützen.

Der Leitfaden SFK-GS-41 stellt zum Thema Vorkehrungen und Maßnahmen zur Risikominderung fest:

- Vorkehrungen und Maßnahmen können grundsätzlich in allen Phasen des Lebenszyklus einer Anlage greifen (Entwurfsphase, Konstruktion, Herstellung, Bau, Inbetriebnahme, Betrieb und Instandhaltung, Abbau)
- Vorkehrungen und Maßnahmen können technischer, organisatorischer Natur sein, bzw. sich auf das menschliche Verhalten beziehen.
- Das Prinzip inhärenter Sicherheit ist bevorzugt einzusetzen
- Bei technischen Maßnahmen sind passive den aktiven vorzuziehen
- Die Gesamtheit der Maßnahmen sollte, in Bezug auf das abzudeckende Risiko, ausgewogen sein. Beabsichtigte Verbesserungen bei einem Störfallablauf sollten keine Verschlechterungen bei anderen Störfallabläufen generieren.

Hinter dieser Priorisierung steckt die Erkenntnis, dass Maßnahmen, die der Erzielung inhärenter Sicherheit (durch Auslegungsparameter und Randbedingungen der Prozesssicherheit bzw. Prozessgestaltung) dienen, meist eine höhere Sicherheit gegen systematische und zufällige Fehler aufweisen als zusätzliche aktive Schutzmaßnahmen, welche durch eine Sicherheitsfunktion garantiert werden.

Gerade im Störungsfall sind prozedurale Schutzmaßnahmen sehr unsicher, da das Risiko menschlicher Fehler vergleichsweise hoch ist (bei komplexen Handlungen, die keine Routine sind, kann dies bis zu 50% und mehr betragen).

Damit sind Maßnahmen zur inhärenten Sicherheit und passive Schutzmaßnahmen im Hinblick auf das Ziel der Risikosenkung ungleich wirksamer in Bezug auf die erreichte Risikominderung.

Es empfiehlt sich daher, bei der Festlegung der Maßnahmen zur Sicherheit die möglichen sicherheitstechnischen Lösungen zur Gewährleistung inhärenter Sicherheit zuerst zu prüfen und zu dokumentieren, und danach zusätzliche Schutzmaßnahmen vorzusehen.

Da jedoch auch die Technik versagen kann, wird es vielfach notwendig sein, auch prozedurale Schutzmaßnahmen, wie eine angemessene Benutzerinformation oder das Tragen von persönlicher Schutzausrüstung, vorzusehen.

3.2.2.5.2 Vorgehen bei der Festlegung der Maßnahmen zur Risikominderung

Der VDSI-Ratgeber (Verband für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz bei der Arbeit) zur Anlagensicherheit (Abschnitt II-5) führt aus: „Der Einsatz der Sicherheitsmaßnahmen (technischer und organisatorischer Art) beinhaltet immer auch die Möglichkeit des Versagens. Wie viele Sicherheitsmaßnahmen auch vorgesehen sein mögen, es bleibt immer ein Weg zum letztendlich unerwünschten Ereignis. Dieses wird zwar zunehmend unwahrscheinlicher, aber ist doch nie ganz auszuschließen.“

Mit diesem Blickwinkel müssen die störfallverhindernden Vorkehrungen bei einer Beschreibung der Gefahrenquellen zunächst außer Betracht bleiben!

Das heißt, alle Gefahren – sofern Sie nicht außerhalb jeder Erfahrung und Berechenbarkeit liegen – müssen in der Gefahrenanalyse enthalten sein. Und zwar unabhängig davon, ob die Gefahren durch bereits getroffene Maßnahmen oder die Auslegung der Anlage nach dem Erkenntnisstand bereits vermieden werden.

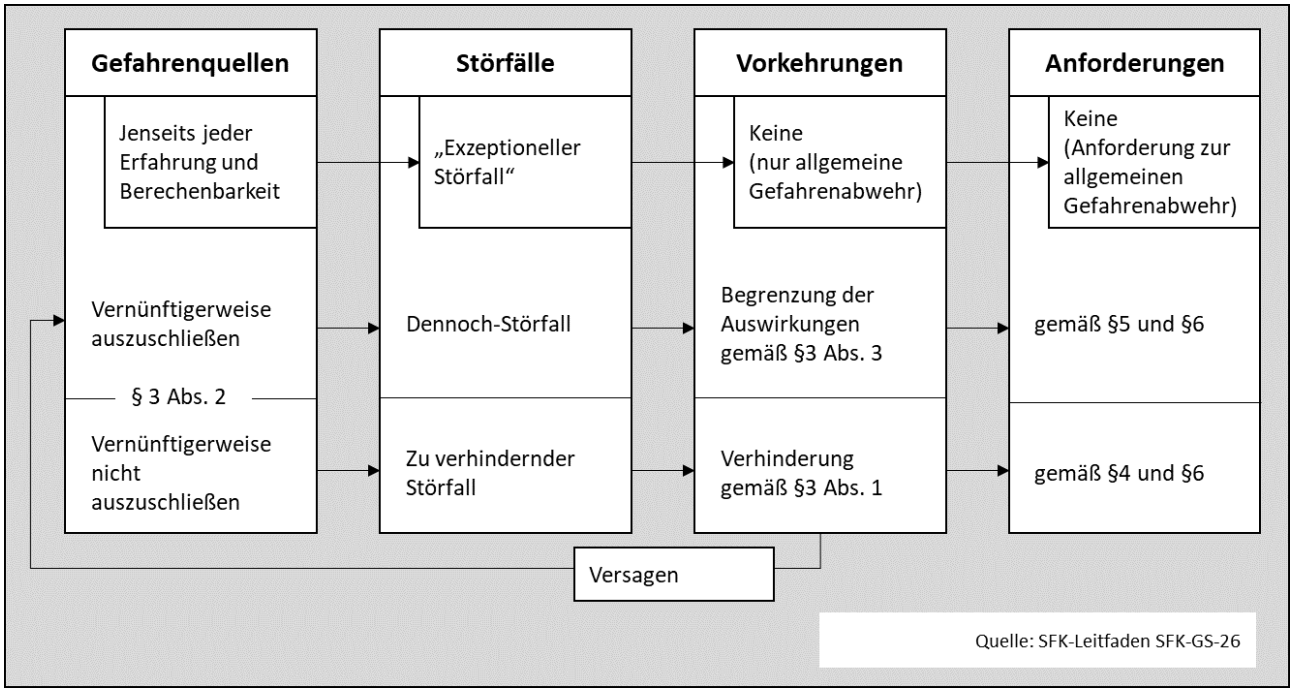
Damit ergibt sich folgendes Vorgehen:

1. Identifikation der Gefahrenquellen, die vernünftigerweise nicht auszuschließen sind, das heißt nicht jenseits jeder Erfahrung und Berechenbarkeit liegen.
2. Festlegen der Maßnahmen zur Verhinderung des aus der Gefahr resultierenden Störfallszenarios entsprechend des Standes der Sicherheitstechnik entsprechend der Anforderungen des §4 der StörfallV
3. Wenn das nach Umsetzung der Maßnahmen verbleibende Restrisiko (determiniert durch Wahrscheinlichkeit und/oder Auswirkung des Eintritts eines „Dennoch-Störfalles“) noch nennenswert ist: Festlegen der Maßnahmen für Auswirkungsbegrenzung für die vernünftigerweise nicht auszuschließenden Störfälle entsprechend des Standes der Sicherheitstechnik entsprechend des §5 der StörfallV.
4. Prüfung und Dokumentation, welche Anforderungen sich nach Stand der Sicherheitstechnik für die Gefahrensituation aus den allgemeinen Anforderungen in Bezug auf die Gefahrenabwehr ergeben (Instandhaltung, Kommunikation mit Behörden, Verpflichtung zur Zusammenarbeit im Ereignisfall).

Die Pflichten im Ereignisfall (Störfall eingetreten) werden regelmäßig auch dann greifen, wenn das Ereignis außerhalb der Erfahrungshorizontes der Betreiber liegt.

Dieses Vorgehen ist in der nachfolgenden Abbildung schematisch skizziert.

Abbildung 1: Risikominderung für identifizierte Gefahrenquellen



Quelle: Eigendarstellung IZP in Anlehnung an SFK-Leitfaden SFK-GS-26

3.2.2.5.3 Weiterentwicklung des Standes der Sicherheitstechnik

Die Weiterentwicklung des Standes der Sicherheitstechnik wird durch mehrere Faktoren bestimmt (u.a.):

- Wissenschaftliche Erkenntnisse und technologische Entwicklungen (z.B. Entwicklung neuer prozesstechnischer Verfahren mit „günstigeren“ Eigenschaften bezgl. inhärenter Sicherheit, Stoffeigenschaften und -mengen, Exothermie, Prozessbedingungen, Anzahl Gefahrenquellen)
- Veränderte Rahmenbedingungen (z.B. Klimawandel)
- Lernen aus Ereignissen

Das vom Umweltbundesamt und der Bundesanstalt für Materialforschung entwickelte Informationssystem Infosis veröffentlicht nach der StörfallV meldepflichtige und nicht meldepflichtige Ereignisse in technischen Anlagen. Die systematische Erfassung und Auswertung dieser Ereignisse stellt eine Grundlage für die Weiterentwicklung des Standes der Sicherheitstechnik dar.

Die Website besteht aus den Bereichen

- DOSIS (Dokumentationssystem zum Stand der Sicherheitstechnik),
- ZEMA (Zentrale Melde- und Auswertestelle für Störfälle und Störungen),
- AS-ER (Ausschuss Ereignisauswertung) und
- AIM (Informations-Managementsystem).

3.2.3 Szenarienentwicklung

Störfallablaufszenarien beschreiben die Zusammenhänge zwischen Gefahrenquellen und Störfallauswirkungen sowie die Einflüsse, welche Vorkehrungen und Maßnahmen zur Verhinderung bzw. Minderung der Auswirkung von Störfällen haben. Ohne Kenntnis der möglichen, durch die szenarische Betrachtung ermittelten Störfallauswirkungen können die zu deren Verhinderung und Begrenzung notwendigen Vorkehrungen und Maßnahmen nicht zweckentsprechend festgelegt werden (Vgl. Vollzugshilfe der StörfallV, Kap. 9.2.6.2.). Erkenntnisse aus den entwickelten Störfallszenarien gehen darüber hinaus in die Alarm- und Gefahrenabwehrplanung ein.

Störfallablaufszenarien können unterschieden werden nach

- Art: Brände, Explosionen, Freisetzungen gefährlicher Stoffe in Luft, Wasser oder Boden
- Gefahrensituation: Anlagenspezifisch, verfahrensspezifisch, stoffspezifisch
- Auswirkung: innerhalb des Betriebsbereiches, auf benachbarte Betriebsbereiche und Anlagen, auf die Nachbarschaft und die Umwelt

Störfallablaufszenarien können weiterhin nach ihrem Verwendungszweck unterschieden werden:

- Szenarien zur Ermittlung der Wirksamkeit von Vorkehrungen zur Störfallverhinderung: Für Maßnahmen nach § 4 der Störfall-Verordnung. Betrachtung vernünftigerweise nicht ausschließbarer Gefahrenquellen.

- Szenarien zur Ermittlung der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen: Für Maßnahmen nach § 5 Nr. 1 der Störfall-Verordnung. Betrachtung vernünftigerweise ausschließbarer Gefahrenquellen (Dennoch-Störfälle). Ursachenunabhängige Entwicklung der Szenarien. Dimensionierung: Orientierung an sog. kritische Masse (M_k)
- Szenarien zur Ermittlung der erforderlichen Informationen für die Erstellung externer Alarm- und Gefahrenabwehrpläne: Zur Ermittlung der nach § 9 Nr. 1 benötigten Informationen. Berücksichtigung von Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen. Ursachenunabhängige Entwicklung der Szenarien. Dimensionierung: Orientierung an der größten zusammenhängenden Masse (GZM)

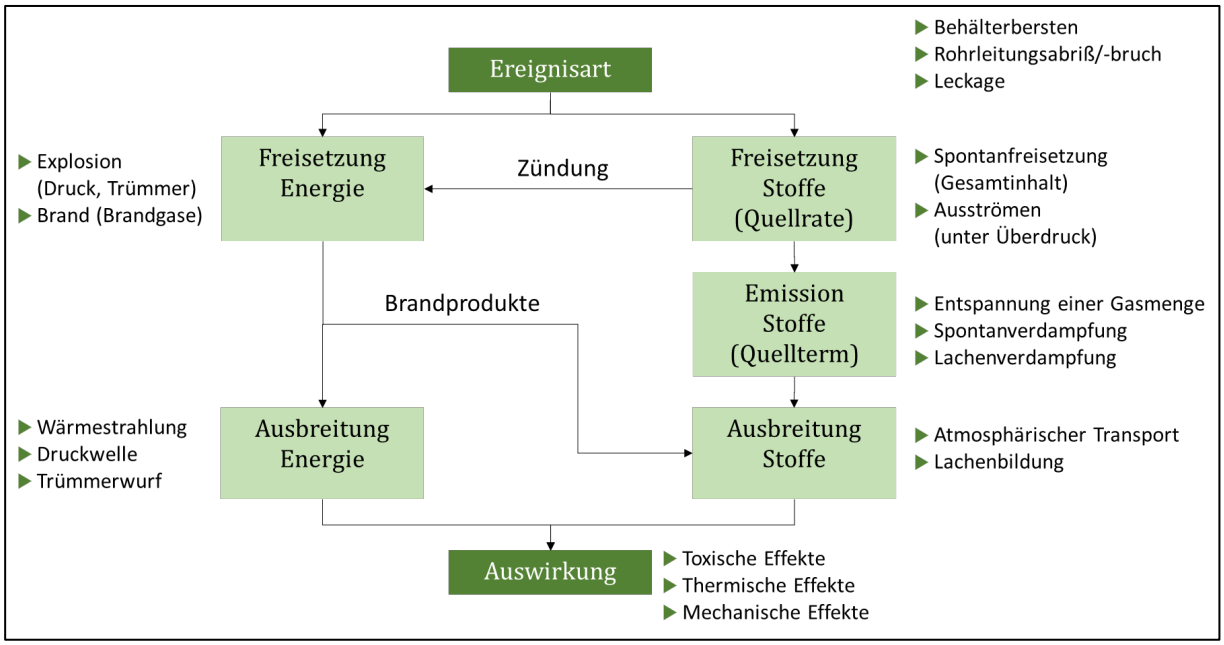
Für die Ermittlung der kritischen Massen M_k sowie der größten zusammenhängenden Massen (GZM) ist entsprechend der Empfehlungen der Vollzugshilfe der Leitfaden SFK-GS-26 heranzuziehen (Abschlussbericht SFK-GS-26 „Schadensbegrenzung bei Dennoch-Störfällen – Empfehlungen für Kriterien zur Abgrenzung von Dennoch-Störfällen und für Vorkehrungen zur Begrenzung ihrer Auswirkungen“).

Bei der Erstellung von Störfallablaufszenarien sind laut Vollzugshilfe weiterhin zu berücksichtigen:

1. Die spezifischen Bedingungen des Betriebsbereichs, des Standortes und der Wechselwirkungen mit der Umgebung,
2. Die möglichen Gefährdungssituationen für Beschäftigte,
3. die im gestörten Betriebsbereich, in der gestörten Anlage bzw. im gestörten Anlageteil vorhandenen Stoffmengen,
4. die spezifischen Stoffeigenschaften unter Einschluss der Stoffe, die bei der Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs entstehen können,
5. Die Ausbreitung der Stoffe in der Luft, in Gewässern oder im Boden nach Freisetzung oder Brand, einschließlich möglicher weiterer Folgen nach einer Freisetzung, einem Brand oder einer Explosion nach dem Stand des Wissens
6. die Wirksamkeit und Durchführbarkeit von Gegenmaßnahmen,
7. Darstellung der räumlichen und gegebenenfalls zeitlichen Verläufe (z.B. ISO-Kurven) von Spitzenkonzentrationen, Dosiswerten, Spitzenüberdruckwerten,

Die Struktur eines Störfallablaufszenarios für einen Dennoch-Störfall stellt sich gemäß SFK-GAS-26 wie folgt dar:

Abbildung 2: Struktur eines Störfallablaufszenarios für einen Dennoch-Störfall



Quelle: Eigendarstellung IZP in Anlehnung an Leitfaden der SKF „SFK-GAS-26 – Schadensbegrenzung bei Dennoch-Störfällen“

Als weitere Quelle empfiehlt die Vollzugshilfe die Arbeitshilfe „Erstellung und Verwendung von Störfallablaufszenarien in der Gefahrenabwehrplanung“ aus dem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Ermittlung und Berechnung von Störfallszenarien nach der 3. Störfall-Verwaltungsvorschrift“ (s.a. Kaiser et. al. (2000)).

Die folgende Abbildung zeigt die in der Arbeitshilfe formulierten Zusammenhänge zwischen den Angaben aus den Störfallszenarien sowie den daraus abgeleiteten Planungsanteilen für die Alarm- und Gefahrenabwehrplanung auf:

Tabelle 8: Zusammenhänge Angaben aus Störfallszenarien und Planungsanteilen

Angaben aus Störfallszenarien	Planungsanteil	Einzelaspekte
Zeitverläufe	Alarmplanung	⇨ Alarmfälle, Alarmstufen, ⇨ Rangfolge der Alarmierung,
Zeitverläufe	Planung von Sofortmaßnahmen	⇨ Optimierung von Einsatzzeiten, ⇨ Eindämmen/Notabschalten, ⇨ Schutz gefährdeter Objekte, ⇨ Sicherstellung/Logistik
Betroffene Flächen	Planung der Meldetätigkeit	⇨ Festlegen von Meldestufen ⇨ Rangfolge des Meldeflusses
Betroffene Flächen	Planung der Warnung,	⇨ Gefährdungsbereiche ⇨ Sirenenbeschallung ⇨ Routen für Lautsprecherwagen ⇨ Angrenzende Betriebe
Betroffene Flächen	Erkundungsplanung,	⇨ Erkundungsrouten ⇨ Schwerpunkte

Angaben aus Störfallszenarien	Planungsanteil	Einzelaspekte
Betroffene Flächen	Evakuierungsplanung,	⇨ Zweckmäßigkeit der Evakuierung ⇨ Aufwand und Zeitpunkt
Betroffene Flächen	Planung öffentliche Sicherheit,	⇨ Zweckmäßigkeit des Sperrens ⇨ Absperrzonen ⇨ Aufwand für Absperrungen
Betroffene Flächen	Informationsplanung	⇨ Verhalten der Bevölkerung ⇨ Medien
Schadenswirkungen	Planung Rettung/Hilfeleistung	⇨ Vermutliche Schäden ⇨ Aufwand für Rettungspersonal ⇨ Verletztentransport ⇨ Notversorgung
Schadenswirkungen	Planung für Folgewirkungen	⇨ Dominoeffekte ⇨ Wasser-, Bodenbelastung
Gesamt	Übungsplanung	⇨ Szenariobezogenes Üben ⇨ Planspiele (Steuerung der Aktionen) ⇨ Koordinationsablauf

Quelle: Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Ermittlung und Berechnung von Störfallszenarien nach der 3. Störfall-Verwaltungsvorschrift“, TÜV Anlagentechnik GmbH 2000

Der LANUV Leitfaden zur Erstellung von Sicherheitsberichten formuliert (LANUV(2023)): „Vielmehr soll die Betrachtung von „Dennoch-Szenarien“ Grundlage für die Beurteilung der Qualität der vom Betreiber getroffenen begrenzenden Maßnahmen sein, wie Werkfeuerwehr, Schulung und Training der Belegschaft für den Alarmfall, Wasservorhänge, Ausbreitungshindernisse, Flucht-wege, Feuerlöscheinrichtungen, persönliche Schutzausrüstung, optische oder akustische Warnmittel.“

3.2.4 Auswirkungsbetrachtungen

Unter einer Auswirkungsbetrachtung wird die Abschätzung des Schadensausmaßes für ein entwickeltes Szenario verstanden. In Abhängigkeit des konkreten Anwendungskontextes kann die Abschätzung mehr oder weniger anspruchsvoll sein.

- binäre Abschätzung, ob im Falle des Eintretens einer Gefahrenquelle mit einem Störfall zu rechnen ist
- erfahrungsbasierte, semiquantitative Expertenabschätzung des Schadensausmaßes. Z.B. zum Zwecke der Beurteilung der Angemessenheit einzelner oder mehrerer risikoreduzierender Vorkehrungen und Maßnahmen.
- Anwendung mathematischer Modelle zur Berechnung von u.a. Massenströmen bei Behälterversagen, Lachenbildungen und -verdampfungen, Gasausbreitungen, Bränden, Explosionen sowie deren Effekte auf Mensch und Umwelt.

Wesentliche Erkenntnisquellen zum Stand der Technik bezgl. geeigneter Modelle und Methoden zur Berechnung von Störfallauswirkungen sind

- Der Forschungsbericht „Ermittlung und Berechnung von Störfallablaufszenarien nach Maßgabe der 3. Störfallverwaltungsvorschrift“ (Kaiser, W. et al. TÜV Anlagentechnik GmbH, Berlin 1999, UBA-FB 000039),
- Das Statuspapier „Auswirkungsbetrachtungen bei störungsbedingten Stoff- und Energiefreisetzungen in der Prozessindustrie - Methodenübersicht und industrielle Anwendung“ (DECHEMA, Frankfurt 2017),

Im internationalen Raum stellen das Yellow book und green book der niederländischen TNO, aber auch weitere Publikationen häufig zitierte Quellen dar.

Durch das Joint Research Center der Europäischen Kommission wurden zwei Computerprogramme ADAM und Rapid-N für Auswirkungsbetrachtungen entwickelt.

3.2.5 Risikobewertung

Trotz größter Sorgfalt bei Planung und Betrieb einer Anlage können Störfallrisiken nicht vollständig ausgeschlossen werden. Es verbleibt ein Restrisiko, da die Häufigkeiten von Störfällen, sowie deren Auswirkungen, durch entsprechende Vorkehrungen und Maßnahmen im Allgemeinen lediglich reduziert, jedoch nicht vollständig getilgt werden können.

Grundsätzlich setzt sich das verbleibende Restrisiko[18] aus einem (korrekt) analysierten und einem nicht analysierten Anteil zusammen. Ursachen von unvollständigen bzw. nicht zutreffenden Analysen können sein:

- Grenzen des menschlichen Erkenntnisstandes: Z.B. „Natech“ im Kontext Klimawandel, neue verfahrenstechnische Prozesse.
- Begrenzte Ressourcen bei der Durchführung der Analyse: Zeitdruck, „falsche“ Zusammensetzung des Analystenteams, mangelhafte Unterlagen.

Korrektheit und Vollständigkeit der durchgeführten Analysen sind von integraler Bedeutung, da sich einerseits Vorkehrungen und Maßnahmen aus den identifizierten Gefahren bzw. aufgestellten Störfallablaufszenarien ableiten und andererseits nur diejenigen Gefahren/Störfallszenarien bei der Berechnung von Risikokenngrößen berücksichtigt werden, welche zuvor identifiziert, bzw. analysiert worden sind.

Ziel der Risikobewertung ist es, das Restrisiko auf ein akzeptables Niveau zu reduzieren, das mit den unternehmensinternen Zielen, den vorhandenen Ressourcen und den gesetzlichen Anforderungen in Einklang steht.

Risikoanalysen (und -bewertungen) sind damit grundsätzlich zweckgebunden:

- Sicherstellung, dass Beschaffenheit, Betrieb und Instandhaltung der Anlage dem aktuellen Stand der Sicherheitstechnik entspricht
- Realisierung eines ausgewogenen Konzeptes zur Verhinderung von Störfällen bzw. zur Minderung von Folgen eingetretener Störfälle (Verteidigung in der Tiefe (Defence in depth), Risikoproportionalität) (-> Anwendung von Risikomatrizen und/oder -graphen)
- Realisierung angemessener Sicherheitsabstände (Raumplanung (Bauleitplanung)),

[18] Zum Begriff „Restrisiko“: Teilweise wird in der Fachliteratur diskutiert, nach dem Stand der Technik vermeidbare Risiken nicht als Teil des Restrisikos zu betrachten (so wird die Unfallserie im Kernkraftwerk Fokushima von der Kerntechnischen Gesellschaft nicht als Realisierung eines Restrisikos angesehen, da es sich hierbei um die Folgen einer falschen, nicht ausreichenden Auslegung gegen Tsunamis handelt. Vgl. https://de.wikipedia.org/wiki/Restrisiko)

- Erarbeitung angemessener Alarm- und Gefahrenabwehrpläne.

Dabei kommen unterschiedliche Bewertungsansätze zum Einsatz:

- Bewertung von Einzelrisiken (z.B. das mit einem Szenario verbundene Risiko).
- Bewertung von kumulierten Risiken (z.B. das Risiko, welches von einem Anlagenteil oder einem Betriebsbereich ausgeht, oder aber das Risiko bzgl. eines unerwünschten Effektes (Überdruck, Wärmestrahlung, …))
- Berücksichtigung ausgewählter Schutzgüter: Menschen (Betriebspersonal und/oder Öffentlichkeit), Umwelt, Sachwerte
- Weitere Untergliederung beim Schutzgut Mensch: Berücksichtigung sämtlicher Wirkungskategorien vs. ausschließliche Berücksichtigung möglicher letaler Effekte
- Bewertungsprinzipien: Qualitative und quantitative Bewertungsansätze.
- Abstufungen in der Bewertung: Akzeptanz und Toleranz

Der gewählte Bewertungsansatz bedingt die Risikokommunikation:

- Unternehmensintern,
- Mit den zuständigen Behörden und der Öffentlichkeit,
- International (Betriebsbereich in Nähe zu einer Landesgrenze).

Die Akzeptanz (Toleranz) von Störfallrisiken ist maßgeblich von der Risikowahrnehmung der Öffentlichkeit bzw. der betroffenen Bevölkerung abhängig. Öffentliche Diskussionen, Informationstransparenz und die Einbeziehung der betroffenen Interessengruppen können einen Einfluss auf die Bewertung der Akzeptabilität von Risiken haben. Die Risikowahrnehmung ist geprägt durch

- die Bekanntheit einer Gefahr,
- die Freiwilligkeit im Eingehen eines Risikos und
- die Beeinflussbarkeit des Risikos (Vgl. Grams, T. (2008)).

Ein Mitarbeiter wird ein persönlich zu tragendes Risiko aufgrund der relativen Freiwilligkeit sich diesem auszusetzen anders einschätzen als ein Anwohner der sich diesem Risiko nicht freiwillig aussetzt.

Zur Beschreibung der Verhältnismäßigkeit von technischen Risiken sind diverse Prinzipien entwickelt worden:

- Stand der Sicherheitstechnik: Beschaffenheit, Betrieb und Instandhaltung der Anlage müssen dem aktuellen Stand der Sicherheitstechnik entsprechen
- GAME (Globalement au moins equivalent - Das System muss mindestens ebenso sicher sein, wie vergleichbare andere Systeme, z.B. das Vorgänger System)
- ALARP (Eine Maßnahme ist nur dann anzuwenden, wenn der Aufwand der Umsetzung und die zu erwartende Erhöhung der Sicherheit in einem zu rechtfertigen Verhältnis stehen). Das Prinzip wird über die Anwendung einer Risikomatrix realisiert

- ALARA (As Low As Reasonably Achievable - so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar)
- GAMAB-Prinzip (Globalement au moins aussi bon – Generell mindestens so gut). Ein neues System muss mindestens genauso sicher sein, wie bereits bestehende, vergleichbare Systeme.
- CBA (cost benefit analysis – Kosten-Nutzen-Analyse)
- MEM (Minimale endogene Mortalität)

4 Übersicht recherchierter Methoden, Verfahren und Modelle

4.1 Allgemeines

Gegenstand des Forschungsprojektes sind Methoden, Verfahren und Modelle der Störfallrisikobeurteilung.

Neben den drei in der Leistungsbeschreibung als gesetzt gekennzeichneten Verfahren

1. in der Schweiz (u.a. Bundesamt für Umwelt /FOEN: Handbuch Störfall-Verordnung),
2. in den Niederlanden / Flandern (u.a. VROM: Guidelines for Quantitative Risk Assessment (2005); Risk Calculation Manual (2019)),
3. des HAZOP-Verfahrens der Berufsgenossenschaften (auch in chemiespezifischer Variante nach BASF) (ISSA/ IVSS Sektion Chemie: Das PAAG-/ HAZOP-Verfahren und weitere praxisbewährte Methoden, 2020)

waren durch den Arbeitnehmer in Abstimmung mit dem UBA drei weitere Verfahren auszuwählen.

Der Auswahl der drei verbleibenden Verfahren ging folgendes Prozedere voraus:

- Identifizierung und (vorläufige) Bewertung der in der Fachliteratur diskutierten Verfahren.
- Hieraus getroffene Vorauswahl mehrerer Verfahren zur Diskussion im ersten Fachgespräch.
- Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den Praxisuntersuchungen (Kapitel 5.1).

Ein Katalog an Bewertungskriterien sollte sicherstellen, dass die (vorläufige) Bewertung möglichst objektiv, nachvollziehbar und vergleichbar erfolgt. (Kapitel 4.2).

Die Kapitel 4.3 ff geben überblicksweise Beschreibungen und Bewertungen zu den identifizierten Verfahren.

Einen Überblick über sämtliche identifizierte Verfahren liefert Kapitel 4.22.

Die Ergebnisse der vertiefenden Betrachtungen schlussendlich ausgewählten Verfahren sind in Kapitel 6 dargestellt.

4.2 Bewertungskriterien für die Verfahren

Die Auswahl der recherchierten Methoden, Verfahren und Modelle sollte möglichst objektiv, nachvollziehbar und vergleichbar erfolgen. Zu diesem Zwecke wurden mehrere Bewertungskriterien erarbeitet.

Tabelle 9: Bewertungskriterien für die Auswahl der Methoden, Verfahren und Modelle

Kriterium	Beschreibung des Kriteriums
Art der Betrachtung	Erfolgt die Betrachtung durch qualitative Angaben (z.B. Eintrittswahrscheinlichkeiten gemäß Risikograph nach VDI2180)? Erfolgt die Betrachtung semiquantitativ (z.B. Risikomatrix, Risikoprioritätszahl)? Erfolgen die Betrachtung quantitativ (Berechnung konkreter Eintrittshäufigkeiten, Berechnung von Schadensausmaßen)?

Kriterium	Beschreibung des Kriteriums
Evaluationsansatz	Welchen grundlegenden Evaluationsansatz verwendet die beschriebene Methode: - induktiv: Entwicklung möglicher Folgen bzw. Auswirkungen eines unerwünschten Ereignisses - deduktiv: Ableitung möglicher Ursachen bzw. Fehler, welche zu einem unerwünschten Ereignis führen können - explorativ/intuitiv: Ermittlung möglicher Ursachen und Folgen der potentiellen Abweichungen.
Erforderliche Fähigkeiten/ Fertigkeiten	Sind evtl. Schulungen und/oder Erfahrungen der Anwender notwendig? Wie praktikabel ist das Verfahren? Handelt es sich um ein moderiertes Verfahren?
Zugänglichkeit und Verbreitung des Methodenwissens	Existiert eine allgemein zugängliche Norm oder ein Anwendungsleitfaden zum Verfahren? Wird das Verfahren umfassend und ausgiebig in der Fachliteratur diskutiert? Wird das Verfahren praktisch angewendet?
Erfüllung der rechtlichen Anforderungen	Inwiefern werden die Anforderungen der StörfallV durch das Verfahren abgedeckt? - Nehmen Quellen zum Verfahren explizit Bezug auf die Eignung für Gefahrenanalysen bis Störfallrisikobewertungen im Rahmen der StörfallV? - Existieren spezielle Empfehlungen zum Umgang mit den Anforderungen, die sich aus der Zuordnung der zu betrachtenden Anlagen zu Betriebsbereichen entsprechend der StörfallV ergeben? - Betrachtungsumfang: Berücksichtigung sämtlicher sicherheitsrelevanter Anlagenteile
Abgedeckte Schritte der Störfallrisiko-beurteilung	Welche Schritte der Störfallrisikobeurteilung werden abgedeckt (Schritte: Gefahrenanalyse, Bestimmung Stand der Sicherheitstechnik, Entwicklung von Szenarien, Abschätzung möglicher Auswirkungen, Risikobewertung). Wird mit dem Verfahren (der Methode) der jeweilige Schritt komplett abgedeckt oder wird das Verfahren (die Methode) nur unterstützend angewendet?
Art der berücksichtigten Gefahrenquellen	Ist aus Empfehlungen, Beschreibungen oder Verfahrensanweisungen erkennbar, dass die gemäß StörfallV, §3 (2) zu analysierenden Gefahrenquellen entsprechend der StörfallV vollständig abgedeckt werden oder mit/ohne zusätzlichen Erklärungsbedarf abgedeckt werden können?
Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse	Inwiefern unterliegen die Analyseergebnisse der Subjektivität des(der) Methodenanwender(s)? Welche Freiheitsgrade gibt es bei der Anwendung der Methoden, welche zur Varianz in den Ergebnissen führen können? oder anders: Inwiefern sind die Ergebnisse manipulierbar (z.B. durch freie Einstellungsmöglichkeiten von Parametern bei der Benutzung von Computerprogrammen?)
Teamorientierte Methode vs. Einzelexpertise	-
Verfügbarkeit von Bewertungs-katalogen	Gemeint sind zum Beispiel FMEA-Bewertungstabellen, Risikomatrizen, Definitionen von Risikoklassen etc. (siehe auch "Das PAAG-/HAZOP-Verfahren und weitere praxisbewährte Methoden")
Statistische Eingangsdaten	Werden verfahrensimmanent Eingangsdaten bereitgestellt? Kann der Ursprung der Daten nachvollzogen werden? Auf welchen Quellen basieren die Angaben von Schätzgrößen und welches Alter haben diese Quellen?

Kriterium	Beschreibung des Kriteriums
	Ist der Anwendungsbereich der Ursprungsquelle definiert, bzw. ähnlich des Anwendungsbereiches, für den die Schätzung herangezogen wird?
Verfügbarkeit von Software-Lösungen	Wird die Anwendung der Methode (des Verfahrens, des Modells) durch geeignete Software erleichtert? Sind diese kostenpflichtig oder frei verfügbar (open source)?
Aufwand für Durchführung der Analyse	Unterstützung durch Benutzung von Softwarelösungen? Anzahl involvierter Analysten, Dauer (Komplexität) Analyse?
Prüfbarkeit durch Behörden	Sind Plausibilitätsprüfungen mit einem anderen Ansatz (durch Behörden) möglich? --> "Schnelltest"

4.3 HAZOP-Verfahren

4.3.1 Beschreibung

Das HAZOP-Verfahren (**Haz**ard and **Op**erability) bzw. PAAG-Verfahren stellt eine Leitwort-gelenkte Kreativtechnik zur systematischen Ermittlung denkbarer Störfalle und deren Ursachen in einem interdisziplinären Team dar. Es wurde in den früheren 1960er Jahren vom britischen Chemieunternehmen ICI (Imperial Chemical Industries) erstmals angewendet, um Gefahrenquellen für Pflanzenschutzmittelläger systematisch analysieren zu können.

Das HAZOP-Verfahren kann prinzipiell auf alle Arten von Anlagen in der Industrie angewandt werden: von großen kontinuierlichen Anlagen der Petrochemie, über kleine diskontinuierliche Einheiten bis hin zu Einzelaggregaten, wie Autoklaven oder Maschinen. Darüber hinaus kann das Verfahren auch für die Überprüfung elektronischer Schaltungen oder von Transportvorgängen eingesetzt werden. Gesichtspunkte bei einer HAZOP-Studie können neben Anlagensicherheit und Umweltschutz auch Arbeitssicherheit, Qualitätssicherung und Verfügbarkeit der Systeme sein (s. Ratgeber Anlagensicherheit (2015)).

Das im deutschsprachigen Raum häufig verwendete Kürzel „PAAG“ ist ein Synonym für den Begriff HAZOP und leitet sich aus den vier Hauptschritten des HAZOP-Verfahrens ab (siehe nachfolgende Übersicht).

Hauptschritte des HAZOP-Verfahrens:

- Prognose: Systematische Suche möglicher Abweichungen und Störungen
- Auffinden der Ursachen: Ermitteln der Ursachen der jeweiligen Abweichungen
- Abschätzen der Auswirkungen: Ermitteln der Folgen der Abweichungen und möglicher Konsequenzen
- Gegenmaßnahmen: Bewerten vorhandener Maßnahmen und Entscheidung über angemessene Gegenmaßnahmen

Den vier Hauptschritten geht eine Gliederung des zu betrachtenden Systems in überschaubare Funktionseinheiten bzw. Handlungssequenzen voraus, gefolgt von der Formulierung zugehöriger Sollfunktionen des bestimmungsgemäßen Betriebs, die den Zweck der jeweiligen Einheit bzw. Handlungssequenz präzise als verbale Anforderung beschreiben.

Aufbauend auf den definierten Sollfunktionen werden mittels sogenannter Leitworte Abweichungen und Störungen „generiert". Im „klassischen" HAZOP kommen sieben Leitworte zur Anwendung, die jeweils mit einer bestimmten Interpretation einhergehen:

- 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

Nach der Analyse und den Beschreibungen denkbarer Abweichungen erfolgt die Suche nach möglichen Ursachen, welche der Störung zugrunde liegen könnten. Ursachen können dabei das Versagen technischer Einrichtungen, der Ausfall von Energien und menschliche Fehlhandlungen umfassen, aber auch umgebungsbedingte Gefahrenquellen und Eingriffe Unbefugter können mit der HAZOP untersucht werden.

Im dritten Hauptschritt werden unter Berücksichtigung der Prozesskenntnisse für jedes Szenario mögliche Auswirkungen abgeleitet bzw. berechnet. Insbesondere erfolgt in diesem Schritt die Einschätzung, ob es sich bei dem Szenario um ein sicherheitsrelevantes bzw. störfallrelevantes Szenario handelt.

Bereits vorhandene bzw. angedachte Gegenmaßnahmen (z. B. Überfüllsicherungen, Sicherheitsventile, Auffangwannen, Betriebsanweisungen) werden bei der Analyse der Ursachen und Auswirkungen zunächst nicht berücksichtigt. Dies ermöglicht es, den Beitrag der Gegenmaßnahmen zur Risikoreduktion besser herausarbeiten zu können und so die erforderliche „Qualität" (Zuverlässigkeit) dieser Einrichtungen besser einschätzen zu können.

Für die identifizierten, sicherheitsrelevanten Szenarien werden schließlich auf Basis der Erkenntnisse und der technischen Realisierbarkeit eintrittsverhindernde und gegebenenfalls schadensbegrenzende Maßnahmen festgelegt. Dabei kann dann auf die bereits vorhandenen Gegenmaßnahmen verwiesen werden, sofern diese als wirksam und ausreichend eingeschätzt wurden. Die geforderte Zuverlässigkeit (Wirksamkeit) der Gegenmaßnahmen orientiert sich dabei an der Schwere der Auswirkungen und der Wahrscheinlichkeit für das Wirksamwerden der Ursachen.

Die Dokumentation der HAZOP-Studie erfolgt üblicherweise in tabellarischen Formblättern. Die schriftliche Darstellung zur systematischen Vorgehensweise macht das gewählte Sicherheitskonzept nachvollziehbar und die getroffenen Entscheidungen transparent.

4.3.2 Bewertung

Tabelle 10: Bewertung des HAZOP-Verfahrens

Kriterium	Ausprägung
Art der Betrachtung	rein qualitativ, lässt erst in Kombination mit weiteren Methoden (z.B. LOPA oder Risikograph) semiquantitative Betrachtungen zu
Evaluationsansatz	explorativ; Identifikation möglicher Ursachen und Folgen im Laufe von mehreren Meetings im Rahmen einer Expertenrunde
erforderliche Fähigkeiten/Fertigkeiten	erfordert Moderation mit entsprechenden Kenntnissen und Erfahrungen; moderierende Person sollte sorgfältig vorbereitet, sowie in der Anwendung der Methoden ausgebildet und erfahren sein; Erfolg der Analyse in großem Maße von den Fähigkeiten und dem Geschick der Moderation abhängig; Gewährleistung von Vollständigkeit der Betrachtung nur mit Erfahrung und Routine der Moderation gegeben; Vorbereitung der Teammitglieder zur Methodik erleichtert den Einstieg in die Analysearbeit
Zugänglichkeit und Verbreitung des Methodenwissens	in verfügbaren Quellen gut verständlich und anhand von Beispielen nachvollziehbar beschrieben
Erfüllung der rechtlichen Anforderungen	breite Akzeptanz vorhanden sowie Erfüllung der rechtlichen Anforderungen gewährleistet (siehe auch Leitfaden KAS-55 „Mindestangaben im Sicherheitsbericht“)
abgedeckte Stufen des Analyseprozesses	vorrangig zur Identifikation von potenziellen und auch nicht offensichtlichen Gefahren durch Aufdecken von möglichen Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb mittels systematischer Fragestellungen (Gefahrenanalyse), keine Risikobewertung
Art der berücksichtigten Gefahrenquellen	betriebsbedingte, umgebungsbedingte und menschliche Gefahrenquellen, wie das Versagen von technischen Einrichtungen, der Ausfall von Energien oder menschliche Fehlhandlungen; generell keine Festlegung, wie weit ein Ursachenbaum zurückverfolgt werden muss
Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse	i. d. R. nicht gegeben, da abhängig von der Zusammensetzung des Analyseteams sowie von den Kenntnissen und Erfahrungen der Teammitglieder
teamorientierte Methode vs. Einzelexpertise	Verfahren ist teamorientiert; Umsetzung immer von interdisziplinärer Gruppe aus unterschiedlichen Fachbereichen (bei verfahrenstechnischen Anlagen: Produktion bzw. Verfahrensentwicklung, Mess- und Regeltechnik, Ingenieurtechnik sowie Sicherheitsfachleute) → Berücksichtigung unterschiedlicher Gesichtspunkte und Erfahrungen;

Kriterium	Ausprägung
	Leitung (+ Protokollführung) durch eine möglichst unabhängige Moderation
Verfügbarkeit von Bewertungskatalogen	nicht erforderlich, da Risikobewertung nicht Bestandteil der Methode; Kriterienkataloge in der Form von sieben Leitworten
statistische Eingangsdaten	nicht relevant, da keine Umsetzung einer quantitativen Gefahrenanalyse
Verfügbarkeit von Software-Lösungen	Dokumentation in tabellarischen Formblättern, entweder mittels üblicher Bürosoftware (z. B. MS Excel) oder spezieller Programme (z. B. Isograph HAZOP+, PHA Pro oder ZHA WORKS und Safety Lifecycle Manager SLM); spezielle Software-Unterstützung eher zweitrangig
Aufwand für Durchführung der Analyse	erheblich (personell und zeitlich), Dauer der Studie insbesondere bedingt von Umfang und Tiefe der Ursachenforschung → Steuerung der Diskussion des Expertenteams durch Moderation
Prüfbarkeit durch Behörden	keine Plausibilitätsprüfungen vorgesehen, aber Nachvollziehbarkeit auf Basis der geforderten umfassenden Dokumentation gegeben

4.4 BASF-HAZOP und weitere Modifikationen des HAZOP-Verfahrens

Die Praxisuntersuchungen und Recherchen haben gezeigt, dass die Leitworte des „klassischen" HAZOP-Verfahrens („Nein/Nicht", „Mehr", „Weniger", „Sowohl als auch", „Teilweise", „Umkehrung", „Anders als"), in der Regel durch die Anwender modifiziert werden. Als Begründung wird angegeben, dass die strikte Anwendung eben dieser sieben Leitworte nicht praxisnah, bzw. zielführend für die Analyse der konkreten Anlagen ist. Durch die Modifikationen wird einerseits Zeitersparnis bei der Durchführung der Analyse, andererseits Vollständigkeit bezgl. untersuchter Gefahren, angestrebt.

Die nachfolgenden Kapitel sollen einen Eindruck davon liefern, wie solche Modifikationen aussehen können, wie der Prozess der Modifikation gestaltet wird und welche Arten von Gefahrenquellen mit den modifizierten HAZOP-Verfahren analysiert werden.

Da die Modifikationen geringfüge Änderungen bzw. Konkretisierungen zum klassischen HAZOP darstellen, wurde darauf verzichtet, diese separat zu bewerten (es wird auf die Bewertung des klassischen HAZOP-Verfahrens in Kap. 4.3.2 verwiesen).

4.4.1 BASF-HAZOP

Das BASF-HAZOP-Verfahren wird zur Untersuchung technischer Gefahrenquellen angewandt und unterscheidet sich vom klassischen HAZOP-Ansatz durch die Konkretisierung der Leitworte (Vgl. TAA-GS-29). Beispiele können der Broschüre der IVSS zum HAZOP-Verfahren entnommen werden (Sommer, J. et al. (2008)):

Tabelle 11: Leitwort-Katalog BASF für stoffbedingte hypothetische Störungen

Chemische Zusammensetzung	Physikalische Parameter	Dosierung
Konzentration: Mehr Weniger	Temperatur: Mehr weniger	Dosiermenge: mehr weniger
Anderer Stoff	Druck: mehr weniger	Verhältnis/Stöchiometrie
	Stand: mehr weniger	Reihenfolge
	Viskosität/Dichte: mehr weniger	Zeitpunkt

Tabelle 12: Leitwort-Katalog BASF für anlagenbedingte hypothetische Störungen

Dichtheit	Wärmetransport	Fördern/Mischen
Apparatur undicht: nach außen nach innen	Kühlung: ausgefallen mehr weniger	Förderung: ausgefallen mehr weniger teilweise sowohl als auch Umkehrung
Armatur undicht: nach außen im Durchgang	Heizung: ausgefallen mehr weniger eingeblockter Abschnitt	Durchmischung: ausgefallen Rührer dreht zu langsam/ zu schnell
Rohr/Flansch/Welle undicht		

Die analysierten Gefahren werden anhand einer konzerneinheitlichen Risikomatrix bewertet. In Abhängigkeit der Höhe des ermittelten Risikos werden verschiedene risikoreduzierende Vorkehrungen und Maßnahmen bevorzugt:

- Extremes, völlig unakzeptables Risiko: Verfahrens- oder Design-Änderung bevorzugt
- Sehr großes, unakzeptables Risiko: Verfahrens- oder Design-Änderung, oder eine Schutzeinrichtung mit SIL 3
- Großes, unakzeptables Risiko: Verfahrens- oder Design-Änderung, oder eine Schutzeinrichtung mit SIL
- Mittleres, akzeptables Risiko, dass weiter reduziert werden sollte: Eine Überwachungseinrichtung guter Qualität mit dokumentierter Prüfung oder organisatorische Maßnahme von guter Qualität

- Kleines, akzeptables Risiko, dass weiter reduziert werden könnte: Eine Überwachungseinrichtung oder organisatorische Maßnahme
- Sehr kleines, akzeptables Risiko: Keine

Im Rahmen der Praxisuntersuchungen (siehe Kapitel 5.1) hat sich herausgestellt, dass alle befragten Betreiber das HAZOP-Verfahren anwenden. Manche der Betreiber haben eigene Modifikationen des Verfahrens entwickelt. Nachfolgend wird eine kurze Übersicht über die jeweils gewählten bzw. verfolgten Ansätze gegeben.

4.4.2 HAZOP-Verfahren Betreiber no. 2

Die entwickelte Modifikation stellt ein Leitwortsystem aus zwei Ebenen dar. Leitworte der ersten Ebene werden mit der 2. Ebene konkretisiert (Tabelle 13). Die Modifikationen werden im Zuge der Erstellung und Fortschreibung der HAZOP-Analysen gleichzeitig erprobt und weiterentwickelt.

Mit der HAZOP-Analyse werden vornehmlich betriebliche Gefahrenquellen untersucht. Umgebungsbedingte Gefahrenquellen werden separat betrachtet. So werden beispielsweise die Gefahrenquellen „Niederschläge und Hochwasser“ sowie „Wind sowie Schnee- und Eislasten“ (-> TRAS 310 und 320) separat betrachtet.

Ebenso erfolgt keine Untersuchung organisatorischer Gefahrenquellen (Beispiel: Das Szenario „Druckregler ungewollt offen-> Überdruck Tank X, gleichzeitig Sicherheitsventil Tank X in Wartung (Doppelfehler)“ wird mit der HAZOP nicht untersucht. Entsprechend wird die Gegenmaßnahme „Umschalten Befüllung Tank X auf Tank Y während Wartung“ nicht im Rahmen der HAZOP ermittelt).

Die Anlagen werden in sogenannte Knoten untergliedert und diese wiederum in einzelne Teilbereiche. Dies dient vornehmlich der Übersichtlichkeit der Analysen. Grundsätzlich steht den Analyseteams die konkrete Aufgliederung frei, jedoch wird darauf geachtet, verfahrenstechnisch Zusammenhänge durch die Wahl der Knoten nicht zu verschleiern.

Tabelle 13: Leitwortsystem Betreiber no. 2

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, Verwechselung, 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

Abweichung Ebene 1	Abweichung Ebene 2
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

4.4.3 HAZOP-Verfahren Betreiber no. 3

Betreiber no.3 wendet kein modifiziertes HAZOP-Verfahren an.

4.4.4 HAZOP-Verfahren Betreiber no. 4

Betreiber no. 4 wendet ein modifiziertes HAZOP-Verfahren an. Folgendes Leitwortsystem wurde entwickelt:

1. Konzentrationsüber-/unterschreitung
2. Mengenüber-/unterschreitung
3. Standüber-/unterschreitung
4. Überfüllen / Leerfördern
5. Drucküber-/unterschreitung
6. Temperaturüber-/unterschreitung
7. Erstarren/Einfrieren
8. mechanische Beschädigung
9. Leckage
10. Explosion
11. Rückströmen
12. falscher Weg
13. Ausfall von Betriebsmitteln/Energien
14. unerwünschte chemische Reaktion

Mit der HAZOP wird das verfahrenstechnische System ohne Bezug zum räumlichen Kontext (Stichwort: Umgebungsbedingte Gefahrenquellen) untersucht. Umgebungsbedingte Gefahrenquellen werden mittels eines weiteren, checklistenbasierten Verfahren betrachtet.

Wie auch bei Betreiber no.2 wird bei der Wahl der Knoten (zu analysierende Teileinheiten) darauf geachtet, dass die verfahrenstechnischen Zusammenhänge nicht verloren gehen.

4.4.5 Weitere Modifikationen

Weitere Modifikationen können u.a. der ISSA Broschüre „Das PAAG- / HAZOP-Verfahren und weitere praxisbewährte Methoden (2020)“ entnommen werden.

4.5 Checklisten

4.5.1 Beschreibung

Die Anwendung von Checklisten stellt eine Methode zur systematischen Gestaltung von Entscheidungsprozessen dar. Dabei sind alle entscheidungsrelevanten Faktoren übersichtlich in Listen zusammengestellt, so dass diese in ähnlich gelagerten Entscheidungssituationen als Hilfsmittel herangezogen werden können und dabei ggf. ergänzt oder korrigiert werden.

Vor der Verwendung im Rahmen der Gefahrenanalyse und Risikobewertung müssen Checklisten zunächst erstellt werden. Darauf aufbauen können dann im konkreten Anwendungsfall Sollfunktionen, Gefahrenquellen, Störfälle, Ereignisszenarien, Auswirkungen oder Risiken nach einer vorgegebenen Reihenfolge auf die Erfüllung bestimmter Kriterien abgefragt werden.

Checklisten finden insbesondere dort Anwendung, wo Anforderungen aus der Erfahrung bekannt oder in Regelwerken festgeschrieben sind. Durch gezielte Fragestellungen und einen konkreten Praxisbezug entfallen ausschweifende Diskussionen.

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

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)

4.5.2 Bewertung

Tabelle 14: Bewertung des Checklisten-Verfahrens

Kriterium	Ausprägung
Art der Betrachtung	maßgeblich qualitative Betrachtungen
Evaluationsansatz	deduktiv; es werden nur Aspekte abgefragt, die bei der Erstellung der Fragen bereits bekannt waren
erforderliche Fähigkeiten/Fertigkeiten	entsprechendes Fachwissen über das ausgewählte Thema und die damit verbundenen Gefahrenpotenziale für die Ausarbeitung der Fragestellungen; Fachexpertise bei komplexen Wirkungszusammenhängen zur Erfassung und Bewertung der Antworten
Zugänglichkeit und Verbreitung des Methodenwissens	Verwendung von Checklisten zur Prüfung der Vollständigkeit z. B. von Ausrüstungsteilen ist recht verbreitet und nicht auf verfahrenstechnische Anlagen beschränkt
Erfüllung der rechtlichen Anforderungen	weitverbreitetes Risikoanalyseverfahren und eine in der Verwaltungspraxis akzeptierte Methode (siehe auch Leitfaden KAS-55 „Mindestangaben im Sicherheitsbericht“)
abgedeckte Stufen des Analyseprozesses	abhängig von den vorgefertigten Inhalten der Checklisten-Fragen; keine Realisierung einer Risikobewertung
Art der berücksichtigten Gefahrenquellen	abhängig von den vorgefertigten Inhalten der Checklisten-Fragen; grundsätzlich können alle Gefahrenquellen abgedeckt werden
Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse	hohe Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse durch eine gezielte Fragestellung
teamorientierte Methode vs. Einzelexpertise	zur Abdeckung eines möglichst großen Wissensbereichs Erstellung durch Team aus Anlagenbetreiber gemeinsam mit Vertretern der Bereiche Process Safety, Process Control, Process Engineering, Maintenance und ggf. anderen relevanten Bereichen auf Grundlage einer internen Richtlinie
Verfügbarkeit von Bewertungskatalogen	keine erforderlich, da keine Risikobewertung erfolgt
statistische Eingangsdaten	keine erforderlich
Verfügbarkeit von Software-Lösungen	Keine speziellen Lösungen bekannt; umsetzbar mit üblicher Bürosoftware oder z. B. mit MS Forms
Aufwand für Durchführung der Analyse	zeitökonomischer Soll/Ist-Vergleich durch gezielte Fragestellungen mittels Ja/Nein- Fragen und einem konkreten Bezug zur Praxis, dadurch keine ausschweifenden Diskussionen; zur Vermeidung von Missverständnissen bei den Formulierungen Verwendung von offenen Fragen, die eine beschreibende Antwort erfordern, damit einher geht allerdings ein erhöhter Zeitbedarf
Prüfbarkeit durch Behörden	Die Antworten auf die Fragen sind zu dokumentieren. Dabei kann eine Überprüfung anhand von Plausibilitätsprüfungen erfolgen.

4.6 Risikomatrix

4.6.1 Beschreibung

Eine Risikomatrix, auch als Risikobewertungs-, Risikoakzeptanz- oder auch Risikobeurteilungsmatrix bezeichnet, ist ein Instrument zur Bewertung von Risiken. Dabei kann es sich um Risiken von Störfällen, aber auch um andere Aspekte unternehmerischer Tätigkeiten handeln.

Risikomatrizen bestehen aus zwei Achsen:

- Risikowahrscheinlichkeit: Diese Achse beschreibt, wie wahrscheinlich es ist, dass ein bestimmtes Risiko eintritt. Sie kann in numerischen Werten (z. B. von 1 bis 5) oder in qualitativen Begriffen (z. B. "sehr unwahrscheinlich" bis "sehr wahrscheinlich") ausgedrückt werden.
- Risikoauswirkung: Diese Achse beschreibt die potenziellen Auswirkungen oder Konsequenzen, die eintreten könnten, wenn das Risiko eintritt. Auch hier können numerische Werte (z. B. von 1 bis 5) oder qualitative Begriffe (z. B. "geringfügig" bis "verheerend") verwendet werden.

Die Risikomatrix dient dazu, Risiken zu priorisieren und zu entscheiden, welche Maßnahmen ergriffen werden sollten, um Risiken zu vermindern, zu kontrollieren oder zu akzeptieren. Sie ermöglicht eine klare Visualisierung bestehender Risiken und unterstützt Entscheidungsträger dabei, Ressourcen effektiv zu allokieren.

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

- So können beide Achsen in beliebig viele Klassen aufgeteilt werden. In der Praxis sind häufig 3-8 Abstufungen anzutreffen.
- Je Klasse werden die damit verbundene Risikowahrscheinlichkeit bzw. Risikoauswirkung qualitativ oder (semi-)quantitativ beschrieben.
- Je Risikokombination ist festzulegen, wie das Risiko zu bewerten ist und welche Konsequenzen aus dem analysierten Risiko gezogen werden sollen. So reichen die Unterteilungsansätze von einfachen Unterscheidungen zwischen akzeptabel/nicht akzeptabel, über das Formulieren von Übergangsphasen, bis hin zu ausformulierten Aussagen, welcher Art zusätzliche risikoreduzierende Maßnahmen sein können oder müssen, um das analysierte Risiko zu reduzieren.

Vom TÜV Austria wurde eine Risikoakzeptanzmatrix zur Bewertung von Einzelszenarien erarbeitet (Vgl. Preiss, Struckl (2017)), welche einen Konsens unter Rückgriff auf in verschiedenen europäischen Regulierungsrahmen definierte Sicherheitsziele darstellt und damit als Grundlage zur Erstellung einer eigenen Risikomatrix dienen kann.

Abbildung 3: Vom TÜV Austria entwickelte Risikoakzeptanzmatrix

[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, Struckl (2017)

Eine typische Risikomatrix kann gemäß TÜV Rheinland aber auch wie folgt ausschauen:

Abbildung 4: Eine typische Risikomatrix gemäß TÜV Rheinland

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 mehr-mals jährlich beim Unter-nehmen auf	Tritt mehr-mals jähr-lich beim Betriebs-bereich 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	Erebliche 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: Eigendarstellung IZP in Anlehnung an TÜV Rheinland[19]

[19] https://risktec.tuv.com/knowledge-bank/the-matrix-reloaded-our-guide-to-the-risk-assessment-matrix/

4.7 Risikograph nach VDI 2180

4.7.1 Beschreibung

Die Prozessindustrie verarbeitet Stoffe und Materialien in chemischen, physikalischen, biologischen oder anderen technischen Prozessen und Verfahren. Ein großer Teil der verarbeitenden Betriebe im Bereich der StörfallV dürfte der Prozessindustrie zuzurechnen sein.

Die Richtlinie besteht aus den folgenden Blättern:

- Blatt 1 Einführung, Begriffe, Konzeption
- Blatt 2 Planung, Errichtung und Betrieb von PLT-Sicherheitsfunktionen
- Blatt 3 Nachweis der Ausfallwahrscheinlichkeit im Anforderungsfall (PFD)

Die StörfallV benennt im § 4, Pkt. 2 „Warn- Alarm- und Sicherheitseinrichtungen“. Zu den Letzteren gehören auch die bisherigen PLT-Betriebseinrichtungen mit Schutzfunktion und PLT Sicherheitseinrichtungen (neue Terminologie, s. VDI 2180, Blatt 1, Abschnitt 1 „Anwendungsbereich“)

Die Richtlinie definiert weiter als zur Auslegung der Sicherheitsintegrität maßgebendes gefährliches Ereignis (VDI 2180:2019-04 – Blatt 1,Abschnitt 2 „Begriffe“): „Ereignis, das unmittelbar zu Personenschäden oder Umweltschäden oberhalb des Grenzrisikos führen kann oder das innerhalb oder durch das eine „ernste Gefahr“ im Sinne der Störfall-Verordnung (12. BImSchV) entstehen kann.“

Bezüglich der Anwendung von PLT-Sicherheitseinrichtungen wird angegeben: „PLT-Sicherheitseinrichtungen kommen üblicherweise dann zum Einsatz, wenn andere Maßnahmen nicht anwendbar, nicht ausreichend oder bei vergleichbarer Risikoreduzierung nicht wirtschaftlich sind. Die Anwendung möglichst einfacher, über-schaubarer und unmittelbar wirkender Maßnahmen (z. B. Sicherheitsventile, druckfeste Absicherung) führt in der Regel zu sicheren und gleichzeitig wirtschaftlichen Lösungen.“

Bezüglich des Sicherheitsmanagements gibt die Richtlinie an (VDI 2180:2019-04 – Blatt 1, Abschnitt 4.2, „Managementsystem der funktionalen Sicherheit“):„Das in der europäischen DIN EN 61511 formulierte Sicherheitsmanagementsystem für PLT-Sicherheitseinrichtungen stellt eine bewährte Vorgehensweise für die Erfüllung der Anforderungen von § 8 Abs. 3 der 12. BImSchV in Bezug auf PLT-Einrichtungen dar und ist auf alle PLT-Sicherheitsfunktionen anzuwenden (siehe Abschnitt 7.3).“

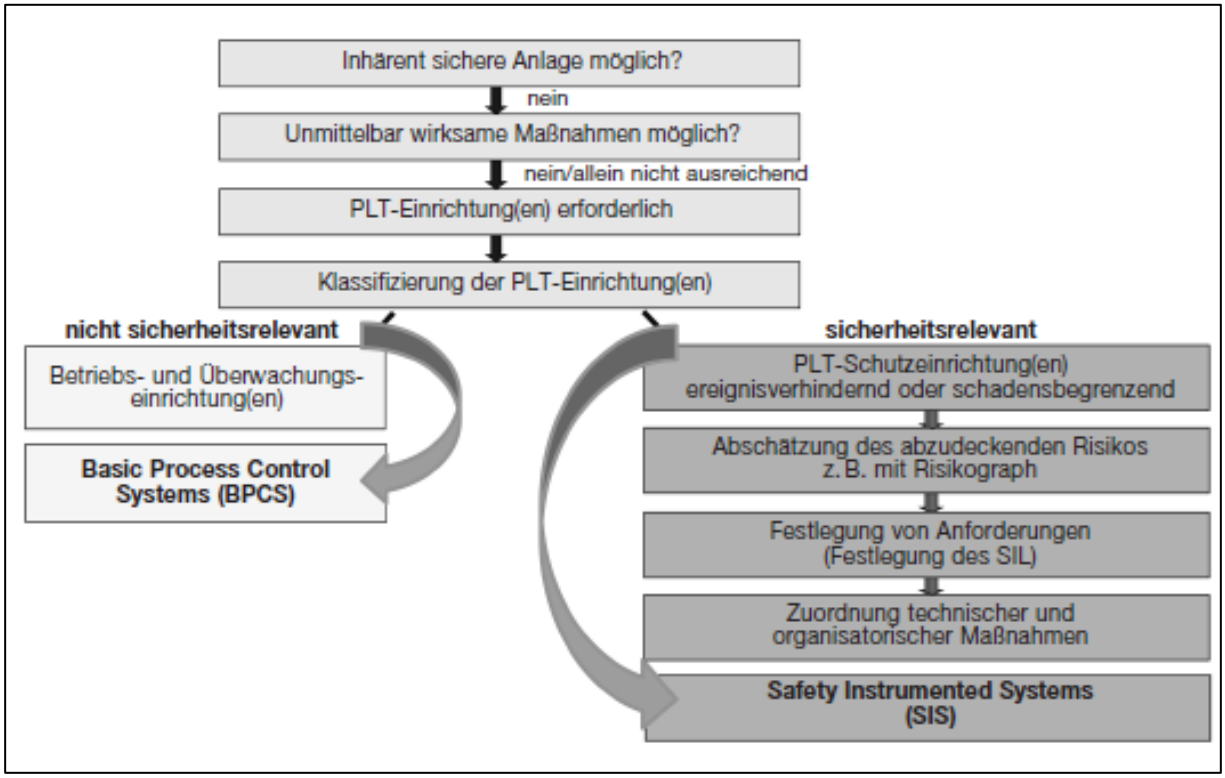
Am Beginn des in der Richtlinie spezifizierten Sicherheitslebenszyklus steht die Gefährdungs- und Risikobeurteilung. Dabei ist zu prüfen, ob die Risikominderung durch eine PLT-Einrichtung realisiert werden soll oder ob andere, unmittelbar wirkende Maßnahmen zweckmäßiger sind (s. VDI 2180:2019-04 – Blatt 1, Abschnitt5.4 „Festlegung von Anforderungen und – im Fall von PLT-Sicherheitsfunktionen – Zuordnung von Sicherheitsintegritätsleveln“).

Weiter wird angeführt „Im Ausnahmefall können auch organisatorische Sicherheitsmaßnahmen (z. B. manuelle Bedieneingriffe nach optischen oder akustischen Alarmen) zum Einsatz kommen, wenn eine technische Maßnahme nicht möglich oder nicht sinnvoll einsetzbar ist (z. B. Raumluftüberwachung mit Alarmierung beim Überschreiten festgelegter Grenzwerte und anschließender Bedienertätigkeit)“. Diese organisatorischen Maßnahmen sind in der Sicherheitsbetrachtung mit zu bewerten.“

Die Beschreibung in der Richtlinie stellt hier also eher auf eine vollständige Gefahrenanalyse ab, als auf eine isolierte Betrachtung der Risikoarten, die durch PLT-Einrichtungen gemindert werden können – genannt wird: „Anforderungen zur Risikoreduzierung und der PLT-Sicherheitsfunktionen, die zur notwendigen Risikoreduzierung benötigt werden“ (s. Tabelle 3 der Richtlinie VDI 2180:2019-04 – Blatt 1).

Obschon die Richtlinie sich eigentlich nur auf PLT-Sicherheitseinrichtungen bezieht, wird damit deutlich, dass es eher einer Betrachtung aller Risiken bedarf, um die notwendigen Schutzmaßnahmen abzuleiten, die wirtschaftlich durch PLT-Sicherheitseinrichtungen reduziert werden können (s.a. nachfolgende Abbildung aus VDSI (2015)).

Abbildung 5: Vorgehen bei der Ermittlung und Klassifizierung des Bedarfes von PLT-Sicherheitseinrichtungen nach VDI 2180



Quelle: VDSI Ratgeber Anlagensicherheit

Mit der verwendeten Definition für den bestimmungsgemäßen Betrieb stellt die Richtlinie klar, dass keinesfalls nur der Normalbetrieb für die Risikoanalyse ausschlaggebend sein darf.

Nach Richtlinie VDI 2180:2019-04 umfasst der bestimmungsgemäße Betrieb:

- Normalbetrieb
- An- und Abfahrbetrieb
- Inbetriebnahme und Außerbetriebnahme
- Probebetrieb
- Inspektions-, Wartungs- und Instandsetzungsvorgänge

Im Anhang zu Blatt 1 geht die Richtlinie auf die Risikoermittlung ein. Grundsätzlich verweist die Richtlinie auf die in IEC 61511-3 aufgeführten Methoden zur Risikoermittlung.

Mit der Anwendung des Risikographen werden die Schutzeinrichtungen mit Anforderungen an die Sicherheitsintegrität belegt.

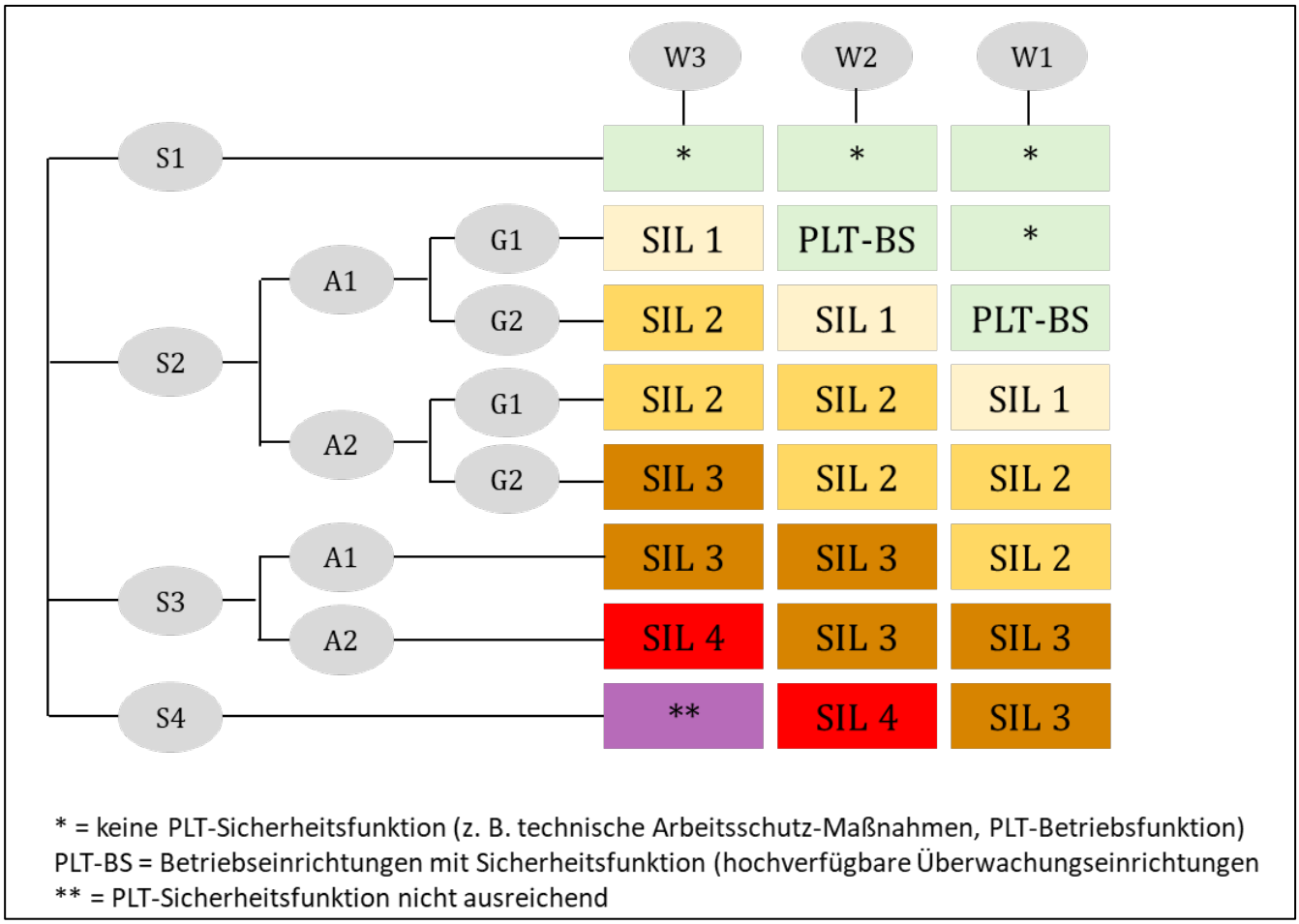
Ein Risikograph gestattet die Einstufung eines Risikos mit bestimmten Bewertungskriterien. Dabei ist das Risiko proportional zur Häufigkeit und der Auswirkung des gefährlichen Ereignisses. Die Auswirkungen beziehen sich bei der Anwendung nach Norm VDI/VDE 2180 auf Personen- und Umweltschäden

In Abhängigkeit der technischen Umsetzung der betrachteten Sicherheitsfunktionen kann neben SIL auch der Performance Level (PL) für die Festlegung der Sicherheitsanforderungen zur Anwendung kommen (s. DIN EN 13849).

Qualitative Einflussgrößen (Parameter) des Risikographen (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

Abbildung 6: Risikograph nach VDI/VDE 2180-1 (Stand April 2019)



Quelle: Eigendarstellung IZP in Anlehnung an VDI/VDE 2180-1 „Funktionale Sicherheit in der Prozessindustrie - Einführung, Begriffe, Konzeption“ (Erscheinungsdatum: April 2019)

Die Bewertung der Gefahr beginnt beim Startpunkt und führt entlang der Pfade des Risikographen mit seinen qualitativen Einflussgrößen bis hin zu einer der vorgegebenen Risikokategorien, welche die Höhe des Risikos angibt und wie im Falle der VDI/VDE 2180 mit einer entsprechenden Sicherheitsanforderungsstufe (SIL, Safety Integrity Level, Sicherheitsanforderungsstufe) an die risikomindernden Maßnahmen (PLT-Sicherheitsfunktionen) verknüpft ist.

Durch die Kombination der qualitativen Risikoparameter (Beispiel: S3 = Tod mehrerer Personen, lang andauernde größere schädliche Umwelteinflüsse , z.B. nach Störfall-Verordnung, A1 = seltener bis häufiger Aufenthalt in der Gefahrenzone, W2 = geringe Wahrscheinlichkeit des unerwünschten Auftretens und nur wenige unerwünschte Ereignisse sind im betrachteten oder in ähnlichen Prozessen wahrscheinlich) kann die Anforderung zur Auslegung der PLT-Sicherheitseinrichtung nach SIL 3 abgeleitet werden. Je nach Schwere der Auswirkungen müssen dabei nicht alle Risikoparameter betrachtet werden.

Im genannten Beispiel spielt die Möglichkeit, die Gefahr in bestimmten Situationen gegebenenfalls noch vermeiden zu können aufgrund der Schwere der zu erwartenden Auswirkungen keine Rolle bei der Entscheidung zur Auslegung der Sicherheitseinrichtung.

Wenngleich der Risikograph entsprechend der Richtlinie VDI 2180 nur zur Bestimmung der Auslegung von PLT-Schutzeinrichtungen konzipiert wurde und daher in dieser Form nicht für

alle zu analysierenden Gefahrenquellen zur Bewertung in Frage kommen kann, ist die Methode Risikograph grundsätzlich geeignet, auch eine allgemeine Prüfung und Priorisierung der störfallvermeidenden und auswirkungsbegrenzenden Maßnahmen vorzunehmen.

Dazu werden an Stelle der in VDI 2180 genannten der SIL-Anforderungen beispielsweise Risikoklassen bestimmt. Eine derartige Anwendung des Risikographen findet sich beispielsweise im ROGA-Verfahren (s. a. Abschnitt 4.13).

4.7.2 Bewertung

Tabelle 15: Bewertung Risikograph nach VDI 2180

Kriterium	Ausprägung
Art der Betrachtung	qualitatives Analyseverfahren, exakte Risiko-Quantifizierung in der Prozessindustrie häufig nicht möglich
Evaluationsansatz	induktive Methode
erforderliche Fähigkeiten/Fertigkeiten	Team muss sowohl über technische Sachkenntnis als auch Betriebserfahrung für die betreffende Anlage und die Lebenszyklusphase verfügen; mindestens eine erfahrene, kompetente, unabhängige Person im Team erforderlich, die nicht mit dem Entwurf des Projekts befasst war (nicht Auftraggeber)
Zugänglichkeit und Verbreitung des Methodenwissens	frei verfügbare Leitfäden sowie VDI/VDE-Richtlinie 2180
Erfüllung der rechtlichen Anforderungen	Sicherheitsmanagementsystem nach VDI 2180: bewährte Vorgehensweise für die Erfüllung der Anforderungen nach StörfallV in Bezug auf PLT-Einrichtungen – einschließlich Ermittlung der Sicherheitsanforderungen an die PLT-Sicherheitsfunktionen mittels Risikographen
abgedeckte Stufen des Analyseprozesses	unterstützt im Rahmen des Gesamtprozesses der Gefahrenanalyse- und Störfallrisikobewertung insbesondere Bewertung des abzudeckenden Risikos und die erforderliche Zuordnung von Sicherheitsmaßnahmen.
Art der berücksichtigten Gefahrenquellen	konzentriert sich primär auf ereignisverhindernde und schadensbegrenzende PLT-Sicherheitsfunktionen (Sicherheitsanforderungsstufe für SIL als Resultat)
Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse	individuelle Konkretisierungen für möglichst vergleichbare Anwendung der Risikoparameter in unterschiedlich zusammengesetzten Sicherheits-Teams; z. B. durch den Bezug von Häufigkeiten auf vorgegebene zeitliche Intervalle (Jahr, Generation, menschliches Leben etc.)
teamorientierte Methode vs. Einzelexpertise	teamorientiertes Verfahren; Zusammensetzung der Beurteilungsteams für den Risikograph-Verfahren kann sich abhängig von der Phase des Lebenszyklus ändern
Verfügbarkeit von Bewertungskatalogen	allgemeine Empfehlungen aus den relevanten Normen zur SIL-Einstufung; unternehmensspezifische Konkretisierungen begrenzen SIL-Klassifizierungen auf gewisse Bereiche individuelle Sicherheitsphilosophie des jeweiligen Unternehmens kann abgebildet werden (Vgl. VDI/VDE 2180)

Kriterium	Ausprägung
statistische Eingangsdaten	nicht erforderlich und kaum verfügbar
Verfügbarkeit von Software-Lösungen	für VDI/VDE 2180 keine bekannt, Referenzprodukte für Funktionale Sicherheit nach Maschinen- oder Niederspannungsrichtline verfügbar (z. B. SAFEXPERT)
Aufwand für Durchführung der Analyse	in Abhängigkeit der Komplexität der zu betrachtenden Anlagen und der Anzahl an Sicherheitsfunktionen; generell geringer Aufwand zum Durchlaufen einen Risikographen, sofern alle erforderlichen Eingangsinformationen verfügbar sind
Prüfbarkeit durch Behörden	siehe Kriterien „Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse“ und „Erforderliche Fähigkeiten/Fertigkeiten“

4.8 Layer of Protection Analysis

4.8.1 Beschreibung

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. Darüber hinaus kann das LOPA-Verfahren dazu verwendet werden, erforderliche SIL-Level für PLT-Sicherheitseinrichtungen zu bestimmen. 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 (Vgl. Preiss, Struckl (2017)).

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. 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 Erstellung einer LOPA umfasst insgesamt fünf Arbeitsschritte (Vgl. Block, Haferkamp, Häberlein (2010)).

Schritte des LOPA-Verfahrens:

- Schritt 1: Beschreibung der Szenarien (ggf. durch bereits bestehende Gefahrenanalyse umgesetzt)
- Schritt 2 (je Szenario): Identifizierung des initialen Ereignisses (das das Szenario auslösende Ereignis). Festlegung seiner Eintrittshäufigkeit.
- Schritt 3 (je Szenario): Identifizierung der unabhängigen Schutzebenen - Independent Protection Layer (IPL) - und Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeiten im Anforderungsfall

- Schritt 4 (je Szenario): Abschätzung der Eintrittshäufigkeit des mit dem Szenarium verbundenen Schadens unter Berücksichtigung der Wirksamkeit der Schutzebenen
- Schritt 5 (je Szenario): Bewertung des mit dem Szenarium verbundenen Risikos

Zum LOPA-Kalkül gehören neben dem auslösenden Ereignis (initial event) und den unabhängigen Schutzebenen (independant protection layers) weiterhin sog. „enabling events“ und „conditional modifier“:

- Enabling events: Diese beschreiben Randbedingungen, damit das initial event oder die beschrieben Auswirkungen eintreten können. Beispiel: Thermische Durchgehen setzt das zeitliche Zusammentreffen eines hohen Reaktionsumsatzes mit dem Ausfall der Kühlung des Behälters voraus (ersteres ist das enabling event und zweiteres das initial event). Die zu erwartende Häufigkeit des zeitlichen Zusammentreffens beider Ereignisse ist zu bestimmen.
- Conditional modifier (Einflussgrößen): Z.B. die Wahrscheinlichkeit der Zündung nach Freisetzung eines brennbaren Stoffes, Anwesenheit von Personal im Gefahrenbereich, Notfallmaßnahmen

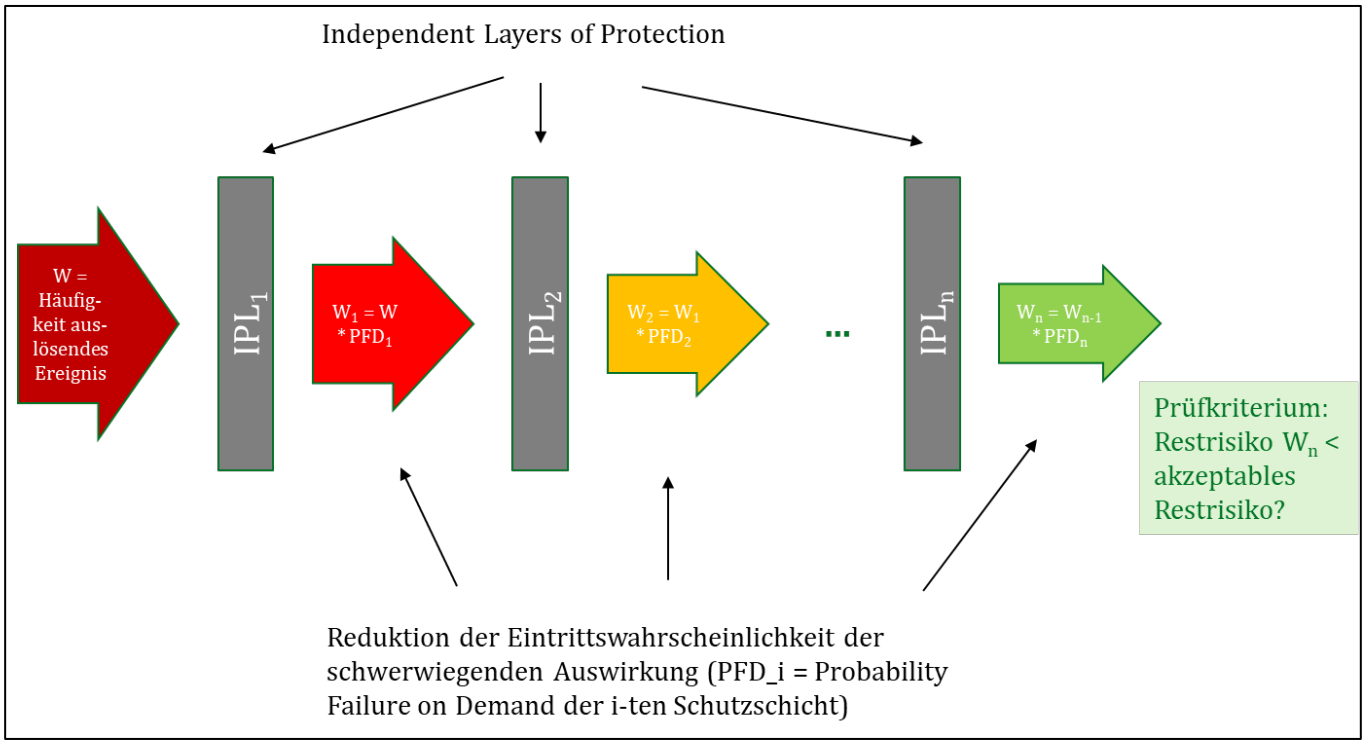
Mit dem LOPA-Verfahren können grundsätzlich sämtliche Vorkehrungen und Maßnahmen betrachtet werden. In der einschlägigen LOPA-Literatur werden häufig folgende Schutzebenen formuliert:

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

Im Rahmen der Anwendung der LOPA-Analyse auf ein konkretes Szenario werden jedoch nicht immer sämtliche geplanten bzw. vorhandenen Vorkehrungen und Maßnahmen mit Relevanz für das zu betrachtete Szenario berücksichtigt. Dies kann mehrere Gründe haben:

- Eine numerische Festlegung ist nicht möglich (Eintrittshäufigkeit eines Ereignisses, Verfügbarkeit einer Schutzebenen).
- Die Schutzebene erzielt keine ausreichende Wirksamkeit (bei Funktionsfähigkeit im Anforderungsfall darf die unerwünschte Auswirkung mit der definierten Schwere nicht mehr eintreten).
- Logische/technische/stochastische Abhängigkeit zu einer anderen Schutzebene oder zum auslösenden Ereignis.
- Die Schutzebene ist nicht auditierbar

Abbildung 7: Schematische Darstellung des LOPA-Verfahren



Quelle: Eigendarstellung IZP in Anlehnung an Preiss, Struckl (2017), Sommer, J. (2020)

Die Anforderung der Unabhängigkeit der Schutzebenen ergibt sich aus der Formel zur Bestimmung des Restrisikos. Die Eintrittshäufigkeit des Störfalls wird bei Unabhängigkeit als Produkt aus dem Eintrittshäufigkeit des auslösenden Ereignisses und den Versagenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Schutzebenen berechnet. Im Falle eine oder mehrere Abhängigkeiten der Schutzebenen untereinander (oder zum initialen Ereignis) bestehen, verliert die Formel ihre Gültigkeit.

Im Rahmen der LOPA-Studie wird typischerweise die Ereigniskette mit der größten Auswirkung betrachtet (dies entspricht dem (credible) Worst-case-Pfad eines Ereignisbaumes). Für den intendierten Verwertungszweck der LOPA-Analyse reicht eine ungefähre Risikoabschätzung:

- Die Abschätzung der Schwere der Auswirkungen erfolgt als Expertenabschätzung (keine detaillierten, computergestützten Auswirkungsbetrachtungen).
- Gleichermaßen wird in der LOPA-Literatur empfohlen, bei den Abschätzungen der Eintrittshäufigkeiten und Barrierenzuverlässigkeiten sich auf Angaben von Größenordnungen zu beschränken (z.B. Ausfallrate einer Komponente = $5*10^{-4}$ [1/Jahr], Versagenswahrscheinlichkeit einer Barriere im Anforderungsfall = 0,1 …).
- Die abschließende Bewertung des Risikos erfolgt in vielen Fällen anhand einer Risikomatrix, welche das ermittelte Risiko als akzeptabel, tolerierbar oder nicht tolerierbar einstuft (Risikomatrizen siehe Kapitel 4.6).

Ein alternativer Ansatz zur Bewertung des Risikos wird in (Sommer, J. (2020)) vorgestellt. Dabei wird mit sogenannten Targetfaktoren und Kreditfaktoren gearbeitet. Dem angenommenen Schadensbild wird in Abhängigkeit der Schadensschwere ein Targetfaktor zugewiesen. Die Targetfaktoren können bei Werte zwischen 1 und 10 annehmen. (Achtung: Der Targetfaktor hängt gemäß dieser Definition nicht von der angenommenen Häufigkeit des Szenarios ab).

Einzelnen Vorkehrungen und Maßnahmen werden in Abhängigkeit ihrer Verfügbarkeit (Stichwort „Probability of Failure on Demand“) und Wirksamkeit Kreditfaktoren zugeordnet. Die Kreditfaktoren können dabei Werte zwischen 1 und 10 annehmen. Das Risiko gilt als akzeptabel, wenn die Summe der realisierten Kreditfaktoren dem Targetfaktor entspricht. Wenn die Summe der realisierten Kreditfaktoren kleiner als der Targetfaktor ist, wird von eine Schutzlücke gesprochen. Das Konzept der Schutzlücke kann zur Ermittlung von SIL-Leveln von PLT-Schutzeinrichtungen verwendet werden. Dazu werden wird zunächst das Restrisiko/die Schutzlücke unter Berücksichtigung sämtlicher Schutzebenen exklusive der PLT-Schutzeinrichtung ermittelt. Je größer die Schutzlücke ausfällt, desto höher muss das erforderliche SIL-Level gewählt werden.

Bei der Verwendung von Risikomatrizen gilt zu beachten, dass in Abhängigkeit der gewählten Betrachtungstiefe mehr oder weniger verschiedene Ursachen zu einem initiating event zusammengedacht werden können. Dies kann einen Einfluss auf die Eintrittshäufigkeit des Szenarios und somit auf die Anforderungen an der IPL’s haben.

Die Anwendung der LOPA-Analyse bietet sich beispielsweise an, wenn in der vorab durchgeführten Gefahrenanalyse ein potenziell hohes Schadensausmaß vermutet wird.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit des unerwünschten Initialereignisses kann mit Hilfe anderer quantitativer Methoden (z.B. einer Fehlerbaumanalyse) bestimmt werden. Die Qualität der LOPA-Analyse kann mit dem sachgerechten Einbezug der Ursachen, welche zu dem Initialereignis führen können, erhöht werden.

Die LOPA dient als Erkenntnisquelle zur Aufdeckung von Schwachstellen und Nachbesserung des Entwurfes und somit zu einem ausgewogeneren Sicherheitskonzeptes, welches die Umsetzung des Standes der Sicherheit allein unter Umständen nicht gewährleisten kann.

4.8.2 Bewertung

Tabelle 16: Bewertung des LOPA-Verfahrens

Kriterium	Ausprägung
Art der Betrachtung	semiquantitative Methode
Evaluationsansatz	n/a (Keine Gefahrenanalyse)
erforderliche Fähigkeiten/Fertigkeiten	hinreichende Methoden- und Fachkenntnis erforderlich, Erstellung einer LOPA erfolgt i. d. R. vom Betreiber einer Anlage gemeinsam mit Vertretern der Bereiche Process Safety, Process Control, Process Engineering, Maintenance und ggf. anderen relevanten Bereichen
Zugänglichkeit und Verbreitung des Methodenwissens	ursprünglich von DOW Chemical für den amerikanischen Raum ermittelt und dort oft angewendet. Kostenpflichtige Leitfäden sind verfügbar (u.a. CCPS (2015); Preiss, Stuckl (2010)), Erwähnung in den Normen EN 61511-3 und EN 61508-5. In Deutschland häufig anzutreffende Ergänzung von Gefahrenanalysen zur Abschätzung und Bewertung von Restrisiken einzelner Szenarien.
Erfüllung der rechtlichen Anforderungen	In der Verwaltungspraxis akzeptierte Methode (Vgl. Leitfaden KAS-55 „Mindestangaben im Sicherheitsbericht“)
abgedeckte Stufen des Analyseprozesses	(Szenarienentwicklung), (Auswirkungsbetrachtung), Risikobewertung

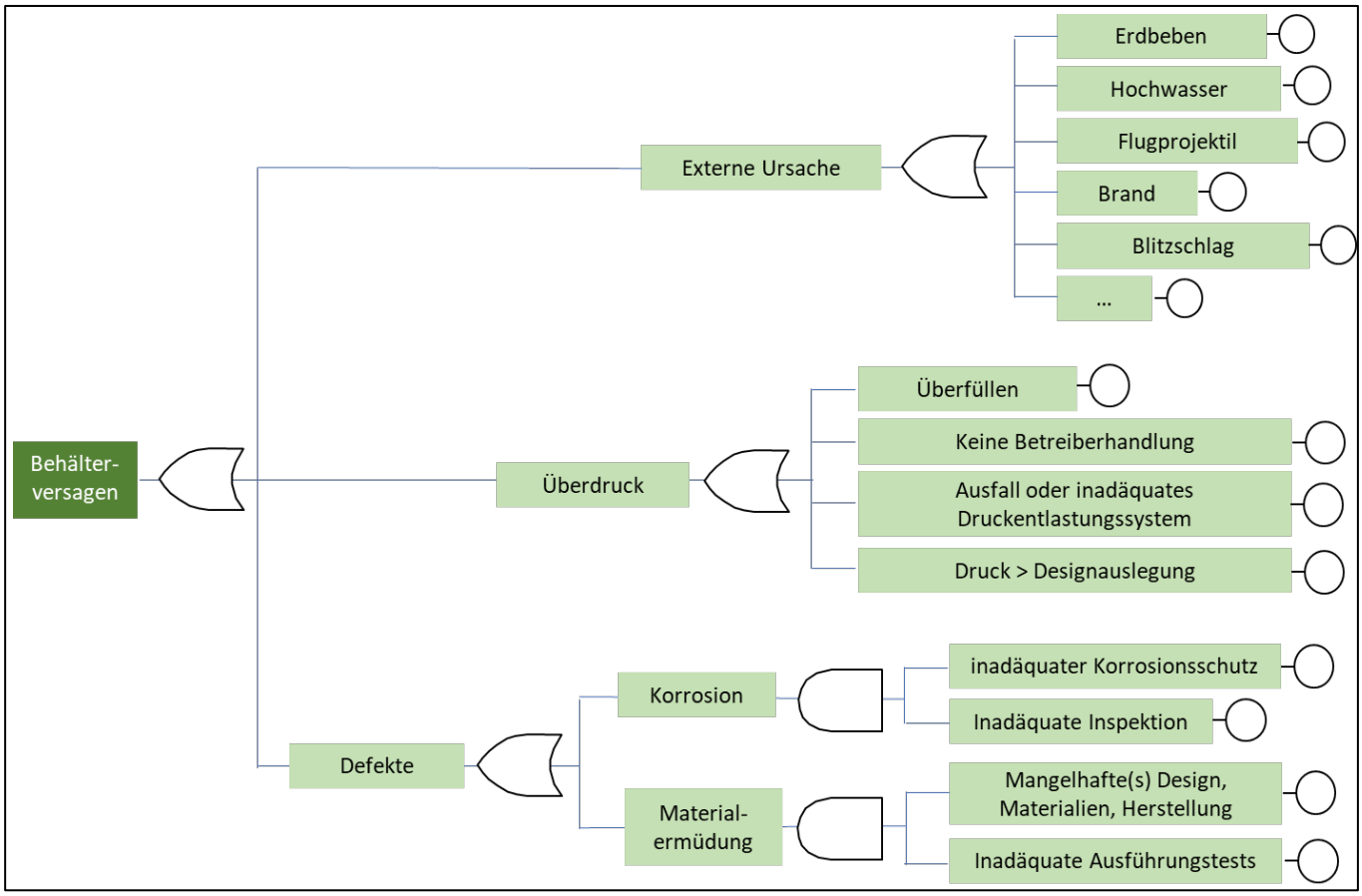
Kriterium	Ausprägung
Art der berücksichtigten Gefahrenquellen	n/a (Keine Gefahrenanalyse)
Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse	Ohne Standardisierung der anzuwendenden numerischen Werte kann das Verfahren starke Abweichungen in den Ergebnissen produzieren. Ermessensspielraum besteht ebenso bei der Einschätzung der Barrieren als unabhängig bzw. relevant für das Szenario.
teamorientierte Methode vs. Einzelexpertise	Durchführung einer LOPA im Team, Teammitglieder sollen im Wesentlichen dieselben wie bei einer vorausgegangenen Gefahrenanalyse sein
Verfügbarkeit von Bewertungskatalogen	Die geltenden Normen zur Anlagensicherheit (z.B. DIN EN 61511) bieten Hilfestellung bei der Bestimmung des akzeptablen Risikoniveaus (Risikomatrix) und der Wirkung der Schutzmaßnahmen (insb. Werte für Zuverlässigkeit im Rahmen des erreichten Sicherheitsintegritätslevels bzw. Performance-Levels bei Sicherheitsfunktionen). Darüber hinaus gibt es Bewertungs- und Anwendungshilfen für die Durchführung des LOPA Verfahrens (z.B.CCPS (2015); Preiss, Stuckl (2010))
statistische Eingangsdaten	o.g. Anwendungshilfen enthalten Vorschläge zur Quantifizierung konkreter Ereignisse und Versagenswahrscheinlichkeiten verschiedener Barrieren
Verfügbarkeit von Software-Lösungen	u. a. Bestandteil von Safety Lifecycle Manager SLM v2
Aufwand für Durchführung der Analyse	Relativ gering (insofern auf eine ausreichend dokumentierte HAZOP-Studie zurückgegriffen werden kann und anwendbare Zuverlässigkeits- bzw.- Eintrittshäufigkeitsdatensammlungen vorliegen)
Prüfbarkeit durch Behörden	Validität der Szenarien ist Gegenstand der zugrundeliegenden Gefahrenanalyse (-> HAZOP oder vergleichbar). Die Validität der verwendeten Daten kann im Allgemeinen nicht, oder nur mit großem Aufwand geprüft werden.

4.9 Fehlerbaum- und Ereignisbaumanalyse, Bow-Tie-Analyse

4.9.1 Beschreibung

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, ein Schlauchabriss, ein Behälterversagen oder auch 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.

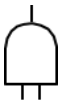
Abbildung 8: Beispielfehlerbaum für ein Behälterversagen



Quelle: Darstellung IZP. 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" by Clive Nussey, December 2006

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

Tabelle 17: Darstellungselemente Fehlerbaum gemäß EN 61025:2007

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

Die En 61025 definiert darüber hinaus weitere Gatter (Prioritäts-UND-Gatter, Exklusives-ODER-Gatter, etc.). Gemäß Erfahrungswerte der Forschungsnehmenden finden diese Gatter eher keine Anwendung.

Hauptschritte des Fehlerbaum-Verfahrens:

- Festlegung des TOP-Ereignisses (oder der TOP-Ereignisse)
- Je TOP-Ereignis: Entwicklung des Fehlerbaums in einem hinreichend detailliert Ausmaß. Abbildung der kausallogischen Zusammenhänge.
- Je TOP-Ereignis: Quantifizierung der Eintrittshäufigkeiten und Reparaturdauern der „ersten“ Ursachen (d.h. der „Blätter“ des Fehlerbaums)
- Je TOP-Ereignis: Berechnung der Eintrittshäufigkeit bzw. Unverfügbarkeit des TOP-Ereignisses

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[20]) 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 zu Eintrittshäufigkeiten vorliegen. Die Fehlerbaummethodik stellt eine Möglichkeit bereit, diese Eintrittshäufigkeiten zu rechnen (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.

Eine vollwertige Fehlerbaumanalyse betrachtet darüber hinaus mögliche Abhängigkeiten im System, welche Redundanzen – zumindest teilweise – aushebeln können (Stichwort: Common-mode-Fehler und Common-Cause-Fehler). Zur Quantifizierung der Abhängigkeiten kommen beispielsweise beta-Faktor-Modelle zur Anwendung[21].

Soll ein System optimiert werden, so kann mit Hilfe der Bestimmung sogenannter Komponentenwichtigkeiten (z.B. Birnbaumwichtigkeiten) ermittelt werden, an welcher Stelle im System eine Zuverlässigkeitsverbesserung den größten Einfluss auf die Systemzuverlässigkeit hat. Analog zur Zuverlässigkeit kann die Verfügbarkeit optimiert werden.

Mithilfe der Ermittlung sogenannter Minimaler Schnittmengen können strukturell kritische Komponenten identifiziert werden. Am kritischsten in diesem Sinne sind sogenannte Single Point of Failures (dies sind Komponenten deren alleiniges Versagen das Systemversagen verursachen).

Im Rahmen der Fehlerbaumanalyse werden sämtliche Zustände binär modelliert (d.h.: Ereignis eingetreten: ja/nein, Komponente defekt: ja/nein). Wo natürliche, graduelle Abstufungen vorliegen, müssen Grenzwerte festgelegt werden, damit eine binäre Zuordnung wieder möglich wird (z.B. Pumpe defekt genau dann, wenn Leistungsvermögen Pumpe < x%).

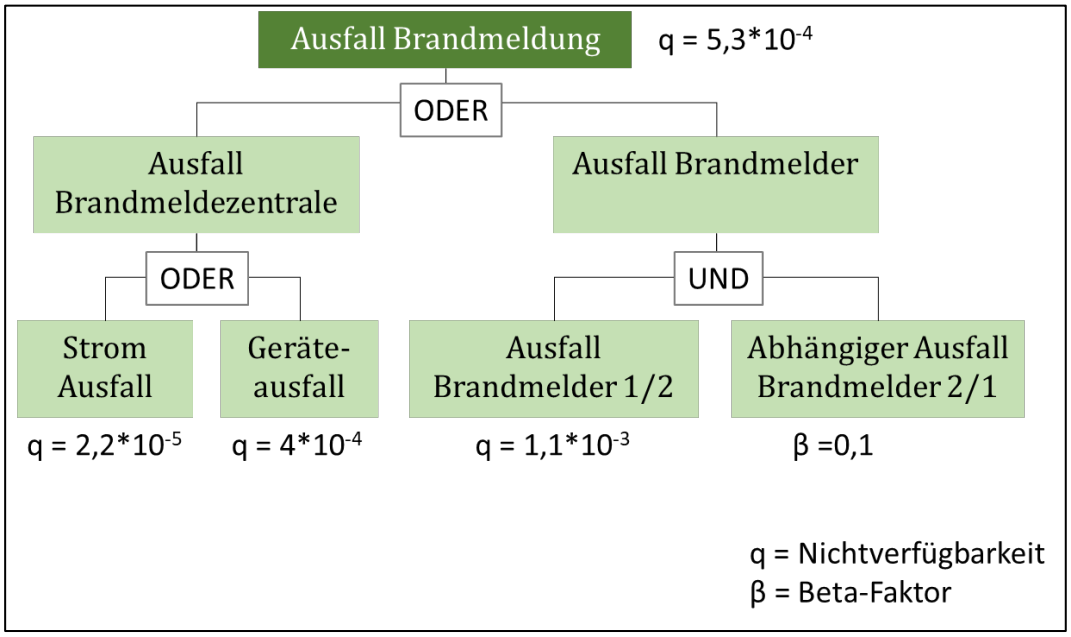
[20] Unklardauer: Bei Defekten von Komponenten die Zeitspanne zwischen Ausfallzeitpunkt und Wiederherstellung der Funktionsbereitschaft. Die Unklardauer beinhaltet neben der reinen Instandsetzungs- bzw. Tauschzeit die Zeit vom Ausfallzeitpunkt bis zur Fehlerdetektion sowie weitere technische und logistische Verzugszeiten.

[21] siehe auch EN/IEC 61508: Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme. Die Norm stellt eine fragenlistenbasiertes Scoring-Verfahren bereit, welches die Abschätzung von beta-Faktoren erlaubt.

Grundlage für die Analysetätigkeit ist ein detailliertes Systemverständnis über das Zusammenwirken einzelner Teilsysteme und Komponenten, Wechselwirkungen mit dem Betriebspersonal und ggf. umgebungsbedingten Einflussfaktoren.

Die FTA kann auf Erkenntnissen deterministischer Gefahrenanalysen (beispielsweise HAZOP oder FMEA) aufbauen.

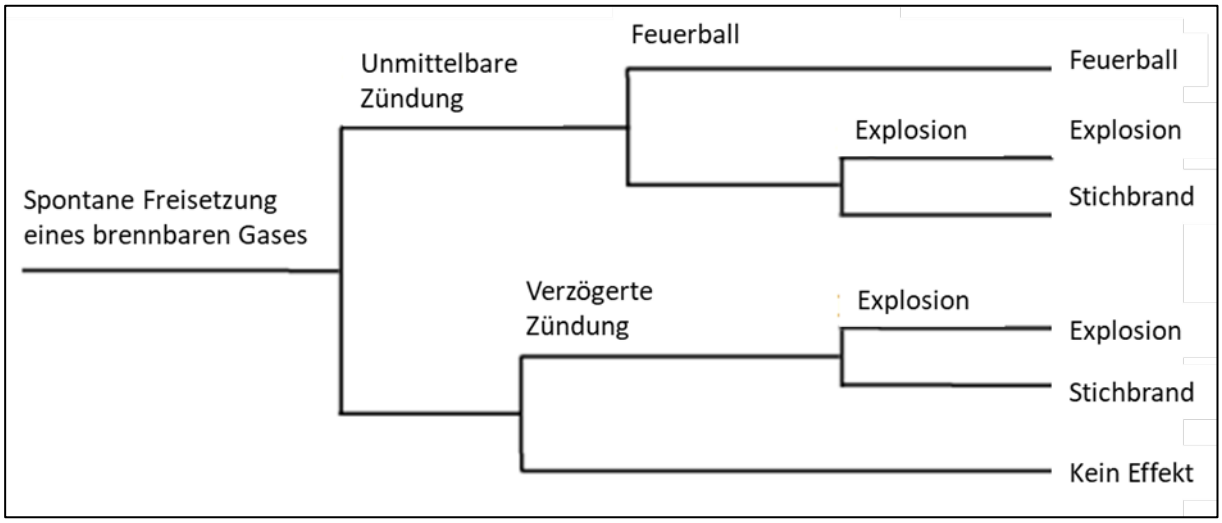
Abbildung 9: Beispielfehlerbaum für eine Brandmeldeanlage



Quelle: Darstellung IZP. 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

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.

Abbildung 10: Ereignisbaum "Spontane Freisetzung eines brennbaren Gases (Instantaneous release of an inflammable gas)"



Quelle: Eigendarstellung IZP in Anlehnung an Reference Manual BEVI risk Assessments, Module B, Version 3.3 (REVI, 2015)

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

Im purple book ist dieses Pivotelement das sogenannte Loss of Containment-Ereignis. In der deutschsprachigen Literatur wird mitunter die Störung oder auch der Störfall als Pivotelement angesehen. Theoretisch betrachtet könnte das Pivotelement auch die finale Wirkung einer Störung (z.B. ein Todesfall) sein. Sämtliche Zusammenhänge würden dann über den FTA modelliert werden, und die ETA damit entfallen. Aus Praktikabilitätsgründen und aus Gründen der Übersichtlichkeit wird letzterer Ansatz eher nicht angewandt. Die FTA lässt sich somit eher dem Schritt der Gefahrenanalyse zuordnen, die ETA dem Schritt der Szenarienentwicklung.

Die benötigen Eingangsdaten zu technischen Zuverlässigkeiten einzelner Komponenten, zur menschlichen Zuverlässigkeiten sowie zu Häufigkeiten von naturbedingten Gefahrenquellen können einer Vielzahl von Quellen entnommen werden, bzw. im einfachsten Fall auf Expertenschätzungen beruhen. Bei der Anwendung von Datensammlungen für technische Zuverlässigkeiten gilt zu beachten, dass diese Daten nur bedingt vergleichbar/auf den eigenen Anwendungsfall übertragbar sind. Die Gründe dafür können vielfältig sein:

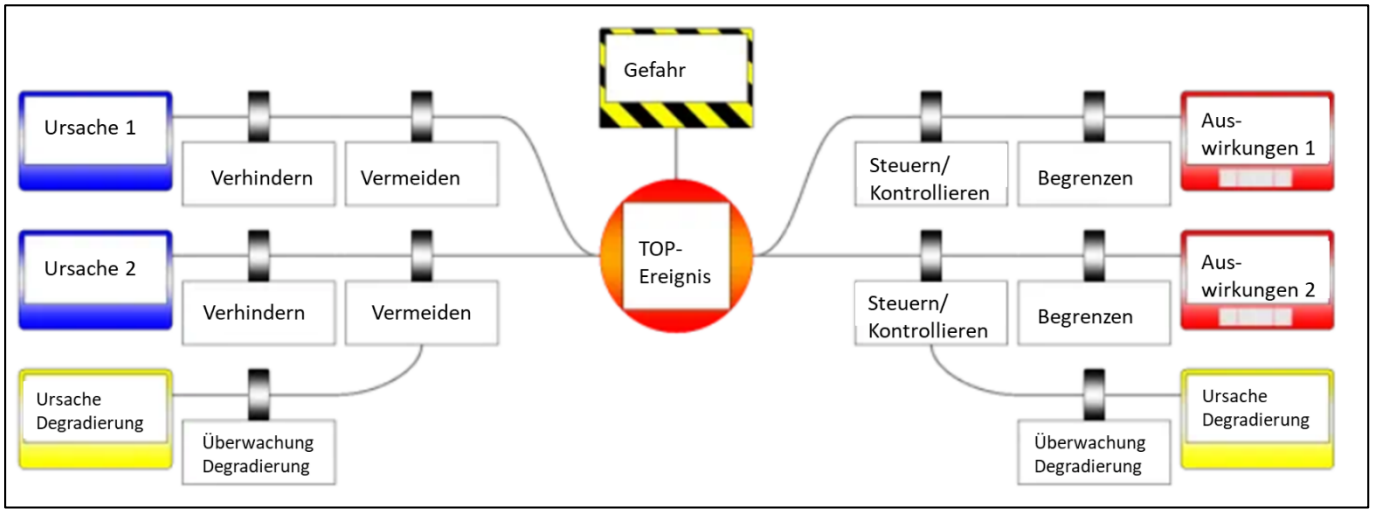
- Unterschiedliche Betriebs- und Umgebungsbedingungen
- Exklusion bestimmter Ereignisse (wie beispielsweise Ausfälle aufgrund externer oder zumindest nichttechnischer Ursachen, Ausfälle aufgrund von Frühausfällen, Ereignisse ohne kritische Folgen)
- Veraltete Daten (Stichwort: Technologieentwicklungen)
- Unterschiedlicher Umgang mit zensierten Stichproben (Stichwort: präventive Tausche vor Beginn steigender Ausfallraten)

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.

Die Kombination aus Fehlerbaum- und Ereignisbaumanalyse wird mitunter als Bow-Tie-Analyse bezeichnet. Es gilt jedoch zu beachten, dass das Center for Chemical Process Safety (CCPS) gemeinsam mit dem EI (Energy Institute) die Bow-tie-Methode zu einer eigenständigen Methode weiterentwickelt hat. Im Fokus der Weiterentwicklung stand insbesondere die Betrachtung der Barrieren und wie mögliche Degradierungen dieser Barrieren gemanagt bzw. vorgebeugt werden können. Mit den Bow-Ties wird eine Verknüpfung der zu analysierenden Anlage mit zugrundeliegenden Sicherheitsmanagementsystem angestrebt. Typischerweise geht der Anwendung der Bow-Tie-Analyse eine Gefahrenanalyse voraus.

Mit dem Begriff der Bow-Tie-Analyse wird darüber hinaus eine konkrete Art der visuellen Darstellung der Vorkehrungen und Maßnahmen verbunden. Während diese in der klassischen Darstellungsweise von Fehler- und Ereignisbaum zwar berücksichtigt werden können, aber nicht explizit als solche herausgestellt werden (müssen), ist es das Anliegen des Bow-Ties, diese grafisch prominent darzustellen.

Abbildung 11: Darstellung eines Bow-Tie-Diagramms



Quelle: Eigendarstellung 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)

Im Kontext der Bow-Tie-Analyse ist das Top-Ereignis der Moment, in welchem die Kontrolle über die zu analysierende Gefahr verloren geht.

Der Begriff „Degradation factor“ bezieht sich auf die mögliche Degradierung bzw. Versagenswahrscheinlichkeit einer einzelnen Barriere. Der Begriff „Degradation control“ bezieht sich entsprechend auf Maßnahmen oder Mechanismen, welche eine Degradation vorbeugen bzw. verhindern (die degradation factors entsprechen sinngemäß den Löchern der Käsescheiben im „Swiss cheese Model“). In letzter Konsequenz wird die Existenz bzw. Wirksamkeit der Degradation factors durch die Effektivität des Sicherheitsmanagements bedingt.

Zu beachten ist, dass eine klare Unterscheidung zwischen Top-Events und Barrieren erfolgen muss. Ein Top-Ereignis sollte kein gescheitertes Sicherheitssystem darstellen.

Beispiel: Top-Ereignis = Tanküberfüllung. Vermeidungsmaßnahme = High-high-level-alarm mit einem automatischen Unterbrechung des Zuflusses. Existenz der Vermeidungsmaßnahme wird durch eine Risikoanalyse bedingt. Das zuverlässige Ansprechen der Vermeidungsmaßnahme im

Anforderungsfall erfordert eine entsprechende Instandhaltung (Inspektionen, Wartung, präventives Tauschen).

Das Anliegen des Bow-Tie-Verfahrens ist es, diese Faktoren zu identifizieren und 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, deren Degradation controls und deren Status. Kritische Pfade - im Sinne, dass wenige, bis keine voll funktionsfähigen Barrieren zwischen einer Gefahrenquellen und einer Auswirkung liegen – werden so schnell erkannt. Konzepte und Software-Lösung hin zu einer möglichst automatisierten Echtzeitdarstellung der Barrienzustände sind entwickelt worden, sind in der Praxis aber nur schwierig umzusetzen.

4.9.2 Bewertung

Die Fehlerbaum- und Ereignisbaumanalyse sind branchenübergreifend und international weit verbreitete Verfahren. Das Schweizer Handbuch zur Störfallverordnung sowie das Purple book verweisen auf die FTA- und ETA-Methoden als geeignete Hilfsmittel zur Durchführung der Gefahrenanalyse und Szenarienmodellierung.

Tabelle 18: Bewertung des FTA/ETA-Verfahrens

Kriterium	Ausprägung
Art der Betrachtung	Qualitativ und quantitativ.
Evaluationsansatz	Deduktiv (FTA) und induktiv (ETA).
erforderliche Fähigkeiten/Fertigkeiten	mittel bis Hoch.
Zugänglichkeit und Verbreitung des Methodenwissens	Normierte Methoden. Softwarelösungen in der Regel kostenpflichtig (für komplexe Systeme sind die Bäume nicht mehr per Hand rechenbar).
Erfüllung der rechtlichen Anforderungen	FTA und ETA werden im KAS-55 als in der Verwaltungspraxis akzeptierte Verfahren klassifiziert.
abgedeckte Stufen des Analyseprozesses	Gefahrenanalyse und Szenarienentwicklung, (Auswirkungsbetrachtung)
Art der berücksichtigten Gefahrenquellen	Grundsätzlich können mittels FTA sämtliche Gefahrenquellen berücksichtigt werden. Der limitierende Faktor ist der Wissenstand des Analysten(-teams).
Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse	Berechnungen können wiederholt werden. Fehlerbaumerstellung und Kennwertebeschaffung sind aber subjektiv
teamorientierte Methode vs. Einzelexpertise	Erstellung der Bäume ist eine teamorientiere Methode, Berechnungen können durch Einzelpersonen durchgeführt werden
Verfügbarkeit von Bewertungskatalogen	Für FTA u.a. Scoring-Modell zur Bestimmung des Beta-Faktors gemäß EN 61508-6
statistische Eingangsdaten	FTA: Als Eingangsdaten kommen entweder Felddaten des Betreibers, Daten aus Datenbanken oder alternativ Expertenschätzungen zum Einsatz.

Kriterium	Ausprägung
Verfügbarkeit von Software-Lösungen	Diverse Softwarelösungen für FTA mit jeweiligen Vor- und Nachteilen sind auf dem Markt verfügbar.
Aufwand für Durchführung der Analyse	Gering bis mittel, wenn Fehlermöglichkeits-, Einfluss- und Kritikalitätsanalyse (FMECA) (resp. HAZOP, …) bereits vorliegt.
Prüfbarkeit durch Behörden	Die qualitativen Aspekte der FTA-Methode werden transparent dokumentiert (Fehlerbaum). Aufgrund der Unterschiede zwischen den Softwarelösungen ist eine Prüfbarkeit der quantitativen Berechnungsergebnisse aber nur bedingt möglich

4.10 Szenarienanalyse - HAZOP-Master

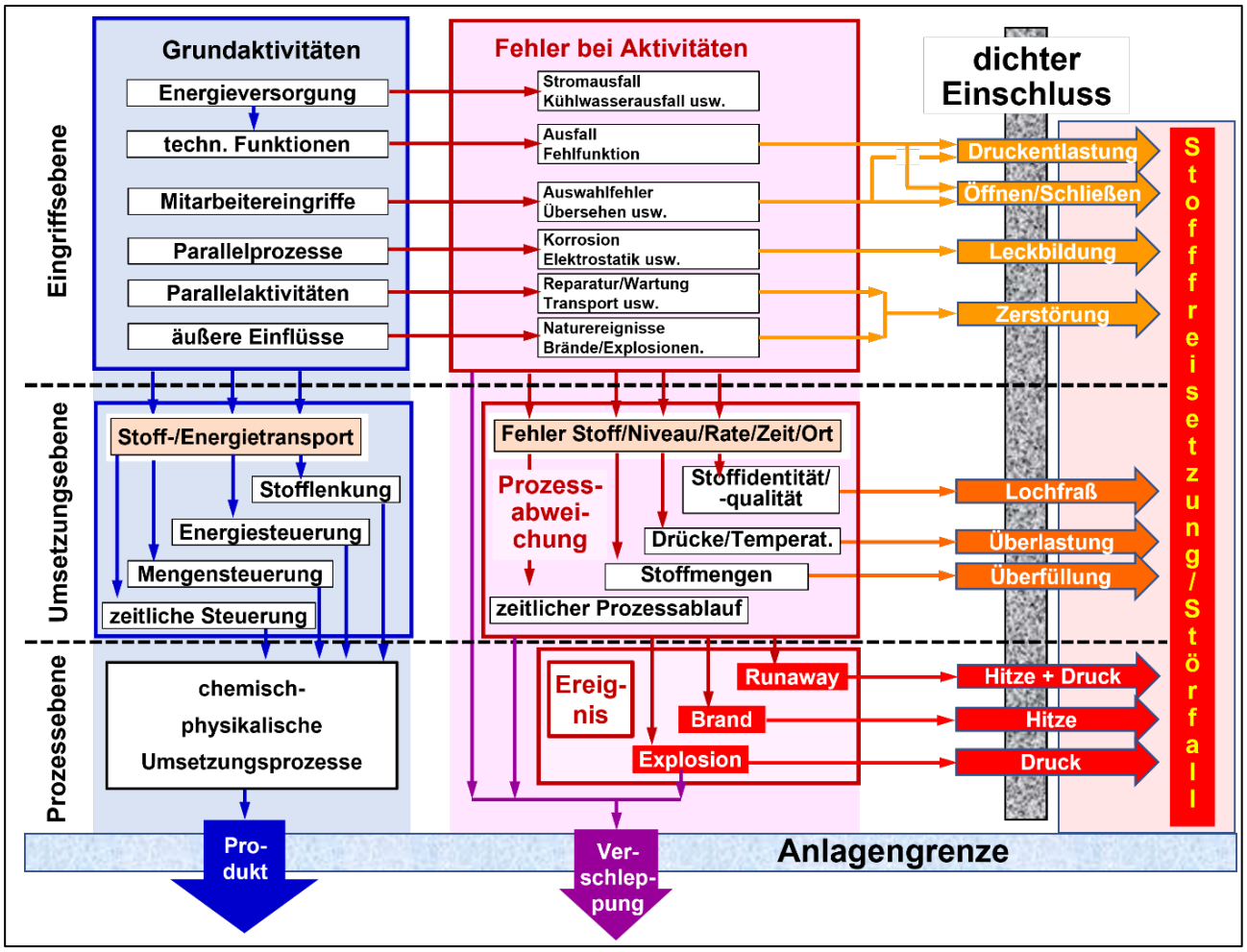
4.10.1 Beschreibung

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 (siehe Tabelle 19), 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 (siehe Abbildung 13). Die im HAZOP-Master hinterlegten Zusammenhänge zwischen den einzelnen Szenarienarten und den Prozessgrößenabweichungen basieren auf technisch/naturwissenschaftlichen Grundlagen des Anlagenbetriebs.

Abbildung 12: Logische Zusammenhänge des Anlagenbetriebs gemäß CMK



Quelle: CMK, Szenarienanalyse/HAZOP-Master

Die so gebildeten, allgemein gültig 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.

Grundsätzliche Struktur der Ereignisabläufe /des HAZOP-Masters

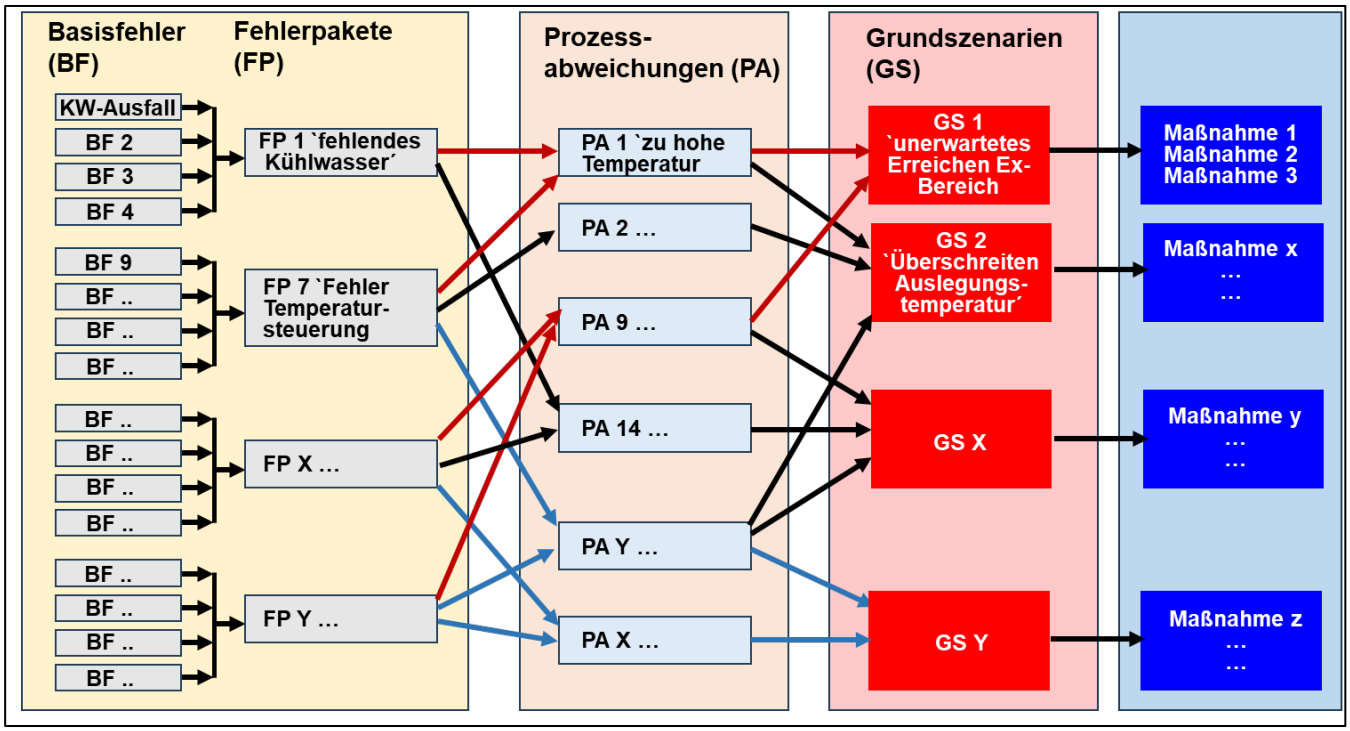
Das im HAZOP-Master hinterlegte Modell für die Ereignisabläufe besteht im Kern aus vier Ebenen:

- den Basisfehlern, welche zu Fehlerpaketen zusammengefasst werden,
- den Prozess(größen)abweichungen,
- den Grundszenarien und

- den Gegenmaßnahmen.

Die Ursache-Wirkungszusammenhänge zwischen den Ebenen sind in dem Modell als m:n-Relationen hinterlegt:

Abbildung 13: HAZOP-Master - grundsätzliche Struktur



Quelle: CMK – Compliance Management Kappelmaier

Die im HAZOP-Master hinterlegten Grundszenarien stellen Konkretisierungen folgender Arten von Ereignissen/Szenarien dar:

- Stofffreisetzungen (toxische Wolke, Gewässer-/Bodengefährdung),
- Gefährliche (exotherme) chemische Reaktionen (Batch-Reaktionen, Dosier-Reaktionen, Konti-Reaktionen)
- Explosionen (innerhalb und außerhalb der Anlagenteile),
- Brände (innerhalb und außerhalb der Anlagenteile),
- Verschleppung (Weiterleitung von Gefahren in andere Anlagenteile).

Tabelle 19: Grundszenarien des Verfahrens Szenarienanalyse - HAZOP-Master (Auszug)

Grundszenario	Störfall	Szenarienarten (nach StörfallV)
Schwächung der dichten Umschließung/ Wandstärkenabtrag	Wandversagen	Stofffrei-setzungen
starke Korrosion/Lochfraß		
Gefügeschwächung		

Grundszenario	Störfall	Szenarienarten (nach StörfallV)
zu hohe Starttemperatur	Überhitzung der Wandung	
unerwarteter Wärmeeintrag		
unerwartete wärmebildende Prozesse		
…		
…	…	
…	…	
…	…	
…	…	
…	Zerstörung der Wandung	
Freisetzung aus ständig offenen Verbindungen ins Freie	Stofffreisetzung/ Öffnungsvorgänge	
…		
Versagen von Rückhalteeinrichtungen	Stofffreisetzung/ fehlendes Zurückhalten	
…		
zu hohes Gesamtpotential	durchgehende Batch-Reaktion	Batch-Reactional
zu hohe Reaktantenkonzentration		
…		
zu hohe Starttemperatur	Überhitzen Dosier-Reaktion	Dosier-Reaktion
Wärmebildung übersteigt Kühlleistung		
…		
zu geringe Umsetzungsrate/ Wärmeproduktion	Dosier-Reaktion - Akkumulation mit Durchgehen nach Wieder-Anspringen	
Zugaberate übersteigt Umsetzungsrate		
zu geringe Reaktantenkonzentration		
…		
zu hohe Starttemperatur	Überhitzen Konti-Reaktion	Konti-Reaktion
…		
zu geringe Umsetzungsrate/ Wärmeproduktion	unvollständige Reaktion mit Austrag	
…		
unerwartet starker Druckaufbau durch gebildete Gase	Überdrücken bei gasbildender Reaktion	besondere Reaktion
blockierte Druckentlastung		
unerwartete Mischreaktion/Stoffvermischung	unerwartete Reaktion	

Grundszenario	Störfall	Szenarienarten (nach StörfallV)
…		
Ex-Atmosphäre durch unerwartet vorhandenen Brennstoff	Explosion	Explosion
Ex-Atmosphäre durch unerwartet vorhandenes Oxidationsmittel		
…		
Brand durch heiße Anlagenteile	Brand	Brand
Brand durch Heißarbeiten		
…		
unerwarteter Austrag gefährlicher Stoffe/Energien	Verschleppung	Verschleppung
unerwartete gefährliche Eigenschaften auszutragender Stoffe		

Quelle: CMK – Compliance Management Kappelmaier

Die vollständige Tabelle kann dem Anhang C entnommen werden.

Zur weiteren Strukturierung der Grundszenarien sind im HAZOP-Master Tabellen hinterlegt, welche die Grundszenarien eines Störfalls szenarienspezifischen Kriterien zuordnet.

In der linken Spalte dieser Tabellen sind jeweils die `Störfälle´ aufgeführt, denen dann szenarienspezifische Kriterien zur weiteren Strukturierung gegenübergestellt werden. In den sich so ergebenden Einzelfeldern (Kombination aus `Störfall´ und `Kriterium´) sind dann die jeweiligen dazugehörenden Grundszenarien eingetragen (Begriffe siehe Tabelle 19). Dabei können auch mehrere Grundszenarien einem Tabellenfeld zugeordnet sein.

Am Beispiel der Stofffreisetzungen stellen sich diese Zusammenhänge wie folgt dar:

Tabelle 20: Logische Grundlagen zu störfallrelevanten Freisetzungsszenarien

Störfall	ungestörter Herstellprozess	Störung im Herstellprozess	Wartung/ Reinigung	Umbau/Reparatur
Schwächung der dichten Umschließung	• Wandstärkenabtrag • Gefügeschwächung • Dichtungsversagen	• starke Korrosion/ Lochfraß (z.B. Verlassen des Beständigkeitsbereichs des Werkstoffs)	• starke Korrosion/ Lochfraß (z.B. falsche, korrosive Reinigungsmittel)	• starke Korrosion/ Lochfraß (z.B. Einbau ungeeigneter Ersatzteile)
ständig offene Stellen		• unerwartete Freisetzung aus betrieblich ständig offenen Stellen		

Störfall	ungestörter Herstellprozess	Störung im Herstellprozess	Wartung/ Reinigung	Umbau/Reparatur
zeitweise offene Stellen		• Öffnen von nicht-entleerten Anlagenteilen • Weiterbetrieb ohne vorheriges Wieder-verschließen • undicht hergestellte Anschlüsse • unerwartet bestehende Verbindung ins Freie	• Öffnen von Reinigungs-/ Wartungsöffnungen an nicht-entleerten Anlagenteilen • undicht hergestellte Anschlüsse • Inbetriebnehmen ohne vorheriges Wieder-verschließen von Reinigungs-/Wartungs-öffnungen	• Öffnen/Demontieren von nicht-entleerten Anlagenteilen • Inbetriebnehmen von Anlagenteilen ohne vorheriges Wieder-verschließen
Versagen Rückhaltung		• Versagen von Reinigungs-/Rückhalte-systemen • Ansprechen von Druckentlastungs-einrichtungen		

Quelle: CMK – Compliance Management Kappelmaier

Für die verbleibenden Szenarienarten sind vergleichbare Tabellen im HAZOP-Master hinterlegt:

- „Überlastung“ und „Zerstörung“ als Sonderfälle der Stofffreisetzungen
- „Außer-Kontrolle-Geraten geplanter Reaktionen“
- „Unerwartete gefährliche Reaktionen“
- „Brände“
- „Explosionen“
- „Verschleppung von Gefahren“

Die jeweiligen Tabellen sind jetzt so aufgebaut, dass immer in der linken Spalte die jeweiligen `Störfälle´ abgebildet sind, die dann jeweils ereignisspezifische Kriterien zur weiteren Strukturierung gegenüberstehen

Die im HAZOP-Master hinterlegten Zusammenhänge zwischen den Einzelfehlern und den Prozessgrößenabweichungen basieren auf den logischen Zusammenhängen des Anlagenbetriebs.

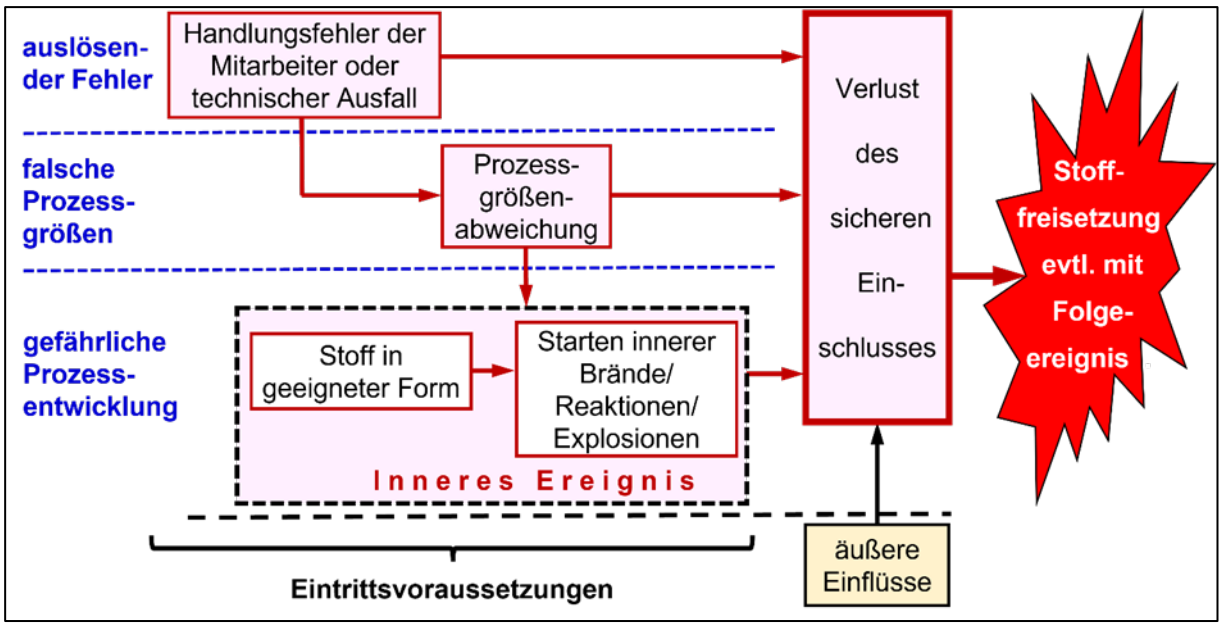
Als Grundvoraussetzung für den Eintritt eines Störfalls muss dabei immer ein gefährlicher Stoff vorhanden sein, was geplanterweise oder ungeplant der Fall sein kann. Damit der sichere Einschluss überwunden werden kann, es also zu einem Störfallereignis kommen kann, müssen dann immer bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein.

Diese Eintrittsvoraussetzungen können für ein gefährliches Ereignis darin bestehen, dass

- es durch einen auslösenden Fehler direkt zum Verlust des sicheren Einschlusses kommt (Ebene 1),

- ein auslösender Fehler zu einer Prozessgrößenabweichung , und diese dann zum Versagen des sicheren Einschlusses führt (Ebene 2) oder
- eine Prozessgrößenabweichung ein inneres Ereignis auslöst, das dann eine Überlastung des sicheren Einschlusses bewirkt (Ebene 3).

Abbildung 14: Das 3-Ebenen-Grundmodell zur Ereignisentstehung beim Vorhandensein gefährlicher Stoffe



Quelle: CMK – Compliance Management Kappelmaier

Störfallereignisse können also auf jeder der drei Ebenen ausgelöst werden und je nach Ereignisart müssen dazu nur eine oder auch mehrere Eintrittsvoraussetzungen gleichzeitig erfüllt sein, damit es zum Ereignis kommt.

Fehler in der Eingriffsebene (Ebene 1) führen - abgesehen von der einzigen Ausnahme des direkten Auslösens einer Stofffreisetzung - immer über den Umweg einer Prozessgrößenabweichung zum Eintritt eines Störfallereignisses.

Diese Prozessgrößen dienen daher - ergänzt um den Aspekt der auslösenden Fehler - zur Strukturierung der Fehlerpfade. Sie werden dazu mit den klassischen Leitworten des HAZOP verknüpft, so dass sich einzelne Fehlerbereiche ergeben.

Dieser Zusammenhang wird in der folgenden Tabelle beispielhaft dargestellt.

Tabelle 21: Die Anwendung der Leitworte auf die relevanten Prozessgrößen ergibt die grundsätzlichen Prozessfehler- bzw. Prozessabweichungsgruppen

relevante Prozess-größen	NICHT	MEHR	WENIGER	SOWOHL ALS AUCH	TEILWEISE	UMKEH-RUNG	ANDERS ALS
Eingriff der Mitarbeiter							• Eingriff in dichten Einschluss

relevante Prozess-größen	NICHT	MEHR	WENIGER	SOWOHL ALS AUCH	TEILWEISE	UMKEH-RUNG	ANDERS ALS
technische Fehl-funktion							• Versagen dichter Einschluss
Stoff-/ Energie-transport	• blockierter Transport • fehlende Durch-mischung	• Transport-geschwin-digkeit zu groß	• Transport-geschwin-digkeit zu klein	• Mitreißen im Produktstrom		• Rück-strömen	• ungeplante Strömung • Entmischung
Stoffe				• Verunreini-gungen • Beläge/ Rückstände • Restmengen	• Verlust einer Kompo-nente bei Gemischen		• Qualität • Wirksamkeit • Fremdstoffe
Stoff-mengen	• fehlender Füllstand • fehlende Kompo-nente	• Gesamt-mengen • Teil-mengen	• Gesamt-mengen • Teil-mengen				
Energie-niveau		• Druck • Tempe-ratur	• Druck • Tempe-ratur				
zeitlicher Prozess-ablauf		• zu schnell • zu lang	• zu langsam • zu kurz				• falscher Zeitpunkt zu früh/zu spät

Quelle: CMK – Compliance Management Kappelmaier

Die Basisfehler werden für den HAZOP-Master dann noch weiter in Fehlerpakete aus auslösenden Einzelfehlern unterteilt. Damit ergibt sich, mit den Prozessgrößenabweichungen als Endpunkte der jeweiligen Fehlerketten, ein durchgängiges System, beginnend bei den auslösenden Fehlern bis hin zu deren jeweiligen prozesstechnischen Auswirkungen, die dann letztlich zu den genannten Störfallereignissen führen

Die in der nachfolgenden Abbildung 15 dargestellten Fehlerbereiche tauchen nicht als solche in den Dokumentationen des HAZOP-Masters auf. Sie zeigen aber die betrachteten Fehlerarten und helfen, den Bogen zu vorhandenen Checklisten- oder Fragensystematiken zu spannen, so dass auch solche bisher fehlerorientierten Studien mit überschaubarem Aufwand in diese neue Struktur überführt werden können (siehe dazu auch die Ausführungen zu `Zusammenführung vorhandener Dokumentationen mit HAZOP-Master-Ergebnissen´).

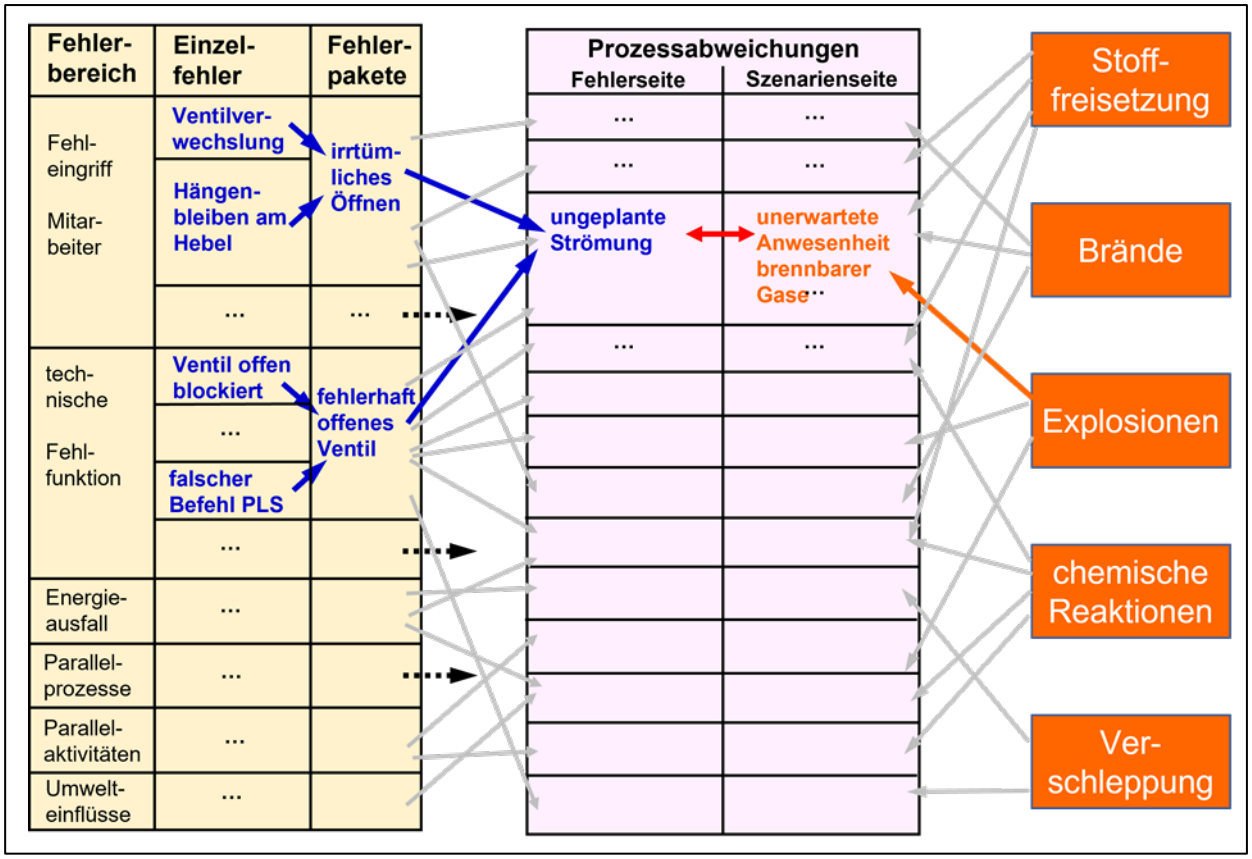
Beispiel:

Das Szenario einer Explosion kann u.a. entstehen, wenn eine Verbindung zwischen Anlagenteilen zur falschen Zeit offen ist und so ungeplant beispielsweise ein brennbares Gas in ein ungeeignetes System einströmen kann, womit sich dort eine ´unerwartete Anwesenheit brennbarer Gase´ ergibt.

Damit werden an dieser Stelle der Fehler- und der Ereignisteil des betrachteten Ereignisablaufs passgenau verknüpft.

Die Ursache einer ungeplanten Strömung kann dann z.B. ein irrtümlich von einem Mitarbeiter geöffnetes oder ein aufgrund eines technischen Ausfalls offenstehendes Ventil sein (= Basisfehler). Beide Ursachenstränge sind dann noch mit konkreten Einzelfehlern (= Fehlerpakete) hinterlegt, so dass sich ein durchgängiger Ereignisablauf ergibt.

Abbildung 15: Ergebnisse des HAZOP-Masters: Durchgängige Ereignisabläufe vom Störfallereignis zurück bis zum Einzelfehler



Quelle: CMK – Compliance Management Kappelmaier

Um dem Anwender des HAZOP-Masters das Arbeiten zu erleichtern, bietet der HAZOP-Master zahlreiche Auswahlmöglichkeiten, mit denen bereits im Vorfeld einer Analyse aufgrund der gegebenen Randbedingungen nichtzutreffende Ereignisabläufe ausgefiltert werden können:

- Auswahl nach vorhandenen Stoffen
- Auswahl nach gewählten Schutzkonzepten
- Auswahl nach der technischen Ausstattung des zu untersuchenden Systems
- Auswahl nach der Art des zu untersuchenden Anlagenteils/Systems

Arbeiten mit dem HAZOP-Master

Vorbereitung von Studien

Der erste Schritt beim Arbeiten mit diesem EDV-Programm ist, durch die Nutzung der vorgenannten Auswahlmöglichkeiten eine auf den jeweiligen Betrachtungsfall zugeschnittene Szenarienliste im EXCEL-Format zu erzeugen. Diese Liste kann durch einen Vergleich mit den realen anlagentechnischen Gegebenheiten schon im Vorfeld der eigentlichen Studie weiter reduziert werden.

Die so erstellte Szenarienliste enthält dann eine Zusammenstellung von in allgemeiner Form vorformulierten kompletten Ereignisabläufen, die direkt als Arbeitsgrundlage verwendet werden kann. Die Ausgabe im EXCEL-Format erlaubt zusätzlich eine einfache Anpassung an die im Unternehmen übliche Struktur von HAZOP-Ergebnissen.

Dadurch ermöglicht der HAZOP-Master eine intensive Vorbereitung von Studien, so dass nicht mehr, wie es oft noch der Fall ist, in großer Runde mit einem weitgehend ´weißen Blatt Papier´ begonnen werden muss. Dies kommt sowohl der Qualität der Studie als auch der Reduzierung des Zeitbedarfs insbesondere in den personalintensiven Teamsitzungen zugute.

Arbeiten im Team

Aufgabe des Teams ist es, diejenigen Ereignisabläufe, die tatsächlich auftreten können, auszuwählen, sicherheitstechnisch zu beurteilen, bezüglich der Gegebenheiten (z.B. konkrete Apparate-, Armaturen- und Stoffbezeichnungen oder relevante Kenndaten von Apparaten Stoffen oder Prozessen) anzupassen und, ganz wie beim klassischen HAZOP, gemeinsam geeignete Sicherheitsmaßnahmen festzulegen.

Der HAZOP-Master stellt keine grundsätzlich neuen Anforderungen an die Arbeitsweise der Untersuchungsteams. Vielmehr unterstützt er die Arbeitsweise,, durch Vorstrukturierung und sicherheitstechnische Zusatzinformation bezüglich denkbarer Ereignisabläufe.

Dies hilft gerade auch unerfahrenen Teams, zielgerichtet zu einem fundierten Ergebnis zu kommen. Es wird so aber auch verhindert, dass von erfahrenen Teams relevante Aspekte einfach einmal übersehen werden.

Zusammenführung vorhandener Dokumentationen mit HAZOP-Master-Ergebnissen

In der Regel liegen bisherige HAZOP-Ergebnisse in einer fehlerorientierten Struktur vor. Sie passen damit nicht zu den ereignisorientierten Ergebnissen, wie sie auch für eventuelle probabilistische Untersuchungen erforderlich sind und wie sie der HAZOP-Master liefert.

Um einen einfachen Übergang zu ermöglichen, besitzt der HAZOP-Master eine zweite Strukturierungsebene, die fehlerorientiert aufgebaut ist. Dabei kann die voreingestellte Fehlerstruktur betreiberspezifisch so angepasst werden, dass eine Vergleichbarkeit von alten und neuen Ergebnissen hergestellt werden kann.

Der Einsatz des HAZOP-Masters bedeutet also nicht, dass alte Arbeitsergebnisse nun neu erstellt werden müssen. Vielmehr kann durch die zweite Strukturierungsebene eine zielgerichtete Übersetzung in die neue ereignisorientierte Darstellungswelt geschaffen werden.

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.

Anwendungsmöglichkeiten

- Unterstützung bei der Durchführung systematischer Sicherheitsbetrachtungen
- 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

4.10.2 Bewertung

Tabelle 22: Bewertung des Verfahrens Szenarienentwicklung und HAZOP-Master

Kriterium	Ausprägung
Art der Betrachtung	qualitativ (bzw. semiquantitativ durch die kombinierte Anwendung mit einem Risikographen oder einer Risikomatrix)
Evaluationsansatz	Vereint induktive und deduktive Elemente
erforderliche Fähigkeiten/Fertigkeiten	Vergleichbar HAZOP. Vordefinierte Ereignisabläufe können Defizite teilweise kompensieren.
Zugänglichkeit und Verbreitung des Methodenwissens	www.hazop-master.com Zugrunde liegender Satz an Szenarien siehe enthaltene Tabelle
Erfüllung der rechtlichen Anforderungen	Keine Einschränkungen
abgedeckte Stufen des Analyseprozesses	Gefahrenanalyse, Szenarienentwicklung, (Auswirkungsbetrachtung)
Art der berücksichtigten Gefahrenquellen	Betriebsbedingte und umgebungsbedingte Gefahrenquellen. (Eingriffe Unbefugter: Im Modell als eigenes Grundszenario berücksichtigt)
Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse	Vordefinierte Ereignisabläufe begünstigen Reproduzierbarkeit
teamorientierte Methode vs. Einzelexpertise	Verfahren ist teamorientiert; Vorauswahl der zu betrachtenden Ereignisabläufe kann ggf. durch eine einzelne Person erfolgen
Verfügbarkeit von Bewertungskatalogen	-

Kriterium	Ausprägung
statistische Eingangsdaten	-
Verfügbarkeit von Software-Lösungen	HAZOP-Master (Lizenzmodell für Betreiber, Sachverständige und Behörden)
Aufwand für Durchführung der Analyse	die integrierten Ereignisabläufe und Fehlerpakete reduzieren den Zeitauswand gegenüber klassischen HAZOP-Studien deutlich.
Prüfbarkeit durch Behörden	Ja, Abgleich der eingereichten Analyse mit den im HAZOP-Master hinterlegten Ereignisabläufen

4.11 FMEA / FMECA und Risikoprioritätszahl

4.11.1 Beschreibung

Die FMEA (Failure Mode Effects Analysis, Fehler-Möglichkeits- und Einwirkungsanalyse) ist ein systematisches Risikoanalyseverfahren, dass sowohl für Produkt- als auch für Prozessbetrachtungen herangezogen werden kann, um mögliche Fehlzustandsarten, ihre Ursachen und ihre Auswirkungen auf das Systemverhalten zu ermitteln.

Für Betrachtungen im Anwendungsbereich der Störfall-Verordnung ist vor allem die Prozess-FMEA (PFMEA) von Bedeutung.

Eine FMEA durchläuft insgesamt sieben Hauptarbeitsschritte.

Arbeitsschritte einer FMEA:

- Schritt 1: Planung und Vorbereitung
- Schritt 2: Strukturanalyse
- Schritt 3: Funktionsanalyse
- Schritt 4: Fehleranalyse
- Schritt 5: Risikoanalyse
- Schritt 6: Optimierung
- Schritt 7: Ergebnisdokumentation

Die eigentliche Analyse beginnt mit der Strukturanalyse, bei der das betrachtete System (Produkt oder Prozess) hierarchisch gegliedert wird. Zweckmäßigerweise wird diese Struktur grafisch veranschaulicht. Eine Prozessgliederung orientiert sich dabei an der 5-M-Charakterisierung (Mensch, Maschine, Mitwelt, Material, Methode), wobei die Methode mittels FMEA nicht beeinflussbar ist und in der Regel ausgeklammert wird.

Bei der Funktionsanalyse werden für alle im Rahmen der Strukturanalyse ermittelten Systembestandteile (Subsysteme, Komponenten bzw. Teilprozesse und Arbeitsschritte) die notwendigen Sollfunktionen abgeleitet.

Diese Funktionen bilden die Grundlage für die eigentliche Fehleranalyse. Aus den Sollfunktionen werden mögliche Fehler für alle Systemelemente abgeleitet. Die Analyse beginnt in der Regel auf der untersten Hierarchieebene. Über eine entsprechende Verknüpfung der Fehler über die einzelnen Hierarchieebenen bis hin zum Gesamtsystem kann eine Fehlerart auf einer niedrige

Ebene zu einer Fehlerursache für eine Fehlerart auf einer höheren Ebene werden. Die Fehlerart auf höherer Ebene bildet in gleicher Weise die Fehlerfolge für die darunter liegende Fehlerart.

Diese Vorgehensweise wird bis zur obersten Hierarchieebene fortgeführt, so dass durch die Verknüpfungen für jeden TOP-Fehler des Gesamtsystems ein gesondertes Fehlernetz entsteht, das die Fehlerabhängigkeiten widerspiegelt (Vgl. DIN EN 60812).

Die Risikoanalyse bestimmt drei subjektiv ermittelte Bewertungsfaktoren für Bedeutung (B) der Fehlerfolge sowie Auftreten (A) und Entdeckung (E) der Fehlerursache, unter Berücksichtigung der bereits definierten Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen. Diesen Bewertungsfaktoren liegen in der Regel für den Anwendungsfall zugeschnittene Bewertungskataloge zu Grunde. Bei der klassischen FMEA sind die Faktoren ganzzahlig und liegen zwischen 1 und 10, wobei 10 jeweils die ungünstigste Ausprägung charakterisiert. Eine Multiplikation der drei Faktoren ergibt die Risikoprioritätszahl (RPZ).

FMEA-Bewertungsfaktoren

- Bedeutung B (Bewertung der Schwere der Fehlerfolge)
  1: geringer Sachschaden - 10: hoher Personen- und Sachschaden
- Auftreten A (Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache):
  1: nie - 10: immer, täglich
- Entdeckung E (Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache):
  1: sofort - 10: nicht erkennbar

(Durch die Anwender) vordefinierte Grenzen für die RPZ und hohe Einzelbewertungen bestimmen die Festlegung von weiteren Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen zur Risikoreduzierung.

Die Abarbeitung der beschlossenen notwendigen Maßnahmen erfolgt vorzugsweise nach absteigender RPZ, sofern nicht im Bereich Sicherheit/Umwelt priorisierende rechtliche Vorgaben bestehen. Nach endgültiger Festlegung bzw. Realisierung der Maßnahmen muss die Anlage erneut mittels FMEA unter Verwendung desselben Bewertungsmaßstabes analysiert werden. Die RPZ unter Einbeziehung der zusätzlich festgelegten Maßnahmen muss jeweils unter dem ursprünglichen Wert liegen und damit deren positiven Auswirkungen verdeutlichen.

Die FMECA (Failure Mode Effects and Criticality Analysis, Fehler-Möglichkeits-, Einfluss- und Kritizitätsanalyse) ist eine Erweiterung der FMEA, die neben der subjektiven Risikoanalyse konkrete Ausfallraten sowie Fehleranteile und Wahrscheinlichkeiten für die Fehlerfolgen berücksichtigt (Vgl. MIL-STD 1629). Statt einer RPZ wird bei der FMECA für jede Fehlerkombination eine Kritizitätskennzahl C ermittelt. Die generelle Vorgehensweise nach den einzelnen Arbeitsschritten ist bei FMEA und FMECA identisch.

4.11.2 Bewertung

Tabelle 23: Bewertung des FMEA/FMECA und Risikoprioritätszahl

Kriterium	Ausprägung
Art der Betrachtung	systematische qualitative Analysemethode
Evaluationsansatz	induktive Vorgehensweise, Charakterisierung eines Risikos auf Basis subjektiv ermittelter Bewertungsfaktoren mittels Risikoprioritätszahl

Kriterium	Ausprägung
erforderliche Fähigkeiten/Fertigkeiten	gründliche Kenntnisse der Entwurfsfunktionen und ihrer Spezifikationen für Detailbetrachtungen; üblicherweise Einbindung von Entwurfsfachwissen aus mehreren Gebieten (z. B. Maschinenbau, Elektrotechnik, Systemtechnik, Softwaretechnik, Instandhaltungsunterstützung usw.) für umfangreiche technische Entwurfsarbeiten
Zugänglichkeit und Verbreitung des Methodenwissens	in vielen Industriebereichen bei der Analyse eines Produktentwurfs weit verbreitet angewendet, ebenso wie für die Analyse der Produktionsprozesse für dieses Produkt; Beschreibungen und Anwendungsleitfäden sind verfügbar
Erfüllung der rechtlichen Anforderungen	weitverbreitetes Risikoanalyseverfahren und eine in der Verwaltungspraxis akzeptierte Methode (siehe auch Leitfaden KAS-55 „Mindestangaben im Sicherheitsbericht“)
abgedeckte Stufen des Analyseprozesses	Analyse möglicher Fehlzustandsarten, ihrer Ursachen und ihrer Auswirkungen auf das Systemverhalten (Verhalten der übergeordneten Baugruppe und des gesamten Systems oder eines Prozesses)
Art der berücksichtigten Gefahrenquellen	Clusterung der auslösenden Ursachen in Anlehnung an Ishikawa (Prozess-FMEA, 5 M) schließt sowohl betriebsbedingte, menschliche und umgebungsbedingte Gefahrenquelle als auch Eingriffe Unbefugter mit ein; Unabhängigkeit wird vorausgesetzt
Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse	Reproduzierbarkeit durch umfassende Dokumentation: i. d. R. Zusammenfassung zur Analyse sowie detailliertes Protokoll mit Blockdiagrammen, Funktions- und Fehlernetzen zur Erläuterung von Systemstruktur und Abhängigkeiten der Funktionen und Fehler
teamorientierte Methode vs. Einzelexpertise	erfolgreiche Umsetzung erfordert angemessene Ressourcen für Teamarbeit, Vergleiche der subjektiv ermittelten Bewertungen eines FMEA-Teams mit denen eines andere Teams sind nicht sinnvoll, selbst wenn die Produkte/Prozesse ähnlich oder identisch erscheinen
Verfügbarkeit von Bewertungskatalogen	Risikoakzeptanzkriterien: subjektiv definiert oder anhand fachlicher und finanzieller Entscheidungen, unterschiedlich je nach Industriesektor
statistische Eingangsdaten	A-Bewertung orientiert sich an Schätzwerten für Eintrittswahrscheinlichkeiten; kontinuierliche Verbesserung der Anfangsschätzungen durch Prüfergebnisse und weitere Informationen; wichtig: kein Weglassen von Fehlerarten aus Mangel an statistischen Referenzdaten
Verfügbarkeit von Software-Lösungen	viele Software-Lösungen für Umsetzung und Dokumentation (z. B. APIS IQ-FMEA, CIMOS-FMEA)
Aufwand für Durchführung der Analyse	arbeitsaufwendiges und ineffizientes Verfahren, wenn es nicht mit Sachverstand angewendet
Prüfbarkeit durch Behörden	gewöhnlich keine schnellen Plausibilitätsprüfungen möglich, gutes Urteilsvermögen und ausführliches Nachvollziehen der Analyse für RPZ-Überprüfung erforderlich

4.12 Zurich Hazard Analysis

4.12.1 Beschreibung

Mit der Zurich Hazard Analysis (ZHA) wird das Ziel verfolgt, systematisch und schnell Gefahren und Bedrohungen aufzuzeigen und Maßnahmen zur Risikobewältigung anzubieten. Dazu werden die Auswirkungen und Eintrittswahrscheinlichkeiten von Szenarien bewertet, wobei die vorhandenen Gegenmaßnahmen von vornherein in die Risikoanalyse einbezogen werden (Vgl. Sommer, J. (2020)).

Neben Umfang und Abgrenzung der durchzuführenden Analyse muss auch deren Zweck bekannt sein. Gleiche Gefahren können nämlich verschieden bewertet werden, je nachdem, ob eine Bedrohung für Menschen, für die Umwelt oder für Sachwerte beurteilt werden soll.

Die ZHA umfasst sieben Arbeitsschritte, wobei die Gefahrenidentifikation den wichtigsten Schritt darstellt.

Schritte der ZHA:

- Schritt 1: Erfassen der Basisdaten
- Schritt 2: Definition der sicheren Prozessbedingungen
- Schritt 3: Gefahrenidentifikation ("Tickerliste für 5 Bereiche: gefährliche Eigenschaften, Störungen oder Versagen, Umgebungseinflüsse, Anwendung und Bedienung, Lebenszyklus oder Verwendung der HAZOP-Methode)
- Schritt 4: Bewertung der Gefahren
- Schritt 5: Festlegung des Risikoprofils
- Schritt 6: Beschreibung der Maßnahmen zur Risikoreduzierung
- Schritt 7: Bestimmung des verbleibenden Risikos

Ausgangspunkt der eigentlichen Analyse ist das systematische Identifizieren der Gefahren mitsamt den zugehörigen Ursachen. Dazu wird das zu analysierende System auf vorher festgelegten Pfaden (z. B. Material-, Energie- oder Signalfluss) betrachtet und anhand einer sogenannten „Tickerliste“ nach fünf Bereichen abgefragt:

- Gefährliche Eigenschaften (z. B. besondere Gefahren der im untersuchten Bereich vorhandenen Stoffe oder Einrichtungen sowie der darin gespeicherten Energien: Explosionsmöglichkeiten, Brennbarkeit, mechanische/elektrische/chemische Energien, Toxizität, Strahlung, Druck, Temperatur, Vibration, Lärm, Verunreinigungen),
- Störungen oder Versagen (d. h. Aufzeigen von Möglichkeiten, wie ein System ausfallen oder fehlerhaft werden kann),
- Umgebungseinflüsse (sowohl von außen auf das System als auch vom System nach außen),
- Anwendung und Bedienung (z. B. Ergonomie, fehlerhafte Bedienung, Missbrauch),

- Lebenszyklus (z. B. Alterung, Korrosion, Änderung von Eigenschaften im Verlauf der Zeit, Entsorgung).

Bei komplexen Anlagen oder bei Anlagen mit einem hohen Gefahrenpotenzial wird in der Regel anstelle der „Tickerliste“ eine detaillierte HAZAOP-Analyse durchgeführt (Vgl. IVSS (2012)).

Für die Bewertung von Gefahren wird bei der ZHA eine relative Betrachtung mit bestimmten vordefinierten Kategorien genutzt.

ZHA-Bewertungskategorien

- Auswirkung (separate und firmenspezifische Definition von Personen- bzw. Umweltschaden, Einbuße von Marktanteilen, Produktionsausfall, Imageverlust)
  I: katastrophal | II: kritisch | III: klein | IV: unbedeutend
- Eintrittswahrscheinlichkeit (anwenderspezifische Definition der Zeiträume):
  A: häufig | B: oft | C: gelegentlich| D: selten | E: unwahrscheinlich | F: sehr unwahrscheinlich

Alle identifizierten und nach Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkung bewerteten Ereignisse werden in einen Gefahrenkatalog dokumentiert und fortlaufend nummeriert.

Das Risikoprofil wird mit den beiden Achsen „Auswirkungen“. und „Eintrittswahrscheinlichkeit“ als zweidimensionale Matrix dargestellt. Das Schutzziel spiegelt sich innerhalb dieser Matrix im Abstand der Stufen und in der Form als Treppenkurve wider und berücksichtigt die Interessen des Betreibers, der Behörden (im Fall von Anlagen, die der Störfall-Verordnung unterliegen) sowie gegebenenfalls von Versicherungen. Für den gleichen Betrieb, mit identischen Anlagen aber an einem anderen Standort, kann unter Umständen eine andere Treppenkurve resultieren.

Die identifizierten Ereignisse aus dem Gefahrenkatalog werden gemäß ihrer Bewertung in das Risikoprofil mit der „Schutzziel-Treppe“ eingetragen. Per Definition sind die Risiken unter dem Schutzziel akzeptierbar. Die Risiken über dem Schutzziel sind dagegen nicht akzeptierbar und müssen durch geeignete Gegenmaßnahmen bezüglich Auswirkungen oder Eintrittswahrscheinlichkeit reduziert werden, so dass letztlich alle Ereignisse unterhalb des definierten Schutzzieles liegen.

Das Risikoprofil gibt vor, welche Risiken zuerst bewältigt werden müssen. Die Risiken der Kategorie I (katastrophal) haben Priorität, und zwar mit abnehmender Eintrittswahrscheinlichkeit. Die abgeleiteten Gegenmaßnahmen werden in einem Maßnahmenkatalog konkret beschrieben

Das verbleibende Risiko kann akzeptiert werden, wenn das Schutzziel erreicht wurde. Für diese Bewertung ist eine erneute Sicherheitsbetrachtung unter Berücksichtigung der zusätzlich getroffenen Maßnahmen erforderlich.

4.12.2 Bewertung

Tabelle 24: Bewertung des Verfahrens Zurich Hazard Analysis (ZHA)

Kriterium	Ausprägung
Art der Betrachtung	semiquantitatives Werkzeug, relative Bewertung für jedes identifizierte Ereignis wie bei vergleichbaren Methoden

Kriterium	Ausprägung
Evaluationsansatz	induktive Analysemethode: bei jedem Gefahrenpotenzial wird von der Ursache ausgegangen und auf die zu erwartende Auswirkung geschlossen
erforderliche Fähigkeiten/Fertigkeiten	Detaillierungsgrad der Analyse von Erfahrung und Fachwissen der Team-Mitglieder, den verfügbaren Unterlagen und der zur Verfügung stehenden Zeit abhängig
Zugänglichkeit und Verbreitung des Methodenwissens	basiert auf dem US Military Standard 882 und entspricht System-Safety-Konzept der Luft- und Raumfahrtindustrie in den USA der 1950er Jahre ganze Reihe frei verfügbarer Anwendungsleitfäden, Weiterentwicklung von Risk Engineering der „Zürich“-Versicherungen
Erfüllung der rechtlichen Anforderungen	erwähnt im Handbuch zur Schweizerischen Störfallverordnung als beispielhafte Methode der Risikoanalyse, generell ein veröffentlichtes und in der Verwaltungspraxis akzeptiertes Verfahren für eine systematische Gefahrenanalyse (siehe auch Leitfaden KAS-55 „Mindestangaben im Sicherheitsbericht“)
abgedeckte Stufen des Analyseprozesses	deckt aus dem gesamten Prozess der Gefahrenanalyse und Störfallrisikobewertung die eigentliche Gefahrenanalyse als wichtigsten Schritt sowie Auswirkungsbetrachtungen und die Risikobewertung ab
Art der berücksichtigten Gefahrenquellen	Betrachtung von betriebsbedingten, menschlichen und umgebungsbedingten Gefahrenquellen sowie Eingriffe Unbefugter
Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse	durch nachvollziehbare Dokumentation gegeben
teamorientierte Methode vs. Einzelexpertise	interdisziplinäres Team und eine in der Methode erfahrene Moderation als Voraussetzung für erfolgreiche Durchführung, ideale Teamgröße: vier bis sieben Fachleute plus Teamleiter (kleineres Team häufig von einer Person dominiert, zu großes Team erschwert Konsensfindung), zusätzliche Einbeziehung entsprechender Spezialisten in das Team je nach Zweck und Abgrenzung der Analyse
Verfügbarkeit von Bewertungskatalogen	keine allgemeingültigen Kriterien für die Akzeptanzbewertung von Risiken: für den gleichen Betrieb, mit identischen Anlagen aber an einem anderen Standort, unter Umständen Anwendung eines anderen Risikoprofils
statistische Eingangsdaten	fest vorgegebene Bewertungskategorien für die Einschätzung von Auswirkung und Eintrittswahrscheinlichkeit, Ausprägungen der Bewertungskategorien sind anwenderspezifisch festzulegen, statistische Referenzwerte dabei hilfreich
Verfügbarkeit von Software-Lösungen	verschiedene Software-Lösungen für die Durchführung und Dokumentation, Verfahren wird u. a. durch das Tool ZHAWORKS PRO 4.1/4.2 abgedeckt, umfassende Freeware-Lösung ZHA Light 1.0 auf Basis von MS Excel zum Download verfügbar
Aufwand für Durchführung der Analyse	Mitterer Aufwand

Kriterium	Ausprägung
Prüfbarkeit durch Behörden	keine Plausibilitätsprüfungen vorgesehen, aber Nachvollziehbarkeit auf Basis der geforderten umfassenden Dokumentation gegeben

4.13 Risikoorientierte Gefahrenanalyse

4.13.1 Beschreibung

Die Risikoorientierte Gefahrenanalyse (ROGA) dient der Bewertung des Arbeitsschutzes, der Anlagensicherheit beim Betreiben von Anlagen sowie des Schutzes der Umgebung der Anlage und wurde von der TÜV Rheinland Industrie Service GmbH, Köln, entwickelt. Das Vorgehen gliedert sich in zwei Teile: die Gefahrenanalyse für die zu betrachtende Anlage und die Klassifizierung der sicherheitsrelevanten Maßnahmen (Vgl. Block, Haferkamp, Mistele, Shahvardian (2006)).

Bei der Gefahrenanalyse werden anhand hierarchisch gegliederter Checklisten zu den denkbaren betrieblichen Gefahrenquellen die für die betrachtete Anlage relevanten Gefahrenquellen ermittelt. Die in der Anlage zu treffenden störfallverhindernden Maßnahmen (Barriere 1) und die Maßnahmen zur Begrenzung der Auswirkungen von Stofffreisetzungen (Barriere 2) werden anschließend unter Berücksichtigung der ermittelten Gefahrenquellen identifiziert. Eine dritte Checkliste unterstützt die Ermittlung der Maßnahmen zum Schutz der betrachteten Anlage gegen Einwirkungen aus der Umwelt und gegen Eingriffe Unbefugter (Barriere III).

Vorgehensweise bei der Gefahrenanalyse:

- Ermittlung der anlagenspezifischen Störfalleintrittsvoraussetzungen
- Selektion der Teilsysteme, in denen die Störfalleintrittsvoraussetzungen auftreten können
- Ermittlung der betrieblichen Gefahrenquellen
- Ermittlung der sicherheitsrelevanten Anlagenteile
- Ermittlung des mit der Gefahrenquelle verbundenen Gefahrenpotenzials und dessen Bewertung in Form von Risikoklassen (RK1 – RK8)
- Ermittlung der störfallverhindernden und auswirkungsbegrenzenden Maßnahmen und deren Bewertung in Form von Verfügbarkeitsklassen* (ZK1 – ZK8)

** in ursprünglicher Verfahrensdefinition: Zuverlässigkeitsklassen*

Die Ergebnisse der anlagenbezogenen Gefahrenanalyse werden in Tabellenform dokumentiert.

Die Ermittlung und Bewertung des mit einer Gefahrenquelle verbundenen Risikos und die Zuordnung einer Risikoklasse erfolgt mit einem Risikografen, der an die VDI/VDE 2180, Blatt 1 (2019) angelehnt ist (Vgl. auch 4.7).

Parameter für die Zuordnung von Risikoklassen

- Schadensausmaß S (mit dem Wirksamwerden der Gefahrenquelle verbunden)
  S1: klein | S2: mittel | S3: groß | S4: katastrophal

- Wahrscheinlichkeit A (Aufenthalt von Menschen im Einflussbereich des mit dem Schadensausmaß verbundenen Gefahrenbereichs):
  A1: selten | A2: häufig
- Wahrscheinlichkeit G: für rechtzeitiges Erkennen der Gefahr
  G1: leicht möglich | G2: schwer möglich
- Wahrscheinlichkeit W: für Wirksamwerden der Gefahrenquelle
  W1: sehr gering | W2: gering | W3: relativ hoch

Für die systematische Festlegung von Auswirkungen werden Nomogramme für die Bestimmung des Schadensausmaßes als Funktion der freigesetzten Stoffmenge erstellt.

Die Einschätzung der Wahrscheinlichkeit für das Wirksamwerden einer Gefahrenquelle erfolgt unter Berücksichtigung der Gegebenheiten einer betrachteten Anlage.

Um das Wirksamwerden der Gefahrenquelle zu verhindern, müssen den Risikoklassen Maßnahmen mit adäquaten Verfügbarkeitsklassen gegenüberstehen, welche jeweils alle erforderlichen Vorgänge umfassen, die die Funktion der sicherheitsrelevanten Maßnahmen gewährleisten. Die Zuordnung von technischen und organisatorischen Maßnahmen in Verfügbarkeitsklassen muss dabei dem Stand der Sicherheitstechnik und der Betriebserfahrung entsprechen. Als Orientierung dienen die PLT-Schutzrichtlinien nach DIN EN 61508/61511 bzw. VDI/VDE 2180 sowie die Klassifizierung von Druckgeräten nach Druckgeräteverordnung.

Die Verfügbarkeitsklasse einer Maßnahmenkette ergibt sich aus der Summe der einzelnen Verfügbarkeitsklassen voneinander unabhängiger Maßnahmen.

4.13.2 Bewertung

Tabelle 25: Bewertung des ROGA Verfahrens

Kriterium	Ausprägung
Art der Betrachtung	Beurteilung des Wirksamwerdens von Gefahrenquellen und der daraus resultierenden Auswirkungen auf Basis einer Risikoermittlung mithilfe einer semiquantitativen Vorgehensweise
Evaluationsansatz	verwendet die Methodik der deduktiven Gefahrenanalyse
erforderliche Fähigkeiten/Fertigkeiten	setzt detailliertes Expertenwissen bei den beteiligten Fachleuten voraus, insbesondere im Hinblick auf die Zuordnung der technischen und organisatorischen Maßnahmen zu den zutreffenden Verfügbarkeitsklassen; Voraussetzung für Anwendung des Verfahrens: Klassifizierung sämtlicher relevanter Anlagenkomponenten in Verfügbarkeitsklassen → erfordert umfangreiche Erfahrungen bei gefahrenanalytischer Behandlung von Prozessanlagen
Zugänglichkeit und Verbreitung des Methodenwissens	vorrangig im Bereich der Shell AG und von TÜV Rheinland Industrie Services GmbH
Erfüllung der rechtlichen Anforderungen	Entwicklung der zugrundeliegenden Methodik in mehreren vom UBA und TÜV-Verband e.V. geförderten Forschungsvorhaben im Kontext der Erstellung von Sicherheitsberichten/Sicherheitsanalysen nach Störfall-Verordnung, ein Ansatz zur Abbildung der Vorgaben des Gesetz- und

Kriterium	Ausprägung
	Verordnungsgebers, die ein tolerierbares Risiko beschreiben, auf das reale Verhalten technischer Anlagen; veröffentlichte sowie in der Verwaltungspraxis akzeptierte Methode (siehe auch Leitfaden KAS-55 „Mindestangaben im Sicherheitsbericht“)
abgedeckte Stufen des Analyseprozesses	im Wesentlichen eine um quantitative Gesichtspunkte erweiterte Gefahrenanalyse; Risikoermittlung lediglich qualitativ in Form eines Risikographen (Vgl. Drewitz (2012));
Art der berücksichtigten Gefahrenquellen	Berücksichtigung betrieblichen Gefahrenquellen, generell gefährdende Einwirkungen aus der Umgebung und Eingriffe Unbefugter mittels spezieller hierarchisch aufgebauter Checklisten; ergänzende Unterscheidung nach Ausführung der Komponenten, Steuerung der Anlage und Bedienung durch den Menschen für direkt auf die Ausführung und Bedienung einer Anlage bezogenen Gefahrenquellen
Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse	Übersichtlicher Aufbau einer ROGA-Studie mit überschaubarer logischer Veranschaulichung des Erfüllungsgrades von adäquaten Schutzmaßnahmen durch direktes Gegenüberstellen von Risiko- und Verfügbarkeitsklassen
teamorientierte Methode vs. Einzelexpertise	Umsetzung als Einzelexpertise oder besser in einer moderierten Teamarbeit
Verfügbarkeit von Bewertungskatalogen	Ermittlung von SIL-Klassen für PLT-Schutzeinrichtungen gemäß gesetzlicher Toleranzgrößen (im Gegensatz zu LOPA)
statistische Eingangsdaten	Datenerhebung für die Zuordnung der im Betrieb getroffenen Maßnahmen zu Verfügbarkeitsklassen evtl. als Voraussetzung für praktische Umsetzung der Gefahrenanalyse
Verfügbarkeit von Software-Lösungen	keine speziellen Software-Lösungen bekannt
Aufwand für Durchführung der Analyse	Zeitbedarf für ROGA im Gegensatz zum Zeitaufwand für LOPA gering, wegen Integration der Gefahrenanalyse; Verfahren gestattet mit vertretbarem Aufwand das Risiko des mit dem Wirksamwerden einer Gefahrenquelle verbundenen Gefahrenpotenzials und die Zuverlässigkeit der Gegenmaßnahmen abzuschätzen
Prüfbarkeit durch Behörden	Bewertung störfallverhindernder Maßnahmen mit Verfügbarkeitsklassen bietet zusätzliche Kontrolle, einschließlich der Prüfung, ob die Maßnahmen in sich geschlossen und unabhängig sind

4.14 Auswirkungsrechnungen nach DECHEMA

4.14.1 Beschreibung

Ursprung des hier behandelten Verfahrens – im Weiteren DECHEMA-Methode bezeichnet – ist Schalau, B., et al. (2017). Es werden Störfälle im Zusammenhang mit Stoffen, Bränden und Explosionen betrachtet. Ebenso wie bei der TÜV Berlin-Methode wurde eine Dreiteilung in Freisetzung bzw. Zündung, Ausbreitung und Auswirkungsbewertung vorgenommen. Auch sonst

sind starke Parallelen zwischen TÜV Berlin-Methode und DECHEMA-Methode zu erkennen. Im Detail kann in dieser Phase der Analyse aber noch nicht eingeschätzt werden, ob die Modelle und Gleichungen übereinstimmen. Ohnehin werden im Rahmen der DECHEMA-Methode alternative Modelle vorgestellt, die vergleichend nebeneinandergestellt werden. Die DECHEMA-Methode deckt die möglichen Störfallablaufszenarien nicht vollständig ab. Folgende Themen werden im DECHEMA-Modell behandelt:

- Freisetzungsflächen,
- Stofffreisetzung aus einer Umschließung,
- Quellterme bei Sprays und Lachen,
- Gasausbreitung,
- Brände von Flüssigkeiten, Gasen und Feststoffen,
- Explosionen von Gaswolken und Bersten von Behältern,
- Beurteilungswerte.

Ausdrücklich nicht behandelt werden:

- die Modellierung der Vorgänge innerhalb einer Umschließung, die zum Versagen der Umschließung und zur Stofffreisetzung führen,
- die Freisetzung von Stäuben,
- die Freisetzung in Gewässer und Böden,
- chemische Reaktionen der freigesetzten Stoffe,
- diffuse Quellen und schleichende, lang anhaltende Freisetzungen.

Abgesehen von der qualitativ-quantitativen Bewertung der Auswirkungen werden quantitative Modelle genutzt.

4.14.2 Bewertung

Die Analyse in der DECHEMA-Methode erfolgt nach dem gleichen dreiteiligen Prinzip wie die TÜV Berlin- Methode: Quellterme – Ausbreitung – Auswirkungsbewertung. Es werden Störfälle der Art Gefahrstofffreisetzung, Explosion und Brand berücksichtigt. Zu den Phasen Quellterme und Ausbreitung werden quantitative Modell verwendet, für die dritte Phase Auswirkungsbewertung sind es qualitativ-quantitative Modelle. Eine Besonderheit der DECHEMA-Methode besteht darin, dass sie bei der detaillierten Behandlung der Störfallablaufszenarien teilweise alternative Modelle und Gleichungen anbietet und diese nebeneinanderstellt. Unterschiede gegenüber der TÜV-Berlin-Methode können erst nach einer tiefergehenden Analyse festgestellt werden. Dann ist zu untersuchen, inwiefern sich beide Methoden ergänzen bzw. welche Berechnungselemente sich überschneiden. Vergleiche sind dann entsprechend zu erweitern. Die Ausbreitung von Stoffen über den Boden und Gewässer wird nicht behandelt.

Was die Möglichkeit betrifft, Software einzusetzen, den Aufwand und die notwendigen Vorkenntnisse, gilt hier das Gleiche wie bei der TÜV-Berlin-Methode: Software ist vorhanden; Aufwand ergibt sich im Wesentlichen aus der Beibringung der Eingangsdaten, Vorkenntnisse im Bereich Mechanik der Flüssigkeiten und Gase sind empfehlenswert.

4.15 Auswirkungsrechnungen nach TÜV Berlin

4.15.1 Beschreibung

Quelle des behandelten Verfahrens – im Folgenden als TÜV Berlin-Methode bezeichnet - ist Kaiser, W., et al. (2000). Ziel ist es, die Auswirkungen für eine Vielzahl an Störfallablaufszenarien abschätzen zu können. Mit der Vielfalt an Szenarien erweist sich die Auswahl eines passenden Berechnungsmodells als eine anspruchsvolle Aufgabe. Die Darstellung bietet einerseits einen Leitfaden, wie man entlang eines Störfallablaufszenarios zu den entscheidenden Bewertungen kommt. Dabei werden von Stoffen ausgehende Gefahren und von Energiefreisetzungen ausgehende Gefahren in Form von Brand und Explosion behandelt. Abhängig von der speziellen Situation wird im Leitfaden auf die Modelle und Modellgleichungen verwiesen, die jeweils Anwendung finden sollten. Andererseits bietet die TÜV Berlin-Methode eben diese Modelle und Modellgleichungen, welche auf mehrere Anhänge verteilt sind. Sie machen den weitaus größeren Teil des Verfahrens aus.

Die Erarbeitung der Auswirkungen kann man in fünf Schritten durchführen.

Im ersten Schritt sind die potentiellen Störfälle zu formulieren. In vielen Fällen findet man die Störfallablaufszenarien in Sicherheitsanalysen.

Im zweiten Schritt sind erste Angaben und Annahmen für die Störfallablaufszenarien zu finden. Unter anderem gehört dazu die Klärung folgender Fragen:

- Welche Stoffe sind beteiligt?
- In welchem Aggregatzustand befindet sich der Stoff?
- Gibt es ein Leck, aus dem etwas unter Druck austritt?
- Gibt es ein Leck, aus dem etwas heraustropft, wodurch es zu einer Lachenbildung kommt?
- Bildet sich über der Lache ein Gasgemisch?
- Kam es zum Bersten eines Behälters?
- Wie sehen die örtlichen Gegebenheiten aus?
- Wie erfolgt die Ausbreitung des Stoffes?
- Wie erfolgt die Energieausbreitung?
- Welche Art von Explosion liegt vor?
- Welche topologischen Besonderheiten gibt es?

In den Schritten 3 und 4 erfolgen die quantitativen Abschätzungen der Quellterme und der Ausbreitung in Form von Berechnungsgleichungen.

Schritt 5 bildet den Abschluss mit der quantitativ-qualitativen Einschätzung der Auswirkungen. Dabei werden tabellarisch die wirkende physikalische Größe (etwa Bestrahlungsstärke) und die Auswirkung (beim Menschen) gegenübergestellt.

4.15.2 Bewertung

Mit der TÜV Berlin-Methode liegt ein Verfahren vor, welches die Auswirkungen von Brand, Explosion und Gefahrstoffaustritten anhand von Störfallablaufszenarien entwickelt und damit gut nachvollziehbar ist. Die quantitativen Zusammenhänge werden durch Gleichungen repräsentiert und die quantitativ-qualitativen Zusammenhänge für die Auswirkungen über entsprechende Tabellen.

Die Berechnung zu den Störfallablaufszenarien erfolgt nach eigener Einschätzung nach Maßgabe der 3. Störverwaltungsvorschrift.

Zur Durchführung einer Analyse ist der Einsatz von Software möglich und empfehlenswert.

Das Bereitstellen aller notwendigen Eingangsdaten kann etwas aufwendig sein. Auch die Modellauswahl fordert Fachkenntnis ab. Die Durchführung der Analyse selbst ist dann weniger aufwendig.

Inwiefern die TÜV Berlin-Methode alle möglichen Störfallablaufszenarien abdeckt, kann nicht eingeschätzt werden. Zumindest kann festgestellt werden, dass es viele Störablaufszenarien berücksichtigt.

Zum Nachvollziehen der verwendeten Modellgleichungen benötigt man eingehende Kenntnisse im Bereich der Mechanik von Gasen und Flüssigkeiten.

Neben der TÜV Berlin-Methode gibt es auch die DECHEMA-Methode, die nachfolgend in diesem Bericht behandelt wird. Die Inhalte beider Methoden sind sehr ähnlich und in ihrer Logik übereinstimmend. Unterschiede gibt es möglicher Weise in der Abdeckung der behandelbaren Störfallablaufszenarien. Für konkretere Aussagen dazu bedarf es genauerer Recherchen.

4.16 Auswirkungsrechnungen gemäß Accident Damage Analysis Module

4.16.1 Beschreibung

Das Accident Damage Analysis Module (ADAM) der gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Kommission (Joint Research Centers (JRC)) ist ein Softwaretool mit dem die physikalischen Auswirkungen von Störfällen in Bezug auf Wärmestrahlung, Überdruck oder toxische Konzentration, die durch den Verlust der Eindämmung einer brennbaren oder giftigen Substanz entstehen können, berechnet werden. Das Tool ist in drei Module aufgeteilt: Source Terms, Physical Effects, Vulnerabilty. Das Modul Source Terms deckt die Phase der Störfallentstehung ab. Das Modul Physical Effects behandelt die Ausbreitung von Gefahrstoffen sowie Explosionen und Brände. Mit dem dritten Modul Vulnerability wird den ermittelten physikalisch messbaren Umständen wie Gefahrstoffkonzentration, Druckwelle, thermische Strahlung eine Wirkung beim Menschen zugeordnet und quantifiziert. Die drei Module bauen in der genannten Reihenfolge aufeinander auf.

Die verwendeten Modelle, Gleichungen und Zuordnungstabellen sind in dem ADAM-Leitfaden (Fabbri et. al. (2017)) dargestellt.

Allgemeine Erläuterungen zu JRC ADAM befinden sich auf der Internetseite der EUROPEAN COMMISSION (JRC of EC (2020)).

4.16.2 Bewertung

Die Modellrechnungen erfolgen im Wesentlichen quantitativ. In besonderen Fällen wird mit klassenspezifischen Werten gerechnet. Die den semiquantitativen Berechnungen zugrunde liegenden Klassenzuteilungen und Wertezuordnungen sind genau dokumentiert, sodass alle Berechnungen nachvollziehbar bleiben.

Dem Softwarenutzer werden die Eingangsdaten für die Rechnung abgefordert. Die Rechnungen selbst erfolgen im Hintergrund durch das Rechenprogramm. Daher sind die Anforderungen an den Nutzer nicht ganz so hoch einzustufen wie bei den Methoden DECHEMA und TÜV Berlin. Dennoch sind die Spezialkenntnisse im Bereich Mechanik von Flüssigkeiten und Gasen von Nutzen, da auch die richtige Interpretation der Eingabedaten gewisse Fähigkeiten verlangt.

Sofern die Eingangsdaten bereitstehen, ist der Aufwand für eine Analyse als gering einzuschätzen. Bei Kenntnissen im Bereich Mechanik von Flüssigkeiten und Gasen sind die Berechnungen allein zu bewältigen. Der Hauptteil der Arbeit dürfte in der Datenbeschaffung bestehen. Hier wäre es sehr sinnvoll, die Arbeit in einem Team zu verteilen.

JRC ADAM ist zur Nutzung durch Entscheidungsträger in den EU-Gremien und den EU-Mitgliedern zur Unterstützung bei der praktischen Umsetzung der Seveso-Richtlinie, sowie für Forschungseinrichtungen in der EU vorgesehen. Eine kommerzielle Nutzung ist nicht vorgesehen.

Die implementierten Modelle wurden in einer Versuchsphase getestet (Näheres siehe Kap. 6.4.7.4).

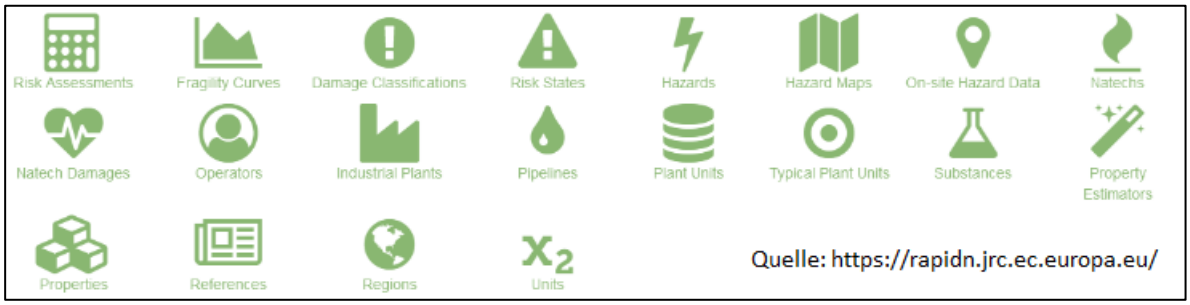
Anhand des ADAM-Leitfadens (Vgl. Fabbri et. al. (2017)) können Vergleiche mit anderen Verfahren durchgeführt werden.

4.17 Auswirkungsrechnungen gemäß Rapid N

4.17.1 Beschreibung

Untersuchungsgegenstand von Rapid N sind durch natürliche Ereignisse initiierte Störfallablaufszenarien - sogenannte Natech-Ereignisse. Rapid N bietet die Möglichkeit einer Einschätzung von Schadensausmaß und geographischer Häufigkeitsverteilung von Natech-Ereignissen. Die geographische Verteilung der Störfälle wird in Form von Karten wiedergegeben. Grundlage ist eine Datenbank, in der die Naturereignisse und ihre Folgen auf die technischen Anlagen erfasst sind.

Abbildung 16: Tabellen der Rapid N - Datenbank



Quelle: https://rapidn.jrc.ec.europa.eu/

Die über das Internet zugängliche Datenbank (Vgl. JRC of EC (2021)) enthält ausschließlich Erdbeben als Naturereignisse. Dort findet man auch allgemeine Erläuterungen zu JRC Rapid N.

Was die weitere Ausbreitung und die Auswirkungen betrifft, werden analytische Berechnungsmodelle verwendet. Als Auswirkungsbewertungen werden sogenannte End Points berechnet, die die Bereiche mit bestimmten Auswirkungen abgrenzen. Berechnungsanleitungen findet man in U.S. EPA (1999). Es werden toxische Gase, Brände und Explosionen behandelt.

4.17.2 Bewertung

Da sich der Datenbankinhalt auf Erdbeben einschränkt, ist eine allgemeine Auswertung nicht möglich. Abgesehen davon dürften die Einträge nur Beispielcharakter besitzen. Ob geeignete vollständige Datenbanken existieren und wie diese zugänglich sind, ist nicht erkennbar. In diesem Sinne lässt sich nur die Methodik einer Bewertung unterziehen. Im Wesentlichen werden quantitative Modellrechnungen vereint, ergänzt durch einige Tabellen. Um die Modelle nachvollziehen zu wollen, benötigt man die Zusammenhänge in Form von Gleichungen, die aus der Quelle U.S. EPA (1999) hervorgehen sollten. Eine Überprüfung war im Rahmen dieses Berichtes nicht angedacht. Um die Berechnungen aber nachvollziehen zu können, benötigt man das Wissen im Bereich der Mechanik von Flüssigkeiten und Gasen. Für die Spezifizierung eines Szenarios müssen viele Eingangsdaten bereitgestellt werden, was recht aufwendig sein kann. Die Berechnung wird im Anschluss vom Programm durchgeführt - ist also ohne Aufwand.

Da die Berechnungsmodelle in dem Leitfaden U.S. EPA (1999) dokumentiert sind, ist ein Vergleich mit anderen Methoden möglich.

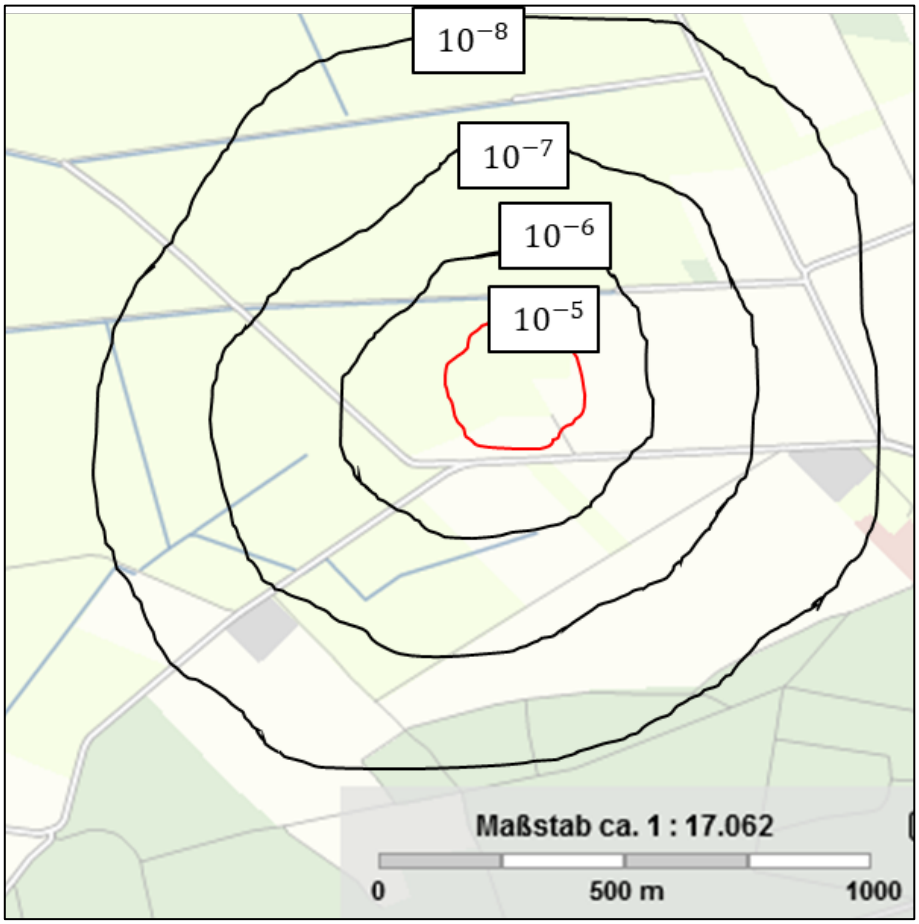
4.18 Methoden und Verfahren in den Niederlanden

In den Niederlanden wird die Seveso-III-Richtlinie mit dem Besluit risico's zware ongevallen 2015 (BRZO 2015, Dekret über Schwere Unfallrisiken) umgesetzt. Die Betreiber von Anlagen mit hohen Mengen gefährlicher Stoffe (Betriebsbereiche der oberen Klasse) sind dazu verpflichtet, quantitative Risikobeurteilungen (QRA, Quantitative Risk Assessment) zu erstellen und der zuständigen Behörde als Teil des Sicherheitsberichtes zu überreichen. Insbesondere sind das Individualrisiko und gesellschaftliches Risiko zu berechnen (BRZO 2015, §2, Art. 6, Abs. 2).

Ergänzt wird das BRZO durch das Besluit externe veiligheid inrichtingen (BEVI, Dekret Externe Sicherheit für Einrichtungen), welches Aspekte der Flächennutzung konkretisiert. Das BEVI bezieht sich nicht ausschließlich auf industrielle Anlagen, welche der Seveso-Richtlinie unterliegen, sondern darüber hinaus auf militärische Aktivitäten, den Transport gefährlicher Güter auf der Straße, per Eisenbahn, auf Wasserwegen und durch Pipelines, sowie den Betrieb von Flughäfen.

Als Individualrisiko wird die ortsabhängige Häufigkeit für eine Person, aufgrund einer Anlagenstörung zu sterben, verstanden. Dabei wird angenommen, dass sich die Person ungeschützt für 24 Stunden an 7 Tagen in der Woche an diesem Ort aufhält. Eventuelle Evakuierungsmaßnahmen werden nicht berücksichtigt (BEVI, §1 Art. 1 Abs 1). Eine Darstellung des Risikos erfolgt über Iso-Risiko-Linien.

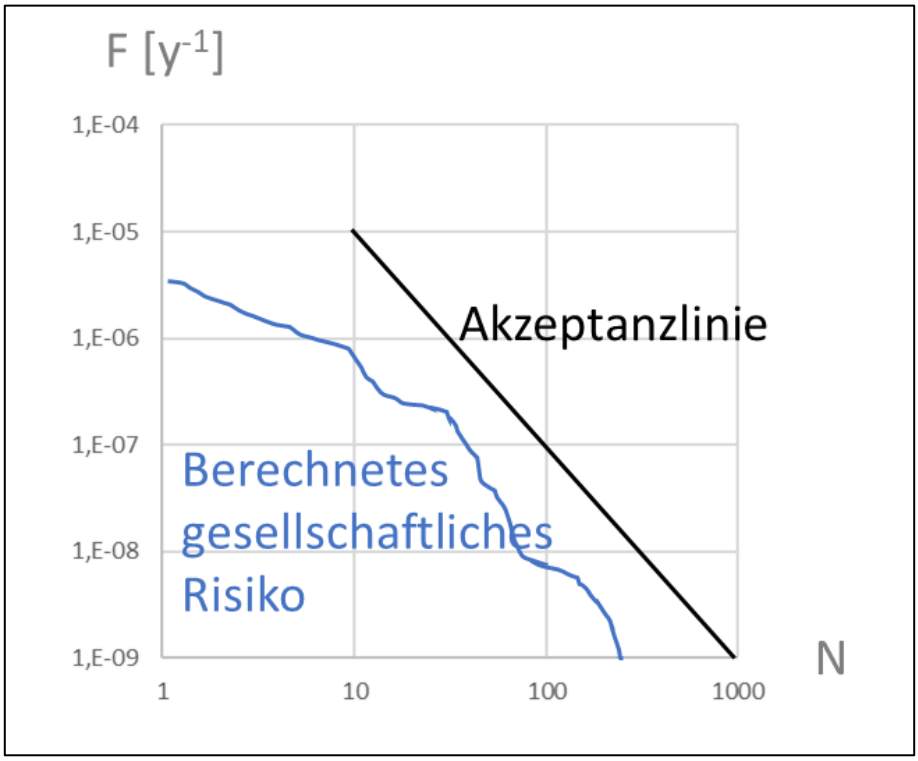
Abbildung 17: Iso-Risiko-Linien 10^-5, 10^-6, 10^-7 and 10^-8 [Jahr-1] für eine fiktive Anlage



Quelle: IZP

Als gesellschaftliches Risiko wird für beliebiges N>0 die Häufigkeit, dass N oder mehr Menschen bei einem Störfall ums Leben kommen, verstanden. Dabei werden die tatsächliche Bevölkerungsdichte exklusive Mitarbeiter:innen des Betriebsbereiches sowie etwaige risikoreduzierende Faktoren wie Evakuierungsmaßnahmen, sicherer Aufenthalt in Gebäuden und Schutzausrüstung berücksichtigt. Die Darstellung erfolgt über ein sogenanntes FN-Diagramm (F=frequency, N= Anzahl Todesopfer).

Abbildung 18: FN-Diagramm für eine fiktive Anlage und Akzeptanzlinie



Quelle: IZP

Konkretisiert wird das BRZO durch die Regeling risico's zware ongevallen (RRZO, Störfallrisikoverordnung), welche Einzelheiten der Umsetzung der BRZO festlegt. So wird beispielsweise die Anwendung einer konkreten Rechenmethodik, die sogenannte „BEVI-Berechnungsmethodik", zur Bestimmung von Individual- und Gruppenrisiko gefordert (RRZO, Art. 12).

Die BEVI-Berechnungsmethodik stellt ein vorläufiges Ergebnis[22] um die Bemühung der Entwicklung eines verifizierbaren, reproduzierbaren und vergleichbaren Vorgehens bei der Erstellung von quantitativen Risikoanalysen dar. Insbesondere baut es auf den „colored books" auf:

- „Red book" (Methoden zur Bestimmung und Verarbeitung von Wahrscheinlichkeiten, Ableitung von Szenarien der Stofffreisetzung (Loss of Containment (LOC)),
- „Yellow book" (Modelle zur Bestimmung des Abflusses und der Ausbreitung gefährlicher Stoffe in die Umwelt),
- „Green book" (Auswirkungen einer Exposition von giftigen Substanzen, Wärmestrahlung und Überdruck auf den Menschen).
- „Purple book" (Weitere Annahmen und Details zur vollständigen Formulierung eines QRA-Berechnungsansatzes)

Die Anwendung des Purple book war (bzw. ist) in den Niederlanden bewährte Praxis. Eine durch das Nationale Institut für öffentliche Gesundheit und Umwelt (RIVM, Rijksinstituut voor

[22] In englischer Sprache ist die Version 3.3 vom 1.7.2015 verfügbar, in niederländischer Sprache die Version 4.3 vom 11.1.2021 „Handleiding Risicoberekeningen Bevi v4.3"

Volksgezondheid en Milieu[23]) beauftragte Benchmark-Studie[24] hat jedoch gezeigt, dass die Berechnungsergebnisse signifikant von den Interpretationen der colored books durch die jeweiligen Anwender/Konsultanten abhängen. Verstärkt wurde dieser Effekt zusätzlich durch die freie Wahl der Berechnungssoftware. Da die Berechnungen jedoch eine große Bedeutung für die Raumplanung haben und größere Abweichungen aufgrund subjektiver Entscheidungen der Anwender als nicht tolerierbar angesehen werden, wurde in Konsequenz festgelegt, dass

- a) für die Durchführung der QRA-Berechnungen zukünftig ein spezielles Berechnungspaket heranzuziehen ist. Das Berechnungspaket SAFETI-NL von DNV-London.
- b) Für stationäre Anlagen das Purple Book durch das „Reference Manual Bevi Risk Assessments“ ersetzt wird (Der Part „Gefahrguttransporte“ des purple book bleibt unberührt)

Die Revi (Verordnung unter Bevi) besagt, dass die Anwender Version 4 des Referenzhandbuchs und Version 8-2019 von SAFETI-NL verwenden sollen. Ab dem 1.1.2024 wird das Reference Manual Bevi Risk Assessments durch das Handbuch Umweltsicherheit ersetzt, die Berechnungsmethode wird jedoch nicht geändert. Die Unterschiede zwischen dem neuen Handbuch und dem aktuellen Referenzhandbuch sind gewissermaßen kosmetischer Natur (z.B. Änderung der Reihenfolge der Kapitel).

4.18.1 Beschreibung

Das Reference Manual Bevi Risk Assessments widmet sich der quantitativen Analyse von Risiken bezogen auf die Gefährdung von Menschenleben. Dabei werden das sogenannte Individualrisiko und das gesellschaftliche Risiko untersucht.

Das Manual besteht aus mehreren Modulen:

- Modul A: Beschreibung des Rechtsrahmens
- Modul B: Generelle Ausführungen zu Modellparametern (frei wählbare und nicht freiwählbare Parameter) sowie zur technischen Dokumentation der Analyse
- Modul C: Modellierung der Szenarien (Insbesondere der Szenarien der „BRZO-Establishments“, sprich der Anlagen, welche der Seveso-Richtlinie unterliegen)

Kurzdarstellung der Teilschritte des Verfahrens für ein BRZO-Establishment:

1. Auswahl der zu untersuchenden Anlagenteile:

Untersucht werden sollen nur diejenigen Anlagenteile(„Installations“), welche signifikant zum Risiko beitragen. Dazu wurde eine Auswahlmethode entwickelt, welche auf stoffabhängigen Mengenschwellen und Prozessbedingungen basiert (Vgl. Modul C, Kapitel 2).

2. Ermittlung der Stofffreisetzungsereignisse (sogenannte „Loss of Containment“-Ereignisse bzw. LOC‘s):

Das Manual stellt eine Auswahl an Systemen und LOC‘s inklusive Ausfallraten bereit, die in die QRA-Analyse aufzunehmen sind (Vgl. Modul C, Kapitel 2).

[23] Das RIVM ist dafür verantwortlich, dass die Berechnungsmethoden und Software-Lösungen auf dem aktuellen Stand bleiben und berät das zuständige Ministerium in Fragen der externen Sicherheit

[24] RIVM Report 610066015/2001 - Benchmark risk analysis models. Ale, B.; Golbach, G.; Goos, D.; Ham, K.; Janssen, L.; Shield, S. So kam es bei der Anwendung des purple book beispielsweise zu Mißverständnissen, welche Ursachen einzelnen LOC’s zugeordnet sind. So wurden beispielsweise von einigen Teilnehmern LOC‘s für Pumpen nicht betrachtet, da von ihnen angenommen wurde, dass diese bereits mit den LOC‘s für Rohrleitungen abgedeckt seien.

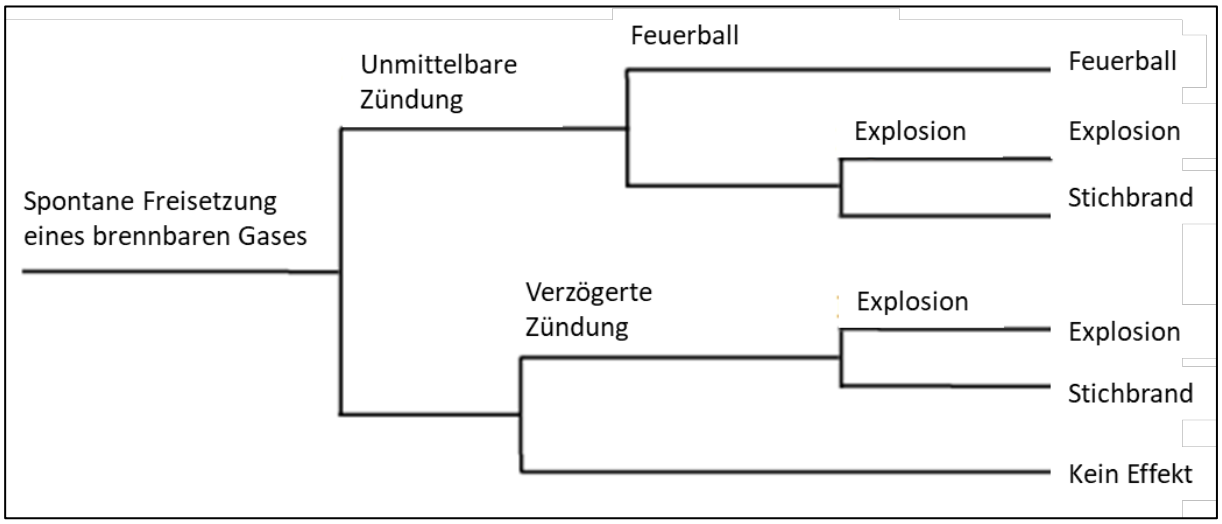
Beispiel - Reaktorbehälter und Prozessbehälter:

- schlagartige Freisetzung des gesamten Inhalts (5×10^{-6} [y^{-1}]),
- Freisetzung des gesamten Inhalts in 10 Minuten in einem kontinuierlichen und konstanten Strom (5×10^{-6} [y^{-1}]),
- Kontinuierliche Freisetzung des Inhalts aus einem Loch mit einem effektiven Durchmesser von 10 mm (1×10^{-4} [y^{-1}])

3. Modellierung resultierender Phänomene:

Im Manual werden für die Loss of containment-Ereignisse entzündbarer Gase und Flüssigkeiten entsprechende Ereignisbäume bereitgestellt, welche die anzunehmenden Folgen („Phänomene“) wie beispielsweise Feuerball, Explosion, Stichbrand (Flashfire), Poolfeuer, explosionsartige Verdampfung eines brennbaren oder nicht brennbaren Stoffes durch die spontane Freisetzung aus einem Behälter (BLEVE) etc. beschreiben.

Abbildung 19: Ereignisbaum “Spontane Freisetzung eines brennbaren Gases (Instantaneous release of an inflammable gas)”



Quelle: Eigendarstellung IZP in Anlehnung an Reference Manual BEVI risk Assessments, Module B, Version 3.3 (REVI, 2015)

Ebenso wird in dem Manual beschrieben, wie die Verzweigungswahrscheinlichkeiten zu bestimmen sind (Vgl. Modul B, Kapitel 3).

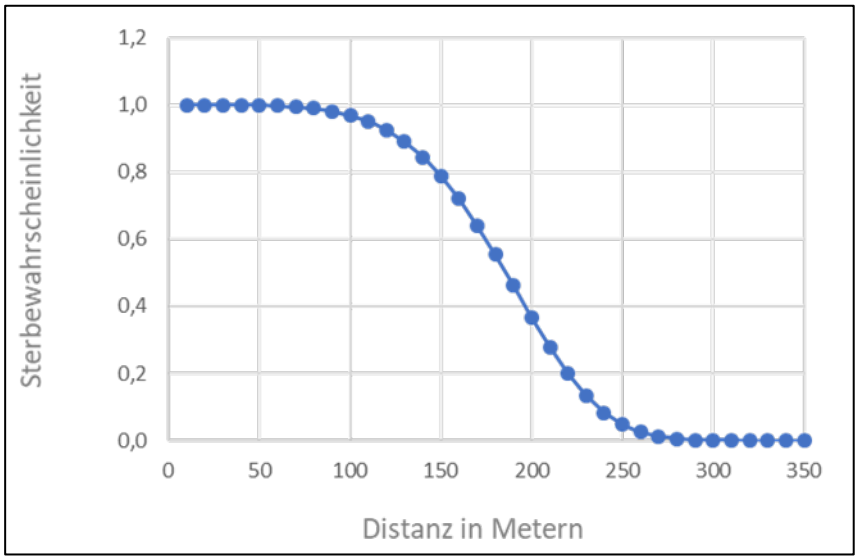
Bei der Modellierung der Folgen der LOC-Ereignisse können sogenannte „Repression factors" berücksichtigt werden. Diese reduzieren Auswirkungen und Häufigkeit der LOC‘s.

4. Modellierung des Schadens:

Es werden verschiedene Modelle, welche Stofffreisetzungen, Gasausbreitungen, Brände und Explosionen sowie die physikalischen Effekte auf die Menschen beschreiben angewandt. Die Anwendung des Softwarepaktes Safeti-NL der DNV ist verbindlicher Bestandteil der BEVI-Berechnungsmethodik. Auf Modelle in dem Softwarepaket implementieren Modelle wird in Kapitel 6.4 eingegangen.

Das zu erwartete Schadensmaß wird mittels sogenannter Probit-Funktionen berechnet, welche Dosis-Wirkung-Zusammenhänge abbilden. Dabei werden jeweils eigene Berechnungsformeln für die thermischen und toxischen Effekte angewandt

Abbildung 20: Die Sterbewahrscheinlichkeit als Funktion des Abstandes (z.B. bei einer angenommenen Explosion)



Quelle: Guidelines for quantitative risk assessment“ (VROM, 2005)

5. Berechnung des Risikos:

Im letzten Schritt werden das Individualrisiko und das gesellschaftliche Risiko aus den Einzelrisiken der LOC‘s berechnet.

4.18.2 Bewertung

Tabelle 26: Bewertung der Verfahren und Methoden in den Niederlanden

Kriterium	Ausprägung
Art der Betrachtung	Quantitativ. Berechnung des Individualrisiko und gesellschaftlichen Risikos.
Evaluationsansatz	Hauptsächlich induktiv. Ermittlung und Berechnung von Störfallablaufszenarien anhand vordefinierter Freisetzungsszenarien und Ereignisbäume. Ursachenermittlung für die gegebenen Freisetzungsszenarien wird erst dann notwendig, wenn von den vordefinierten Eintrittshäufigkeiten abgewichen werden soll.
erforderliche Fähigkeiten/Fertigkeiten	mittel bis hoch. Das Verfahren wird von den Unternehmen teils als zu akademisch angesehen[25]. Anwender der Software Safeti-NL erhalten in den Niederlanden ein 4-tägiges Training. Valide Berechnungsergebnisse benötigen weiterhin entsprechendes Expertenwissen[26]
Zugänglichkeit und Verbreitung des Methodenwissens	Die Leitfäden sind frei verfügbar. Die anzuwendende Software hingegen ist kostenpflichtig. Das Verfahren wird in den Niederlanden akzeptiert und angewendet.

[25] DNV-Studie “Praxis bei der Ermittlung von Betrieben nach der Seveso-II-Richtlinie in Europa und entsprechenden Betrieben in Nordamerika” (Jörg Arnold, Andreas Niehoff (DNV), 2005)

[26] “Evaluation of the Use of the Prescribed Quantitative Risk Assessment Method for Land Use Planning in the Netherlands” (Paul A.M. Uijt de Haag*, Leendert Gooijer, Eelke S. Kooi, Margreet B. Spoelstra, 2013)

Kriterium	Ausprägung
Erfüllung der rechtlichen Anforderungen	Keine Gefahrenanalyse. Referenzhäufigkeiten für Freisetzungsszenarien gelten unter der Prämisse, dass „State of the art“-Maßnahmen zur Reduzierung der Störfallrisiken implementiert sind. Analysiert wird lediglich das Risiko für die Bevölkerung in Folge eines Störfalles zu sterben. Verletzungen, Verunreinigungen von Gewässern und Böden, Sachschäden werden mit dem QRA-Verfahren nicht betrachtet.
abgedeckte Stufen des Analyseprozesses	(bedingt Gefahrenanalyse), Szenarienentwicklung, Auswirkungsbetrachtungen und Risikobewertung. Eine Bestimmung des Standes der Sicherheitstechnik erfolgt nicht, jedoch werden im „Reference Manual Bevi Risk Assessments“ eine Menge konkreter Vorkehrungen und Maßnahmen vorgestellt, die für die Analyse zu berücksichtigen sind.
Art der berücksichtigten Gefahrenquellen	Siehe -> Evaluationsansatz: Eine Berücksichtigung erfolgt zunächst implizit über die vorgegebenen Eintrittshäufigkeiten für die jeweiligen LOC‘s. Inwiefern bei den jeweils angegebenen Eintrittshäufigkeiten altersbedingte Verschleißausfälle, Betreiber- und Instandhalterfehler sowie externe Einflüsse Berücksichtigung finden, kann nur eine detaillierte Untersuchung der jeweils im Handbuch verwendeten Datenquellen ergeben.
Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse	Dem im „Reference Manual Bevi Risk Assessments“ formulierten Anspruch der Reproduzierbarkeit wird versucht nachzukommen, indem zu untersuchende Szenarien, sowie anzuwendende Modelle und Daten bereitgestellt werden. Gleichzeitig werden in allen Schritten der Analyse Freiheitsgrade eingeräumt. Ein Kompromiss, mit dem realistischere Berechnungen auf Kosten der Reproduzierbarkeit erzielt werden soll.
teamorientierte Methode vs. Einzelexpertise	Anwendung des Computerprogrammes Safeti-NL erfolgt in den Niederlanden durch speziell geschultes Personal. Die benötigten Eingangsdaten werden aufgrund der Komplexität der Fragestellungen von mehreren Personen der Unternehmen zusammengetragen. Das Computerprogramm kann wiederum von einer Person bedient werden
Verfügbarkeit von Bewertungskatalogen	Grenz- und Zielwerte sind für das Individualrisiko und das gesellschaftliche Risiko definiert.
statistische Eingangsdaten	Im „Reference Manual Bevi Risk Assessments“ verwendete Ausfallraten gelten als teilweise veraltet bzw. unpräzise. Teilweise werden die Ausfallraten selbstkritisch als zu optimistisch eingeschätzt. Die Verifizierbarkeit (d.h. der Ursprung der verwendeten Daten) ist teils nur schwer rekonstruierbar.
Verfügbarkeit von Software-Lösungen	Die kommerzielle Software Safeti-NL der Firma DNV London ist verbindlicher Bestandteil der in den Niederlanden etablierten Rechenmethodik
Aufwand für Durchführung der Analyse	Keine Angaben möglich
Prüfbarkeit durch Behörden	Das „Reference Manual Bevi Risk Assessments“ bietet eine relativ hohe Transparenz, da die Menge an zu betrachtenden Szenarien, deren Folgen sowie die anzuwendenden Eintrittshäufigkeiten klar

Kriterium	Ausprägung
	beschrieben sind. Weiterhin ist eine bestimmte Softwarelösung (Safeti-NL) anzuwenden. Diese Umstände erlauben es den zuständigen Behörden, die Berechnungsergebnisse nachzuvollziehen

4.19 Methoden und Verfahren in Flandern

Mit dem Kooperationsabkommen „Samenwerkingsakkoord 3“ (SWA3) vom 16.02.2016 zwischen dem belgischen Föderalstaat, der Flämischen Region, der Wallonischen Region und der Region Brüssel-Hauptstadt zur Beherrschung der Gefahren schwerer Unfälle mit gefährlichen Stoffen wird die Seveso-III-Richtlinie in belgisches Recht umgesetzt.

Seveso-Betriebe der oberen Klasse haben im Rahmen der Kooperationsvereinbarung einen SWA-Sicherheitsbericht vorzulegen (Artikel 8 des [SWA3]). Mit dem SWA-Sicherheitsbericht muss der Betreiber der hochschwelligen Einrichtung u.a. nachweisen[27],

- dass er die Anlagen sicher betreibt und dass er die mit dem Vorhandensein und der Verwendung gefährlicher Stoffe verbundenen Risiken kennt und beherrscht
- dass es ein Konzept zur Verhütung schwerer Unfälle gibt und dass ein Sicherheitsmanagementsystem vorhanden ist, um dieses Konzept aktiv umzusetzen
- dass alle Gefahren schwerer Unfälle erkannt wurden und dass alle Vorkehrungen und Maßnahmen ergriffen wurden, um schwere Unfälle zu verhindern oder ihre negativen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt zu minimieren
- dass die Anlagen, die gefährliche Stoffe enthalten oder enthalten können, ausreichend sicher, zuverlässig und kontrollierbar sind
- dass es einen internen Notfallplan gibt und notwendige Daten für die Erstellung externer Notfallpläne bereit gestellt werden.

Im Rahmen des flämischen Umweltgenehmigungsverfahrens haben diese Betriebe zusätzlich einen Umweltsicherheitsbericht „Omgevingsveiligheidsrapport“ (OVR) vorzulegen. Der Bericht bewertet das Risiko, dem Menschen in der Umgebung eines Betriebs (d. h. außerhalb des Betriebsgeländes) aufgrund der möglichen Auswirkungen ausgesetzt sind, die bei einer unbeabsichtigten Freisetzung gefährlicher Stoffe auf dem Betriebsgelände auftreten können. Mittels einer quantitativen Risikoanalyse (QRA) wird die Sterbewahrscheinlichkeit einer Person im Umfeld der Anlage berechnet und die Anzahl der zu erwartenden Todesopfer abgeschätzt, die außerhalb des Bereichs der Anlage infolge eines Unfalls auftreten können. Anhand einer qualitativen Analyse, meist in Form eines Bow-ties, wird geprüft, ob die notwendigen und ausreichenden Sicherheitsmaßnahmen vorhanden sind bzw. getroffen werden, um die unbeabsichtigte Freisetzung des Gefahrstoffes oder den Schaden (=Tod von Menschen) zu verhindern (sog. primäre, sekundäre und tertiäre Maßnahmen)[28].

[27] https://omgeving.vlaanderen.be/nl/het-veiligheidsrapport-bij-het-samenwerkingsakkoord

[28] https://omgeving.vlaanderen.be/nl/omgevingsvergunning/externe-veiligheid-en-veiligheidsrapportage/over-veiligheidsrapportage/omgevingsveiligheidsrapportage/wat-is-een-omgevingsveiligheidsrapport

Darüber hinaus berücksichtigt der Umweltsicherheitsbericht auch die Umweltsicherheit sowohl außerhalb als auch innerhalb des Betriebs, indem er das Risiko für die Umwelt untersucht.

Der Umweltsicherheitsbericht befasst sich nicht mit der internen Personensicherheit, d. h. mit den Risiken, denen Personen (Mitarbeiter des Betriebs oder diesen gleichgestellte Personen) auf dem Betriebsgelände ausgesetzt sind. Diese Betrachtungen entfallen auf den SWA-Sicherheitsbericht.

Im Rahmen der Erstellung des Umweltsicherheitsberichtes sind Untersuchungen gemäß „RISK CALCULATIONS MANUAL - Guidelines for quantitative risk analysis, indirect risks and environmental risk analysis“ (Handboek risicoberekeningen) durchzuführen. Die Software zur Konsequenzmodellierung ist dabei frei wählbar.

Maßgebliche Berechnungsergebnisse der quantitativen Risikoanalyse sind das Individualrisiko und das gesellschaftliche Risiko wie sie derzeit auch in den Niederlanden zur Anwendung kommen (Definitionen siehe Kapitel 4.3). Für beide Risikokenngrößen müssen Ziel- und Grenzwerte eingehalten werden, damit Umweltgenehmigungsverfahren positiv entschieden werden können.[29]

4.19.1 Beschreibung

Hier untersucht werden soll das vom Departement Omgeving[30] erstellte „RISK CALCULATIONS MANUAL - Guidelines for quantitative risk analysis, indirect risks and environmental risk analysis– version 2.0 of 01/04/2019“ (Handboek Risicoberekeningen”), welches in der ersten Version 2017 veröffentlicht wurde und ein vorläufiges Ergebnis der Bestrebung einer Vereinheitlichung der Berechnungsansätze quantitativer Risikoanalysen für „Seveso-Anlagen“ in Flandern darstellt[31,32]. Das Manual beruht insbesondere auf den Ergebnissen des Forschungsprojektes „Unification“, in welchem verschiedene Fallstudien von jeweils mehreren Sicherheitsexperten analysiert worden sind. Dabei wurden Ursachen für Abweichungen in den Analyseergebnissen (z.B. ausgewählte Modelle und Parameter, angewendete Software) ermittelt und gemeinsam mit den Experten diskutiert, wie diese Freiheitsgrade bei der Durchführung einer QRA sinnvollerweise eingeschränkt werden können.

Die gegenwärtig vorliegende Version dieses Manuals wird laut Selbstauskunft in Zukunft weiter fortgeschrieben werden.

Das Manual widmet sich vorrangig der quantitativen Analyse von Risiken bezogen auf die Gefährdung von Menschenleben. Primäre Berechnungsergebnisse sind das Individual- und Gruppenrisiko. Daneben werden Aussagen zum Vorgehen bei Analysen von Risiken für die Umwelt (Gewässer, Erdboden, Luft) sowie bei sogenannten indirekten Risiken (benachbarte Betriebs- bzw. Anlagenbereiche) getroffen.

Konzeption:

- Primäres Ziel ist die Berechnung von Individual- und Gruppenrisiko für Menschen in der Nähe der Betriebsbereiche

[29] New Manual for Risk Calculations in Flanders as the Result of the Project Unification. Karola Imbrechts, Government of Flanders, Department of Environment & Spatial Development, Koning Albert II-laan 20 bus 8, 1000 Brussels, Belgium

[30] Umweltabteilung der flämischen Regierung. Die Abteilung entstand am 1. April 2017 aus einer Fusion der ehemaligen Abteilungen Umwelt, Natur und Energie (LNE) und Raumplanung Flandern (ex-RWO).

[31] New Manual for Risk Calculations in Flanders as the Result of the Project Unification. Karola Imbrechts Government of Flanders, Department of Environment & Spatial Development, Koning Albert II-laan 20 bus 8, 1000 Brussels, Belgium

[32] Die Version 2.0 von 2019 stellt die gegenwärtig letzte ins Englische übersetze Version dar. Die aktuelle Version 3.2 von 2022 ist lediglich auf Niederländisch verfügbar und wurde daher nicht ausgewertet.

- Durch eine Bereitstellung von zu untersuchenden Szenarien und anzuwendenden Häufigkeitswerten und Berechnungsmodellen zur Abschätzung der Auswirkungen soll sichergestellt werden, dass die Analysen verifizierbar, wiederholbar und vergleichbar sind.
- Von den Vorgaben im Manual kann und soll in begründeten Fällen abgewichen werden.

4.19.1.1 Quantitative Risikoanalyse (Berechnung von Individualrisiko und gesellschaftlichem Risiko)

Die quantitative Risikoanalyse besteht aus den folgenden Schritten:

1. Auswahl relevanter Anlagenteile
2. Entwicklung der Störfallszenarien
3. Je Szenario: Berechnung der Auswirkungen
4. Je Szenario: Berechnung der Eintrittshäufigkeiten
5. Berechnung des Individualrisikos und des gesellschaftlichen Risikos

Schritt 1:

Dieser Schritt dient der Exklusion von Anlagenteilen von der QRA, von welchen anzunehmen ist, dass von ihnen kein signifikantes Risiko ausgeht. Das Kalkül bezieht sich dabei auf die Gefahrenkategorien gemäß Verordnung EG (Nr.) 1272/2008. Das Manual stellt eine Übersicht bereit, für welche Kategorien (und somit Gefahrstoffe) QRA'en durchzuführen sind (Vgl. Modul 4).

Dieser Schritt soll helfen, den Aufwand der gesamten QRA zu reduzieren. Der Schritt ist als optional gekennzeichnet. Weiterhin wird im Manual darauf hingewiesen, dass der Schritt in naher Zukunft noch weiter ausgearbeitet werden wird.

Eine qualitative Analyse soll ungeachtet dieser Einstufung für sämtliche im Betriebsbereich vorhandenen Gefahrstoffe durchgeführt werden.

Schritt 2:

Dieser Schritt dient der Modellierung von Freisetzungsereignissen („Loss of Containment"-Ereignissen) und der Festlegung möglicher Folgen („Phenomena"). Dazu stellt das Manual anlagenspezifische Szenarien („Failure Modes") bereit (Vgl. Module 5 bis 10). Für drucklose Behälter („atmospheric vessels") sind das beispielsweise kleine/mittlere/große Leckage, Bruch mit schlagartige Stofffreisetzung und kontinuierliche Freisetzung des gesamten Inhaltes in 10 Minuten.

In Abhängigkeit des zu betrachtenden Gefahrstoffes sowie des Szenarios sind konkrete Phänomene wie beispielsweise Gaswolkenexplosionen (vapour cloud explosions), explosionsartige Verdampfung eines brennbaren oder nicht brennbaren Stoffes durch die spontane Freisetzung aus einem Behälter (BLEVE), physikalische Explosionen mit Trümmerwurf, Brände (z.B. in einer Auffangwanne oder Fläche (pool fire), unmittelbare Zündung bei Austritt (jet fire) zu betrachten (Vgl. Modul 14).

Sofern dem Freisetzungsereignis nachgelagerte Maßnahmen existieren, können diese in die Modellierung der Szenarien mit aufgenommen werden. Dazu werden für ausgewählte Maßnahmen die Wahrscheinlichkeiten des Versagens im Anforderungsfall sowie deren Reaktionszeiten vorgegeben (Vgl. Modul 13).

Schritt 3:

Dieser Schritt dient der Berechnung der Effektdistanzen physikalischer Effekte der in Schritt 2 qualitativ ermittelten Phänomene. Dabei wird die Distanz bei welcher noch eine 1%-ige

Sterbewahrscheinlichkeit besteht, als maximale Effektdistanz bezeichnet. Als mögliche physikalische Effekte werden Überdruckbelastung, Wärmestrahlung, Verbrennung, Vergiftung untersucht (Vgl. Module 18-20). In diesen Modulen werden die Modelle beschrieben, mit welchen die Effektdistanzen, sowie die ortsabhängige Umrechnung in die Sterbewahrscheinlichkeiten erfolgt.

Damit die Effektdistanzen berechnet werden können, sind die Release-Parameter („source terms“) zu bestimmen (Vgl. Modul 15).

Die Bildung von Pools bzw. deren Verdampfung wird in Modul 16 beschrieben.

Die Ausbreitung von Gasen ist in Modul 17 beschrieben.

Meteorologische und umweltbedingte Einflussfaktoren werden in Modul 3 beschrieben.

Schritt 4:

Dieser Schritt dient der Häufigkeitsberechnung der einzelnen Szenarien. Das Manual stellt hierfür bereit:

- Eintrittshäufigkeiten für die Szenarien,
- Eintrittswahrscheinlichkeiten für verschiedene Phänomene,
- Versagenswahrscheinlichkeiten für eventuell vorhandene Maßnahmen zur Reduzierung des Ausmaßes,
- Verteilungen für verschiedene meteorologische Gegebenheiten (z.B. Wind).

Schritt 5:

Dieser Schritt dient der Berechnung des Individualrisikos und des gesellschaftlichen Risikos, welches von dem gesamten Betriebsbereich ausgeht. Dazu ist eine Abschätzung über die Bevölkerungsdichte innerhalb der maximalen Effektdistanz zu ermitteln (Vgl. Modul 22).

4.19.1.2 Indirekte Risiken

Indirekte Risiken entstehen, wenn sich die Auswirkungen eines Störfalles auf einen benachbarten Betriebsbereich bzw. eine benachbarte Anlage ausbreiten können („Dominoeffekt“). Bei der Analyse der indirekten Risiken soll der zu betrachtende Betriebsbereich (bzw. die zu betrachtende Anlage) in beide Richtungen analysiert werden, d.h., dass dieser einerseits als verursachende Entität betrachtet werden soll, andererseits die Auswirkungen von Störfällen benachbarter Betriebsbereiche berücksichtigt werden sollen, welche sich negativ auf den eigenen Betriebsbereich (die eigene Anlage) negativ auswirken können. Die Analyse soll grundsätzlich semi-quantitativ erfolgen.

Welche Risiken konkret zu berücksichtigen sind, wird in Modul 23 erläutert. Sollte sich herausstellen, dass ein ermitteltes Risiko „signifikant“ ist, soll dieses in der QRA aufgenommen werden.

4.19.1.3 Risiken für die Umwelt

Die Betrachtung der Risiken für die Umwelt erfolgt qualitativ anhand möglicher Freisetzungen gefährlicher Stoffe bei Störfällen. Dabei sind die möglichen Ausbreitungswege über Wasser, Luft oder Boden zu behandeln (Vgl. Module 24).

Die Analyse erfolgt in den folgenden Schritten:

Schritt 1:

Identifikation der Anlagenteile, welche für die Umwelt gefährliche Stoffe beinhalten. Unter anderem:

- Giftige Substanzen,
- Stoffe, die eine Gefahr für die aquatische Umwelt darstellen,
- Ätzende Stoffe.

Schritt 2:

Hier erfolgt die Auswahl der zu analysierenden Anlagenteile (optional, analog zur QRA)

Schritt 3:

In diesem Schritt wird die Analyse der Risiken für die ausgewählten Anlagenteile durchgeführt.

Als methodischer Ansatz soll das Bow-Tie-Verfahren dienen. Folgende Teilschritte sind zu absolvieren:

- Beschreibung der möglicherweise betroffenen Fauna und Flora,
- Analyse der Auswirkungen und Ursachen für schlagartige und kontinuierliche Freisetzungen der in Schritt 1 identifizierten Stoffe;
- Beschreibung und Begründung der im Betrieb ergriffenen vorbeugenden Maßnahmen zur Minimierung der Wahrscheinlichkeit von Freisetzungen gefährlicher Stoffe sowie
- Beschreibung und Begründung von Schutzmaßnahmen, die im Betrieb ergriffen werden, um die Folgen im Falle umweltschädigender Freisetzungen gefährlicher Stoffe zu minimieren.

4.19.2 Bewertung

Tabelle 27: Bewertung der Verfahren und Methoden in Flandern

Kriterium	Ausprägung
Art der Betrachtung	Berechnung des Individualrisiko und gesellschaftlichen Risikos.
Evaluationsansatz	Explorativ/intuitiv. LOC's, Systemarten, Modelle etc. werden vorgeben.
erforderliche Fähigkeiten/Fertigkeiten	mittel bis hoch. Laut DNV-Studie (Vgl. Jörg Arnold, Andreas Niehoff (DNV), 2005) wird das Verfahren von den Unternehmen teils als zu akademisch angesehen, Verwaltungsmitarbeiter/-innen legen das Regelwerk aufgrund der Komplexität unterschiedlich aus.
Zugänglichkeit und Verbreitung des Methodenwissens	Das Manual ist frei verfügbar.
Erfüllung der rechtlichen Anforderungen	Keine Gefahrenanalyse. Referenzhäufigkeiten für Freisetzungsszenarien gelten unter der Prämisse, dass „State of the art"-Maßnahmen zur Reduzierung der Störfallrisiken implementiert sind. Analysiert wird lediglich das Risiko für die Bevölkerung in Folge eines Störfalles zu sterben. Verletzungen, Verunreinigungen von Gewässern und Böden, Sachschäden werden mit dem QRA-Verfahren nicht betrachtet.

Kriterium	Ausprägung
abgedeckte Stufen des Analyseprozesses	Gefahrenanalyse, Szenarienanalyse, Auswirkungsbetrachtungen und Risikobewertung.
Art der berücksichtigten Gefahrenquellen	Eine Berücksichtigung erfolgt ggf. implizit über die vorgegebenen Eintrittshäufigkeiten für die jeweiligen LOC's. Inwiefern bei den jeweils angegebenen Eintrittshäufigkeiten altersbedingte Verschleißausfälle, Betreiber- und Instandhalterfehler sowie externe Einflüsse berücksichtigt sind, kann nur eine detaillierte Untersuchung der jeweils im Handbuch verwendeten Datenquellen ergeben.
Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse	Mit dem Manual erstellte Analysen sollen einen hohen Grad an Reproduzierbarkeit leisten. Diesem Ideal versucht das Manual nachzukommen, indem es einen gemeinsamen Startpunkt für die Analysen formuliert, sowie Modelle und Daten bereitgestellt. Gleichzeitig werden in allen Schritten der Analyse Freiheitsgrade eingeräumt. Ein Kompromiss, mit dem realistischere Berechnungen auf Kosten der Vergleichbarkeit erzielt werden soll.
teamorientierte Methode vs. Einzelexpertise	Anwendung des Computerprogrammes Safeti-NL erfolgt in den Niederlanden durch speziell geschultes Personal. Die benötigten Eingangsdaten werden aufgrund der Komplexität der Fragestellungen von mehreren Personen der Unternehmen zusammengetragen. Das Computerprogramm kann wiederum von einer Person bedient werden
Verfügbarkeit von Bewertungskatalogen	Grenz- und Zielwerte sind für das Individual- und das Gruppenrisiko definiert. Für sämtliche Analyseschritte sind konkrete Vorgaben gemacht (Auswahlkriterien für zu berücksichtigende Anlagenteile, anzuwendende Ausfallraten, ...)
statistische Eingangsdaten	Im Vergleich zum Purple book werden auch neuere Studien und Datenquellen herangezogen
Verfügbarkeit von Software-Lösungen	PROMETEUS, nicht namentlich erwähntes tool zur Berechnung von Individual- und Gruppenrisiko
Aufwand für Durchführung der Analyse	Keine Angaben möglich
Prüfbarkeit durch Behörden	siehe Kriterien „Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse“ und „Erforderliche Fähigkeiten/Fertigkeiten“.

4.20 Methoden und Verfahren in der Schweiz

4.20.1 Beschreibung

Die Schweizer Störfallverordnung (Verordnung über den Schutz vor Störfällen (StFV)) regelt vergleichbar zu deutschen Störfall-Verordnung den Schutz von Mensch und Umwelt vor den Folgen plötzlich auftretender Störfälle bei technischen Anlagen. Die Verordnung wurde erstmalig 1991 in Kraft gesetzt und wird gegenwärtig in der Fassung vom 1. August 2019 angewendet. Sie basiert auf dem Umweltschutzgesetz, sowie auf dem Gewässerschutzgesetz.

Im Unterschied zur Seveso-Richtlinie unterscheidet die Schweizer Störfallverordnung dabei nicht zwischen Betriebsbereichen der oberer und unterer Klasse33. Sie bezieht auch Verkehrswege, auf denen gefährliche Güter transportiert werden, Erdgashochdruck- und Erdölleitungen, sowie besonders gefährliche Mikroorganismen in ihre Bestimmungen mit ein.

Die StFV fordert von den Inhabern (d.h. von den Betriebsbereichen) im Rahmen der Störfallvorsorge u.a.

- geeignete Sicherheitsmaßnahmen zu treffen
- einen Kurzbericht zu erstellen
- ggf. eine Risikoermittlung durchzuführen

Die Verordnung schreibt die Art der eigenverantwortlich zu treffenden Maßnahmen vor (Anh. 2.1 StFV). Zudem wird festgehalten, welche (generischen) anlagenspezifischen Maßnahmen sich daraus ergeben (Anh. 2.2–2.5 StFV). Die Maßnahmen werden wie folgt kategorisiert (Handbuch zur Störfallverordnung (StFV)):

- Maßnahmen, mit denen das Gefahrenpotenzial herabgesetzt werden kann (beispielsweise Mengenbeschränkungen)
- Maßnahmen zur Verhinderung von Störfällen (bauliche, technische oder organisatorische Sicherheitsmaßnahmen, die den bestimmungsgemäßen Betrieb sicherstellen)
- Maßnahmen zur Begrenzung der Einwirkungen von Störfällen (Bau von Auffangvorrichtungen, Bereitstellen von Einsatzmitteln, die Instruktion des Personals, etc.)

Bei der Wahl der Maßnahmen werden betriebliche und umgebungsbedingte Ursachen für Störfälle, sowie Eingriffe Unbefugter berücksichtigt.

Der vom Inhaber zu erstellende Kurzbericht dient u.a. folgenden Zwecken (Handbuch zur Störfallverordnung (StFV)):

- Anhalten des Inhabers einer Anlage, sich mit dem Gefahrenpotenzial und den möglichen Störfallszenarien (Ursachen, Abfolgen und Ausmaße) auseinanderzusetzen
- Grundlage für den behördlichen Entscheid, ob eine Risikoermittlung nötig ist
- Grundlage für den behördlichen Entscheid, ob der Inhaber seinen Pflichten nach Artikel 3 StFV nachgekommen ist

Eine Risikoermittlung ist dann nötig, wenn bei Betrieben eine schwere Schädigung nicht ausgeschlossen werden kann (oder wenn bei Verkehrswegen und Rohrleitungsanlagen die Wahrscheinlichkeit eines Störfalls mit schweren Schädigungen nicht hinreichend klein ist).

Eine schwere Schädigung wird dabei wie folgt definiert:

Tabelle 28: Kriterien für die schwere Schädigung

Schadensindikator		Schwere Schädigung
	Anzahl Todesopfer	≥ 10

[33] in der Schweiz angewendete Mengenschwellen orientieren sich an den Mengenschwellenangaben der Seveso-Richtlinie zur unteren Klasse, teilweise sind die Mengenschwellen sogar noch niedriger gewählt

Schadensindikator		Schwere Schädigung
Bevölkerung (exklusive Personal)	Anzahl Verletzte	≥ 100
Boden	beeinträchtigte Bodenfruchtbarkeit in Flächenjahren	≥ 0,02 $km^2 \times a$
Verunreinigte oberirdische Gewässer	Volumen verunreinigter oberirdische Gewässer	≥ 10^6 m^3
	Fläche verunreinigter oberirdische Gewässer	≥ 1 km^2
Verunreinigte unterirdische Gewässer	Ausfall einer Trinkwasserfassung in Personenmonaten oder Mio. Liter	≥ 10 000 P × M oder ≥ 110 Mio. L

Quelle: BAFU (Hrsg.) (2018)

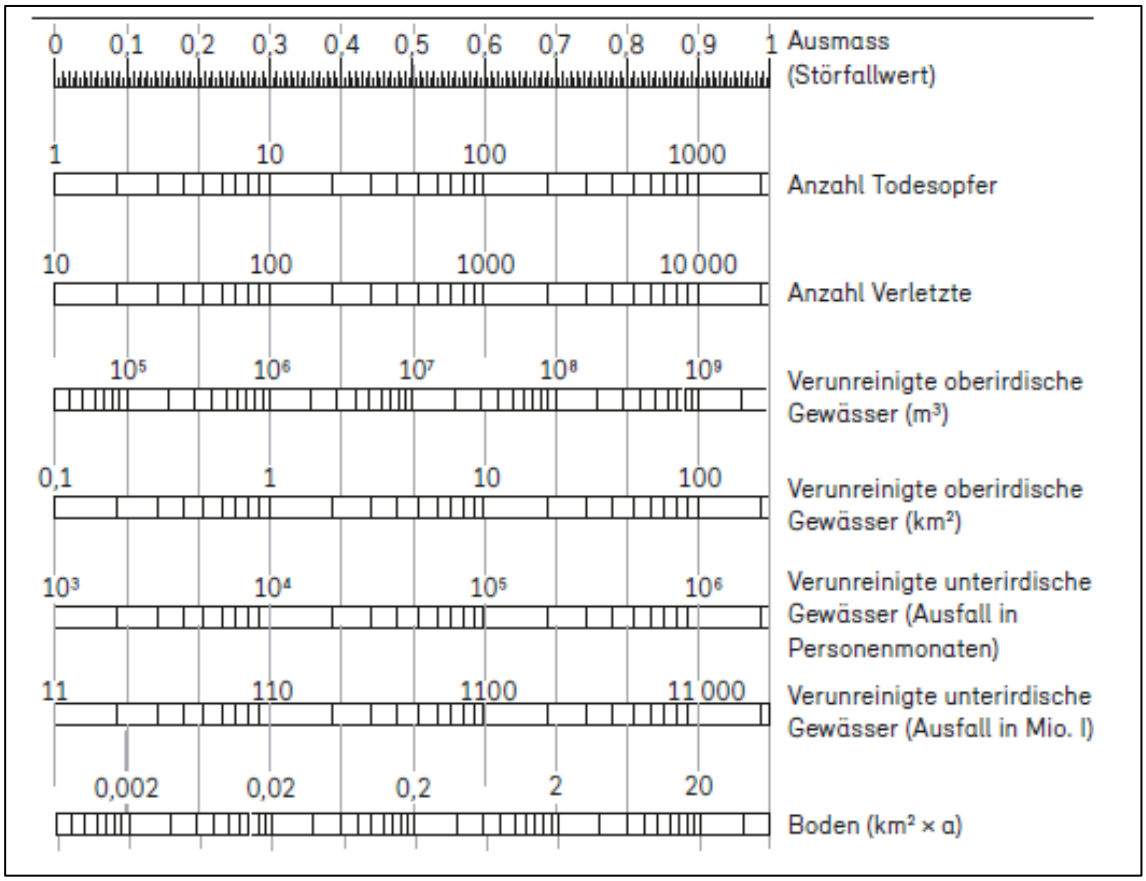
Die vom Inhaber erstellte Risikoermittlung dient folgenden Zwecken (Handbuch zur Störfallverordnung (StFV)):

- Eingehende Prüfung und Beurteilung der bestehenden oder geplanten Sicherheitsmaßnahmen
- Systematische Untersuchung und quantitative Darstellung des von der Anlage ausgehenden Risikos für Bevölkerung oder Umwelt.
- Grundlage für den behördlichen Entscheid, ob das Risiko tragbar ist oder ob zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen notwendig sind
- Evaluation baulicher, technischer und organisatorischer Sicherheitsmaßnahmen, die allenfalls zusätzlich umzusetzen sind.

Darstellung des Risikos:

Die Quantifizierung der Schädigungen der Bevölkerung oder der Umwelt liefert je nach Indikator Ergebnisse in unterschiedlichen Einheiten. Im Hinblick auf eine Beurteilung in einem einheitlichen Raster werden diese Ergebnisse als Störfallwert ausgedrückt.

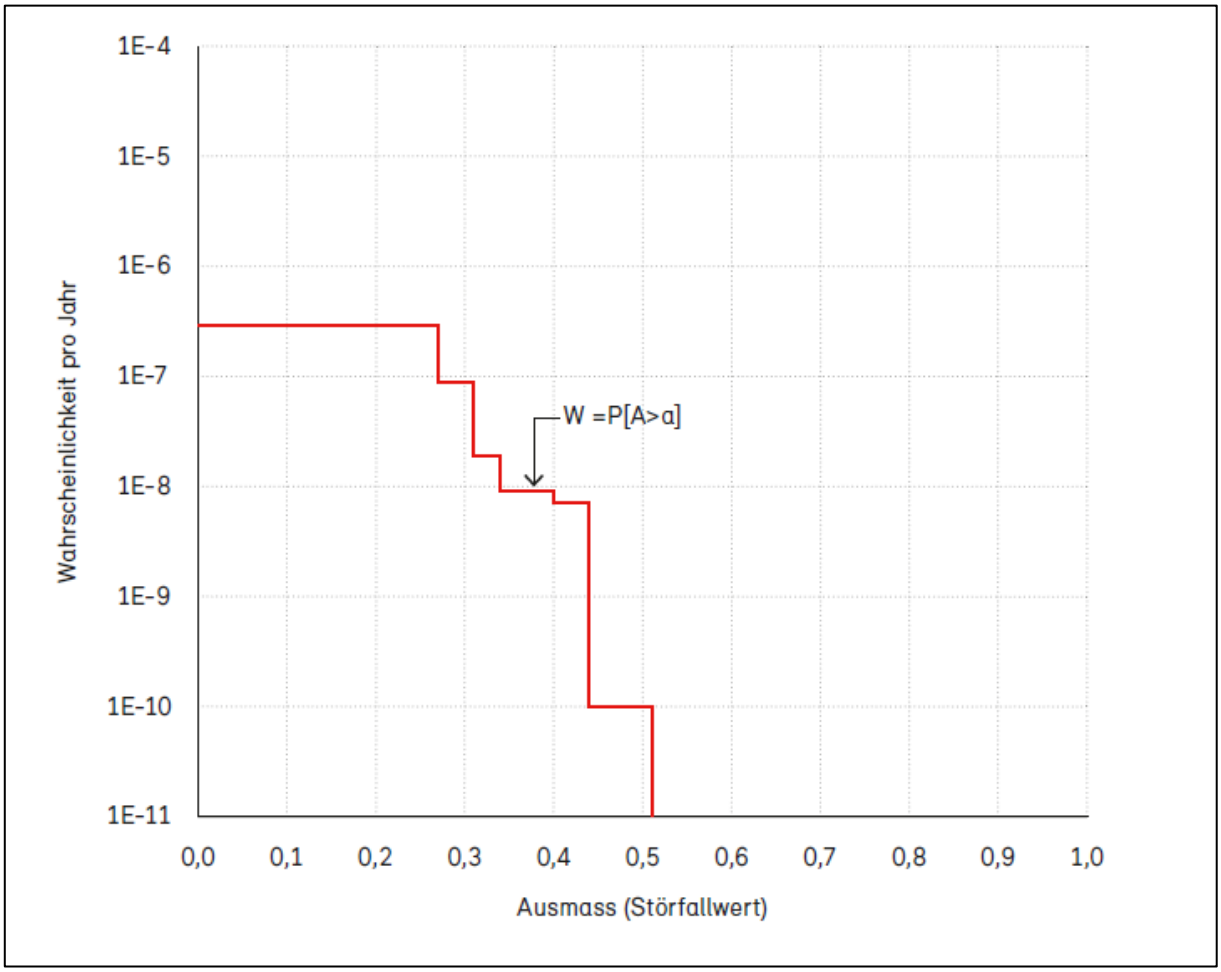
Abbildung 21: Zuteilung von Störfallwerten



Quelle: BAFU (Hrsg.) (2018)

Aufgrund der Störfallszenarien, die im Rahmen einer Risikoermittlung berücksichtigt werden müssen, ergeben sich eine Vielzahl von Ausmaß- und Wahrscheinlichkeitspaaren, die als so genannte Summenkurven (komplementär-kumulative Verteilungsfunktion) in einem sogenannten W/A-Diagramm darzustellen sind. Dazu werden alle Szenarien nach dem Umfang des Ausmaßes in absteigender Reihenfolge geordnet, um dann die Eintretenswahrscheinlichkeiten aufzusummieren. Die Beziehungen zwischen Ausmaßen und kumulierten Eintretenswahrscheinlichkeiten ergeben die Summenkurve im W/A-Diagramm. Die Summenkurve bildet somit die Wahrscheinlichkeit ab, dass das Ausmaß eines Störfalls A einen Störfallwert grösser als a annimmt:

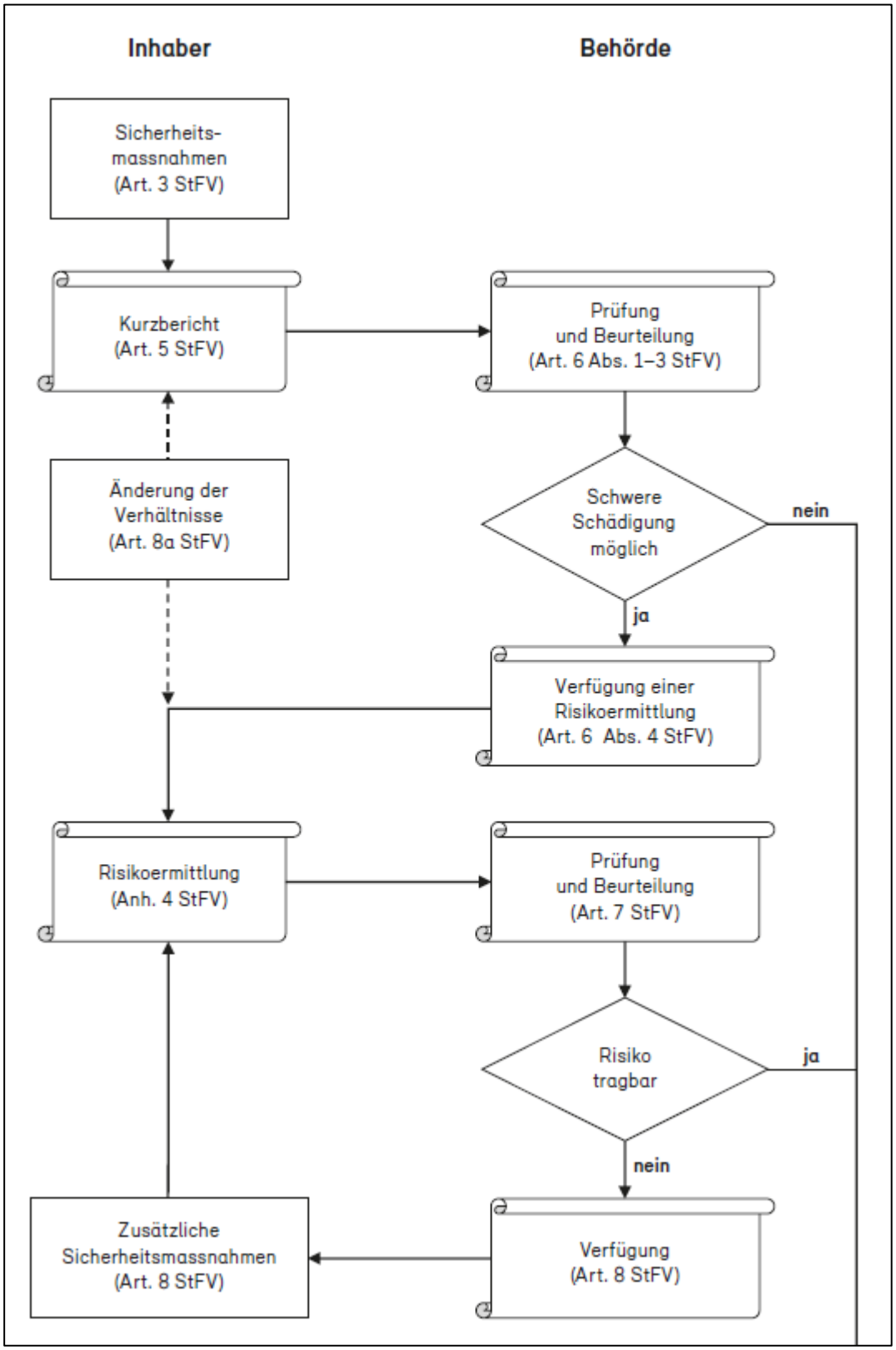
Abbildung 22: Summenkurve



Quelle: Beurteilungskriterien zur Störfallverordnung (StFV). Bundesamt für Umwelt BAFU. Bern, 2018

Die folgende Abbildung stellt den Zusammenhang zwischen Kurzbericht und Risikoermittlung grafisch dar:

Abbildung 23: Kontroll- und Beurteilungsverfahren gemäß schweizerischer Störfall-Verordnung



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

Für die Risikoermittlung sind Analyse-Methoden zu verwenden, die eine quantitative Abschätzung des Ausmaßes der möglichen Schädigung für Bevölkerung und Umwelt sowie der

Eintretenswahrscheinlichkeit für jedes Störfallszenario und eine Nachvollziehbarkeit ermöglichen. Als Basismethode gilt die Fehler- und Ereignisbaumanalyse.

Detaillierte Aussagen zu den qualitativen und quantitativen Risikoakzeptanzkriterien werden in Kapitel 6.5.6 (Risikobewertung in der Schweiz) gegeben.

4.20.2 Bewertung

Das BAFU stellt mit seinen Handbüchern zur Störfallverordnung Rahmenbedingungen für die Durchführung der Gefahrenanalyse und Risikobewertung auf. Jedoch steht dem Inhaber die Wahl der Analysemethoden und -verfahren weitestgehend frei (Anforderung: Risikoermittlung muss quantitativ erfolgen und nachvollziehbar dokumentiert werden). Die formulierten Bewertungskriterien sind somit für das „Schweizer Verfahren“ nicht anwendbar.

4.21 Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the framework of SEVESO II Directive

4.21.1 Beschreibung

Ziel des ARAMIS-Projektes (Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the framework of SEVESO II Directive, Laufzeit 2002-2005) war es, die gängigen, angewendeten Methoden zu einer gesamtheitlichen und insbesondere einheitlichen Methodik der Risikoanalyse zu fusionieren. Dabei sollten die Stärken der einzelnen, bereits in ihrer Anwendung befindlichen, qualitativen und quantitativen Methoden übernommen und zu einem gesamtheitlichen Verfahren zusammengeführt werden. Mit dem ARAMIS-Verfahren sollen die Bedürfnisse der verschiedenen Interessengruppen (Landnutzungs- oder Notfallplanung, Entwicklung ausgewogener Konzepte der Störfallvorsorge, Genehmigungsprozesse, Kommunikation) adressiert werden.

Die ARAMIS-Methode setzt sich aus sechs Schritten bzw. Modulen zusammen:

- Identifikation der schweren Unfallgefahren (MIMAH, Methodology for the Identification of Major Accident Hazards)
- Identifizierung der Sicherheitseinrichtungen und Bewertung derer Performanzen
- Evaluierung der Effizienz des Sicherheitsmanagements
- Identifizierung der Referenzunfallszenarien (MIRAS, Methodology for the Identification of Reference Accident Scenarios)
- Bewertung und Zuordnung der Risikoschwere zu den Referenzszenarien
- Evaluierung und Zuordnung der Vulnerabilität der Anlagenumgebung

Die Gefahrenanalyse MIMAH dient der Ermittlung störfallrelevanter Szenarien. Dazu werden zunächst die Anlagenteile, das Stoffinventar und deren -zustände ermittelt. Anhand der Stoffeigenschaften- und mengen wird entschieden, welche Anlagenteile in die weitere Analyse einzubeziehen sind. Danach werden die verbleibenden Anlagenteile mit den stofflichen Gefahren verknüpft. Vordefinierte kritische Ereignisse (insgesamt 12) können den Anlagenteilen zugeordnet werden. Für diese vordefinierte Ereignisse wurden ebenso generische Fehler- und Ereignisbäume bereitgestellt. Diese sind durch den Anwender als Startpunkt der eigenen Analyse zu verstehen und müssen auf die tatsächlich vorliegende Situation angepasst werden.

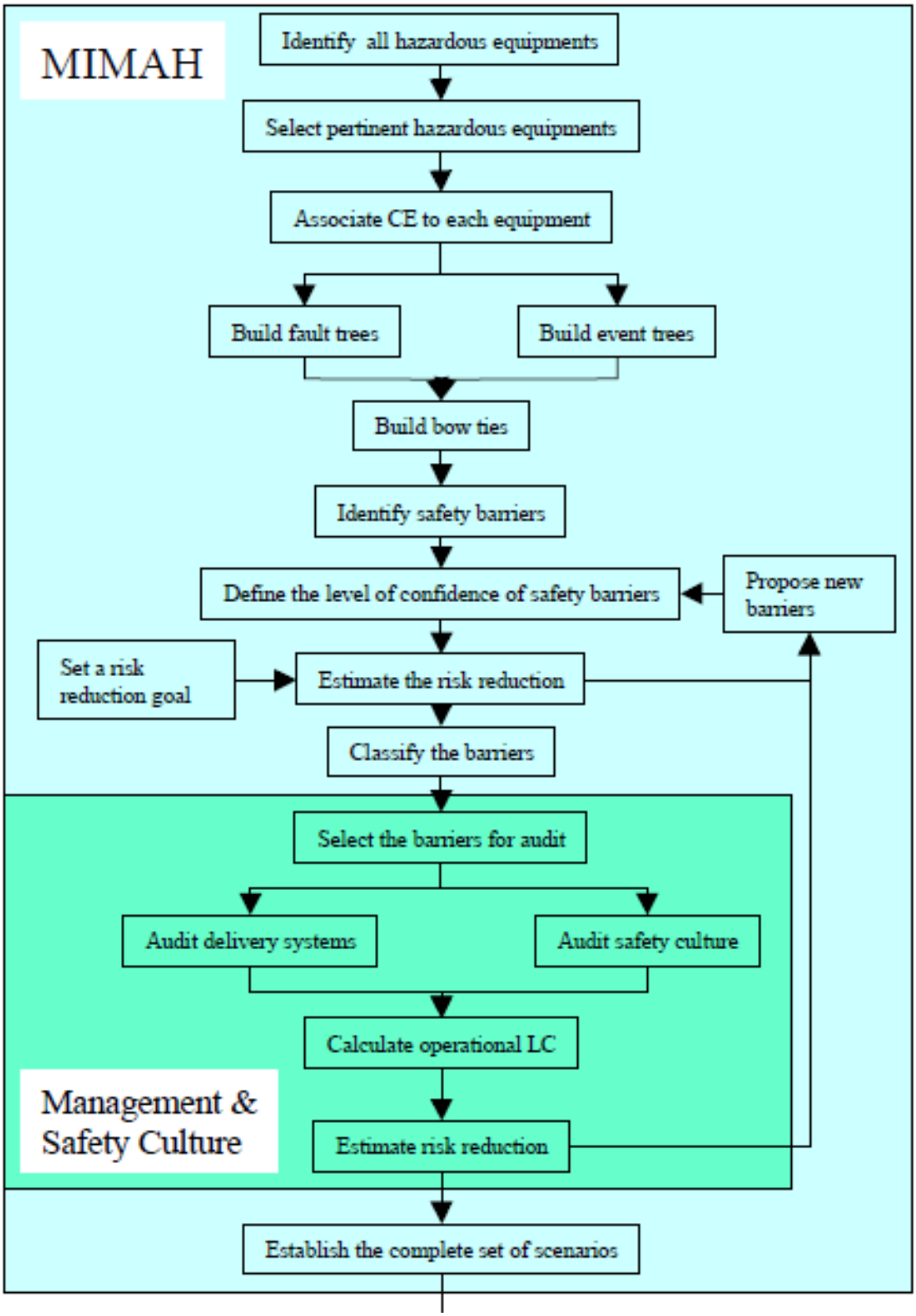
Die notwendigen technischen und organisatorischen Maßnahmen sind aus den erstellten Fehler- und Ereignisbäumen abzuleiten. Deren Wirksamkeiten sind dabei durch den Anwender über ein Indexverfahren abzuschätzen. Dieser Schritt beinhaltet insbesondere die Berücksichtigung eines Sicherheitsmanagementfaktors, welcher die gelebte Sicherheitskultur des Anlagenbetreibers berücksichtigt. Ebenso sind Ausfalldaten heranzuziehen, wobei auf OREDA, purple book, Lee's und COVO verwiesen wird.

Die Auswirkungsbetrachtungen erfolgen zwei-stufig:

- Erste Stufe: Qualitative Betrachtung auf Basis von Konsequenzklassen, mit Hilfe derer über eine Risikomatrix sogenannte Referenzszenarien bestimmt werden.
- Zweite Stufe: Quantitative Betrachtung (Berechnung der Auswirkungen) für die Referenzszenarien.

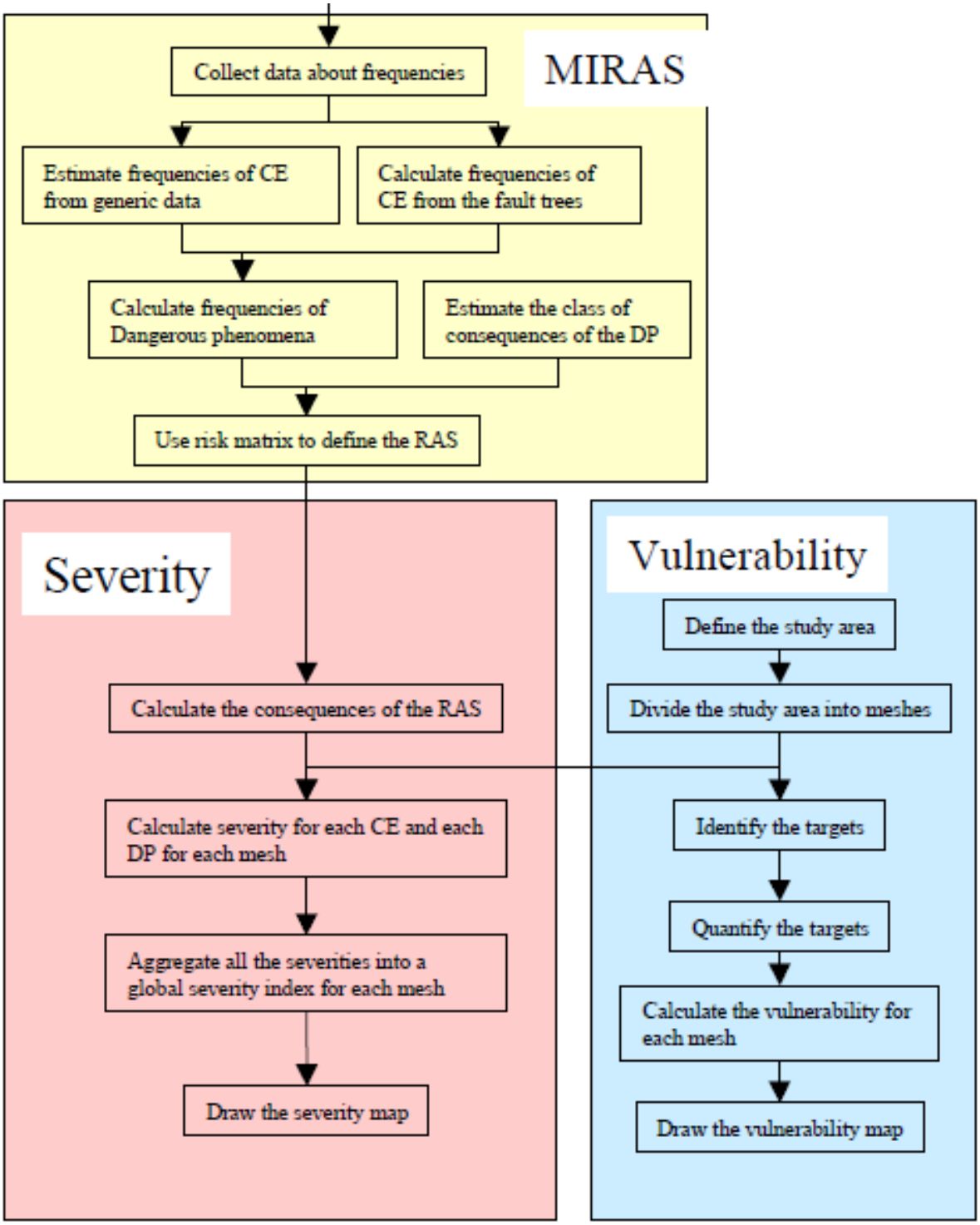
Abschließend wird der Risikoindex gebildet, der vier Ausprägungen von gering bis sehr hoch annehmen kann. Hierbei kann zusätzlich die Vulnerabilität der Anlagenumgebung als Kriterium einfließen.

Abbildung 24: Übersicht ARAMIS-Verfahren – Schritte MIMAH und Management & Safety Culture



Quelle: ARAMIS final User Guide

Abbildung 25: ARAMIS-Verfahren – Schritte MIRAS, Severity und Vulnerability



Quelle: ARAMIS final User Guide

4.21.2 Bewertung

Mit dem ARAMIS-Verfahren werden deterministische und probabilistische Ansätze vereint. Es enthält viele Elemente bzw. Weiterentwicklungen bereits etablierter Verfahren (u.a. QRA-Verfahren in den Niederlanden und Flandern, HAZOP, FTA/ETA/Bowtie, LOPA, Checklisten). Entsprechende Grundlagen und Arbeitshilfen sind im Rahmen des ARAMIS-Projektes entwickelt

und getestet worden (generische Fehlerbäume, Matrizen zur Erstellung von Ereignisbäumen, Checklisten für potentielle Gegenmaßnahmen, Zusammenstellungen von Datensätzen zur Quantifizierung der Eintrittshäufigkeiten, ...).

Es enthält darüber hinaus neue Elemente, wie das Konzept zur Quantifizierung des Safety Managements anhand eines Fragenkataloges.

Tabelle 29: Bewertung des ARAMIS-Verfahrens

Kriterium	Ausprägung
Art der Betrachtung	Qualitativ und quantitativ.
Evaluationsansatz	ARAMIS vereint deduktive und induktive Ansätze (Fehler- und Ereignisbaumanalysen).
erforderliche Fähigkeiten/Fertigkeiten	mittel bis Hoch.
Zugänglichkeit und Verbreitung des Methodenwissens	Im Rahmen der Erarbeitung des Verfahrens wurden diverse Hilfsmittel (generische Fehler- und Ereignisbäume, Checklisten, etc.) erarbeitet. Diese sind jedoch nur noch – zumindest teilweise - auf Anfragen bei EC JRC erhältlich.
Erfüllung der rechtlichen Anforderungen	ARAMIS baut auf diverse in der Verwaltungspraxis akzeptierte Verfahren wie FTA, ETA, LOPA, HAZOP auf.
abgedeckte Stufen des Analyseprozesses	Gefahrenanalyse, Szenarienentwicklung, Auswirkungsbetrachtung. Risikobewertung.
Art der berücksichtigten Gefahrenquellen	In den generischen Fehlerbäumen werden sämtliche Arten an Gefahrenquellen berücksichtigt.
Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse	Bereitstellung einer Vielzahl Arbeitshilfen und -vorgaben (generische Fehler- und Ereignisbäume, Checklisten, Datensammlungen, etc). Vergleichsweise höhere Reproduzierbarkeit im Vergleich zu HAZOP, FTA/ETA, ..
teamorientierte Methode vs. Einzelexpertise	Abhängig vom jeweiligen Analyseschritt (Aufstellen bzw. Anpassen generischer Fehler- und Ereignisbäume, Ableiten Gegenmaßnahmen, Quantifizieren, Ausbreitungsrechnungen, ..)
Verfügbarkeit von Bewertungskatalogen	Ereigniseintrittshäufigkeiten, Checklisten SMS inkl. Scoring-Verfahren, Risikographen und Risikomatrizen
statistische Eingangsdaten	Bereitstellung Sammlung Ereigniseintrittshäufigkeiten
Verfügbarkeit von Software-Lösungen	Diverse Tools sind entwickelt worden, aber nicht frei online abrufbar
Aufwand für Durchführung der Analyse	Abhängig vom Analyseziel: - Interne und/oder externe Sicherheit. - Die Verfahrensschritte zur Analyse des Sicherheitsmanagements werden als relativ zeitaufwändig eingeschätzt.
Prüfbarkeit durch Behörden	siehe Kriterien „Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse“ und „Erforderliche Fähigkeiten/Fertigkeiten“.

4.22 Übersicht recherchierter Methoden, Verfahren und Modelle

Im Rahmen der Recherchearbeit wurde eine Vielzahl an Methoden, Verfahren und Modellen identifiziert. Die folgende Übersicht liefert einen Überblick inklusive Zuordnung zu den jeweils abgedeckten Analyseschritten.

Tabelle 30: Übersicht über die identifizierten Methoden, Verfahren und Modelle

Methode, Verfahren, Modell	Gefahren -analyse	Szenarien-entwicklung	Auswirkungs-betrachtungen	Risiko-bewertung
HAZOP	x	(x)	(x)	
Checklistenverfahren	(x)	(x)	(x)	(x)
Risikomatrix				x
Risikograph nach VDI/VDE 2180				(x)
LOPA		(x)	(x)	x
Fehlzustandsbaumanalyse	x	(x)		
Ereignisbaumanalyse		x	(x)	
Bow-Tie-Analyse	(x)	(x)	(x)	
Szenarienanalyse/HAZOP-Master	x	x	(x)	
FME(C)A	x	(x)	(x)	x
Zurich Hazard Analysis	x		(x)	x
ROGA	x		(x)	x
Ausbreitungs- und Auswirkungsmodelle nach DECHEMA-Process-Net, TÜV-Berlin, Computerprogramme des JRC „ADAM“			x	
Ausbreitungs- und Auswirkungsmodelle: Computerprogramme des JRC „Rapid N“	(x)		x	
Methoden und Verfahren in den Niederlanden / Flandern (u.a. VROM: „Guidelines for quantitative risk assessment“)	(x)	x	x	x
Methoden und Verfahren in der Schweiz (u.a. BAFU / FOEN: „Handbuch Störfall-Verordnung“)		(x)		x
Accident Risk Assessment Methodology for Industries – ARAMIS	x	x	x	x

Legende:

x = Die Methode deckt den Analyseschritt vollständig ab

(x) = Die Methode unterstützt den Analyseschritt

5 Praxisuntersuchungen

Im Rahmen von Praxisuntersuchungen sollten Anwendung und Anwendbarkeit von Verfahren, Methoden und Modellen der Störfallrisikobeurteilung im Kontext der deutschen StörfallV untersucht werden. Die Untersuchungen untergliedern sich in zwei Schritte:

- In einem ersten Schritt wurde die gegenwärtige Praxis der Anwendung von Verfahren, Methoden und Modellen der Störfallrisikobeurteilung bei den Betriebsbereichen untersucht. Dazu wurden mit Betreibern und Behörden Interviews geführt und Sicherheitsberichte ausgewertet (Kapitel 5.1). Das Kapitel 5.1.4 liefert ergänzende Aussagen aus Sicht eines Sachverständigen nach § 29a BImSchG.
- In einem zweiten Schritt wurde in Zusammenarbeit mit Betreibern und Anlagenherstellern die Anwendbarkeit probabilistischer Verfahren an konkreten Anlagen erprobt. Die Ergebnisse und Erkenntnisse der Erprobung wurden anschließend in einem Workshop mit Vertretern des AISV diskutiert (Kapitel 5.2).

5.1 Praxis der gegenwärtigen Anwendung von Verfahren, Methoden und Modellen

5.1.1 Aufgabenstellung

Es war zu untersuchen, welche Verfahren, Methoden und Modelle in Deutschland im Kontext der Störfallrisikobeurteilung eingesetzt werden. Hierzu waren mit den Betreibern und zuständigen Behörden Interviews zu führen, sowie die Sicherheitsberichte der Betriebsbereiche auszuwerten.

Dabei wurden folgende Fragestellungen adressiert:

1. Welche Verfahren, Methoden und Modelle der Störfallrisikobeurteilung sind den Betreibern und Behörden bekannt, welche finden Anwendung?
2. Wurden oder werden die Verfahren durch die Betreiber für die eigene Anwendung modifiziert?
3. Welche Hilfsmittel werden bei der Anwendung der jeweiligen Verfahren herangezogen? Welche zusätzlichen Hilfsmittel würden die Anwendung der Verfahren aus Sicht der Betreiber und Behörden erleichtern?
4. Finden probabilistische Verfahren Anwendung?
5. Wie werden die gegenwärtig angewendeten Verfahren bewertet?

5.1.2 Umsetzung

In gemeinsamer Abstimmung mit dem Umweltbundesamt wurden vier Betreiber sowie vier Behörden akquiriert.

Den akquirierten Betreibern ist gemein, dass sie Anlagen der oberen Klasse gemäß StörfallV betreuen, sowie für die Entwicklung und Umsetzung Ihrer Analyseverfahren im hohen Maße eigenverantwortlich sind und somit ein entsprechend detailliertes Wissen und Erfahrungswerte vorliegen. Die Betreiber haben unter der Prämisse der Wahrung der Anonymität an den Untersuchungen teilgenommen.

Die akquirierten Behörden stellen eine Mischung aus Landesämtern und Vollzugsbehörden dar. Eine Sonderrolle nimmt die Berufsgenossenschaft Rohstoffe Chemische Industrie (BG RCI) ein

(kein Vollzug der StörfallV, Durchführungen von Schulungen zu HAZOP und weiteren Verfahren). Folgende Behörden haben an den Untersuchungen teilgenommen:

- Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim
- Regierungspräsidium Darmstadt
- Berufsgenossenschaft Rohstoffe und Chemische Industrie (BG RCI)
- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV)

In gemeinsamer Abstimmung mit dem UBA wurden Fragenbögen für die Betreiber sowie für die Behörden entwickelt. Die Fragen adressieren folgende Themenbereiche:

1. Angaben zum Betriebsbereich / zur Behörde
2. Informationen zu angewendeten Verfahren, Methoden und Modellen zur Gefahrenanalyse bis Störfallrisikobewertung
3. Bei der Anwendung der Verfahren, Methoden und Modellen zur Gefahrenanalyse bis Störfallrisikobewertung angewendete Hilfsmittel
4. Probabilistische Verfahren zur Gefahrenanalyse bis Störfallrisikobewertung
5. Bewertung der angewendeten Verfahren, Methoden und Modellen zur Gefahrenanalyse bis Störfallrisikobewertung
6. Verknüpfungen zur 9. BImSchV sowie zur 12. BImSchV

Die Blankofragenbögen können dem Anhang A entnommen werden. Die aus den Antworten gewonnenen Erkenntnisse werden im folgenden Kapitel dargestellt.

5.1.3 Erkenntnisse

Die in den Interviews gegebenen Antworten werden in diesem Bericht nicht wortwörtlich wiedergegeben. Die nachfolgenden Ausführungen stellen eine Zusammenfassung der Antworten dar.

Zunächst werden übereinstimmende Antworten bzw. das dominierende Stimmungsbild je Themenbereich dargestellt. Im Anschluss werden Einzelaussagen der Betreiber und Behörden mit besonderer Aussagekraft dargestellt.

5.1.3.1 Übereinstimmende Antworten je Themenbereich

Angewendete Verfahren, Methoden und Modelle zur Gefahrenanalyse bis Störfallrisikobewertung

1. Das Hazard and Operability (HAZOP)-Verfahren wird bei sämtlichen interviewten Betreibern angewendet, teils mit Modifikationen der Leitwörter. Die Gespräche mit den Behörden bestätigen die flächendeckende Anwendung des Verfahrens.
2. In Ergänzung werden Risikomatrizen und -graphen, aber auch die Layer of Protection analysis (LOPA) zur Risikobewertung angewendet. Diese werden standort- bzw. konzernspezifisch kalibriert. Die Gespräche mit den Behörden bestätigen die häufige Anwendung dieser Verfahren in Kombination mit der HAZOP.
3. Das ROGA-Verfahren des TÜV-Rheinland wird von keinem der interviewten Betreiber angewendet. Gespräche mit den Behörden bestätigen die vereinzelte Anwendung. Allerdings geschieht dies vorwiegend in den Fällen, in den der TÜV-Rheinland als Dienstleister beauftragt wird. Als problematisch wird von den meisten Praxispartnern die mangelnde Transparenz des Verfahrens angesehen (z.B. sind Bewertungskriterien für Risikoklassen unveröffentlicht).

4. Fehler- und Ereignisbäume (FTA+ETA) werden von den Betreibern in Einzelfällen angewendet (u.a. im Rahmen der Instandhaltungsplanung oder Auswertung vergangener Ereignisse).
5. Checklisten werden von den interviewten Betreibern– wenn überhaupt – als ergänzende Hilfsmittel angewendet. Durch die Behörden wird der Vorbehalt formuliert, dass Analysen, welche primär mittels Checklistenverfahren erstellt wurden, häufig unreflektierte Kopien bereits erstellter Analysen („Alibi-analysen“) seien. Dies betrifft vermehrt Biogasanlagen. Für einfachere Anlagen, wie Läger, werden seitens der Behörden checklistenbasierte Verfahren als sinnvolle Alternativen angesehen.
6. Quantitative Risikoanalysen vergleichbar mit den Verfahren in den Niederlanden und Flandern sind teilweise bekannt, werden aber nicht angewendet. Kritikpunkt: Primäres Ziel ist die Berechnung der Risikokenngrößen Individualrisiko und gesellschaftliches Risiko. Eine Gefahrenanalyse im Sinne des deutschen Störfallrechts findet mit diesen Verfahren nicht statt.
7. Das Verfahren ARAMIS ist teilweise bekannt. Anwendungsfälle hingegen sind nicht bekannt. Das Verfahren wird als zu ambitioniert bzw. akademisch geprägt beschrieben.
8. Vereinzelt Anwendung finden HAZID und HAZAN (Hazard Identification und Hazard Analysis).
9. Index-Verfahren (Dow Fire & Explosion Index, Mond Fire, Explosion and Toxicity Index) sind teilweise bekannt. Eine Anwendung über die Anlagenbereiche des Dow-Konzerns hinaus ist nicht bekannt.
10. Die Betreiber wenden in der Regel neben der klassischen Kombination von HAZOP + LOPA/Risikograph/Risikomatrix + Ausbreitungsberechnungen (für ausgewählte Störfallszenarien) weitere Analyseelemente an, um so die Qualität ihrer Analysen weiter zu erhöhen. Dies können beispielsweise ursachenunabhängige, systematische Gasausbreitungsrechnungen oder spezielle Checklisten/Fragenlisten/VDMA-Einheitsblätter etc. zu bestimmten Themengebieten sein (z.B. umgebungsbedingte Gefahrenquellen und Eingriff Unbefugter (spezielle Tabellen – z.B. NA 163), Ex-Schutz, TA-Luft, Siting-Analysen (Platzierung von Anlagenteilen innerhalb des Betriebsbereiches), …).

Angewendete Hilfsmittel

11. Zur Unterstützung bzw. Dokumentation der Analysen werden nebst MS Word und MS Excel teilweise kostenpflichtige Softwaretools angewendet. Z.B.:
    a. PHA pro und PHA Works (PHA=Process Hazard Analysis),
    b. Phast (Ausbreitungsmodelle),
    c. ProNuSs (Ausbreitungsmodelle),
    d. ROGA-Software des TÜV-Rheinland.

    Teilweise werden nicht erwerbliche Individuallösungen angewendet (z.B. MS Excel mit Makro-Feature „Prüfung der Aktualität P&I-Schemata“).
    Das Kapitel 8.4 liefert einen umfangreicheren Blick zu aktuell verfügbaren Softwareprogrammen und Dokumentationshilfen.
12. Sämtliche Betreiber beziehen externe Unterstützung bei der Durchführung der Analysen. Als ein Hauptgrund wird das hohe Arbeitsvolumen, welches durch das Stammpersonal nicht allein bewältigt werden kann, genannt. Teilweise wird aber auch explizit Expertenwissen eingekauft (z.B. Moderation des HAZOP-Verfahrens, Erstellung von Sicherheitsberichten, Fachwissen Verfahrenstechnik, Sicherheitstechnik, Ausbreitungsrechnungen). Gerade bei kleineren und mittleren Unternehmen sehen Behörden die mangelnde Kompetenz in der Durchführung von Gefahrenanalysen bzw. in der Erstellung von Sicherheitsberichten als hauptsächlichen Beauftragungsgrund.

13. Die Betreiber bzw. Konzerne bieten ihren Arbeitnehmern – teils in Abhängigkeit ihrer Funktionen (Störfallbeauftragte/Störfallbeauftragter, Moderator/-in, Teilnehmer/-in Prozessrisikoanalysen) – interne und externe Weiterbildungsmaßnahmen an.
    a. Intern: z.B. Ausbildung und Einarbeitung von Störfallbeauftragten, Schulungen von Teilnehmern an Prozessrisikoanalysen durch die Störfallbeauftragte bzw. den Störfallbeauftragten,
    b. Extern: Schulungen der BG RCI zu HAZOP/LOPA etc., Weiterbildungen durch den VCI, Schulungen zu den Themen Explosionsschutz, Brandschutz.

    Teilweise werden die Mitarbeiter/-innen gemäß dem Leitsatz „Learning by doing“ unter Anleitung bzw. Beobachtung erfahrener Mitarbeiter/-innen an die Prozessrisikoanalysen herangeführt.
    Das Kapitel 8.5 liefert einen umfangreicheren Blick zu aktuell verfügbaren Ausbildungs- und Qualifizierungsangeboten.

Probabilistische Verfahren

14. Die Anwendung probabilistischer Elemente beschränkt sich bei den meisten Betreibern auf semiquantitative Ansätze zur Bewertung der Risiken (mittels LOPA, Risikomatrizen- und graphen) bzw. auf Untersuchungen im Zusammenhang mit der KAS-18.
15. Die Betreiber greifen in diesen Fällen auf externe Häufigkeits- bzw. Zuverlässigkeits-Datensammlungen sowie auf eigene Erfahrungswerte zurück.
16. Der Mehrwert quantitativer Risikoanalysen wird von der Mehrheit der Praxispartner kritisch hinterfragt:
    a. Die Übertragbarkeit von Zuverlässigkeits-Datensammlungen (beispielsweise OREDA, purple book, etc.) auf die eigenen Anlagen wird als problematisch bzw. kaum möglich eingeschätzt. Die Auswertung eigener Anlagen erscheint in den meisten Fällen als nicht zielführend (keine aussagekräftigen Statistiken)
    b. Die Berechnung quantitativer Risikozahlen bringt keine nennenswerten Mehrwerte.
17. Als zusätzliche Hürde wird die mit der Kommunikation von Risikozahlen zusammenhängenden Diskussionen um akzeptable Risikowerte angesehen. Diese möchten die Betreiber nicht bilateral, bzw. auf ein konkretes Projekt basierend, mit den Behörden führen.

Bewertung der angewendeten Verfahren

18. Laut Selbsteinschätzung haben die interviewten Praxispartner keine Schwierigkeiten, die Anforderungen der StörfallV mit den bei ihnen zur Anwendung kommenden Verfahren umzusetzen.
19. Der schwierigste bzw. anspruchsvollste Schritt von der Störfallrisikobeurteilung wird mehrheitlich bei der Gefahrenanalyse gesehen (Teamarbeit, kreativer Akt, von naturwissenschaftlichem/technischem Verständnis geprägt). Die folgenden Schritte werden im Vergleich zur Gefahrenanalyse von eher „mechanischer“ Natur beschrieben.
20. HAZOP: Neben der Modifikation der Leitworte wird als weiterer Erfolgsfaktor die Festlegung der Betrachtungseinheiten gesehen. Eine ungünstige Wahl kann dazu führen, das wichtige Zusammenhänge nicht erkannt werden, bzw. nichtzielführende Betrachtungstiefen gewählt werden.
21. HAZOP: Die Einschätzungen zur idealen Zusammensetzung eines HAZOP-Teams ergänzen sich wie folgt:
    a. Das Team sollte nie größer als unbedingt notwendig sein.
    b. Die Moderatorin bzw. der Moderator sollte nicht zwingend die Schriftführung übernehmen.

   c. Rollierende Schriftführerinnen oder Schriftführer (dient der Selbstreflektion).
   d. Zusammensetzung (nebst Moderator/HAZOP-Experte):
      i) Antwort 1: Vertreter vom Betrieb und Verfahrensingenieur
      ii) Antwort 2: Sicherheitstechnik, Verfahrenstechnik, „Betriebler“, sowie je nach Thema „PLT‘Ler“, Maschinenbauingenieur, …
      iii) Antwort 3: Produktionsleiter/Betriebsleiter + Verfahrenstechniker + Instandhaltung + MSR + Operator
      iv) Antwort 4: Entscheider/-innen, Produktion, Betriebstechnik, MSR/PLT-Technik, ggf. nachrückendes Führungspersonal in den Bereichen Produktion, Betriebstechnik, MSR/PLT-Technik, Methodenkundige (Moderator/-in und Fachexpertise für sicherheitstechnische Fragestellungen) mit Mitverantwortung des Analyseergebnisse

22. Es wird grundsätzlich eine mäßige bis starke Abhängigkeit der Analyseergebnisse vom Analyseteam gesehen. Gründe:
    a. Teamleitung (diese vereint idealtypisch mehrere Kompetenzen/Anforderungen: Moderation, Organisation und Leitung, Fachwissen Anlagentechnik, Unbefangenheit bezgl. der zu untersuchenden Anlage, Mitverantwortung des Analyseergebnisses),
    b. Freiheitsgrade in der Durchführung des Verfahrens,
    c. Persönliche Erfahrungswerte,
    d. Motivation des Teams.

    Ein Betreiber jedoch schätzt die Varianzen der Analyseergebnisse aufgrund subjektiver Einflüsse innerhalb seines Konzernes als relativ gering ein, was auf strikte Vorgaben des Konzerns bezgl. des Analyseverfahrens sowie auf weltweit einheitliche Sicherheitsstandards des Konzerns zurückgeführt wird. Die Einschätzung beruht auf empirischen Erfahrungen.
23. Das HAZOP-Verfahren wird als sehr aufwändig eingeschätzt. Abhilfe können schaffen: Die Festlegung weiterer Standards, Weiterentwicklung der Leitworte zur zielgerichteten Abfrage für die betreuten Anlagen relevanter Gefahrenquellen, Softwareunterstützung, gute Vorbereitung der Sitzungen (insb. Dokumentenbereitstellung) sowie eine konzentrierte und motivierte Durchführung der Sitzungen. Das Vorbefüllen der HAZOP’s wird mitunter als nichtzielführend eingeschätzt („Scheuklappen“).
24. Als Mehrwerte (nebst der Erfüllung der Anforderungen der StörfallV) sehen die interviewten Betreiber mehrheitlich:
    a. konzerninterner Erfahrungsaustausch.
    b. Schärfung des Bewusstseins sämtlicher Beteiligter für mögliche Störfallszenarien und deren Ursachen mit entsprechender Außenwirkung jenseits der HAZOP-Sitzungen.
    c. Gerade bei Investitionsprojekten: Sicherstellung vor Realisierung, dass Sicherheitsstandards eingehalten werden.
    d. Erhöhung Anlagenverfügbarkeit und Qualität der Produkte
25. Inwiefern Synergien zu weiteren sicherheitsanalytischen Verfahren wie beispielsweise Risikobeurteilung nach Maschinenrichtlinie (MRL) gesehen bzw. realisiert werden, wird von den Betreibern unterschiedlich beantwortet:
    a. MRL: Keine Synergie, MRL hat die Arbeitssicherheit, nicht aber die Prozesssicherheit im Fokus.
    b. MRL: Synergieeffekte teilweise vorhanden: Mittels HAZOP-Studie kann die Risikobeurteilung nach MRL teilweise geprüft/hinterfragt werden.
    c. Integration der Analysen zum Thema Explosionsschutz in die Gefahrenanalyse.
    d. Synergieeffekte mit „benachbarten“ Instrumenten (z.B. Gefährdungsbeurteilung nach Gefahrstoffverordnung (GBU)) sind relativ beschränkt, da die GBU den bestimmungsmäßen und die HAZOP den nichtbestimmungsmäßen Betrieb im Fokus hat.

Verknüpfungen zur 9. und 12. BImSchV

26. Die Verfahren selbst werden während der Erörterungstermine nicht diskutiert, eher werden konkrete Ausbreitungsrechnungen diskutiert.
27. Von den Behörden werden probabilistische Aussagen für den Nachweis der Einhaltung von Betreiberpflichten als ergänzende Information akzeptiert. Das Umsetzen des Standes der Sicherheit hat oberste Priorität.
28. Die Kommunizierbarkeit probabilistischer Aussagen gegenüber der Öffentlichkeit (Einwendern) wird von der Mehrheit der Praxispartner als eher schwierig angesehen.

Nachfolgend werden Einzelaussagen der Praxispartner mit besonderer Bedeutung bzw. Aussagekraft aufgeführt.

5.1.3.2 Einzelaussagen der Betreiber und Behörden

Betreiber 1

29. Anwendung des Bow-Tie Verfahrens mit einem gesamtheitlichen Ansatz. Nebst StörfallV werden Gefahren bzw. Gefährdungen im Sinne der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV), der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV), etc. abgebildet. Die Barrieren sind dem jeweiligen Nachweis zugeordnet.
30. Weiterbildung: Es findet ein regelmäßiger, konzernübergreifender Austausch zum Thema Anlagensicherheit statt.
31. Den schwierigsten Teil von der Gefahrenanalyse bis zur Störfallrisikobewertung sieht der Betreiber in der Fragestellung „Was ist das akzeptable Risiko?“ (vgl. Diskussion KAS-18). Vorschläge, welche einen konstanten Abstand vorsehen, sieht der Betreiber kritisch.
32. Die Anwendung des HAZOP-Verfahrens allein kann die Störungsanfälligkeit nicht hinreichend senken. Entscheidende Verbesserungen werden erst mit weiteren Managementsystemen (u.a. Audits) realisiert.

Betreiber 2

33. Anwendung des Risikographen nach VDI 2180. Bei der Kalibrierung wird die DIN EN 61511 berücksichtigt, welche die Parameter („Aufenthaltsdauer“, …) konkretisiert.
34. Ein regelmäßiger Erfahrungsaustausch zwischen HAZOP-Anwendern (z.B. alle 2 Jahre) über Unternehmensgrenzen hinweg wäre ein wichtigstes Mittel bzw. wird als sinnvoll erachtet.

Betreiber 3

35. Der eigentlichen Gefahrenanalyse geht eine Vorbetrachtung voraus, welche prüft, ob für das Anlagenteil eine Prozessrisikoanalyse notwendig ist.
36. Interne Audits werden durch eine zentrale Stelle durchgeführt: Abfrage der Plausibilität der Ergebnisse (z.B. SIL-Festlegungen)
37. Ein regelmäßiger Austausch mit anderen Betreibern wird praktiziert (durch Mitgliedschaft VCI, Mitarbeit in diversen Ausschüssen)
38. Als zusätzliches Hilfsmittel für die Durchführung der Prozessrisikoanalyse wird ein Katalog mit Zuverlässigkeitskennwerten für Sicherheitseinrichtungen als sinnvoll erachtet

Betreiber 4

39. Gegenwärtig erfolgt die Erprobung/Entwicklung einer customisierten, kostenpflichtigen HAZOP-Software mit dem Software-Hersteller. Die Hauseigene Methodik soll dabei nicht deformiert werden. Mit der Anwendung der Software wird eine weitere Effizienzsteigerung beabsichtigt.

40. Das Einfehlertoleranzprinzip ist eine methodische Schwäche der HAZOP, wie die Ursachenanalysen eingetretener Ereignisse bereits gezeigt haben.
    Insbesondere das Thema "Unabhängigkeit" hat in der Vergangenheit Diskussionen verursacht („Sind zwei Ereignisse unabhängig oder korreliert/kausal verknüpft?“).
41. Bei ausgewählten speziellen Fragenstellungen kann eine ergänzende Anwendung probabilistischer Verfahren sinnvoll sein.
42. In der Masse werden eher deterministische (regelwerksbasierte) Anwendungen präferiert. Eine Kalibrierung der Regeln mit probabilistischen Überlegungen kann allerdings zielführend sein. An einer aktiven Teilnahme an solchen Unterfangen besteht seitens des Betreibers grundsätzliches Interesse (Beispiel Bauregelwerk: Für Anwender ist das ein deterministisches Regelwerk. Erstellung des Regelwerks basiert unter anderem auf probabilistischen Überlegungen)
43. Unerfahrene Teams wenden den Risikograph eher konservativ, die LOPA hingegen eher optimistisch an (Ursache: Gefahren werden in LOPA tendenziell eher unterschätzt aufgrund der gedachten Vorkehrungen/Maßnahmen). Erfahrende Teams hingegen kommen mit beiden Vorgehen zum gleichen Ergebnis.
44. Der Risikograph ist effizienter als LOPA (geringerer Zeitaufwand).
45. Der Risikograph kann bei komplexen Fragestellungen versagen („Grauschattierungen“ werden wegeblendet), in diesen Fällen ist die Anwendung der LOPA zielführend.
46. Geringe Abweichungen in den Analyseergebnissen (z.B. im Kontext 5-jährlicher Fortschreibungen) können Ausdruck echter Auseinandersetzungen bzw. des Mutes zur Korrektur sein und sollten entsprechend wertgeschätzt werden, um so den Prozess der stetigen Verbesserung zu fördern.
47. Inwiefern die Auswahl des angewendeten Verfahrens einen Einfluss auf die Störungsanfälligkeit hat, könnte selbst in einer breit angelegten statistischen Studie nicht valide beantwortet werden.

Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim

48. Systematische, ereignisbezogene Anpassung der Verfahren wird häufig als mangelhaft eingeschätzt
49. Schulungsangebote für spezielle Verfahren sind ungenügend. Es fehlen unter anderem konkrete Fortbildungsangebote für Betreiber (Wie schreibe ich einen Sicherheitsbericht?)
50. Es gibt allgemeine Schulungsangebote zu Managementsystemen, die nur teilweise hilfreich sind, da nicht sicherheitsspezifisch.
51. Schwierigkeiten der Betreiber bei der Anwendung der Verfahren/der Umsetzung der Anforderungen der StörfallV:
    Betriebliche und technische Gefahrenquellen können identifiziert werden;
    Umgebungsbedingte Gefahrenquellen und Eingriffe Unbefugter (Innentäter) sind schwerer zu identifizieren;
    Abbildung von Organisationsproblemen (Managementversagen, Wartungszustand) und menschliche Faktoren (Qualifikation…) kaum möglich;
    Sinnvolle Zusammenfassung zu Szenarien ist schwierig;
    Risikobewertung anhand von Eintrittswahrscheinlichkeiten ist schwierig;
    Ableitung von Störfallszenarien mit Festlegung notwendiger Maßnahmen kann problematisch sein
52. Weitere beobachtete Defizite:
    Methodenbeschreibung fehlt mitunter (insbesondere bei Biogasanlagen);
    Bestimmung sicherheitsrelevanter Anlagenteile aufgrund der Funktionen ist problematisch;
    Gewählte Methodik erfasst nicht alle Gefahrenquellen;

Risikobewertung und Maßnahmen werden unzulässig verknüpft;
Gefahrenquellen werden nicht genannt, weil Vorkehrungen und Maßnahmen vorhanden sind

53. Zusätzliche Hilfsmittel werden als hilfreich empfunden:
    Bessere Methodenbeschreibung durch Betreiber;
    Verfügbarkeit einer möglichst kostenlosen Datenbank zu Eintrittswahrscheinlichkeiten:
    Anwendungsleitfäden zu Verfahren;
    Spezielle Fortbildungsangebote insbesondere zur Erstellung eines Sicherheitsberichtes

Regierungspräsidium Darmstadt

54. Teilweise konzerninterne Vorgabe: Alle 10 Jahre Neuerstellung der HAZOP (um unreflektierte Fortschreibung bestehender Analysen zu verhindern)
55. In der Regel verlangt das Regierungspräsidium Darmstadt bei Änderungsgenehmigungen bzw. Neugenehmigungen ein Sachverständigengutachten zur Prüfung des Sicherheitsberichtes sowie eine Ausbreitungsrechnung gemäß KAS 18
56. Die Verfahren selbst werden bei eingetretenen Ereignissen nicht hinterfragt. Rückfluss aus Ereignissen zur Fortschreibung der Methodik der Risikoanalyse fehlt (Bei HAZOP sind Modifikationen der Leitworte von Bedeutung.)
57. HAZOP's werden standardmäßig mit Excel dokumentiert.
58. Externe Unterstützung der Betreiber: u.a. Sachverständige nach §29a BImSchG als Moderator/-in

Berufsgenossenschaft Rohstoffe und Chemische Industrie

59. Weitere Anbieter von Schulungen: es gibt verschiedene Institutionen, die Seminare zur Anlagensicherheit anbieten
60. Checklisten mit reinen ja/nein-Antworten sind nicht geeignet für Analysen im Rahmen der StörfallV
61. Häufig erfolgt eine Konkretisierung der Leitworte, um „Schwammigkeit" der 7 ursprünglichen Leitworte praxisnah abzubilden. Eine Vereinheitlichung der Leitwort-Kataloge sollte nicht angestrebt werden
62. Betreiber holen sich externe Unterstützung bei der Anwendung der Verfahren. Dies wird auch dringendst empfohlen, wenn eigene Erfahrungen fehlen. Auch ein 2-tägiger Kurs befähigt noch nicht zum qualitätsgerechten Arbeiten.
63. Qualitätssicherung: Teilweise prüfen Unternehmen potentielle Moderatoren (Arbeitsproben, …)
64. Teamleiter/Moderator/-innenausbildung steht nicht im Fokus der BG RCI-Schulung. Teamleiterausbildungen werden deutschlandweit dem Wissen des Praxispartners nach nicht angeboten.
    Es existieren jedoch diverse Plattformen zum Austausch.
    Fazit: Betreiber müssen Qualität der Teamleiter selbst sicherstellen. Anforderungen an Teamleiter sind nicht universell, sondern im Unternehmen abzustimmen (Moderieren vs. Fachkenntnis Anlagensicherheit)
65. Ausfallraten für MSR/PLT: NAMUR-Datenbank
66. Das Purple book-Verfahren in den Niederlanden wird nicht als Probabilistik angesehen, da keine Verteilungen betrachtet werden.
67. Weitere Hilfsmittel: DECHEMA /Process Net prüfen gegenwärtig die perspektivische Sinnhaftigkeit der Entwicklung von Typicals (Wie sieht beispielsweise eine klassischerweise abgesicherte Pumpe aus? Schwierigkeit: Konkrete Einsatzbedingungen, Pumpentyp)

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW

68. Bei LOPA positiv hervorzuheben ist, dass menschliche Faktoren positiv berücksichtigt werden können
69. Ereignishäufigkeitsdaten im Purple book sind für Chemieanlagen nicht geeignet (aufgrund des Alters der Daten (Technologische Weiterentwicklungen), der unterschiedlichen Anwendungsbereiche, konstruktive Unterschiede der Komponenten).
70. Die Betreiber haben keine generellen Probleme bei der Umsetzung der Anforderungen aus der StörfallV. Gelegentlich entstehen Probleme bei neuen Anforderungen (z.B. SMS, TRAS310/320, cyber-security). Lösung: Implementierung und Dokumentation im Sicherheitsbericht werden im iterativen Dialog von Betreibern und Behörden festgelegt.
71. Etablierte Verfahren: HAZOP, LOPA, zum Teil ROGA für Prozessanlagen. FMEA/Checklisten für Läger.
72. Beobachtete Mängel in den Sicherheitsberichten: Nachvollziehbarkeit in der Ermittlung der sicherheitsrelevanten Anlagenteile.
73. Analyseergebnisse: Unterschätzt werden Ereignisse, mit welchen noch keine persönlichen Erfahrungswerte gesammelt wurden.

5.1.4 Methodenauswahl und Anwendung für Gefahrenanalysen im Bereich der Störfall-Verordnung aus Sicht eines Sachverständigen

Systematische Gefahrenanalysen werden aus unterschiedlichen Anlässen, wie der Neuplanung von Anlagen, der Durchführung wesentlicher Änderungen oder als Werkzeug zur Ursachenfindung für aufgetretene Betriebsstörungen durchgeführt. Die Erfahrungen sowohl aus der Teilnahme an eben jenen bzw. deren Moderation, als auch im Zuge von sicherheitstechnischen Prüfungen nach § 29a BImSchG zeigen, dass die Auswahl der angewendeten Methoden und Verfahren von mehreren Einflüssen bestimmt wird.

So ist es üblich, dass z. B. Konzerne, die weltweit agieren, häufig eigene Methoden anwenden. Diese stellen zumeist speziellere Formen allgemein anerkannter Methoden wie HAZOP dar. Der Hauptgrund hierfür ist, dass man innerhalb solcher Wirtschaftseinheiten für gleichartige Anlagen an unterschiedlichen Standorten möglichst weitestgehend vergleichbare Ergebnisse erzielen möchte, um daraus standortunabhängig ein einheitliches Sicherheitsniveau ableiten zu können.

Andererseits bietet es sich für bestimmte Anlagenarten an, Methoden anzuwenden, die sich hierfür bewährt haben. Auch hier ist offenbar die Vergleichbarkeit der Ergebnisse bzw. das Erreichen eines möglichst gleichartigen Sicherheitsniveaus das angestrebte Ziel. Im Bereich der Chemie- und Mineralölindustrie werden häufig Modifikationen des HAZOP-Verfahrens angewendet, die dadurch gekennzeichnet sind, dass

- anlagenteilbezogen vorab eine Eingrenzung der Leitworte vorgenommen wird (z. B. kann „Füllstand“ nur „zu hoch“ oder „zu niedrig“ und nicht „anders als“ sein) und/oder
- in Abhängigkeit von der diskutierten Auswirkung zwingend eine (semi-)quantitative Betrachtung „nachgeschaltet“ wird.

Schließlich gibt es vor allem kleinere Betreiber, die sich für die Durchführung der Gefahrenanalyse externer Unterstützung bedienen (müssen), da sie hiermit nicht genügend Erfahrung haben. In diesen Fällen ist es meist Teil der Aufgabenstellung für den damit betrauten „Externen“, geeignete Methoden zu finden und auf ihre Eignung für den konkreten Anwendungsfall hin zu prüfen. Große Consulting-Unternehmen haben dazu eigene Verfahren

entwickelt und wenden diese an, z. B. die maßgeblich vom TÜV Rheinland entwickelte ROGA-Methode (Vgl. Block, Haferkamp, Mistele, Shahvardian (2006)). Zur ROGA-Methode siehe auch Kapitel 4.13)

Die von der KAS jährlich publizierte Auswertung der Erfahrungsberichte der Sachverständigen zeigt, dass die Anwendung systematischer Methoden zur Gefahrenanalyse bzw. deren Vollständigkeit (Mängelcode 5-01: „Unvollständige Analyse und Einstufung möglicher betrieblicher Gefahrenszenarien, Gefährdungsanalysen, Gefährdungsbeurteilungen“) seit 2017 von den Sachverständigen in rückläufigem Maße als „bedeutsame Mängel“ benannt wird. (Vgl. KAS-56 - Auswertung der Erf.-Berichte für das Jahr 2019). Der Schwerpunkt der Nennungen lag hier bei Chemie- und Abfallbehandlungsanlagen, während bei Ammoniakkälteanlagen und Lageranlagen (Tankläger) der Anteil an der festgestellten Gesamtzahl an Mängeln deutlich geringer war.

Soweit die Gefahrenanalyse als mangelhaft angesehen wurde, bezog sich dies überwiegend auf deren Betrachtungsumfang/Vollständigkeit sowie die Tatsache, dass eine Aktualisierung nicht innerhalb der durch § 9 (5) StörfallV vorgegebenen Frist von maximal fünf Jahren dokumentiert werden konnte.

5.2 Anwendbarkeit probabilistischer Verfahren

5.2.1 Aufgabenstellung

Die Anwendbarkeit probabilistischer Verfahren war im Kontext der Störfallrisikobeurteilung nach deutschem Störfallrecht zu erproben. Die Erprobung sollte in Zusammenarbeit mit Betreibern und Anlagenherstellern an zwei Anlagenarten mit je zwei Anlagen durchgeführt werden. Die Arbeitsergebnisse und Erkenntnisse waren mit den zuständigen Behördenmitarbeiter:innen des AISV zu diskutieren.

Mit der Erprobung sollten nach Möglichkeit folgende Forschungsfragen adressiert werden:

1. Inwiefern können die probabilistischen Verfahren die deterministischen Verfahren ergänzen?
2. Für welche Anwendungsfälle (z.B. Gefahrenanalyse, Raumplanung, Alarm- und Gefahrenabwehrplanung, Evaluierung von verschiedenen Design- und Instandhaltungsoptionen) sind probabilistische Verfahren geeignet?
3. Welche Mehrwerte lassen sich mit der Quantifizierung einzelner Risiken/Szenarien generieren?
4. Welche Mehrwerte lassen sich mit der Quantifizierung des Gesamtrisikos des Betriebsbereiches generieren?
5. Werden Mehrwerte durch grafische Darstellungen der Ursache-Wirkungsketten inkl. Darstellung der Vorkehrungen und Maßnahmen erzielt?
6. Inwiefern lassen sich praktische Überlegungen Störfallrisikobeurteilung mit dem jeweiligen probabilistischen Verfahren abbilden? (Die Fehlerbaumanalyse beispielsweise ist insofern beschränkt, als das sich mit ihr nur ein binärer Zustandsraum abbilden lässt)
7. Welche Datensammlungen zur Quantifizierung der unterschiedlichen Arten an Gefahrenquellen (betrieblich, umgebungsbedingt, Eingriffe Unbefugter) sind verfügbar?
8. Welcher Aufwand ist mit der Übertragung der Daten auf die konkret vorliegende Situation verbunden? Lassen sich die Daten ganz grundsätzlich übertragen?
9. Welche Aspekte lassen sich „gut“ quantifizieren, welche weniger gut? Mit welcher Ungenauigkeit im Berechnungsergebnis ist zu rechnen?

10. Welchen Anteil haben die einzelnen Gefahrenquellen (Hardwarefehler, menschliche Fehler in Betrieb und Instandhaltung, Externe Einflüsse durch Mensch und Natur) an der prognostizierten Eintrittswahrscheinlichkeit für das jeweilige Störfallszenario und was folgt daraus für die Anwendung und Detaillierungstiefe der Anwendung probabilistischer Verfahren?

5.2.2 Umsetzung

In gemeinsamer Abstimmung mit dem Umweltbundesamt (UBA) wurden als zu untersuchende Anlagenarten Biogasaufbereitungsanlagen (BGAA) sowie Luftzerlegungsanlagen (LZA) festgelegt. Es wurden zwei Betreiber von Biogasaufbereitungsanlagen, sowie ein Betreiber von Luftzerlegungsanlagen akquiriert, mit welchem zwei unterschiedliche Anlagen und somit insgesamt vier Anlagen betrachtet worden sind.

Die Betreiber haben unter der Prämisse der Wahrung der Anonymität an den Untersuchungen teilgenommen.

In gemeinsamer Abstimmung mit dem UBA wurde das grundsätzliche Vorgehen bei der Erprobung festgelegt:

- Erprobung der Probabilistik anhand der Verfahren Fehlerbaum- und Ereignisbaumanalyse (FTA und ETA) mit folgender Begründung: Die Verfahren FTA und ETA werden vom schweizerischen Bundesamt für Umwelt (BAFU) als Basismethoden der probabilistischen Analyse angesehen. Auch die QRA-Verfahren in den Niederlanden und Flandern, sowie das ARAMIS-Verfahren integrieren FTA- und ETA-Techniken in ihre Verfahren in unterschiedlich starkem Ausmaß.
- Modellierung ausgewählter Szenarien. Darstellung der Ursache-Wirkungszusammenhänge von den Gefahrenquellen bis hin zu den Auswirkungen ohne/mit Maßnahmen.
- Möglichst Betrachtung sämtlicher Arten von Gefahrenquellen (betrieblich, umgebungsbedingt, Eingriffe Unbefugter).
- Quantifizierung der Eintrittshäufigkeiten der Gefahrenquellen und Zuverlässigkeiten eventueller Vorkehrungen und Maßnahmen. Dazu Recherche verfügbarer Datensammlungen und ggf. vorläufige Auswertung der Anwendbarkeit dieser Datensammlungen.

Die Zusammenarbeit mit den Betreibern gestaltete sich grundsätzlich wie folgt:

- Evaluierung der aktuellen Anwendungspraxis der Störfallrisikobeurteilung des Betreibers
- Auswahl im Rahmen des Projektes zu untersuchender Teilanlagen bzw. zu untersuchenden Störfallszenarien.
- Bereitstellung von Unterlagen (Dokumente des Sicherheitsmanagementsystem, Dokumentierte Gefahrenanalysen, Rohrleitungs- und Fließschemata, Datenblätter)
- Gemeinsame Erarbeitung von Fehler- und Ereignisbäumen zu den festgelegten Störfallszenarien (ca. 4 Meetings à 1 Stunde je Betreiber und Anlage).
- Je entwickeltem Szenario: Quantifizierung Eintrittshäufigkeiten der identifizierten Gefahrenquellen sowie der Zuverlässigkeiten der identifizierten Vorkehrungen und Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos. Dazu Bereitstellung von Datenblättern mit Zuverlässigkeitskennwerten sowie ergänzenden Abschätzungen durch den Betreiber,

Recherche weiterer Informationsquellen durch die Forschungsnehmenden. Abgleich und Auswertung der Datenlage. Anschließende Berechnung des mit dem Szenario verbundenen Restrisikos.

- Abschließende Bewertung des Vorgehens.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen dargestellt.

5.2.3 Ergebnisse

5.2.3.1 Betreiber 5 (Biogasaufbereitungsanlage, Membrantrennverfahren)

Auf Vorschlag des Betreibers wird zur Begrenzung des Betrachtungsumfanges auf Gefahrensituationen im Zusammenhang mit der Gefahrenquelle „Überdruck“ abgestellt.

Das Membranverfahren zur Biogasaufbereitung besteht grundsätzlich aus einem Druckerzeuger und kaskadierten Filtern.

Vor den Filtern wird Taupunkt und Temperatur des Gases mittels eines Kühlers und eines Erwärmers eingestellt.

Dabei handelt es sich um eine Baugruppe nach EG-Druckgeräterichtlinie mit einem höchsten zulässigen Betriebsdruck von 12 bar g (Absicherung mittels Sicherheitsventiles).

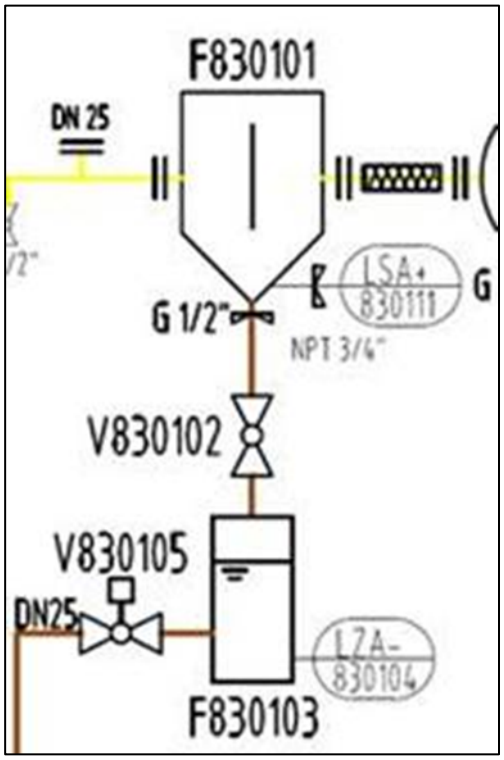
Im Rahmen der Praxisuntersuchungen sind folgende Situationen exemplarisch untersucht worden:

1. Situation no. 1 – Ausschleusung von kondensiertem Wasser hinter dem Kühler in einen Kondensatsammelbehälter
2. Situation no. 2 – Ausschleusung eines gasförmigen Zwischenproduktes (ca. 20 Vol.-% CH_4, Rest CO_2) zur Verbrennung in einer Verbrennungsmotorenanlage (BHKW) (Retentat 3)

5.2.3.1.1 Situation no. 1 – Ausschleusung von kondensiertem Wasser hinter dem Kühler in einen Kondensatsammelbehälter

Die folgende Abbildung stellt die Ausschleusung von kondensiertem Wasser hinter dem Kühler in einen Kondensatsammelbehälter schematisch dar.

Abbildung 26: Schematische Darstellung Ausschleusung Kondensat



Quelle: Betreiber

- Das Kondensat wird in einem PN16 Sammelbehälter (F830103) gesammelt, bis ein Füllstandswächter (LSA+830111) den Ausschleusungsvorgang initiiert.
- Die Ausschleusung erfolgt, indem eine Armatur (V830105) geöffnet wird und ausschließlich Flüssigkeit in eine Freispiegelleitung (DN 25 (braun) hinter V830105) abgibt.
- V830102: Handabsperrarmatur für Wartungszwecke.
- Der Füllstandswächter LSA+830111 stellt die positive Flanke der speicherprogrammierbaren Steuerung dar. Löst diese aus, öffnet V830105 für X Sekunden.
- Der Füllstandswächter LZA- 830104 dient nicht dem Normalbetrieb. Er erfüllt die Anforderung der Sicherheitsfunktion.
- Ein fehlerhaftes Leerfallen der Flüssigkeitsvorlage wird also durch einen weiteren Füllstandswächter (LZA-830104) überwacht.
- Ein Ansprechen dieses Füllstandswächters führt ebenfalls zum Verschließen der Armatur V830105 und zum Entspannen der gesamten Baugruppe.
  - Abfallende Flanke des Signals am LZA- führt zur Anforderung der Sicherheitsfunktion
  - Gasdruck verdrängt die Flüssigkeit in die Freispiegelleitung
- Die Gefahrensituation ist, dass brennbares Gas in einen Rohrleitungsabschnitt gelangt, der für diesen Druck nicht ausgelegt ist (ab Rohrleitungsabschnitt „nach“ V830105).

- Die Freisetzung brennbarer Gase kann bei Versagen der drucktragenden Wandungen zur Bildung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre führen.
- Es besteht keine Möglichkeit, dass das Betriebspersonal eingreifen kann, bevor der zulässige Höchstdruck überschritten wird und das Gas entsprechend freigesetzt wird.
- Eine Zündung der gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre führt zur Explosion, die einen Menschen tödlich verletzten kann (Störfall).

Mögliche, tieferliegende Ursachen wurden gemeinsam mit dem Praxispartner diskutiert. Grundlage bildeten dabei die vom Praxispartner bereitgestellten Informationen, sowie die TRAS 120 – Biogasanlagen, welche u.a. Hinweise zur Analyse der Gefahrenquellen gibt.

Insbesondere wurden mögliche Defektursachen für die Armatur V830105 diskutiert. Das Nichtschließen des Kugelhahns aufgrund einer Verstopfung wird als eher unwahrscheinliche Ursache angesehen. Als wahrscheinlicher wird hingegen das mechanische Versagen des Magnetventils angesehen, infolgedessen der pneumatische Schließvorgang nicht mehr verfügbar wäre. Dem wird jedoch durch einen regelmäßigen Tausch des Ventils vorgebeugt. Der Tauschzeitpunkt berücksichtigt dabei die vom Hersteller angegebene Ausfallhäufigkeit.

Eine Beschädigung von Teilen der Biogasaufbereitungsanlage (BGAA) durch Fahrzeuge wird aufgrund der Platzierung der BGAA'en generell ausgeschlossen. Weitere umgebungsbedingte Gefahrenquellen – weder technische noch natürliche – sind aus Sicht des Praxispartners für die entwickelten Szenarien, bzw. für die Auslegung der oben genannten Sicherheitsfunktionen nicht relevant.

Unbefugte Eingriffe sind grundsätzlich denkbar. Dies betrifft beispielsweise die Speicherprogrammierte Steuerung: So kann die Manipulation der LSA-Funktion nicht vollständig ausgeschlossen werden (Vorort- oder Onlineangriff). Die LZA-Funktion hingegen ist nicht aus der Ferne manipulierbar.

Die Auswertung der ZEMA-Datenbank (Filter „Anlagenart=Anlagenart 1") lieferte keine weiteren nennenswerten Erkenntnisse hinsichtlich zu berücksichtigender Gefahrenquellen.

Erkannt wird das Freisetzen des Gases über einen Druckverlust in der Hauptproduktionsleitung (Erkennung nach <15 Minuten). Das Erkennen führt zum selbständigen Abfahren der Anlage. Eine Abfrage der Position des defekten Magnetventils würde wesentlich früher zu einer Erkennung führen.

Weitere Maßnahmen zur Risikoreduzierung wie beispielsweise eine Gaswarnanlage sind nicht gegeben. (Die Rohrleitung verläuft unterirdisch und endet in einem Sammelschacht, der im Freien ist. In dem Sammelschacht ist keine GWA).

Toxische Wirkungen sind nicht zu berücksichtigen (ausschließlich Methan, CO_2; CO_2 ist kein Stoff nach StörfallV). Brände in Folge einer Explosion sind denkbar.

Auf dem Betriebsgelände befinden sich typischerweise zwischen 0 und 6 Personen. Die Verletzung einer dieser Personen im Falle einer Explosion wäre eher zufällig (Wartung, Inspektionsrundgang). Die Verletzung von Anwohnern kann aufgrund der im Rahmen des Szenarios anzunehmenden freigesetzten Stoffmenge (Stoffstrom mehrere 100m^3/h für ca. 15 Minuten) ausgeschlossen werden.

Zur Quantifizierung der Ausfallraten der unerwünschten Ereignisse wurden verschiedene Datensammlungen und Quellen herangezogen und verglichen, u.a.

- NRPD 95 (Nonelectronic Parts Reliability Data),
- MIL-HDBK-217F (Military Handbook: Reliability prediction of electronic equipment),
- FIDES 2009 (lat. "Vertrauen"): Zuverlässigkeitsabschätzungen für elektronische Komponenten und Systeme. Französisches Pendant des MIL-HDBK.
- Datenblätter des Betreibers.

Die folgende Abbildung stellt eine Übersicht über die zusammengetragenen Angaben bereit. Die Eintrittshäufigkeiten für die unerwünschten Ereignisse bzw. Zustände sind als FIT-Werte (FIT = Failure in Time = Eintrittshäufigkeit in 109 Stunden), die Zuverlässigkeit der Barrieren als PFD-Werte (Probability of dangerous failure on demand) angegeben:

Tabelle 31: Ausfallraten der unerwünschten Ereignisse

Ereignis	FIT / PFD[34]	Herkunft Angabe
Kugelhahn ungewollt offen	117 FIT	NPRD-95 "Ball Valve Not Closed"
Kugelhahn ungewollt offen	80,75 FIT	Gegenvorschlag des Betreibers (Datenblatt: dangerous failure rate = 5,65; safe failure rate = 75,10 FIT. Werte gelten unter der Annahme, dass alle 5 Jahre präventiv getauscht wird)
Defektes Magnetventil	11106 FIT	NPRD-95: Solenoid Operator Valve
Defektes Magnetventil	7,76 FIT	Gegenvorschlag des Betreibers (Datenblatt: dangerous failure rate = 0,78; safe failure rate = 6,98 FIT. Werte gelten für Temperaturbereich -40°C bis 40°C. Ausfallraten für höhere Temperaturbereich geringer. Werte gelten unter Annahme, dass alle 6 Jahre präventiv getauscht wird)
Fehlerhafte LSA	4897 FIT	MIL-217F-2, Part Stress: Liquid Level Switch
Fehlerhafte LSA	4715 FIT	NPRD-95: Liquid Level Switch
Fehlerhafte LSA	319 FIT	Gegenvorschlag des Betreibers (Datenblatt: MTBF = 3,13*10^6 Stunden für LZA)
Fehlerhafte LSA/LZA	0,0003 PFD	Gemäß Datenblatt bei jährlicher Funktionsprüfung
Fehlerhafte Steuerungslogik	5 FIT	FIDES-2009: Ausführung komplett unbekannt, daher folgende Annahme: Ausführung als ASIC (application-specific integrated circuit), TTL (Transistor-Transistor-Logic), simple function
Fehlerhafte Steuerungslogik	n/a	Gegenvorschlag des Betreibers

[34] FIT = Failure in Time = Anzahl erwarteter Fehler in 10^9 Stunden. PFD=Probability of Failure on Demand= Versagenswahrscheinlichkeit im Anforderungsfall

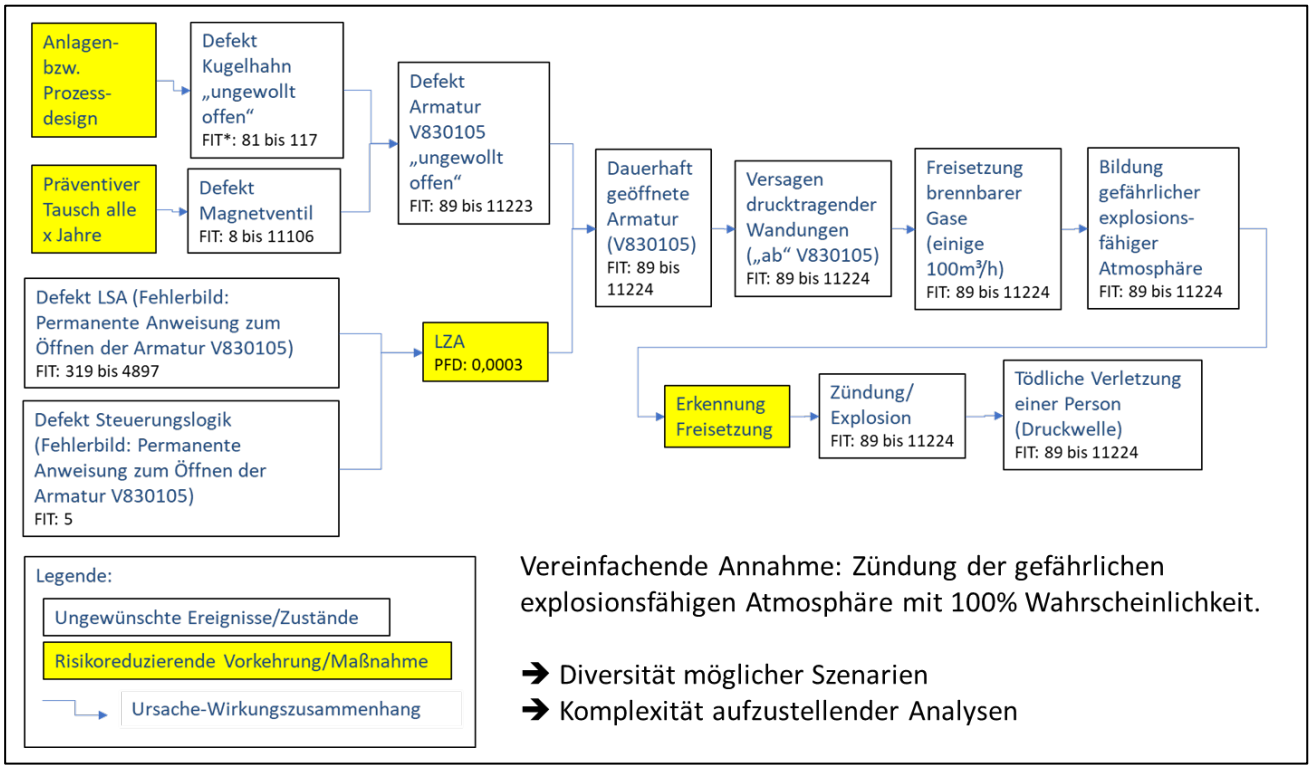
Zwischen den Datenquellen gibt es zum Teil erhebliche Unterschiede in den jeweils ausgewiesenen Eintrittshäufigkeiten. Insbesondere lässt sich feststellen, dass die in den Datenblättern des Betreibers ausgewiesenen Ausfallraten signifikant geringer sind, als die in den Datensammlungen recherchierten Ausfallraten. Als eine mögliche Ursache könnte in Betracht kommen, dass in den o.g. Datensammlungen größere Bandbreiten an Komponenten, sowie an Betriebs- und Einsatzbedingungen abgebildet werden. Wichtiges Auswahlkriterium des Betreibers bei der Wahl der Komponenten ist hingegen eine möglichst hohe Zuverlässigkeit. Grundsätzlich sollte daher davon ausgegangen werden können, dass die von den Lieferanten bereitgestellten Datenblätter genauere Abschätzungen liefern, als die o.g. Datensammlungen.

Die folgende Abbildung stellt das entwickelte Szenario dar. Abgebildet sind neben den qualitativen Ursache-Wirkungszusammenhängen die Eintrittshäufigkeiten für die jeweiligen Ereignisse und Zustände.

Textboxen auf weißem Hintergrund stellen dabei die unerwünschten Ereignisse bzw. Zustände, Textboxen auf gelbem Hintergrund risikoreduzierende Vorkehrungen und Maßnahmen („Barrieren“) dar. Die die Textboxen verbindenden Pfeile stellen die Ursache-Wirkungsbeziehen dar. Diese Form der Darstellung orientiert sich am ARAMIS-Verfahren.

Die angegebenen FIT-Werte entsprechen den minimalen und maximalen recherchierten Werten.

Abbildung 27: Betreiber 5 – Fehler- und Ereignisbaum Gefahrensituation no. 1



Quelle: eigene Darstellung, IZP Dresden

Annahmen:

- Erkennung Defekt Armatur via Druckverlust in Hauptproduktionsleitung nach voraussichtlich 15 Minuten.

Erkennung Defekt LSA nach ca. 1 Minute via Steuerungslogik oder alternativ über die LZA.
Erkennung Defekt Steuerungslogik nach ca. 1 Minute via Routineprüfung

- Konservative Annahme: Zündung mit 100% Wahrscheinlichkeit. Grundlage für andere Argumentationen wäre aus der Sicht des Betreibers schwierig bzw. zeitaufwändig:
  a) individuelle Beurteilung je Standort, z.B. Berücksichtigung des Rohrleitungsverlaufes.
  b) Die Detektionszeiten für die fehlerhafte LSA resp. Steuerungslogik sind mit 1 Minute wesentlich kürzer als die 15 Minuten im Falle des Defektes der Armatur V830105. Eine kürzere Freisetzungsdauer wäre zu erwarten. Die Explosionswahrscheinlichkeit würde sich in diesem Falle entsprechend reduzieren.
  c) Es besteht die Möglichkeit, dass die Leckage relativ klein ist, sich weiterhin eine gefährliche
  explosionsfähige Atmosphäre bildet, dabei aber kein ausreichender Druckverlust entsteht und somit die Freisetzung nicht innerhalb von 15 Minuten erkannt wird. In direkter Folge ist mit einer länger andauernden Gefahrensituation zu rechnen. Die Wahrscheinlichkeit einer Zündung/Explosion erhöht sich entsprechend.

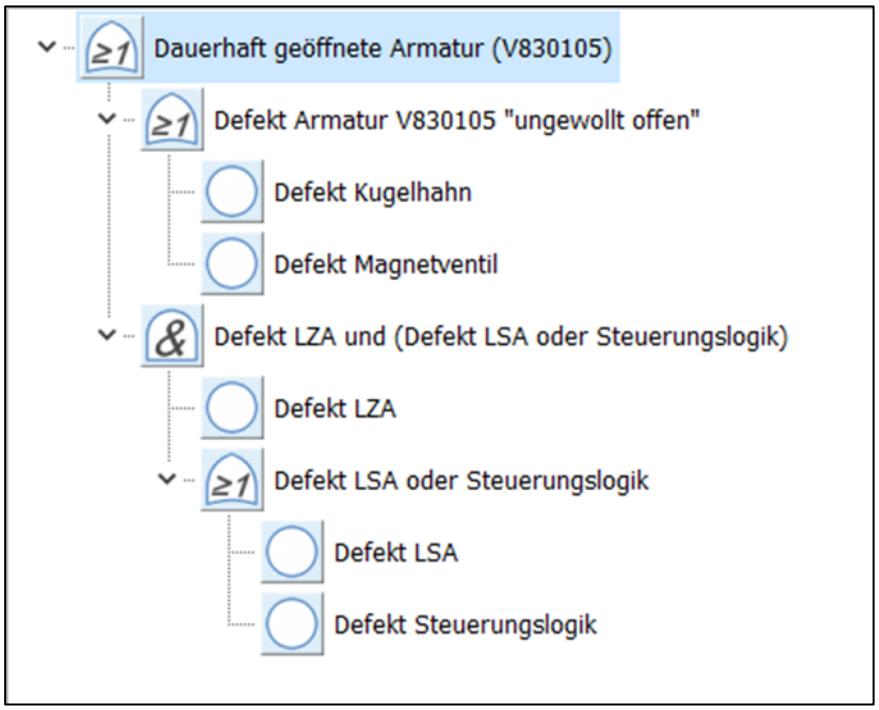
- Konservative Annahme: Max. 1 Person auf dem Betriebsgelände betroffen. Verletzungen von Anwohner können bei den geringen freigesetzten Mengen aufgrund der Abstände ausgeschlossen werden

Den berechneten Werten liegen folgende Formeln zu Grunde:

1. FIT „Defekt Armatur“ = FIT „Defekt Kugelhahn ungewollt offen“ + FIT „Defekt Magnetventil“. Dies entspricht dem logischen ODER-Gatter im Fehlerbaum
2. FIT „Dauerhaft geöffnete Armatur (V830105)“ =
   FIT „Defekt Armatur“ +
   (FIT „Defekt LSA“ + FIT „Defekt „Steuerungslogik“) * PFD „LZA“.
   Die LZA einerseits und die LZA zusammen mit der Steuerungslogik andererseits stellen somit Parallelsystem dar, dies entspricht dem logischen UND-Gatter im Fehlerbaum.
3. FIT-Wert „Dauerhaft geöffnete Armatur (V830105)“ wird für weitere Folgen in der Kausalkette 1-zu-1 übernommen, da keine weiteren Risikoreduzierenden Barrieren angenommen wurden.

In der klassischen Fehlerbaumdarstellung würde sich der Sachverhalt somit wie folgt präsentieren:

Abbildung 28: Betreiber 5 – Fehler- und Ereignisbaum Gefahrensituation no. 1 (alternative Darstellung mittels logischer Gatter)

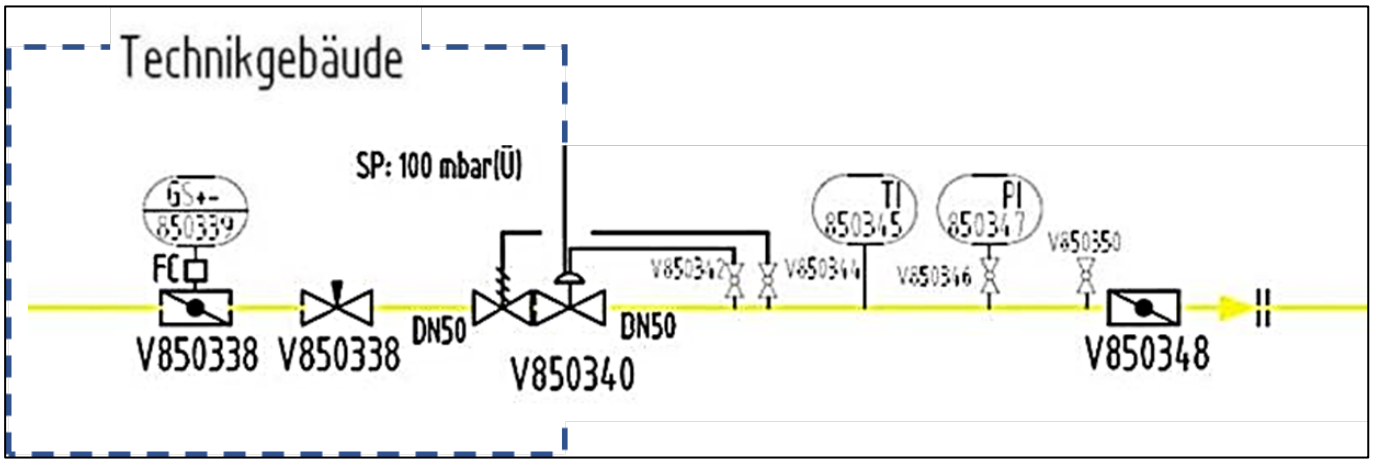


Quelle: Darstellung mittels FTA-Software „RAMS-Office“ der Firma IZP Dresden

5.2.3.1.2 Situation no. 2 – Ausschleusung eines gasförmigen Zwischenproduktes (ca. 20 Vol.-% CH_4, Rest CO_2) zur Verbrennung in einer Verbrennungsmotorenanlage (BHKW) (Retentat 3)

Die folgende Abbildung stellt die Ausschleusung eines gasförmigen Zwischenproduktes (ca. 20 Vol-% CH_4, Rest CO_2) zur Verbrennung in einer Verbrennungsmotorenanlage (BHKW) (Retentat 3) schematisch dar.

Abbildung 29: Schematische Darstellung Ausschleusung Zwischenprodukt



Quelle: Betreiber

- Ein Zwischenprodukt (ca. 20 Vol.-% CH_4, Rest CO_2) wird zur Effizienzsteigerung nicht erneut der Aufbereitung zugeführt, sondern in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) thermisch verwertet.

- Das Zwischenprodukt wird dazu der Gasregelstrecke eines Blockheizkraftwerkes zugeführt. Rohrleitung und Gasregelstrecke haben einen zulässigen Betriebsdruck von <0,5 bar g.
- An der Schnittstelle erfolgt die Druckreduzierung mittels Gasdruckregler V850340 auf max. 100 mbar g.
- Der Gasdruckregler verfügt über ein Sicherheitsabsperrventil (SAV – V850340 eine Baugruppe mit Druckregler), welches bei Durchschlagen des Reglers den Gasstrom unterbricht.
- Die Gefahrensituation ist, dass brennbares Gas in einen Rohrleitungsabschnitt gelangt, der für diesen Druck nicht ausgelegt ist.
- Die Freisetzung brennbarer Gase kann bei Versagen der drucktragenden Wandungen zur Bildung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre führen.
- Es besteht keine Möglichkeit, dass das Betriebspersonal eingreifen kann, bevor der zulässige Höchstdruck überschritten wird und das Gas entsprechend freigesetzt wird.
- Eine Zündung führt zur Explosion, die einen Menschen tödlich verletzen kann (Störfall).
- V850338: Im Normalbetrieb offen und ohne Druckminderungsfunktion. Automatische Schließung bei Not-Aus, Gasalarm oder wenn die Gasabnahme aus anderen Gründen nicht frei gegeben wurde. Das Ventil wird weder aufgrund von Temperatur- noch von Druckmessungen (TI-850345 und PI-850347) gesteuert. Das Ventil stellt keine Sicherheitsfunktion zur Verhinderung unzulässiger Überdrücke dar.
- V850342 und -344: Im Normalbetrieb offen. Ermöglichen Druckregelung, bzw. Auslösen des Sicherheitsabsperrventils V850340 bei unzulässigem Überdruck.
- V850348: Ungeregelt, verhindert Rückfluss.
- Das Sicherheitsabsperrventil kann im Gegensatz zur Absperrklappe (V850338) ohne nennenswerte zeitliche Verzögerung den Gasfluss stoppen.
- V850346: Im Normalbetrieb offen. Wird im Falle eines Tausches des Fühlers benötigt.
- V850350: Dient der Entlüftung.

Bei der Untersuchung wurden primär betrieblich/technische Gefahrenquellen betrachtet und vor allem quantifiziert. Umgebungsbedingte Gefahrenquellen und Eingriffe Unbefugter konnten aus zeitlichen Beschränkungen nur knapp andiskutiert werden.

Die folgende Abbildung stellt eine Übersicht über die ermittelten Ausfallhäufigkeiten bereit:

Tabelle 32: Ausfallraten der unerwünschten Ereignisse

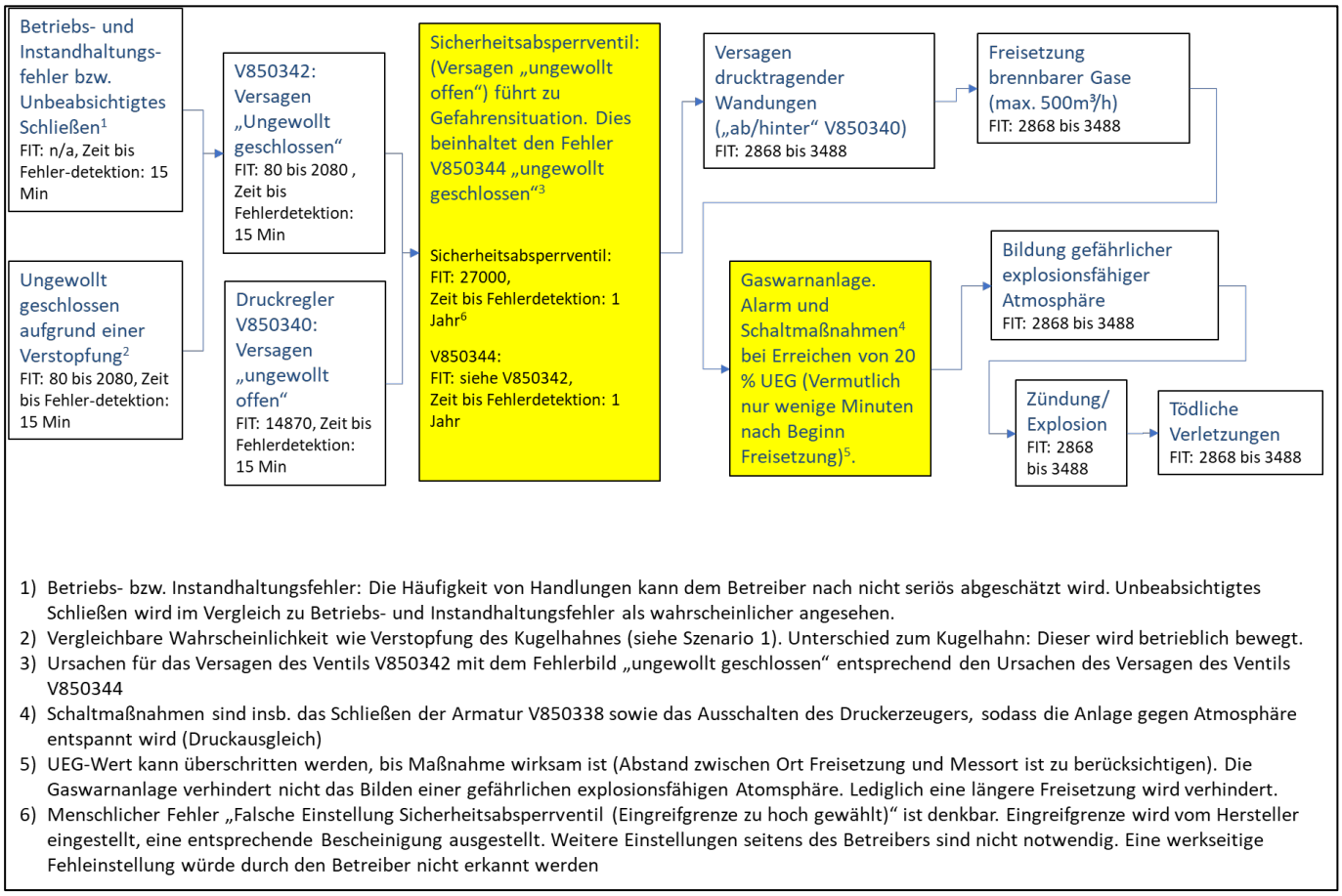
Ereignis	FIT / PFD[35]	Herkunft Angabe
Druckregler V850340: Versagen „ungewollt offen“	14870	OREDA 2009: Valve, Failure Modes “Fail to close on comand

[35] FIT = Failure in Time = Anzahl erwarteter Fehler in 10^9 Stunden. PFD=Probability of Failure on Demand= Versagenswahrscheinlichkeit im Anforderungsfall

Ereignis	FIT / PFD[35]	Herkunft Angabe
Druckregler V850340: Versagen „ungewollt offen“	n/a	Gegenvorschlag des Betreibers
Sicherheitsabsperrventil	27000	OREDA 2009: Valve, shut-off valve, all Failure Modes mit 27 Ausfällen je 10^6 Stunden
Sicherheitsabsperrventil	n/a	Gegenvorschlag des Betreibers

Die folgende Abbildung stellt das entwickelte Szenario grafisch dar:

Abbildung 30: Betreiber 5 – Fehler- und Ereignisbaum Gefahrensituation no. 2



1) Betriebs- bzw. Instandhaltungsfehler: Die Häufigkeit von Handlungen kann dem Betreiber nach nicht seriös abgeschätzt wird. Unbeabsichtigtes Schließen wird im Vergleich zu Betriebs- und Instandhaltungsfehler als wahrscheinlicher angesehen.
2) Vergleichbare Wahrscheinlichkeit wie Verstopfung des Kugelhahnes (siehe Szenario 1). Unterschied zum Kugelhahn: Dieser wird betrieblich bewegt.
3) Ursachen für das Versagen des Ventils V850342 mit dem Fehlerbild „ungewollt geschlossen“ entsprechend den Ursachen des Versagen des Ventils V850344
4) Schaltmaßnahmen sind insb. das Schließen der Armatur V850338 sowie das Ausschalten des Druckerzeugers, sodass die Anlage gegen Atmosphäre entspannt wird (Druckausgleich)
5) UEG-Wert kann überschritten werden, bis Maßnahme wirksam ist (Abstand zwischen Ort Freisetzung und Messort ist zu berücksichtigen). Die Gaswarnanlage verhindert nicht das Bilden einer gefährlichen explosionsfähigen Atomsphäre. Lediglich eine längere Freisetzung wird verhindert.
6) Menschlicher Fehler „Falsche Einstellung Sicherheitsabsperrventil (Eingreifgrenze zu hoch gewählt)“ ist denkbar. Eingreifgrenze wird vom Hersteller eingestellt, eine entsprechende Bescheinigung ausgestellt. Weitere Einstellungen seitens des Betreibers sind nicht notwendig. Eine werkseitige Fehleinstellung würde durch den Betreiber nicht erkannt werden

Quelle: eigene Darstellung, IZP Dresden

Die Berechnung der Eintrittshäufigkeit für das Ereignis „Versagen drucktragender Wandungen („ab/hinter“ V850340)“ erfolgte mithilfe eines Fehlerbaumsoftwaretools (RAMS Office NG der Firma IZP Dresden mbH) sowie der vorab ermittelten Eintrittshäufigkeiten für die Basisereignisse.

5.2.3.1.3 Fazit des Betreibers

Die Kombination aus FTA und ETA erscheint zu unflexibel und benötigt einen sehr hohen Aufwand an die Ausbildung beteiligter Entscheidungsträger und Experten, sowie bei der Recherchearbeit. Daher erscheint die Anwendung als Ergänzung zur HAZOP nur bei „Serienproblemen“ sinnvoll. Also bei Anwendungsfällen, die sehr häufig wiederkehrend auftreten. Dies ist bei Biogasanlagen eher seltener der Fall.
Die grafische Darstellung der Ursache-Wirkungsketten ermöglicht ein schnelleres Erkennen der Zusammenhänge.
Aufgrund des Aufwands an Recherche und Berechnung erscheinen praktische Überlegungen im Sinne von Abwägungen von Alternativen nicht effizient.
Aus Sicht des Betreibers stehen keine Datensammlungen zur Quantifizierung zur Verfügung. Ereignisse und Beinaheereignisse sind viel zu selten, als dass eine verlässliche Quantifizierung erfolgen kann.
Erfahrungsgemäß müssen vom Betreiber Genehmigungsbehörden und Sachverständige von der Richtigkeit der Beurteilung des Betreibers überzeugt werden. Hierfür sind einfach nachvollziehbare und belastbare Quellen notwendig. Diese scheinen nicht verfügbar zu sein.
Für Planungen erscheinen die Analysen nicht geeignet. Nicht beteiligte dritte aus Behörden werden die anspruchsvolle Methode nicht nachvollziehen können.
Die Analyse kann insbesondere zum Vergleich verschiedener Designoptionen herangezogen werden, wenn ein Zweifelsfall eintritt.

5.2.3.2 Betreiber 6 (Biogasaufbereitungsanlage, Druckwasserwäsche)

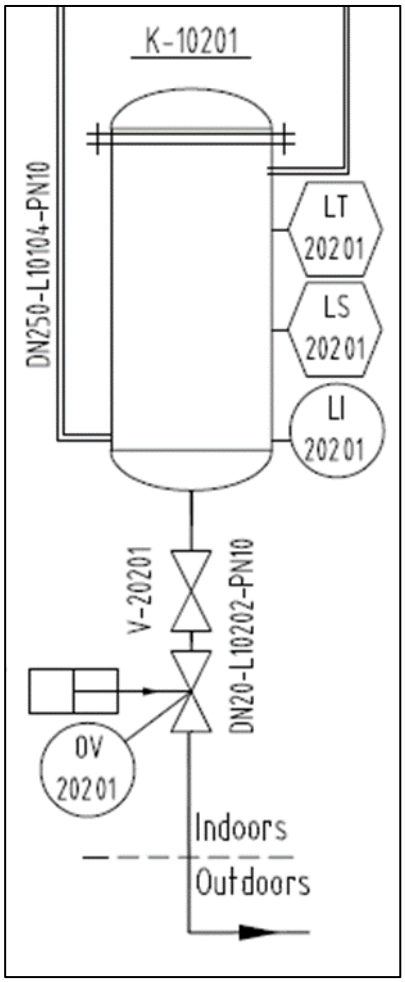
Das Biogas wird mittels Druckwasserwäsche aufbereitet.
Die Anreicherung des Methans erfolgt dabei unter Druckbeaufschlagung im Gegenstrom Biogas/Waschwasser.

Betrachtet wurde die folgende Gefahrensituation: Freisetzung von Biogas aufgrund eines fehlerhaften Regelventils zur Ausschleusung von Kondensat. Bildung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphären in den Betriebsräumen und im Freien.

Beschreibung des technischen Aufbaus

Die folgende Abbildung stellt die Ausschleusung von kondensiertem Wasser einen Kondensatsammelbehälter schematisch dar:

Abbildung 31: Schematische Darstellung Ausschleusung Kondensat



Quelle: Betreiber

Am Kondensatabscheider K-10201 wird betriebsbedingt anfallendes Kondenswasser aus den gasführenden Anlagenteilen ins Freie abgeschieden. Bei Erreichen eines festgelegten Niveaus wird das Regelventil OV20201 für eine kurze Zeit x geöffnet, um angesammeltes Kondensat einem Kondensatschacht (nicht eingezeichnet) zuzuführen. Wenn im Kondensatschacht ein festgelegter Füllstand erreicht ist, wird das Kondensat in ein Vorlagebehälter abgepumpt.

Der Kondensatabscheider ist mit den folgenden Armaturen ausgerüstet:

- LI 20201: Niveauindikator mit Bypass Indikation. Ermöglicht das manuelle Ablesen des Füllstandes
- LT 20201: Niveaufühler bzw. Niveautransmitter. Abbildung des Füllstandes als elektr. Stromstärke
- LS 20201: Niveauschalter. Schaltung bei definierten Füllstand
- V 20201: Wartungsventil: Standardmäßig offen.
- OV 20201: Regelventil, bestehend aus Kugelhahnventil, pneumatischem Aktuator und Magnetventil

Das Ventil OV 20201 wird planmäßig geöffnet, wenn der Niveaufühler LT 20201 das Erreichen eines festgelegten Niveaus signalisiert und die Steuerungslogik entsprechend das Öffnen initiiert. Das OV20201 öffnet relativ häufig (stündlich bis täglich).

Mittels Niveauindikator LI 20201 wird durch das Bedienpersonal regelmäßig geprüft, dass die durch den Niveaufühler LT 20201 übermittelten Werte korrekt sind.

Im Falle eines Fehlers von LT 20201 oder der Steuerungslogik dient der Niveauschalter LS 20201 als Rückfallebene. Bei Unterschreitung eines festgelegten Füllstandes im Kondensatabscheider wird das Ventil OV 20201 geschlossen.

Die gesamte Einrichtung zur Sicherstellung des Kondensat-Mindestfüllstandes K-10201 besteht aus dem Ventil OV 20201, der Füllstandmesssonde LS 20201 sowie der zugehörigen Steuerung und genügt SIL 2 (Safety Integrity Level). Die Steuerwege (Messeinheiten LT 20201 und LS 20201) sind separat aufgebaut und funktionieren unabhängig voneinander.

Um ein Einfrieren des Kondensates zu verhindern, sind die zugehörigen Apparaturen innerhalb des Betriebsraumes angeordnet.

Beschreibung der Gefahrensituation

Aufgrund des prozessbedingten Überdrucks in den gasführenden Anlagenteilen würde im Falle eines dauerhaft geöffneten Ventiles OV-20201 nicht nur sämtliches Kondensat im Kondensatabscheider in den Kondensatschacht abgeführt werden, sondern das Biogas würde sich in entsprechende Bereiche ausbreiten. Denkbar sind zwei alternative Folgen:

1. Versagen drucktragender Wandungen (Rohrung zur Abscheidung des Kondensates weist eine geringere Druckbeständigkeit auf) und Freisetzung des Biogases im Betriebsraum
2. Das Biogas gelangt in den Kondensatschacht und/oder tritt über diesen ins Freie aus.

Aufgrund der relativ geringen Wassersäule im Kondensatschacht wird vom Betreiber Folge 2 als wahrscheinlichere Folge angesehen.

Die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre (geA) bildet, wird vom Betreiber aufgrund diverser Vorkehrungen und Maßnahmen bei beiden Folgen unter 1% angesehen. Diese sind:

- Alarmierung (LS bzw. LT 20201 melden „Low-Low“) mit Betriebsstop
- Gasüberwachung im Betriebsraum: Bei 20% UEG schaltet techn. Lüftung an, bei 40% UEG schaltet sich die komplette Anlage stromlos.

Die Bildung einer geA im Freien hängt von Luft- und Windverhältnissen, sowie von der Menge des ausgetretenen Gases ab.

Potentielle Zündquellen sind im Rahmen der Erarbeitung eines Explosionsschutzkonzeptes analysiert und behandelt worden. Entsprechende Vorkehrungen und Maßnahmen sind getroffen, sowie Ex-Zonen ausgewiesen worden. Dennoch kann eine Zündung nicht mit 100%iger Sicherheit ausgeschlossen werden. Aus Sicht des Betreibers wird im Falle einer geA eine Zündwahrscheinlichkeit von 1-5% geschätzt. Als wahrscheinlichste Ursachen werden dabei heiße Oberflächen, sowie elektrische Anlagen angesehen.

Die Zündung bzw. Explosion einer geA kann zu Personenschäden mit tödlichen Verletzungen führen. Dies wird mit folgenden Maßnahmen vorgebeugt.

- Vollautomatisierter Betrieb, Personal auf Betriebsgelände ist auf das Notwendige reduziert (Einsätze aufgrund von Störungen oder Instandhaltung).

- Betriebsanweisungen für Einsätze in Ex-Schutzzonen bzw. in Bereichen mit potentiellen Ex-Gefahrenquellen.
- Optische und akustische Warnsignale (Hupe und Blitzleuchte) + Alarm bei 20 % UEG (zur Verhinderung, dass sich Personal in Ex-zone hineinbewegt)

Abschätzung der Zuverlässigkeiten der betrachteten Komponenten

Folgende Ausfallraten sind für den Ausfall „Defekter Kugelhahn - Dauerhaft geöffnetes Ventil OV-20201“ recherchiert worden:

Tabelle 33: Ausfallraten „Defekter Kugelhahn - Dauerhaft geöffnetes Ventil OV-20201“

Quelle	FIT (Failure in Time = Anzahl Ausfälle in 10^9 Stunden)	Bemerkung
Gemäß Datenblatt	2124	Datenblatt: https://www.avintos.ch/fileadmin/user_upload/Homepage%202018/10_Produkte/01_Armaturen/01_Kugelhaehne/04_Worcester%20%28Flowserve%29/Serie%2044_459/KUG_WOR_CERT_SIL_44_459_EN.pdf Im Datenblatt angegeben sind Ausfallraten für drei Verschiedene Funktionen ("Full stroke", "Tight Shut-Off", "Open on Trip"). Die Ausfallrate je Funktion wird weiter unterteilt bezgl. möglicher Folgen des Fehlers ("safe und detected", "safe und undetected", "dangerous und detected", "dangerous und undetected"). Die Ausfallraten werden in zwei Varianten angegeben: Mit und ohne sogenannter "partial valve stroke tests" (PVST). Für das Projektbeispiel trifft die Variante "ohne PVST" zu (das Ventil wird im „high demand mode“ angewandt. Zu PVST's siehe auch https://safetyandsis.com/partial-valve-stroke-test/). Für die Abschätzung der Gesamtausfallrate wurden die Ausfallraten für sämtlicher Funktionen aufsummiert, dabei jedoch auf die Fehler mit der Fehlerfolge "dangerous" beschränkt.
Gemäß SIL2-Einstufung	<1000	Da gemäß SMS-Doku das Ventil OV20201 Teil einer Safety Instrumented Function (SIF) mit SIL2 ist, kann abgeleitet werden, dass das OV20201 und somit auch der Kugelhahn eine maximale Ausfallrate von 10^-6 PFH (probability of dangerous failure per hour) aufweist. (IEC 61508/61511: Anforderung Mindestzuverlässigkeit an SIF’s mit SIL2: PFH < 10^-6).
UKAEA	500	Equipment failure rates published by the UKAEA 1972 from nuclear and non nuclear industry for ““Ball valves””
-	3500	Ausfallrate für “Ball valves” gemäß Franck P. Lees, "Loss prevention in the process industry", London: Butterworths, 1986
NPRD-2016	117 - 4600	Nonelectronic Parts Reliability Data Publication NPRD-2016 „Valve, Ball: Normally closed“ mit verschiedenen Ausfallraten in Abhängigkeit der Einsatzbedingungen (Ground, ground benign, ground fixed …) und Qualität (Commercial, Military, Unknown). Die angegebenen Werte liegen zwischen 117 und 4600 FIT.

Folgende Ausfallraten sind für den Ausfall „Defekter Stellantrieb - Dauerhaft geöffnetes Ventil OV-20201“ recherchiert worden:

Tabelle 34: Ausfallraten „Defekter Stellantrieb - Dauerhaft geöffnetes Ventil OV-20201“

Quelle	FIT (Failure in Time = Anzahl Ausfälle in 10^9 Stunden)	Bemerkung
Gemäß Datenblatt	1008	Datenblatt: https://www.avintos.ch/fileadmin/user_upload/Homepage%202018/10_Produkte/01_Armaturen/06_Antriebe/06_Norbro%20%28Flowserve%29/ACT_NOR_CERT_SIL_SERIE_33_40R_EN.pdf
Gemäß SIL2-Einstufung	<1000	Da gemäß SMS-Doku das Ventil OV20201 Teil einer Safety Instrumented Function (SIF) mit SIL2 ist, kann abgeleitet werden, dass das OV20201 und somit auch der Stellantrieb eine maximale Ausfallrate von 10^-6 PFH (probability of dangerous failure per hour) aufweist. (IEC 61508/61511: Anforderung Mindestzuverlässigkeit an SIF’s mit SIL2: PFH < 10^-6).
-	4000	Ausfallrate für “Valve actuator - fail open” gemäß Franck P. Lees, "Loss prevention in the process industry", London: Butterworths, 1986
NPRD-2016	3245	Nonelectronic Parts Reliability Data Publication NPRD-2016 „Valve, Actuator“

Folgende Ausfallraten sind für den Ausfall „Defektes Magnetventil - Dauerhaft geöffnetes Ventil OV-20201“ recherchiert worden:

Tabelle 35: Ausfallraten „Defektes Magnetventil - Dauerhaft geöffnetes Ventil OV-20201“

Quelle	FIT (Failure in Time = Anzahl Ausfälle in 10^9 Stunden)	Bemerkung
Gemäß Datenblatt	-	N/A
Gemäß SIL2-Einstufung	<1000	Da gemäß SMS-Doku das Ventil OV20201 Teil einer Safety Instrumented Function (SIF) mit SIL2 ist, kann abgeleitet werden, dass das OV20201 und somit auch das Magnetventil eine maximale Ausfallrate von 10^-6 PFH (probability of dangerous failure per hour) aufweist. (IEC 61508/61511: Anforderung Mindestzuverlässigkeit an SIF’s mit SIL2: PFH < 10^-6).
-	34247	Ausfallrate für “Solenoid valve” gemäß Franck P. Lees, "Loss prevention in the process industry", London: Butterworths, 1986
-	1000000	Probability of Failure on Demand (PFD) für ein Magnetventil = 1/1000. Mit der Annahme, dass dieses je Stunde durchschnittlich einmal angefordert wird, folgt FIT = 1 Mio . Quelle für den PFD-Wert: Franck P. Lees, Loss prevention in the process industry, London: Butterworths, 1986

Quelle	FIT (Failure in Time = Anzahl Ausfälle in 10^9 Stunden)	Bemerkung
UKAEA	3000	Equipment failure rates published by the UKAEA 1972 from nuclear and non-nuclear industry for "Solenoid valve"
Exida, Safety Equipment Reliability Handbook	580	Magnetventil - Exida, Safety Equipment Reliability Handbook - 3rd Edition, 3. Aufla 2007
NPRD-2016	6217	Nonelectronic Parts Reliability Data Publication NPRD-2016 „Valve, Solenoid (Summary)"
NPRD-2016	423	Nonelectronic Parts Reliability Data Publication NPRD-2016 „Valve, Solenoid Control"

Folgende Ausfallraten sind für den Ausfall „Defekter Niveaufühler - Dauerhaft geöffnetes Ventil OV-20201" recherchiert worden:

Tabelle 36: Ausfallraten „Defekter Niveaufühler - Dauerhaft geöffnetes Ventil OV-20201"

Quelle	FIT (Failure in Time = Anzahl Ausfälle in 10^9 Stunden)	Bemerkung
Gemäß Datenblatt	-	N/A
NPRD-2016	2600 - 6806	Nonelectronic Parts Reliability Data Publication NPRD-2016 „Sensor, Level" mit verschiedenen Ausfallraten in Abhängigkeit der Einsatzbedingungen (Ground, ground benign, ground fixed …) und Qualität (Commercial, Military, Unknown). Die angegebenen Werte liegen zwischen 2600 und 6806 FIT.

Folgende Ausfallraten sind für den Ausfall „Defekter Niveauschalter- Dauerhaft geöffnetes Ventil OV-20201" recherchiert worden:

Tabelle 37: Ausfallraten „Defekter Niveauschalter - Dauerhaft geöffnetes Ventil OV-20201"

Quelle	FIT (Failure in Time = Anzahl Ausfälle in 10^9 Stunden)	Bemerkung
Gemäß Datenblatt	-	N/A
Gemäß SIL2-Einstufung	Probability of dangerous Failure on Demand (PFD) < 0,01	Da gemäß SMS-Doku der Niveauschalter LS 20201 Teil einer Safety Instrumented Function (SIF) mit SIL2 ist, kann abgeleitet werden, dass der Niveauschalter eine maximale PFD von 0,01 (probability of dangerous failure per demand) aufweist. (IEC 61508/61511: Anforderung Mindestzuverlässigkeit an SIF's mit SIL2: PFD < 0,01).
NPRD-95	4897	Nonelectronic Parts Reliability Data Publication NPRD-95 „Liquid level switch".

Quelle	FIT (Failure in Time = Anzahl Ausfälle in 10^9 Stunden)	Bemerkung
MIL-217F-2	4715	MIL-217F-2, Part Stress: Liquid level switch

Folgende Ausfallraten sind für den Ausfall „Defekte Steuerung - Dauerhaft geöffnetes Ventil OV-20201“ recherchiert worden:

Tabelle 38: Ausfallraten „Defekte Steuerung- Dauerhaft geöffnetes Ventil OV-20201“

Quelle	FIT (Failure in Time = Anzahl Ausfälle in 10^9 Stunden)	Bemerkung
Gemäß Datenblatt	-	N/A
FIDES-2009	5	Ausführung komplett unbekannt, daher folgende Annahme: Ausführung als ASIC (application-specific integrated circuit), TTL (Transistor-Transistor-Logic), simple function

Als mögliche Ursachen für ein defektes Kugelventil mit dem Schadbild „Ventil dauerhaft offen“ werden seitens des Praxispartners angesehen:

- Verstopfung durch Schlamm: Denkbare, jedoch sehr unwahrscheinliche Ursache. Außerdem wäre als Folge eher anzunehmen, dass kein Gas mehr durch das Ventil hindurchfließt, was nicht der betrachteten Gefahrensituation entspricht.
- Als wahrscheinlichere Ursachen werden angesehen: Das Abdrehen der Welle, sowie das Eintreten eines Fremdkörpers. Das Eintreten eines Fremdkörpers ist theoretisch möglich, wenn sich ein anderes Bauteil „zerlegt“, oder aber bei Montage- bzw. Instandhaltungsarbeiten Werkzeuge im System zurückgelassen werden.
- Alterung bzw. mechanisches Versagen werden als Ursachen ausgeschlossen, da die Ventile Edelstahlausführungen sind.
- Ebenso werden Auslegungsfehler als mögliche Ursachen ausgeschlossen, da solche Fehler unmittelbar auftreten würden.

Vorkehrungen und Maßnahmen:

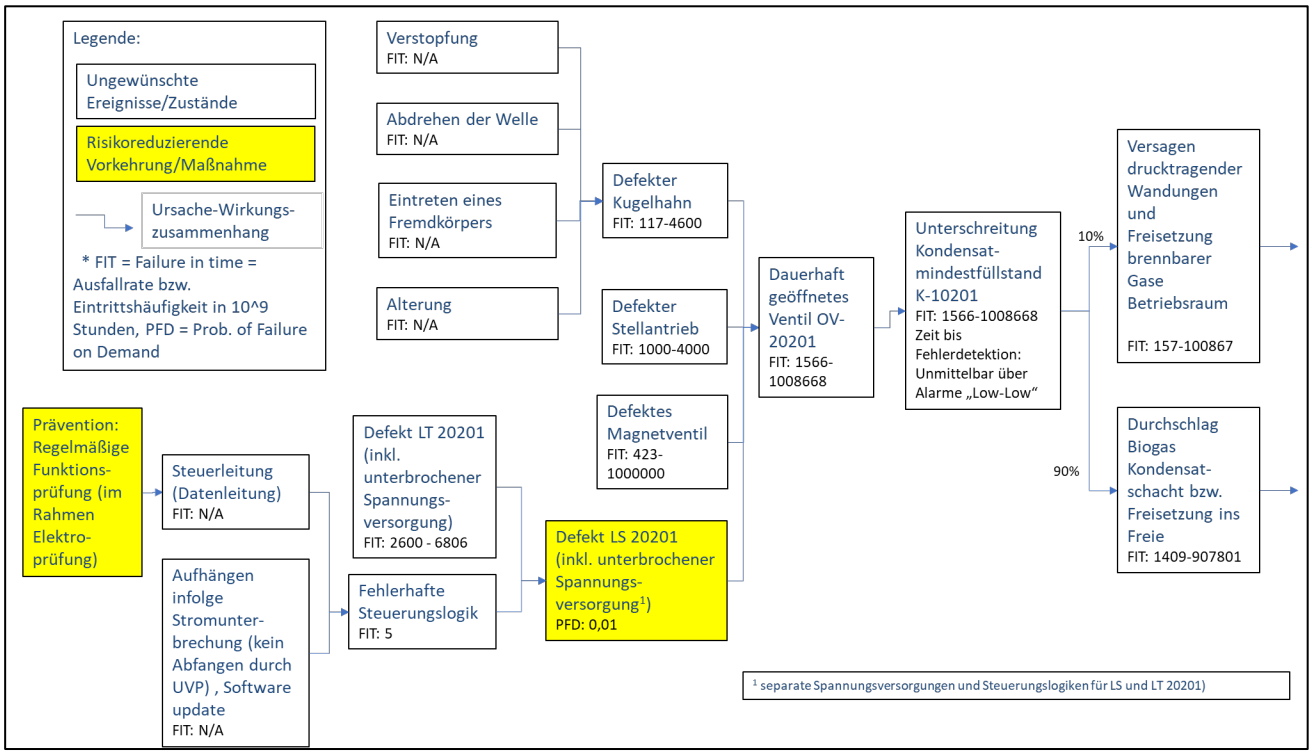
- Da keine Alterung der Kugelventile angenommen wird, sind präventive Tausch nicht vorgesehen.
- Inspektionen: Monatliche Kontrolle, dass das Ventil regelmäßig öffnet.

Eine Quantifizierung der Zuverlässigkeit des Kugelhahnventils auf der Ebene der Failure Modes bzw. Ausfallmechanismen, wie sie oben aufgelistet sind, ist auf Basis der Rechercheergebnisse (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) nicht möglich. Abschätzungen zu Ausfallraten auf Ebene der Failure Modes können zum Beispiel der (kostenpflichtigen, und daher hier nicht berücksichtigten) OREDA-Datensammlung entnommen werden.

Die nachfolgenden Abbildungen stellen die entwickelten Ursache-Wirkungsketten unter Berücksichtigung der identifizierten Vorkehrungen dar. Als Zuverlässigkeitsmaß werden FIT

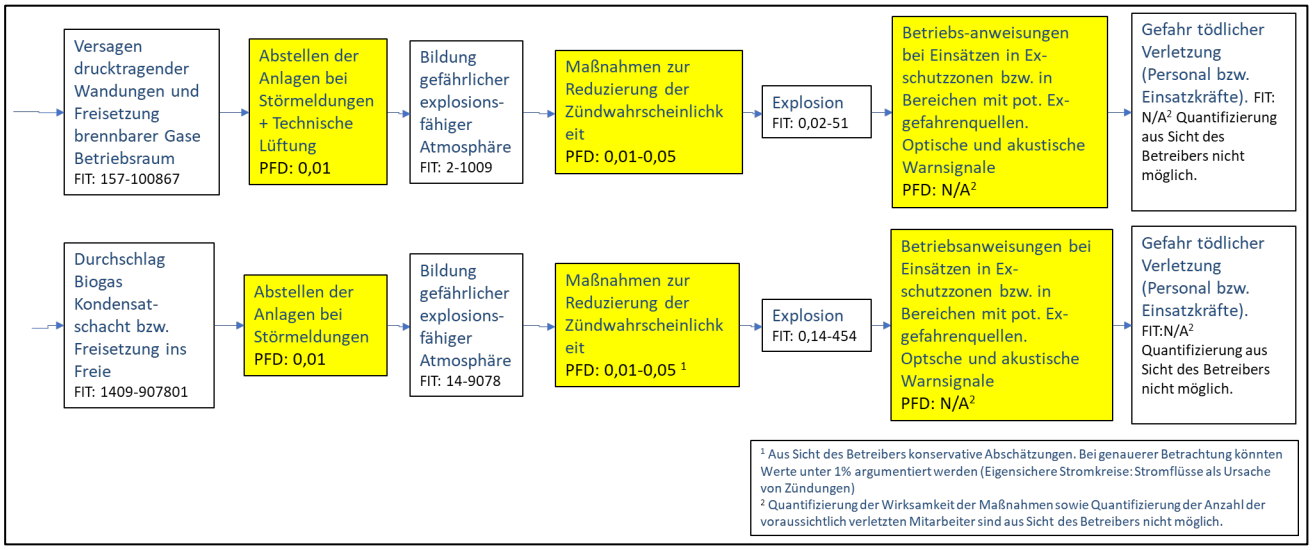
(Failure in Time = Anzahl Ausfälle in 10^9 Stunden) sowie PFD benutzt. Angegeben sind die recherchierten Minimal- und Maximalwerte.

Abbildung 32: Betreiber 6 – Fehler- und Ereignisbaum Gefahrensituation „Freisetzung Biogas“



Quelle: Eigendarstellung IZP

Abbildung 33: Betreiber 6 – Fehler- und Ereignisbaum Gefahrensituation „Freisetzung Biogas“ - Fortsetzung



Quelle: Eigendarstellung IZP

Weitere betriebliche Gefahrenquellen

Es bestehen durchaus weitere, betrieblich bedingte Gefahrenquellen, welche zur Bildung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphären führen können, die im Rahmen der Praxisuntersuchungen aber nicht weiter betrachtet worden sind.

Diese sind beispielhaft:

- Überdruck in den gasführenden Anlagenteilen
- Bildung einer geA in der Desorptionskolonne
- Instandhaltungsfehler: Unterlassene Inertisierung

Technische umgebungsbedingte Gefahrenquellen

Umgebungsbedingte Gefahrenquellen sind seitens des Betreibers untersucht worden, im Rahmen der Praxisuntersuchungen aber nicht weiter betrachtet worden. Diese sind beispielhaft:

- Das Gelände der Biogasanlage grenzt an eine Staatsstraße. Die Anlage ist durch einen Zaun und teilweise durch einen Graben gegen diesen Verkehrsweg abgeschirmt.
- In mittlerer Entfernung verläuft eine Autobahn.
- Das Betriebsgelände befindet sich in der Einflugschneise eines Flughafens.
- Angrenzend an das Betriebsgelände befindet sich eine Gaseinspeisestation. Diese verfügt über ein Flüssiggaslager.
- In einem Umkreis von ca. 1000 m befinden sich keine Wohnhäuser, Betriebe oder andere Gebäude.

Natürliche umgebungsbedingte Gefahrenquellen

Umgebungsbedingte Gefahrenquellen sind seitens des Betreibers untersucht worden, im Rahmen der Praxisuntersuchungen aber nicht weiter betrachtet worden. Diese sind beispielhaft:

Blitzschlag:

- Der Lagerbehälter und die erdgedeckten Leitungen sind geerdet (VDE 0100/0199).
- Maßnahmen zum Potentialausgleich entsprechend den VDE-Bestimmungen 0100 und 0190 sind getroffen.
- Es ist eine Blitzschutzanlage zum Schutz von Personen installiert (VDE 0185).

Hochwasser und Überflutungen:

- Eine Gefahr durch Hochwasser ist zu nicht berücksichtigen, da das Anlagengelände keinem Hochwassergebiet zugeordnet wurde. Hohes Grundwasser: Das Gelände der Biogasanlage liegt in einem Gebiet ohne hohe Grundwasserstände.

Wald- und Flächenbrände:

- Bei entsprechender Trockenheit und Windverhältnissen können bei Waldbränden eventuelle Störfälle nicht komplett ausgeschlossen werden (Funkenflug). Bäume in Nähe zu den entsprechenden Gefahrenbereichen wurden gefällt.

Erdbeben:

- Der Betriebsbereich befindet sich nicht in einem durch Erdbeben gefährdeten Gebiet.

Eingriffe Unbefugter

Eingriffe Unbefugter sind seitens des Betreibers untersucht worden, im Rahmen der Praxisuntersuchungen aber nicht weiter betrachtet worden.

Der Betreiber weist darauf hin, dass durchaus Vorkommnisse mit Relevanz im Sinne der AwSV bekannt sind, welche nicht in der ZEMA-Datenbank enthalten sind.

5.2.3.2.1 Fazit des Betreibers

Die Analysetechniken FTA und ETA können ggfs. eine sinnvolle Ergänzung zu den bisherigen Analysetechniken sein. Konkrete Anwendungsfälle ergeben sich aktuell jedoch nicht. Da die bisher angewandten Verfahren standardisiert sind, verfügen sie über eine Akzeptanz bei Sachverständigen und Behörden. Für die hier angewandte Methodik kann dazu keine Aussage getroffen werden.

5.2.3.3 Betreiber 7 (Luftzerlegungsanlagen)

Hauptziel der Fallstudien für die Anlagenart Luftzerlegungsanlagen war es, zu prüfen inwieweit ein auf der Fehler- und Ereignisbaumanalyse basierendes Verfahren umsetzbar ist, um die Erfüllung der Betreiberpflichten der Störfall-Verordnung mit Hilfe eines solchen Verfahrens nachzuweisen.

Vom Ergebnis der Analyse erhofften die Autoren sich u.a. folgende Erkenntnisse:

- Abschätzung der Größenordnungen für betriebliche und umgebungsbedingte Gefahrenquellen
- Beitrag zur Frage, ob menschliche Fehler das entscheidende Risiko beim Betrieb derzeit realisierter Anlagen sind
- Klärung der Frage, ob für umgebungsbedingte Gefahrenquellen eine probabilistische Quantifizierung der Eintrittswahrscheinlichkeit grundsätzlich möglich ist
- Erkenntnisse zu sonstigen betrieblichen und umgebungsbedingten Gefahrenquellen, welche ggf. nicht im Fokus der bisher häufig angewendeten HAZOP bzw. LOPA-Analysen stehen
- Aussage zum erforderlichen Zeitaufwand für eine derartige Betrachtung

Menschlichen Risiken wird aufgrund der Erkenntnisse aus den bisherigen Analysen ein hoher Stellenwert eingeräumt. Die Erkenntnis, dass menschliche Fehler als Gefahrenquelle nicht vernachlässigt werden dürfen, wurde gestützt durch die Analyse einiger Ereignisse aus der ZEMA-Datenbank und weiterer Störfälle (beispielsweise von veröffentlichten Videos der UCSB – U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board zu realen Störfallabläufen).

Die ZEMA-Datenbank enthält insgesamt gerade einmal zwei Ereignisse, welche auf Eingriffe Unbefugter zurückgeführt wurden (2011-05-22 Brand in einem Sonderabfallzwischenlager; 9340 (1993-12-19 Explosion von Leichtbenzin mit Folgebrand)). Die Bedrohungslage kann sich hier allerdings sehr schnell ändern und operative Maßnahmen erfordern. Eine probabilistische Betrachtung für Eingriffe Unbefugter erschien daher nicht sinnvoll und der Bereich „Eingriffe Unbefugter“ wurde in der Fallstudie nicht betrachtet.

Als Anforderungen an die Analyse wurden folgende Prämissen aufgestellt:

- Die Quantifizierbarkeit für nach der Störfall-Verordnung zu bewertenden Szenarien hinsichtlich Eintrittswahrscheinlichkeit des Störfallszenarios und des Eintrittes der Auswirkungsszenarien sollte für konkrete Anlagen getestet werden.
- Es sollten Vorkehrungen zur Verhinderung von Störfällen, sowie auswirkungsbegrenzende Maßnahmen einbezogen werden (nachfolgend auch „Barrieren“ genannt).
- Menschliche Fehler sollten in die Abschätzung der Störfalleintrittswahrscheinlichkeiten einbezogen werden.
- Die Schätzung der Eintrittswahrscheinlichkeiten sollte nicht zu komplex sein, und die Begründung für die Erwägungskriterien bei der Schätzung sollte hinterlegt werden, um diese für eine spätere Prüfung bzw. Nachbesserung nachvollziehen zu können.
- Die Güte des Sicherheitsmanagements sollte nicht bewertet werden (ein Bewertungsansatz dazu ist z.B. im ARAMIS-Verfahren enthalten). Die Quantifizierung sollte sich auf die als Wirkung des Sicherheitsmanagements realisierten Barrieren bzw. Schutzeinrichtungen zur Auswirkungsbegrenzung fokussieren.

Für die Analyse konnten herangezogen werden:

- Existierende HAZOP-Analyse für die Anlage
- Piping&Instrumentation Diagramme (P&ID’s, Fließschemata)
- Auskünfte des verantwortlichen Sicherheitsingenieurs für Prozess- und Umweltsicherheit aus den jeweilig zuständigen Bereichen des Betreibers

Der Sicherheitsbericht wurde hingegen nicht zur Verfügung gestellt. Gleichfalls wurden die aufgezeigten Maßnahmen im Sicherheitsmanagement, und die dafür erstellten Alarm- und Gefahrenabwehrpläne bzw. Schulungsunterlagen nicht im Detail geprüft, sondern die entsprechenden Aussagen des Mitarbeiters aus den Arbeitsgesprächen herangezogen.

Die Analysen begannen jeweils mit der Aufstellung eines Fehlerbaumes in Microsoft Visio (MS Visio) auf Basis der in der HAZOP Analyse identifizierten Ereignisse an den relevanten Anlagenteilen (Flachbodentank).

Ähnlich der Vorgehensweise im ARAMIS Verfahren wurden für die aus der vorliegenden HAZOP Analyse ermittelten betrieblichen Gefahrenquellen für Störfälle die jeweils relevanten Schutzeinrichtungen als Barrieren mit im Fehlerbaum dargestellt.

Beim Versuch der Schätzung der Eintrittshäufigkeiten für die Ereignisse wurde schnell klar, dass die grafische Darstellung in einem Fehlerbaum bzw. Ereignisbaum zwar gut geeignet ist, um Zusammenhänge abzubilden. Allerdings können Annahmen zur Quantifizierung und Entscheidungen zum Einbezug von Gefahrenquellen (Welche Gefahren sind vernünftigerweise auszuschließen?) nicht in einem Fehlerbaum selbst dokumentiert werden.

Daher erfolgte die quantitative Abschätzung der ermittelten Fehlerbäume in MS Excel.

Die betrachteten Anlagen stehen nicht in Deutschland und unterliegen daher nicht dem deutschen Störfallrecht. Beim Praxispartner gelten jedoch weitestgehend einheitliche Grundsätze bei der Anlagenplanung und im Betrieb gemäß europäischen Standards, so dass dieser Umstand auf die Aussage der quantitativen Analyse wenig Auswirkungen hat.

Hinsichtlich menschlicher Fehler wurde der vom TÜV-Austria herangezogene Bewertungskatalog verwendet (Quelle: TÜV Austria Akademie; Layer of Protection Analysis for Risk Based Assessment of Scenarios).

Tabelle 39: Bewertungskatalog des TÜV-Austria zur Bewertung menschlicher Fehler

Komplexität	Häufigkeit (wie oft wird die Tätigkeit pro durchführender Person ausgeführt)	Stress	Fehlerwahrscheinlichkeit je durchgeführter Handlung
einfach	Häufig (monatlich oder öfter)	Nein	$1x10^{-3}$
	Selten (weniger oft als monatlich)	Nein	$1x10^{-2}$
	Häufig (monatlich oder öfter)	Ja	$1x10^{-2}$
	Selten (weniger oft als monatlich)	Ja	$1x10^{-1}$
Komplex	Häufig (monatlich oder öfter)	Nein	$1x10^{-2}$
	Selten (weniger oft als monatlich)	Nein	$1x10^{-1}$
	Häufig (monatlich oder öfter)	Ja	$1x10^{-1}$
	Selten (weniger oft als monatlich)	Ja	$1x10^{-0}$

Quelle: TÜV Austria Akademie; Layer of Protection Analysis for Risk Based Assessment of Scenarios

Die aus verschiedenen Datenquellen (z.B. VDI 4006, RedBook, RMR) entwickelte Bewertungstabelle gilt bei einer ausreichenden Qualifikation des Personals, berücksichtigt nach Aussage des TÜV bereits Stress durch außerbetriebliche Stressfaktoren und ist hinsichtlich des Schwierigkeitsgrades und auch der Häufigkeit der Tätigkeiten differenziert [Vgl. Preiss, R., Struckl, M. (2017)).

Dort, wo menschliche Tätigkeiten Sicherheitsrisiken verursachen, welche zum kritischen Ereignis führen (Loss of Containment (LOC) Liquid Oxygen Tank (LOX)), wurde gleichzeitig die Häufigkeit dieser Tätigkeiten erfragt und in der Bewertung angegeben.

Die Darstellung der Wirkung der Barrieren wurde mit einem „Risk-In/Risk-Out“ Ansatz realisiert, wobei die Hardwarefehler am verursachenden Element selbst und der für Funktion des Elements notwendigen Regel- bzw. Sicherheitskreises extra abgeschätzt werden.

Es wurden folgende Arten von Kalkulationen erstellt und gemeinsam mit dem anlagenverantwortlichen Sicherheitsingenieur ausgefüllt:

Tabelle 40: Erstellte Kalkulationsblätter für FTA/ETA-Analyse

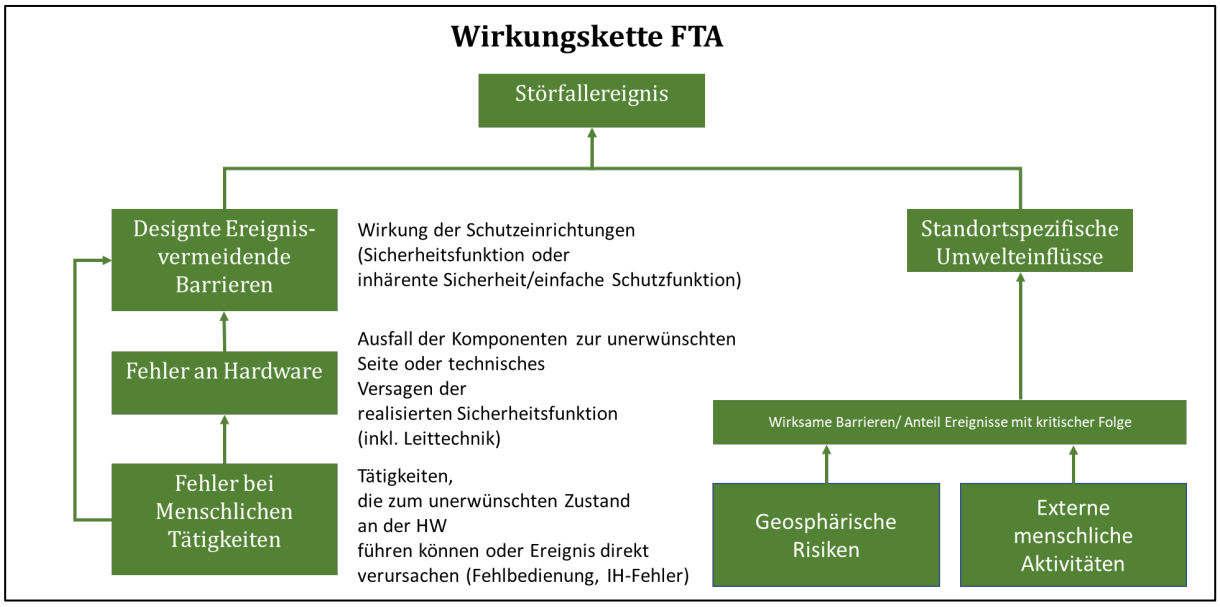
Art des Kalkulationsblattes	Inhalt	Anzahl Fallstudie A	Anzahl Fallstudie B
Eintrittswahrscheinlichkeit Fehlerarten (Komponenten)	Relevante Fehlerart, Kalkulation der HW-Fehlerrate, Kalkulation der Häufigkeit menschlicher Fehler, welche zur o.a. Fehlerart führen können, Risikomindernde Barrieren	7	15
Menschliche Tätigkeiten	Relevante Fehlerart, Kalkulation der Häufigkeit menschlicher Fehler, welche zur o.a. Fehlerart führen können,	1	3

Art des Kalkulationsblattes	Inhalt	Anzahl Fallstudie A	Anzahl Fallstudie B
	Risikomindernde Barrieren		
Beurteilung Externer Risiken	Zusammenstellung der umgebungsbedingten Gefahrenquellen, welche zum Ereignis führen können Geosphärische Risiken am Anlagenstandort Externe Risiken durch menschliche Aktivitäten in der Umgebung des Anlagenstandortes (inkl. betriebsbedingter Gefahren, die nicht der Anlage zuzurechnen sind)	1	1
Ergebnis FTA	Summierung der einzelnen Fehlerarten, Darstellung des Eintritts des kritischen Ereignisses (Top-Ereignis im Fehlerbaum)	1	1
Ereignisauswirkungen	Auswirkung, Auswirkungsmindernde Barrieren, Verbleibende kritische Auswirkung, Aufteilung in Konsequenzen (Tote/Verletzte)	3	6
Gesamt		12	26

Die Kalkulationssheets für die Fehlerarten decken hierbei jeweils ein Elementarereignis im aufgestellten Fehlerbaum bzw. im Ereignisbaum ab. Dabei wurden die nicht durch die Anlage selbst bedingten Einflüsse (umgebungs- und betriebsbedingte Risiken) in einem Sheet zusammengefasst.

Die Kalkulation wurde entsprechend der Unterlagen vorbereitet, und mit dem Anlagenverantwortlichen durchgesprochen. Dabei wurden die Sheets auf der Basis neuer Erkenntnisse schrittweise weiterentwickelt. Die Quellen für die Eingangsdaten zur Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit für die Fehlerarten sind entsprechend in den Kalkulationssheets vermerkt. Für die Quantifizierung der Wirksamkeit der Barrieren wurde eine Abschätzung vorgenommen, welche sich zum Großteil an den CCPS (Center for Chemical Process Safety) Guidelines LOPA orientiert (s. CCPS (2015)).

Abbildung 34: In der Fehlerbaumanalyse betrachtete Wirkungskette



Quelle: IZP Dresden

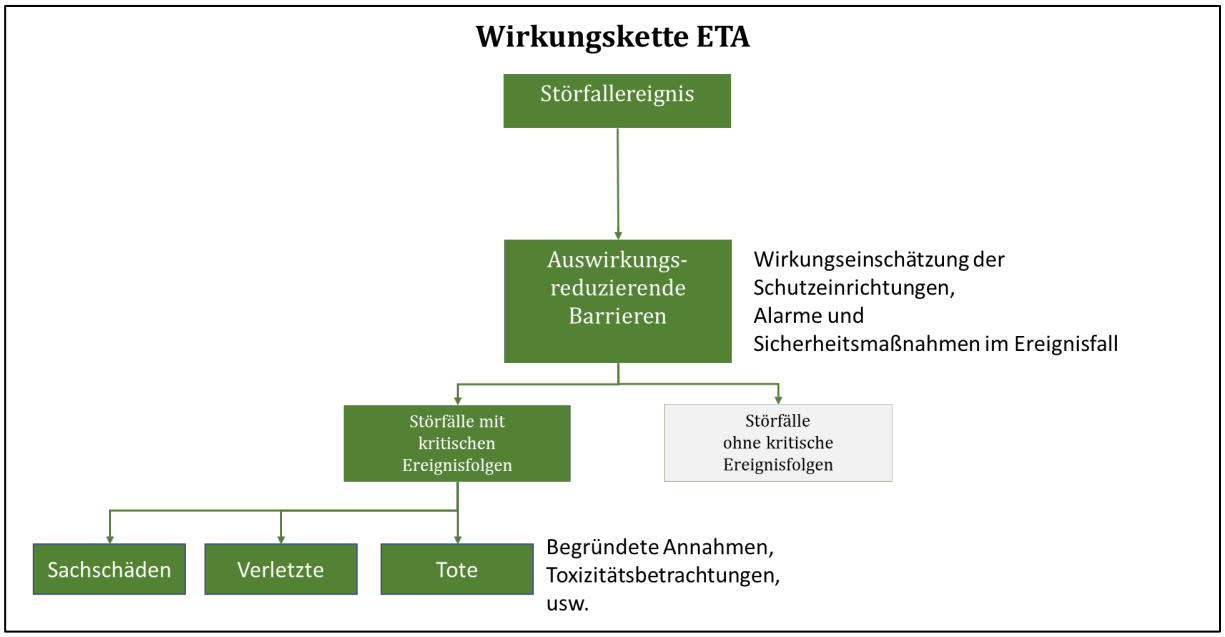
Hinsichtlich der Ereignisauswirkungen wurde unterteilt in:

- Ereignissen mit Toten und Verletzten, wobei die Aufteilung der Wahrscheinlichkeiten in die Kategorien nur verletzt, einzelner Toter, mehr als ein Toter geschätzt wurde
- Ereignissen mit Sachschäden

Für die Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeiten wurden die Schutzvorkehrungen zur Auswirkungsminderung entsprechend als Barrieren angesetzt.

Gleichfalls wurde die Wirkung risikoreduzierender Maßnahmen oder von natürlichen Sicherheitsabständen bei der Schätzung der Eintrittswahrscheinlichkeiten berücksichtigt und dies entsprechend nachvollziehbar dargestellt.

Abbildung 35: Abgebildete Wirkungskette in der Ereignisbaumanalyse



Quelle: IZP Dresden

6.2.4.3.1 Luftzerlegungsanlage 1 (LOX Flachbodentank)

Der an der Anlage erzeugte Flüssigsauerstoff (liquid oxygen; LOX) wird bei 0,5 bar und -196°C im LOX-tank bis zur Weiterverladung auf LKW gespeichert. Der Tank ist als doppelwandiger Flachbodentank ausgeführt.

Die Freisetzung von Flüssigsauerstoff am Behälter (Loss of Containment; LOC) wurde aus den möglichen Störfallereignissen ausgewählt, da einerseits eine (im Sinne der deutschen Störfall-Verordnung) kritische Stoffmenge vorhanden ist, und andererseits mehrere Ursachen zu einem solchen Ereignis führen können (geeignet für Ansatz mit der FTA/ETA-Methodik).

Bereits eine geringe Menge von verflüssigtem Sauerstoff führt bei Verdampfung zur Bildung einer großen Menge an gasförmigem Sauerstoff.

Aus einem Liter Flüssigsauerstoff entstehen bei Verdampfung (Siedepunkt -182.96°C bei Normaldruck) etwa 850 Liter gasförmiger Sauerstoff. Bei einem starken bzw. schnellen Temperaturanstieg kann daher der Tankdruck die Auslegungsgrenze des Tanks überschreiten.

Eine erhöhte Luftsauerstoffkonzentration wirkt stark brandfördernd. Flüssigsauerstoff ist in diesem Zusammenhang besonders gefährlich, wenn er in Kontakt mit organischen Substanzen kommt (z.B. auch Asphalt). Damit besteht bei einem Austritt von Sauerstoff ein hohes Brandrisiko im Ausbreitungsbereich, wobei der erhöhte Sauerstoffgehalt von Personen nicht wahrgenommen wird.

Zusätzlich besteht im Falle des Austrittes einer größeren Menge Flüssigsauerstoff das Risiko der Erstickung durch ausbleibenden Atemreiz bei einer hohen Luftsauerstoffkonzentration und das Risiko von Erfrierungen durch den direkten Kontakt mit dem kalten Sauerstoff.

Der betrachtete doppelwandige LOX-Tank besteht aus einem inneren und einem äußeren Tank, wobei zwischen den beiden Tankhüllen Stickstoff als Spülgas (engl. Purge Gas) durch das der Isolierung dienende Perlit Granulat eingeleitet wird, dass einen geringen Überdruck halt und in geringen Mengen ständig in die Umgebungsluft abgegeben wird.

Der Druck im äußeren Tank ist viel geringer als im inneren Tank. Der innere Tank ist außerdem wesentlich kälter als der äußere.

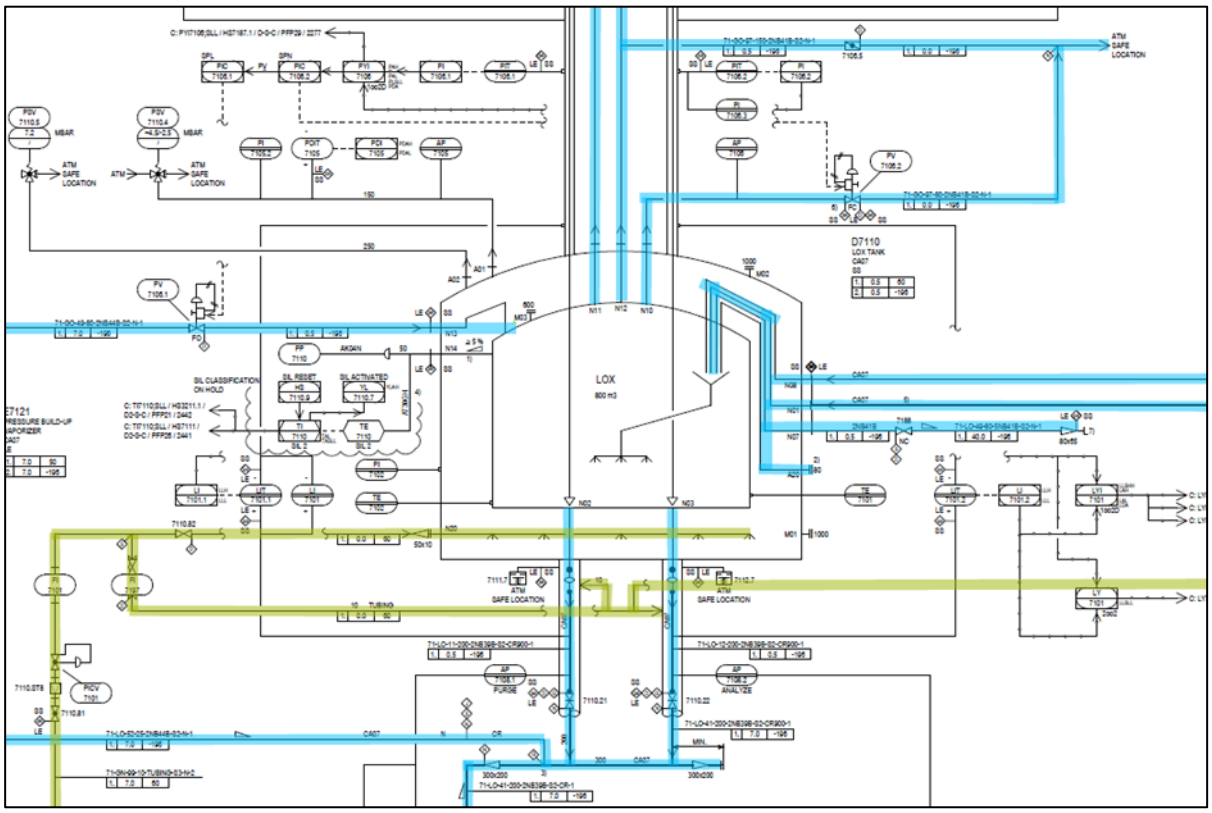
Das Spülgas soll vor allem Wärmebrücken durch Festfrieren von Feuchtigkeit verhindern, welche für eine Wärmebrücke sorgen kann.

Bei einem Unterdruck und fehlender Spülgaszuführung oder Verlust des zwischen den Tankhüllen eingeleiteten Spülgases, kann es zu einem Feuchtigkeitseintrag aus der Umgebungsluft, der Eisbildung an der Hülle des wesentlich kälteren inneren Tanks und damit zur Bildung von Wärmebrücken kommen. In der Folge kann der innere Tank durch den die erhöhte Verdampfungsrate bei einer Temperaturerhöhung bersten, falls keine Sicherheitseinrichtungen ansprechen. Dieser Prozess verläuft relativ langsam.

Bei Überdruck im inneren Tank, der durch einen langsamen Temperaturanstieg entstehen kann, wird der Sauerstoff durch die Druckregelventile bzw. Sicherheitsventile in einen ungefährlichen Bereich abgeblasen, für den keine negative Auswirkungen erwartet werden (berechnete Safe Locations).

Aus dem P&ID in Abb. 38 sind die Tankzuleitung (links, blau), die Spülgaszuführung (grün) und der Druckablass (vent line) rechts, sowie innerer und äußerer Tank mit den beiden Sicherheitsventilen (links oben) erkennbar.

Abbildung 36: Auszug aus dem P&ID für den Flachbodentank



Quelle: Eigendarstellung Betreiber 7

Die Druckregelung im LOX-Tank erfolgt durch:

- Selbsttätiges Druckaufbauregelventil PV7106.1 für die Druckhaltung im äußeren Tank (gesteuert über Leittechnik), fails open. Die offene Stellung bei Versagen verhindert, dass

im Tank ein Unterdruck entsteht, der zum Eintrag von Umgebungsluft und Feuchtigkeit führen kann.

- Selbsttätiges Druckhalteventil PV7106.2 für die reguläre Entlüftung des Tankes (gesteuert über Leittechnik) in eine safe location, fails closed
- Ventil HV7111 (Sicherheitsfunktion für Überfüllsicherung des Tankes SIL 1 bei Befüllung von LKW, fails closed, Ausfall also fail safe zur sicheren Seite)

Als Barrieren wurden für den inneren Tank identifiziert und in die Analyse eingearbeitet:

- Safety Loop Druckregulierung im LOX Tank
- Pressure Control High Alarm (LOX Zufuhr kann manuell unterbrochen werden)
- Redundante Sicherheitsventile
- Zwei Sicherheitskreise, welche die Überfüllung verhindern (1 davon SIL 2)

Für das Spülgas dient hauptsächlich das selbsttätige Druckregelventil PCV 7101. Beim dauerhaft geschlossenen Ventil kommt es zur Druckminderung des Spülgases und damit zum Verlust der Isolationsfunktion oder Feuchtigkeitseintrag. Wenn das Druckregelventil im offenen Zustand verbleibt, steigt der Druck.

Als Barrieren wurden identifiziert und in die Analyse eingearbeitet:

- Pressure Control High Alarm innerer Tank (manuelle Entlüftung kann LOC verhindern)
- Sicherheitsventile äußerer Tank

Wird bei Befüllung eines leeren Tankes zu viel flüssiger Sauerstoff in einem zu warmen Tank eingefüllt, kann es zu einer schlagartigen Verdampfung kommen, die zu einem Bersten des inneren Tankes führen kann. Eine solche Befüllung wurde vom Betreiber als ein Ereignis angegeben, dass etwa 1-mal in 10 Jahren auftritt, da es keine regelmäßige Prozedur gibt, welche eine Entleerung des Tankes fordert (Reinigung, Inspektion).

Die Befüllung eines warmen Tanks mit LOX ist nur in der Anfangsphase der Kühlung kritisch (da die Temperaturdifferenz dann hoch ist, und große Mengen verdampfen können, wobei der Tank wiederum leer ist).

Das Herunterkühlen des Tankes vor dem Einfüllen von LOX dauert Stunden bis Tage, womit nicht von einer Stresssituation auszugehen ist, so lange die Betriebsanweisungen eingehalten werden. Dies wurde bei der Bemessung der Fehlerwahrscheinlichkeit für ein Bersten des Tankes durch Einfüllen von Sauerstoff in einem zu warmen Tank berücksichtigt.

Bei einem Bersten des inneren Tankes (z.B. durch Materialversagen) wirkt keine auswirkungsverhindernde Barriere mehr.

5.2.3.3.1.1 Vorgehensbeschreibung und Ergebnisse

Das nachfolgende Beispiel zeigt exemplarisch, wie für ein Elementarereignis (Druckregelventil vent line unerwünscht geschlossen) die Eintrittswahrscheinlichkeit abgeschätzt wurde. Zu beachten ist, dass die Werte für die Ereignisraten einmal in Ereignisse pro Jahr und einmal in Ereignissen pro Stunde angegeben sind (Ausfallraten werden oft bezogen auf Stunden angegeben).

Tabelle 41: Auszug Kalkulationsblatt zur Schätzung der Hardware- und Prozessausfallrate für das Elementarereignis „PV7016.2 ungewollt geschlossen (kein/geringer Durchfluss an der Entlüftungsleitung) (unwanted closed (no/less flow at vent line))“

Fehl-funktion	geschätzte Eintritts-häufigkeit [1/h]	Quelle Ausfallrate/ Vernünftige Erklärung	Auftreten einer kritischen Konsequenz? [%]	Barriere(n)/ Umgesetzte Präventionsmaßnahmen	Ver-weise	Geschätzte Redu-zierung durch Präventions-maßnahmen [%]	Ausfall-rate [1/h]
HW-Ausfall des Ventils (FR)	6,20E-06	NPRD-95; Valve - Pneumatic, Globe Rotary; Ground Fixed; 25 °C	100,00%			0,00%	6,20E-06
Fehler Ansteuer-ung (keine Sicherheits-schaltung; SIL0)	1,87E-05	kontinuierliche Druckregelung (--> PFH_D)			siehe Blatt Komponenten		1,87E-05
andere prozess-spezifische Fehler	0	Reinigungsservice, kein Öl und Fett, keine Partikel auf Sauerstoffbasis; kein Einfrieren oder Polymerisieren (Trockenbetrieb)					0,00E+00
						Häufigkeit Gesamt [1/h]	2,49E-05

Tabelle 42: Auszug Kalkulationsblatt zur Schätzung der Eintrittshäufigkeiten manueller Aktivitäten für Elementarereignis „PV7016.2 ungewollt geschlossen (kein/geringer Durchfluss an der Entlüftungsleitung) (unwanted closed (no/less flow at vent line))“

Manuelle Aktivität	Relevanter Betriebs-modus	Häufig-keit [1/a]	Aktivität Typ	Versagens-rate pro Aktivität	Vermeid ungs-maßnah me	Geschätzte Reduzieru ng der Versagens rate durch Prävention smaßnah men [% pro Vorfall]	Auftreten der kritische Konseque nz? [% pro Vorfall]	Häufig-keit [1/h]
Manuelles Öffnen/ Schließung zu Wartungszw ecken (keine regelmäßige Aktivität, aber denkbar)	Instandhal tung	0,1	Einfache Aufgabe	0,01	4-Augen-Prinzip	80,00%	100,00%	2,28E-08
							Häufigkeit Gesamt [1/h]	2,28E-08

Tabelle 43 Auszug Kalkulationssheet zur Abschätzung des verbleibenden Risikos nach Risikomindernden Barrieren für Elementarereignis „PV7016.2 ungewollt geschlossen (kein/geringer Durchfluss an der Entlüftungsleitung) (unwanted closed (no/less flow at vent line))“

Barriere	Barrieretyp	PFD	Quelle	zusätzlicher Faktor	Risiko-Eingang [1/h]	Risiko Ausgang [1/h]
Druckregel ung Hochalarm PYI 7106	Sicherheitsr egelkreis	0,1	CCPS GUIDELINES LOPA (Data Table 5.12)	Komplexe Aufgabe: Eine Reaktion des Bedieners ist erforderlich, um den LOX-Fluss zum Tank zu stoppen → 1,1111	2,4970E-05 (SUMME aus beiden Tabellen oben)	2,7745E-06
PSV7110.1 / PSV 7110.2	Sicherheitsv entile (redundant)	0,001	CCPS GUIDELINES (Data Table 5.16)		2,7745E-06	2,7745E-09
					Verbleibendes Geschätztes Risiko pro Jahr [1/a]	2,4305E-05

Da bei der gewählten Aggregationstiefe ausschließlich ODER-verknüpfte Ereignisse auftraten, ist die Eintrittshäufigkeit des TOP-Ereignisses durch einfache Summierung der Ausfallraten der nachgeordneten Elementarereignisse zu berechnen.

Tabelle 44: Ergebnisse der quantitativen Betrachtung für das TOP Ereignis „Freisetzung von Flüssigsauerstoff am Behälter (LOX-Tank)“ – Darstellung der Elementareignisse und deren Auftretenshäufigkeiten

Elementarereignis	Auftretens-häufigkeit [1/a]	Prozentualer Anteil
Manuelle Aktivität schlägt fehl: Lox wird in den warmen Tank gefüllt	1,00E-04	27,5228%
Tankmaterialfehler (Innentank)	1,00E-04	27,5228%
Umweltgefahren	7,33E-05	20,1845%
PV7106.1 vollständig geöffnet (mehr Durchfluss an der Druckaufbaulinie)	6,56E-05	18,0611%
PV7106.2 ungewollt geschlossen (kein/weniger Durchfluss an der Entlüftungsleitung)	2,43E-05	6,6893%
HV7111 bleibt offen (Überfüllschutz des LOX-Tanks bei hohem Füllstand)	6,73E-08	0,0185%
PICV7101 fällt in geschlosser Stellung aus (Druckabfall des Spülgases im Außentank)	2,22E-09	0,0006%
Tankmaterialfehler (äußerer Tank)	1,00E-09	0,0003%
PCV7101 fällt in offener Stellung aus (Druckanstieg des Spülgases im Außentank)	8,26E-13	0,0000%

Für die Darstellung des Fehlerbaumes wurde die Software RAMS-Office NG verwendet.

Abbildung 37: Fehlerbaum für das Top-Ereignis " Freisetzung von Flüssigsauerstoff am Behälter (LOX-Tank)") – Listenansicht in RAMS-Office NG

Fehlerbaum (Listenansicht)	Elementtyp	Auftretens-häufigkeit [1/a]
- ≥1 Freisetzung von Flüssigsauerstoff am Behälter (LOX-Tank)	ODER-Gatter	3,6322E-04
- ≥1 Überdruck - Innentank	ODER-Gatter	2,8994E-04
Tankmaterialfehler (Innentank)	Elementar-ereignis	1,0000E-04
Manuelle Aktivität schlägt fehl: Lox wird in den warmen Tank gefüllt	Elementar-ereignis	1,0000E-04
PV7106.2 ungewollt geschlossen (kein/weniger Durchfluss an der Entlüftungsleitung)	Elementar-ereignis	2,4300E-05
PV7106.1 vollständig geöffnet (mehr Durchfluss an der Druckaufbaulinie)	Elementar-ereignis	6,5600E-05
HV7111 bleibt offen (Überfüllschutz des LOX-Tanks bei hohem Füllstand)	Elementar-ereignis	6,7300E-08
- ≥1 Verlust der Isolationsfähigkeit des Außentanks	ODER-Gatter	3,2208E-09
Tankmaterialfehler (äußerer Tank)	Elementar-ereignis	1,0000E-09
PCV7101 fällt in offener Stellung aus (Druckanstieg des Spülgases im Außentank)	Elementar-ereignis	8,2600E-13
PICV7101 fällt in geschlosser Stellung aus (Druckabfall des Spülgases im Außentank)	Elementar-ereignis	2,2200E-09
Umweltgefahren	Elementar-ereignis	7,3300E-05

Quelle: Eigendarstellung IZP

Die Eintrittshäufigkeit der ermittelten Elementarereignisse des Fehlerbaums ist dort am höchsten, wo keine Barrieren oder Schutzfunktionen vorhanden sind. Das betrifft sowohl das zu schnelle Einfüllen von flüssigem Sauerstoff in einen leeren Tank als menschlichen Fehler, wie auch die Wahrscheinlichkeit des Materialversagens (unabhängig der konkreten Ursache (konstruktionsbedingt, produktionsbedingt, Alterung)) des inneren Tankes.

Die anderen Fehlerarten haben entsprechend wesentlich geringere Eintrittshäufigkeit, wobei die Einschätzung der Wirkung der Umgebungseinflüsse hinsichtlich des Ereignisses sehr schwierig ist.

Einerseits sind z.B. Schäden durch Schnee- und Eis, Wasser bzw. Erdbeben nicht gänzlich ausschließbar und anhand der Auslegungsbemessung (Auslegung auf 50 bzw. 500-

Jahresereignis) und vorhandenen Statistiken gut abschätzbar. Andererseits ist es schwierig (oder aufwendig), im Ereignisfall die Wahrscheinlichkeit einer negativen Auswirkung abzuschätzen, zumal die notwendigen Kausalketten nicht immer im Detail zu ermitteln sind.

Beispiele: Schäden durch Vereisungen können beispielsweise dort eintreten, wo vorher aufgrund von anderen unentdeckten Fehlern Wasser eindringt (z.B. auch durch bauliche Schäden außerhalb einer des üblichen Rahmens der Anlagensicherheitsbetrachtung).

Die durch derartige Annahmen resultierenden Gefährdungshäufigkeiten sind im Vergleich zu den (rechnerisch) für technische Schutzmaßnahmen anzunehmenden Werten vergleichsweise hoch. Aus diesem Grund haben umgebungsbedingte Risiken einen nicht unwesentlichen Anteil an der ermittelten Gefährdungshäufigkeit.

Zur Häufigkeit von reinen Materialfehlern an doppelwandigen Flachbodentanks wurde für ein strukturelles Versagen des Tankes jeweils auf einen Wert für Leckage zurückgegriffen (CCPS GUIDELINES LOPA (Data Table 4.18; continuous 10 mm diameter leak)). Die Größenordnung dieses Wertes ist hierbei vermutlich als konservativ anzusehen.

Die Nachprüfung ergab, dass der Wert in der Tat die im Arbeitskreis für die Erstellung des Purple Books als Konsens definierte Eintrittswahrscheinlichkeit für ein LOC-Ereignis dieser Ausprägung enthält – ungeachtet deren Ursache! (Guidelines for Quantitative Risk Assessment, 2nd Edition "Purple Book "18 E (CPR 2005), p 3.6, Table 3.5).

Dies zeigt sich zum Beispiel in einer im Jahr 2006 veröffentlichten Vergleichsstudie der Ansätze zu Leckagen an Tanks (Vgl. Nussey (2006)). Auch in der deutschsprachigen Literatur wird darauf hingewiesen (Vgl. Drewitz (2009)), dass es dazu stark abweichende Angaben gibt.

Es ist unstrittig, dass die Bildung großer Lecks vermutlich seltener ist. Allerdings ist nicht nur die Versagenswahrscheinlichkeit bzw. der Eintritt einer bestimmten Leckgröße für das Störfallausmaß und den Eintritt eines Störfallszenarios relevant, sondern auch die Frage, innerhalb welcher Zeit ein Leckagefehler entdeckt werden kann!

Die in einschlägigen Datensammlungen aufgeführten Szenarien unterscheiden sich dabei nach Konstruktionstypen bzw. Leckageszenario.

Auch in der deutschsprachigen Literatur wird darauf hingewiesen, dass es dazu stark abweichende Angaben gibt (Vgl. Drewitz (2009)).

Tabelle 45: Szenarien für ein Behälterversagen nach (Purple Book CPR 18E)

	Spontane Freisetzung des Behälterinhaltes	Kontinuierliche Freisetzung des Behälterinhaltes innerhalb von 10 Minuten	Kontinuierliche Freisetzung über einen Leckdurchmesser von 10 mm
Druckbehälter zur Lagerung	$5*10^{-7}$ [1/a]	$5*10^{-7}$ [1/a]	$1*10^{-5}$ [1/a]
Druckbehälter mit physikalischer Umwandlung	$5*10^{-6}$ [1/a]	$5*10^{-6}$ [1/a]	$1*10^{-4}$ [1/a]
Druckbehälter mit chemischer Reaktion	$5*10^{-6}$ [1/a]	$5*10^{-6}$ [1/a]	$1*10^{-4}$ [1/a]
Druckloser einwandiger	$5*10^{-6}$ [1/a]	$5*10^{-6}$ [1/a]	$1*10^{-4}$ [1/a]

	Spontane Freisetzung des Behälterinhaltes	Kontinuierliche Freisetzung des Behälterinhaltes innerhalb von 10 Minuten	Kontinuierliche Freisetzung über einen Leckdurchmesser von 10 mm
Behälter			

Tabelle 46: Analyse der Ursachen von Leckagen in Offshore-Anlagen (HSE-Datenbasis für Offshore-Anlagen)

	Ursachen	Anzahl Leckagen	Prozentualer Anteil
Auslegungsfehler	Falsche Auslegung	321	10%
Versagen des Anlagenteils	Korrosion/Erosion Mechanischer Fehler Materialfehler Andere Fehler	277 920 76 89	40%
Bedienfehler und inkorrekte Installation	Fehler bei der Installation Bedienfehler Mechanische Beschädigung Andere Fehler	267 732 36 81	33%
Fehler in der Prozesssteuerung	Nicht Befolgen von Betriebsanweisungen Fehlerhafte Betriebsanweisungen Andere Fehler	231 323 34	17%

Die beispielhaft herangezogene Tabelle zu Ursachen von Leckagen zeigt, dass aus vorliegenden Ereignisstatistiken nicht immer verwertbare Informationen gewonnen werden können.

So ist aus der vorstehenden Statistik beispielsweise nur schwer abzuleiten, welchen Anteil unterschiedliche Fehler der Instandhaltung haben (Fehlerhafte IH-Anweisung, menschlicher Fehler im IH-Prozess). Folglich wäre es schwierig, eine Verbesserung der Instandhaltungsprozesse (z.B. durch (bessere) IH-Anweisungen, Reduzierung vom Komponententypen, Kontrollen, …) zu quantifizieren. Gleichfalls kann nicht per se auf einen Anteil leittechnikbedingter Fehler geschlossen werden (falsche Auslegung oder Fehlfunktion der Leittechnik).

Es ist also wichtig bei der Verwendung von Werten aus Datensammlungen zu verstehen, was als Leckage bzw. Versagensszenario in einer solchen Datensammlung beschrieben wird.

- Katastrophales Versagen (Auslegungs- oder Materialfehler)
- Fehler in Folge andere (nicht tankbedingter) technischer Fehler
- Leckage oder Versagen durch externe Einflüsse (z.B. Blitzschlag, Beschädigung)
- Instrumentierung am Tank (Anzeigen, Entleerungs- und Befüllungsvorrichtungen, Füllstandsmessung…)
- Sollbruchstelle oder Berstscheiben (beherrschtes oder teilbeherrschtes Szenario) vs. Beschädigung

- In die Daten einbezogene Ereignisse durch Alterungs- und Umwelteinflüsse (Korrosion, Vibration, Außentemperatur…) und Betriebsbedingungen (Vibration, Temperaturwechsel, Druck…)

Anderenfalls ist eine Schätzung auf Basis solcher Daten nur sehr ungenau, weil sie zu viele, oder zu wenige relevante Ereignisszenarien enthält.

Wie die Beispiele zeigen, ist die entsprechende Einstufung der betrachteten Elemente (Doppelwandiger Flachbodentank) im Onshore-Bereich und die Frage, welche Ursachenkategorien durch Zu- und Abschläge auf vorhandene Werte zu Eintrittshäufigkeiten zu berücksichtigen sind, trotz einfacher Ansätze verhältnismäßig komplex und die Interpretation solcher Daten kann fehlerbehaftet sein.

In der Praxis dürfte es außerdem so sein, dass in den statistisch auf Fehlern untersuchten Anlagen bereits ein bestimmtes Maßnahmenset umgesetzt wird. Die dadurch erreichte Mindestsicherheit fließt in die Statistik mit ein.

Damit sind die Ergebnisse nur dann vergleichbar, wenn auch ein ähnliches Sicherheitsniveau und eine ähnliche Instandhaltungsstrategie auf den Vergleichsanlagen existiert. Grundlegende Maßnahmen, die allgemein üblich bzw. nach allgemein anerkannten Regeln der Technik realisiert sind können damit genau genommen nicht oder nur schwer mit einer solchen Statistik begründet oder verworfen werden!

Die Kalkulationstabellen mit den abgeschätzten Eingangswerten für betriebsbedingte und umgebungsbedingte Gefahren wurden gemeinsam mit einem anlagenverantwortlichen Sicherheitstechniker der zuständigen Niederlassung entwickelt und hinsichtlich der Annahmen abgestimmt. Dazu waren für das ausgewählte Ereignis etwa 10 Stunden reiner Analyseaufwand für den Projektpartner angefallen.

Hierbei muss berücksichtigt werden, dass das Vorgehen in dieser Form noch nicht erprobt wurde, und viele Inhalte daher neu waren und erst ein Quantifizierungsansatz gefunden werden musste. Da allerdings im Konzern bereits LOPA-Analysen durchgeführt wurden, und auch bezüglich der Auslegung in Bezug auf externe Gefahrenquellen Erkenntnisse vorlagen, war dies weitgehend problemlos.

Bei der Aufstellung des Ereignisbaumes zeigte sich, dass die Maßnahmen zur Begrenzung der Auswirkungen eines LOC am LOX-Tank hinsichtlich der Wirksamkeit nur vergleichsweise grob beurteilt werden konnten.

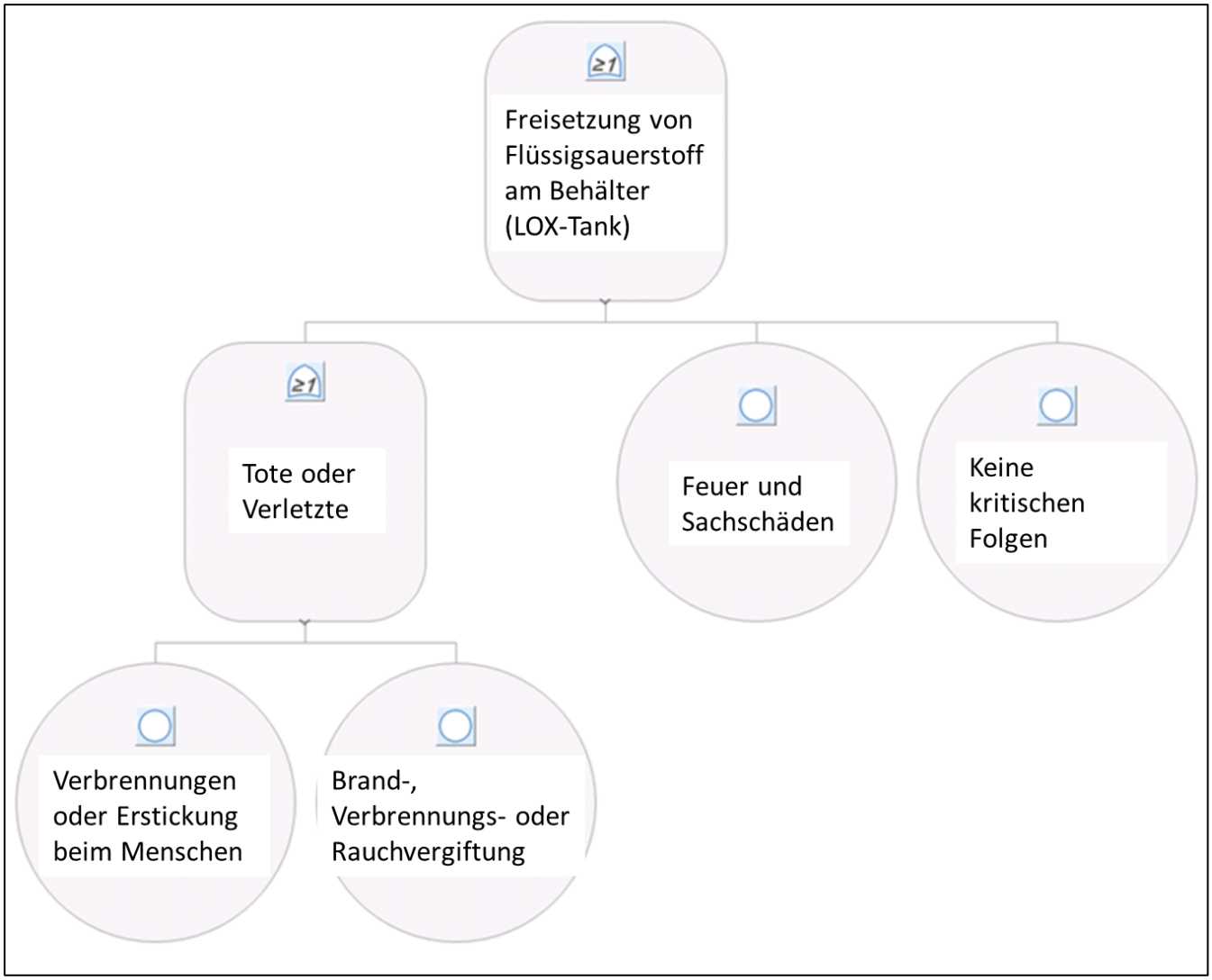
Der Ereignisbaum wurde gleichfalls mit der für die Fehlerbaumberechnung verwendeten Software RAMS-Office NG dargestellt. Dabei wurden die Eintrittshäufigkeiten für die Auswirkungen vorher gleichfalls in MS Excel berechnet.

Tabelle 47: Konsequenzen des Störfalls „Freisetzung von Flüssigsauerstoff am Behälter (LOX-Tank)“

Loss of Containment (LOX Tank)		
Konsequenz	Auftrittshäufigkeit [1/a]	Prozentsatz
Direkter Kontakt mit LOX führt zu Verbrennungen oder Erstickung beim Menschen	7,89E-05	21,7080%

Loss of Containment (LOX Tank)		
Eine hohe Sauerstoffkonzentration begünstigt eine Brand-, Verbrennungs- oder Rauchvergiftung beim Menschen	3,68E-05	10,1250%
Insgesamt erwartete Verletzungen/Unfälle	1,16E-04	31,8330%
Eine hohe Sauerstoffkonzentration begünstigt Feuer und Sachschäden	5,45E-05	15,0000%
Keine kritischen Folgen (Schutzmaßnahmen vermeiden Schäden oder Gesundheitsrisiken)	1,93E-04	53,1670%
Summe	3,63E-04	100,0000%

Abbildung 38: Ereignisbaum für die Auswirkungen der Freisetzung von Flüssigsauerstoff am Behälter (LOX-Tank) – Darstellung als Fehlerbaum in Baumansicht mit RAMS-Office NG



Quelle: IZP Dresden

Der Bereich um den Tank ist mit einem Kieselgranulat, welches durch das Oberflächenvolumen der aufgeschütteten Steine für eine rasche Verdampfung von noch flüssigem Sauerstoff bei einem Störfall sorgt. Damit wird auch das Risiko von Erfrierungen durch den kalten LOX deutlich gemindert.

Mit Ausnahme der Kiesschüttung um den Tank und der vorhandenen Sicherheitsabstände zu Brandlasten sind die anderen Maßnahmen zur Reduzierung der Auswirkungen bei einem LOC alle abhängig vom richtigen Handeln der Beteiligten im Ereignisfall und der konsequenten Umsetzung der entsprechenden Sicherheitsanweisungen.

Wegen der Brandgefahr ist der Bereich um den Tank nicht asphaltiert.

Im Ereignisfall ist vom Handeln unter Stress unter Mitwirkung mehrerer Beteiligter auszugehen, wobei sich hier negativ auswirkt, dass eine erhöhte Luftsauerstoffkonzentration durch verdampfenden LOX nicht ohne Hilfsmittel wahrgenommen werden kann. Außerdem ist die brandfördernde Wirkung des LOX handelnden Personen mit Sicherheitsunterweisung (Sauerstoffgefährdungsschulung) zwar bekannt. Risiken können aber ggf. falsch eingeschätzt wird, da meist keine praktischen Erfahrungen der handelnden Personen damit vorliegen dürften und im Gefahrfall am Brandherd wenig Zeit zur Überlegung verbleibt.

Das von Risiko von menschlichen Fehlern liegt in solchen Fällen nahe 1 (s. Bewertungstabelle im vorangegangenen Abschnitt)!

Durch den Einbezug von Ausbreitungsrechnungen und der genauen Bereichspläne könnten diese Aussagen selbstverständlich noch genauer spezifiziert bzw. untermauert werden.

Eine Situation, wie das Neubefüllen eines Tankes (Ereignisszenario: LOX filled into warm tank), dürfte verstärkt dann auftreten, wenn auf der Anlage in größerem Umfang Arbeiten stattfinden bzw. stattgefunden haben. In einem solchen Fall ist nicht auszuschließen, dass Brandlasten oder Zündquellen temporär in den Bereich innerhalb der Sicherheitsabstände eingebracht werden (z.B. Werkzeuge und Material für Bau- und Instandhaltungsarbeiten).

Allerdings sind hierfür im Bereich des Sicherheitsmanagements bereits Vorkehrungen getroffen: Arbeiten im Betriebsbereich dürfen grundsätzlich nur mit Genehmigung des Anlagenverantwortlichen stattfinden und alle Arbeiten, welche eine Brandgefahr nach sich ziehen bedürfen einer besonderen Genehmigung („hot work permit“).

Insgesamt kann nur in einem Teil der Fälle davon ausgegangen werden, dass alle Beteiligten durch richtiges Reagieren Brände und Verletzungen bzw. Tote verhindern, auch dann, wenn sie entsprechend geschult und ausgerüstet sind.

Als schwierig erwies es sich, dass Zusammenwirken der Schulungsmaßnahmen und der persönlichen Schutzausrüstung (insb. Gasdetektor) zu quantifizieren. Hier wurde davon ausgegangen, dass der Gasdetektor durch die technisch ausgelöste Warnung einen höhere Sicherheitsbeitrag leistet, als die Schulung zum Verhalten nach einem erkanntem Gasaustritt (sog. Sauerstoffgefährdungsschulung). Der Gasdetektor wird zudem bei sachgemäßer Anwendung entsprechend der Arbeitsschutzvorschriften außen am Körper getragen, so dass eine relativ hohe Detektionswahrscheinlichkeit besteht.

Situationen, wie das Neubefüllen eines Tankes treten vor allem dann auf, wenn auf Anlagen gerade in größerem Umfang Arbeiten stattfinden. In einem solchen Fall könnten erhöhte Expositions- und Brandrisiken vorliegen, oder ggf. Personen ohne (ausreichende) Erfahrungen Sicherheitsrisiken falsch einschätzen (selbst wenn sie eine entsprechende Schulung erhalten).

Aus den oben genannten Gründen kommt die Schätzung insgesamt zu dem Ergebnis, dass für das untersuchte „Loss of Containment“ Ereignis in ca. 2/3 der Fälle die getroffenen auswirkungsbegrenzenden Maßnahmen ausreichen, um Tote und Verletzte zu verhindern.

Durch den Einbezug von Ausbreitungsrechnungen und der genauen Bereichspläne könnten diese Aussagen selbstverständlich noch genauer spezifiziert bzw. untermauert werden, da dann die Zündwahrscheinlichkeit ggf. besser eingeschätzt werden kann.

Umgebungsbedingte Einflüsse können auch andere Anlagenteile treffen oder gleichzeitige Schäden verursachen (sog. Common-Cause-Ereignisse), was bei der Aufstellung des Fehlerbaumes im vorliegenden Beispiel nicht berücksichtigt wurde. Ausschlaggebend für diese Entscheidung war, dass der Tank nach Einschätzung des Sicherheitsingenieurs des Praxispartners auch bei einem länger andauernden Stromausfall nicht in einen kritischen Zustand kommt.

Der langsame Temperaturanstieg würde zu einem „ausköcheln“ über die Sicherheitsventile bzw. das federgeregelte Druckregelventil (PV7106.2) in der „vent line“ führen.

Nach Auskunft des Sicherheitsingenieurs des Betreibers ist bei einem LOC nach den vorhandenen Ausbreitungsrechnungen nicht von Auswirkungen (d.h. Brandförderung bei vorhandener Zündquelle oder Erstickung durch erhöhte Luftsauerstoffkonzentration) durch das Verdampfen des freigesetzten LOX außerhalb des Betriebsbereiches auszugehen. Daher wurde dies im Ereignisbaum auch nicht berücksichtigt.

5.2.3.3.1.2 Erkenntnisse bezüglich Anlagensicherheit der betrachteten Anlage

Die quantitative Analyse offenbart, dass die Fehler, welche einen Überdruck in inneren Tank produzieren, deutlich wahrscheinlicher sind als Fehler, die durch eine Verringerung der Isolationsfähigkeit entstehen. Während die technischen Schutzeinrichtungen, bedingt durch die Erfahrungen des Betreibers, zu kleinen Eintrittswahrscheinlichkeiten führen, sind die Prozesse, an denen Menschen beteiligt sind, ungleich unzuverlässiger.

Die Analyse ergab eine Eintrittshäufigkeit von 3,63E-04 Ereignissen pro Jahr für das Szenario „Loss of Containment LOX Tank“.

Im Ergebnis verbleibt (bei einer konservativen Einschätzung) damit eine Eintrittshäufigkeit von 1.33E-04 Ereignissen mit Toten und Verletzten Personen pro Jahr.

Der Vergleich mit in der Praxis angewendeten Risikoakzeptanzmatrizen (Auswertung Sicherheitsberichte und Fachliteratur, z.B. Preiss, Stuckl (2017)) zeigt, dass das ermittelte Risiko für das Störfallszenario noch im akzeptablen bzw. tolerierbaren Bereich läge.

Die vom Praxispartner verwendete Risikoakzeptanzmatrix wurde diesbezüglich nicht eingesehen, allerdings wurde bestätigt, dass ein Risiko in solcher Höhe noch als tolerabel gilt. Damit wäre man in einem Bereich, in dem man in der Pflicht steht, weitere Maßnahmen zu finden und zu begründen.

Diesem Ergebnis gegenüber steht allerdings die Verwendung eher konservativer Werte für das strukturelle Versagen des Behälters (ohne differenzierte Betrachtung der Ursachen für die als Eingangswert herangezogene Zahl). Gleichfalls sind menschlicher Fehler (auch bei der Instandhaltung) und umweltbedingter Gefahrenquellen quantifiziert worden, welche bei der klassischen LOPA-Analyse nicht zum Ansatz kommen.

Aus den in der Analyse behandelten Themen bzw. den Ergebnissen wurden folgende Fragen abgeleitet, die zur Verbesserung des Standes der Sicherheitstechnik beitragen könnten.

- Kann die Befüllung eines unzulässig warmen Tankes durch weitere technische oder organisatorische Maßnahmen verhindert werden oder reichen die bislang etablierten und definierten Betriebsprozesse für „Entleeren“, „cool-down“ und „start-up“ dafür aus?
- Ist die Mitführung von Gasdetektoren bei den an der Anlage Beschäftigten geeignet, um eine ausreichende Diagnosesicherheit bei Störfällen zu gewährleisten und die in den Alarm- und Gefahrenabwehrplänen vorgesehenen auswirkungsbegrenzenden Maßnahmen einzuleiten?
- Reichen die im Rahmen der Sauerstoffgefährdungsschulung vermittelten Kenntnisse aus, um im Ereignisfall ausreichend schnell und besonnen zu reagieren? Wurde die Reaktion der Beteiligten im Alarmfall durch Übungen getestet?

Da im Rahmen der Fallstudien weder das Sicherheitsmanagement, Alarm- und Gefahrenabwehrpläne noch die realisierten örtlichen Gegebenheiten im Betriebsbereich im Detail geprüft werden sollten sind dies jedoch zunächst Anregungen, die an den Betreiber weitergegeben wurden.

5.2.3.3.2 Luftzerlegungsanlage 2 (LOX-Drucktank)

Luftzerlegungsanlage 2 wurde vom Betreiber 7 Anfang der 2020er Jahre für einen Metallurgiebetrieb in Ostasien geplant, geliefert und errichtet.

Die Luftzerlegungsanlage 2 besitzt einen Drucktank mit einem Fassungsvermögen von 105 m^3 zur Speicherung von Flüssigsauerstoff. Der kältere, innere Tank wird durch das Vakuum zwischen äußerem und innerem Tank isoliert. Der Betriebsdruck beträgt 0,2 bar Atmosphärenüberdruck (also etwa 1,2 bar gesamt).

Betrachtet wurden der LOX Tank (D7131) inkl. der Tankwagen-Füllpumpe P7167 und den dazugehörigem Druckhaltekreislauf sowie den externen Befüll-Leitungen für den Tank.

Bei einem Verlust des Vakuums durch eine Beschädigung der äußeren Tankhülle geht die Isolationswirkung verloren, so dass es im inneren Tank zu einem Druckanstieg infolge der Erwärmung des Flüssigsauerstoffes kommen kann. Das isolierende Vakuum bleibt kontinuierlich bestehen (Wiederherstellung wäre über den das Vakuum-Kontrollventil 7131.V möglich).

Ein Verlust des Vakuums kann durch die Sicherheitsventile sowie Füllstands- und Druckregelung abgefangen werden (Versagen des Ventils 7131.V bzw. Materialfehler am äußeren Tank), da die Erwärmung nicht schlagartig erfolgt.

Der Tank ist sowohl vom Luftzerleger (from plant; Normalfall), als auch von mobilen Fahrzeugen befüllbar (from truck).

Der Überdruck im Tank wird über einen Druckaufbau-Verdampferkreislauf (Verdampfer E7117) und das Druckregelventil PV7131.1 geregelt, welcher zusammen mit dem eigentlichen Tank mit betrachtet wurde. Die beiden Sicherheitsventile PSV7117.1/PSV7117.2 verhindern einen zu hohen Druck im Verdampferkreislauf.

Entsprechend niedrig wären die Eintrittswahrscheinlichkeiten für ein Behälterversagen.

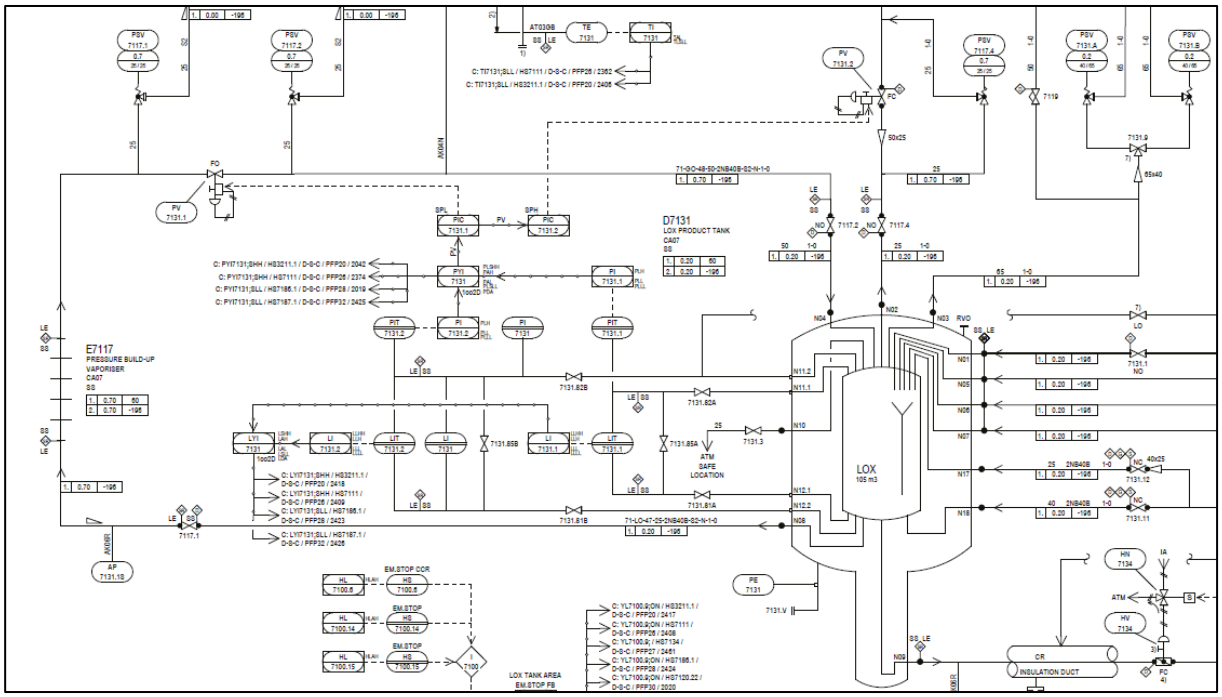
Bei einer Überfüllung des Tankes (wobei eine Füllstandsüberwachung eingebaut ist, welche den LOX Zufluss stoppt; LAH7131/LSHH7131) käme es zum Austritt von LOX über die Entlüftung (Vent stack; links oben im P&ID Auszug).

Sollte das Ventil 7131.36 offen stehen (manuell betätigt; nicht auf dem P&ID Auszug erkennbar), wäre die Überfüllung des Entleerungsbehälters (E7160, steingefüllter Edelstahlbehälter,

bezeichnet als Drain Pit) denkbar. Auch in diesem Fall käme es zum Austritt von Flüssigsauerstoff, wofür die vorhandene Sauerstoffabblasung des Drain Pits nicht ausgelegt wurde (keine Safe Location für diesen Fall).

Diese beiden Szenarien, und der Einschluss von LOX in den Rohrleitungsabschnitten (P7131.31 und 7117.1, 7117.2 bzw. HV 7111) können zu einer lokalen Freisetzung von Flüssigsauerstoff führen.

Abbildung 39: Auszug aus dem P&ID für den vakuumisolierten Drucktank



Quelle: Eigendarstellung Betreiber 7

5.2.3.3.2.1 Vorgehensbeschreibung und Ergebnisse

Für die Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit wurden die bereits für die erste Luftzerlegungsanlage entwickelten Bewertungstabellen (MS Excel; s.a. Beispiele aus der Bewertung der ersten Anlage in Tabelle 40, Tabelle 41, Tabelle 42, Tabelle 43) weiterverwendet und in der Moderation mit dem verantwortlichen Sicherheitsingenieur des Projektpartners mit Inhalten gefüllt. Aus Aufwandsgründen wurde auch die Berechnung der Sicherheitskreise hilfsweise übernommen, ohne diese auf neue Ausfallraten für spezifische an der Anlage verwendete Bauteile zu stützen.

Gleichfalls wurden alle quantitativen Ansätze (CCPS LOPA Guidelines (Vgl. CCPS (2015)) bzw. NPRD-95 für die Anrechnung von Barrieren und Ausfallwahrscheinlichkeit von Ventilarten) in ähnlicher Weise verwendet. Auch der Ansatz für die Berücksichtigung menschlicher Fehler und von umweltbedingten Ereignissen wurde erneut in ähnlicher Weise wieder verwendet.

Die störfallvermeidenden Barrieren wurden mit demselben Ansatz bewertet, wie bei der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Analyse beim Flachbodentank.

Bedingt durch den höheren Betrachtungsumfang war die Anzahl der Fehlermöglichkeiten und damit der Kalkulationstabellen für Elementarereignisse im Fehlerbaum auch entsprechend höher (vgl. Tabelle 40: Erstellte Kalkulationsblätter für FTA/ETA-Analyse in Abschnitt 5.2.3.3.1.1).

Die Berechnung des Fehlerbaumes und die grafische Darstellung des Ereignisbaumes erfolgte erneut in RAMS-Office NG.

Abbildung 40: Fehlerbaum LOC LOX (Drucktank) – Listenansicht in RAMS-Office NG

Fehlerbaum (Listenansicht)	Elementtyp	Auftretens-häufigkeit [1/a]
- ≥1 Freisetzung von Flüssigsauerstoff am Behälter (LOX-Tank)	ODER-Gatter	1,99E-03
Tankmaterialfehler (Innentank)	Elementar-ereignis	1,00E-04
- ≥1 Freisetzung von Flüssigsauerstoff über den Abluftkamin 71-GO-51	ODER-Gatter	7,42E-05
Überfüllung (durch Anlage)	Elementar-ereignis	3,29E-04
Überfüllung (durch LKW)	Elementar-ereignis	2,97E-05
- ≥1 Freisetzung von LOX an der Abflussgrube	ODER-Gatter	0,00E+00
7131.36 ungewollt offen	Elementar-ereignis	4,05E-05
- ≥1 Auslegungsdruck des LOX-Tanks überschritten	ODER-Gatter	3,50E-04
Kritischer Fehler während des LOX-Füllvorgangs	Elementar-ereignis	2,50E-05
- ≥1 Erhöhter Wärmeeintrag aus der Umgebung	ODER-Gatter	2,19E-06
7131.V/Außentank undicht	Elementar-ereignis	5,44E-07
Pumpenbypassventil 7166.3 vollständig geöffnet	Elementar-ereignis	1,65E-06
Tankmaterialfehler Außentank	Elementar-ereignis	1,00E-09
- ≥1 Überdruck	ODER-Gatter	3,40E-04
Überdruck vom LKW	Elementar-ereignis	9,90E-06
PV7131.1 vollständig geöffnet	Elementar-ereignis	1,65E-04
PV7131.2 geschlossen	Elementar-ereignis	1,65E-04

Fehlerbaum (Fortsetzung von der vorherigen Seite)	Elementtyp	Auftretens-häufigkeit [1/a]
- ≥1 Unerwünschter LOX-Rückfluss zum Tank	ODER-Gatter	8,14E-06
Trip der Backup-Pumpe P7166	Elementar-ereignis	4,07E-06
Trip der Fülltankpumpe P7167	Elementar-ereignis	4,07E-06
- ≥1 Auslegungsdruck des Rohrabschnitts überschritten	ODER-Gatter	2,83E-07
- ≥1 Höherer Druck in der LOX-Leitung zum Tank	ODER-Gatter	2,82E-07
- & LOX-Leitung zum Tank zwischen 7131.1 und HV7111 blockiert	UND-Gatter	2,82E-07
7131.1 geschlossen	Elementar-ereignis	1,68E-04
HV7111 geschlossen	Elementar-ereignis	1,65E-03
- ≥1 Höherer Druck im Druckaufbaukreislauf	ODER-Gatter	1,34E-09
- & Druckaufbauschleife zwischen 7117.1 und PV7131.1 blockiert	UND-Gatter	6,72E-10
7117.1 geschlossen	Elementar-ereignis	4,00E-06
PV7131.1 geschlossen	Elementar-ereignis	1,68E-04
- & Druckaufbauschleife zwischen 7117.2 und PV7131.1 blockiert	UND-Gatter	6,72E-10
7117.2 geschlossen	Elementar-ereignis	4,00E-06
PV7131.1 geschlossen	Elementar-ereignis	1,68E-04
Schäden aufgrund äußerer Ursachen	Elementar-ereignis	1,12E-03

Quelle: IZP Dresden

Im Ergebnis wurde mit der Fehlerbaumanalyse die Eintrittswahrscheinlichkeit eines LOC-Ereignisses mit etwa 2 Ereignissen pro 1000 Jahre ermittelt (1,99E-03 Ereignisse pro Jahr).

Hinsichtlich der Aussagekraft der Ergebnisse sei auf die Diskussion in Abschnitt 5.2.3.3.4 verwiesen.

Bedingt durch die komplexere Bauform mit mehr (automatisch) wirksamen Sicherheitsbarrieren im Fehlerfall ist der Anteil umweltbedingter Ereignisse an der Eintrittswahrscheinlichkeit umweltbedingter Ereignisse an den ursächlichen Fehlerquellen hoch (1,12E-03 umweltbedingte Ereignisse pro Jahr, entspräche einem Anteil von 56% an den prognostizierten Ereigniswahrscheinlichkeiten für den Eintritt eines Störfallszenarios).

Außerdem hat auch hier der konservativ geschätzte Wert für das Tankversagen des inneren Tankes aufgrund von Materialfehlern eine signifikante Höhe (entspräche einem Anteil von ca. 10% der Ereignisse).

Bei der Aufstellung des Ereignisbaumes wurde im Gegensatz zur Analyse am Flachbodentank berücksichtigt, dass nicht für alle Ereignisse dieselben Wirkungszusammenhänge gelten. Im Falle der Überfüllung (Vent Line oder Drain Pit) bzw. des Druckanstieges durch Erwärmung in Rohrleitungsabschnitten, welche (unzulässigerweise bzw. durch Defekte) abgesperrt sind, tritt nicht der gesamte Tankinhalt aus. Damit ist vor allem das Risiko von Bränden bei Vorhandensein einer Zündquelle wesentlich geringer.

Daher wurden zwei Ereignisszenarien aufgestellt, denen die Ereignisse im Fehlerbaum jeweils zugeordnet wurden („Catastrophic Incident“ und „Incident“ – s. Darstellung des Ereignisbaumes in Abbildung 41 und Tabelle 49).

Hinsichtlich der umweltbedingten Gefahrenquellen wurde vereinfacht angenommen, dass diese sich zu gleichen Teilen (50%) auf die beiden Szenarien auswirken.

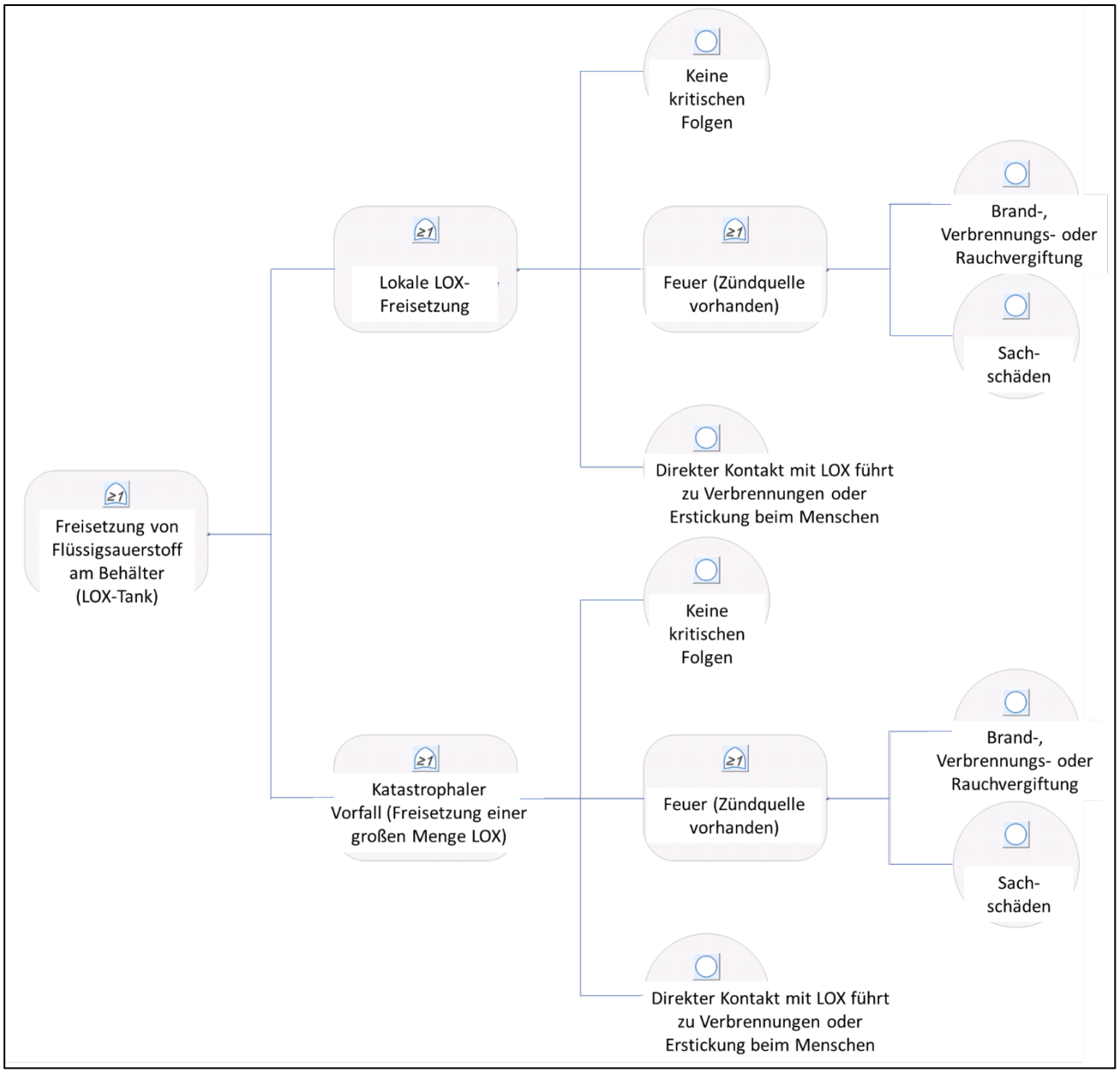
Die ausmaßreduzierenden Barrieren wurden mit demselben Vorgehen wie in der Analyse des Drucktankes ermittelt und hinsichtlich ihres Beitrages zur Ausmaßminderung bewertet, allerdings unterscheidet sich die Experteneinschätzung hinsichtlich der Wirksamkeit der Barrieren teilweise (Beispiel s. folgende Tabelle).

Tabelle 48: Auszug aus der Bewertung der ausmaßreduzierenden Barrieren (Katastrophaler Vorfall) am Beispiel „Tod oder Verletzungen durch Verbrennungen durch LOX-Kontakt oder Erstickung“

Barriere	Barrieretyp	Gesch. Risiko-reduk-tion	Beschreibung der Barriere	Erklärung der Wirksamkeit	Risiko-Ein-gang [1/h]	Risiko-Aus-gang [1/h]
Pflasterung	inhärenter Schutz	60%	Eine Pflasterung mit Kiesbett fördert die Verdampfung von LOX und verringert somit das Risiko von Verbrennungen oder Erstickungen	alle Menschen innerhalb der Gefahrenzone	1,1814E-07	4,7254E-08
Persönlicher Gasdetektor	persönliche Schutzaus-rüstung	33%	Persönlicher Gasdetektor als Schutz- und Warngerät für hohe	Betriebspersonal, Tankwagenfahrer und Schichtleiter mit Gaswarngerät	4,7254E-08	3,1660E-08

Barriere	Barrieretyp	Gesch. Risiko-reduk-tion	Beschreibung der Barriere	Erklärung der Wirksamkeit	Risiko-Ein-gang [1/h]	Risiko-Aus-gang [1/h]
			Konzentrationen an verdampftem LOX			
Arbeits-schutzunter-weisung zu LOX-Gefahren (inkl. visuelle Wahr-nehmung)	Persönliche Schulung und Anleitung	80%	Sicherheitshinweise zu LOX/OX-Gefährdungen für Betriebspersonal, Besucher und externe Mitarbeiter; LOX-Emission ist sichtbar	Betriebspersonal, Tankwagenfahrer und Schichtleiter, externe Arbeiter und Besucher, die über angemessenes Verhalten in der Situation informiert und informiert sind und Gefahrenbereiche meiden dürfen – verdampfte Flüssigkeit ist möglicherweise nicht sichtbar/riechbar	3,1660E-08	6,3321E-09
Schutzk-leidung	persönliche Schutzaus-rüstung	10%	Persönliche Schutzausrüstung verringert die Verbrennungsgefahr im Brandfall	Sämtliches Bedienpersonal mit Schutzkleidung. inkl. Risiko der Selbsterkenntnis (z. B. Rauchen oder Gebrauch von Werkzeugen nach dem Passieren eines Bereichs mit hoher LOX-Konzentration)	6,3321E-09	5,6989E-09
					Wahr-schein-lichkeit der kri-tischen Ereignis-folge pro Jahr [1/a]:	4,9922E-05

Abbildung 41: Ereignisbaum (Grafische Darstellung in RAMS-Office NG)



Quelle: IZP Dresden

Nach dem verwendeten Modellansatz und der Bewertung der Auswirkungsszenarien dabei beide Auswirkungsszenarien („Incident“ und „Catastrophic Incident“) etwa als gleich wahrscheinlich anzusehen (s. folgende Tabelle 49).

Etwa 2/3 der katastrophalen Ereignisse (Catastrophic Incident), bei denen große Mengen bzw. der gesamte Tankinhalt freigesetzt wird und mehr als 3/4 der Ereignisse (Incident with local LOX release), bei denen deutlich kleinere Mengen LOX entweichen können, würden nach dem Modellansatz ohne Folgen für die Gesundheit von Menschen und Brandereignisse bleiben (d.h. die katastrophale Störfallauswirkung tritt nicht ein). Insgesamt dürfte damit rechnerisch etwa jedes 3. - 4. Störfallereignis (ca. 29%) zu nennenswerten Sach- oder Gesundheitsschäden führen.

Dieses Ergebnis zeigt, dass im Rahmen der Bewertung der Genehmigungsfähigkeit von Anlagen eine hinreichend begründete und genaue Betrachtung der einbezogenen

Wirkungszusammenhänge (Zuordnung der Elementarereignisse zu Auswirkungsszenarien und Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit der Fehlerfolgen) notwendig ist.

Es wurde von den Praxispartnern in beiden Fällen eingeschätzt, dass aufgrund der lokalen Gegebenheiten bei beiden Betriebsbereichen keine Auswirkungen außerhalb des Betriebsbereiches zu erwarten sind.

Tabelle 49: Quantitative Ergebnisse der Ereignisbaumanalyse (Stofffreisetzungsszenario LOX Drucktank)

Konsequenz	Auftrittshäufigkeit – Stofffreisetzungs-szenario Gesamt [1/a]	Auftrittshäufigkeit - Szenario eines katastrophalen Vorfalles [1/a]	Auftrittshäufigkeit – Szenario eines Vorfalles mit lokaler LOX-Freisetzung [1/a]
Direkter Kontakt mit LOX führt zu Verbrennungen oder Erstickung beim Menschen	1,57E-04	1,05E-04	5,18E-05
Eine hohe Sauerstoffkonzentration begünstigt eine Brand-, Verbrennungs- oder Rauchvergiftung beim Menschen	6,94E-05	4,99E-05	1,94E-05
Ereignisse mit erwarteten Verletzungen/Unfällen	2,26E-04	1,55E-04	7,12E-05
Eine hohe Sauerstoffkonzentration begünstigt Feuer und Sachschäden	1,22E-04	5,45E-05	6,72E-05
Keine kritischen Folgen (Schutzmaßnahmen vermeiden Schäden oder Gesundheitsrisiken)	1,42E-03	6,71E-04	7,50E-04
LOX-Freisetzung am LOX-Tank - Gesamt	1,99E-03	1,03E-03	9,59E-04

Die Analyse konnte auf einem vorbereiteten Bewertungsverfahren für die Einschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit der betriebs- und umgebungsbedingten Ereignisse bzw. der menschlichen Fehler aufbauen, dass für die Analyse des Flachbodentankes entwickelt wurde. Dennoch ist der Aufwand auch hier erheblich gewesen (mehr als 10 Stunden reine Analysezeit).

Dieser Aufwand wurde auch hier vom beteiligten Sicherheitsingenieur als zu hoch angesehen, und ist damit nur im begründeten Einzelfall leistbar.

5.2.3.3.2.2 Erkenntnisse bezüglich Anlagensicherheit der betrachteten Anlage

Die Risikomatrix des Betreibers lag nicht vor, allerdings ist aus der Fachliteratur (Auswertung Sicherheitsberichte und Fachliteratur, z.B. Preiss, Stuckl (2017)) zu entnehmen, dass ein Risiko dieser Größenordnung seitens des Betreibers im tolerierbaren Bereich liegt .

Dies würde für das betrachtete Beispiel praktisch bedeuten, dass das Ausbleiben weiterer Maßnahmen begründet werden müsste.

Aufgrund

- des hohen Anteiles an umweltbedingten Gefährdungen, deren Einfluss auf die Anlage im Rahmen einer einfachen Fehlerbaumanalyse nur grob abzuschätzen ist,
- der im Rahmen einer solchen Analyse nicht im Detail betrachtbaren Wirksamkeit der Prozeduren aus Alarm- und Gefahrenabwehrplänen (wie z.B. Tragen des Gasdetektors) auf die auch die im Betriebsbereich praktisch etablierte Sicherheitskultur Einfluss hat, und
- der konservativen Höhe des Ansatzes für ein Versagen des inneren Tankes (s. Tabelle 45 und Tabelle 46 im vorangegangenen Kapitel 191)

sind aus der quantitativen Analyse keine direkte Schlussfolgerungen auf einzelne Sicherheitsmängel im Design der Anlage möglich, aus welchen sich Maßnahmeempfehlungen ergeben.

Wie auch schon bei der Analyse der ersten Luftzerlegungsanlage konstatiert, hängt die Wahrscheinlichkeit der Brandentstehung wesentlich von der Anwesenheit von Zündquellen im Bereich der Sauerstofffreisetzung ab.

Im Rahmen der Alarm- und Gefahrenabwehrplanung sollte daher (analog zur ersten Luftzerlegungsanlage) geprüft werden:

1. Wie wird mit vorhandenen und möglichen eingebrachten Zündquellen im Betriebsbereich umgegangen (z.B. „hot work permit“)?
2. Ist sichergestellt, dass die Gasdetektoren allen Personen im Bereich funktionsfähig zur Verfügung stehen und in der Praxis auch getragen werden?
3. Sind alle Personen, die sich im Betriebsbereich befinden, in ausreichendem Maße über das Verhalten bei Eintritt eines Störfalles unterwiesen und haben Sie dieses Verhalten ggf. auch trainiert?

5.2.3.3.3 Parallele Ereignisauswertung der ZEMA-Datenbank

Begleitend zur Untersuchung wurde die ZEMA Datenbank in Bezug auf passende meldepflichtige Ereignisse untersucht (Ereignisart und Stoffmengen).

Die Untersuchung erfolgte durch Auswahl einer kleinen Referenzstichprobe an Ereignissen mit Luftzerlegungsanlagen und Tanks.

Hierbei sollten drei Ziele verfolgt werden:

- Lernen in Bezug auf Betriebsweisen und real aufgetretene Fehler sowie deren Ursachen
- Gegencheck auf zu untersuchende interne und externe Ursachen aufgrund der Erfahrungen mit meldepflichtigen Ereignissen an vergleichbaren Anlagen bzw. deren Betriebsweisen
- Eindruck vom an der untersuchten Anlage realisierten Stand der Sicherheitstechnik im Vergleich zu Bestandsanlagen

Tabelle 50: Herangezogene Ereignisse aus der ZEMA-Datenbank

Bezeichnung (ZEMA)	Einstufung	Datum	Ursache (ZEMA Exzerpt)	Maßnahmen (ZEMA Exzerpt)
2007-09-10 Freisetzung von flüssigem Sauerstoff in einer Luft-zerlegungs-anlage	Einstufung Anhang VI Teil1: III	10.09.2007	Am 10.09.2007 kam es bei einer Demontage eines Antriebes einer Absperrklappe in der Luftzerlegungsanlage zu einer Freisetzung von ca. 10.000 kg flüssigem Sauerstoff.	Konstruktionsänderung Absperrklappe durch Hersteller. Der Betreiber erarbeitet zusätzliche Maßnahmen zur Ausbreitungsminimierung von tiefkaltem Sauerstoff bei Leckagen.
0125 (2001-12-31) Freisetzung von Sauerstoff und anschließendem Brand in einer Luftzerlegungsa nlage)	Einstufung Anhang VI Teil1: I 2a	31.12.2001	Stellungsrückmeldung ohne Endlagen-überwachung Einbindung der Leittechnik in Verbindung mit Vereisung eines Spülventils	Vorkehrungen zur Vermeidung: - Einbau einer Endlagenüberwachung für das Spülventil. Dadurch wird die tatsächliche Stellung des Ventils überwacht und auf dem Überwachungsmonitor angezeigt. - Änderung der Abblaseleitung für die Druckluft zur Steuerung des Spülventils. Die Öffnung der Abblaseleitung wurde so ausgelegt, dass ein Einfrieren nicht mehr möglich ist und die Druckluft nach dem Schließsignal entweichen kann und das Ventil korrekt schließt. Vorkehrungen zur Begrenzung: - Aufbau einer Überwachung der Sauerstoffkonzentration innerhalb des Betriebsbereiches. Die Sauerstoffkonzentration soll sowohl im Außenbereich, wie auch innerhalb des Gebäudes überwacht werden. Bei Über- oder Unterschreiten der festgelegten Grenzwerte wird von der Überwachungseinrichtung ein Alarm ausgelöst. Dieser Alarm wird auf dem Überwachungsmonitor für die Anlagenfahrer optisch angezeigt und akustisch signalisiert. Für Mitarbeiter im Außenbereich und Fahrer, die sich auf dem Gelände befinden erfolgt eine entsprechende Alarmierung, so dass auch hier erkennbar ist, wenn die Grenzwerte nicht eingehalten werden. Eine Anzeige wird auch am Einfahrtstor der Anlage angebracht, so dass Fahrer von Fahrzeugen, die in den Betriebsbereich einfahren wollen, gewarnt werden. Für die Mitarbeiter erfolgt eine entsprechende Schulung, welche Maßnahmen bei Auslösung der Überwachungseinrichtung erforderlich sind.

Bezeichnung (ZEMA)	Einstufung	Datum	Ursache (ZEMA Exzerpt)	Maßnahmen (ZEMA Exzerpt)
				- Einbau eines Windmessers im Bereich der Tanks
2019-09-05 Freisetzung von Ethanol an einem Außentank in einem Tanklager	Einstufung Anhang VI Teil1: III	05.09.2019	Bedienfehler (falsche Maßnahme) Eine Überfüllmeldung wurde angezeigt, jedoch fälschlicherweise als Störung interpretiert. Überfüllmeldung wurde fälschlicherweise quittiert und Verpumpung fortgesetzt	Vorkehrungen zur Vermeidung: Schulung der Mitarbeiter. Anpassung von Arbeitsanweisungen. Anbringung einer Überfüllleitung an die zentrale Abluftreinigungsanlage (Ableitung in WHG Wanne); zusätzliche Auslösung Pumpenstopp Tanklager bei Störung der Abluftreinigungsanlage
0202 (2002-01-04 Aufreißen eines Tankdaches in einem Tanklager)	Einstufung Anhang VI Teil1: II	04.01.2002	Verdampfung beim Spülen eines Tankes mit Niederdruckdampf und kaltem Außentemperaturen Weiterhin hat sich bestätigt, dass die Über-/Unterdruckarmatur infolge der Frosteinwirkung nicht bestimmungsgemäß geöffnet hat (ca. -19 °C Außentemperatur).	Auszug: Sicherheitsrelevante Messungen sind nicht mehr über die Auswerteeinheit zu führen, sondern dürfen nur noch im PLS verarbeitet werden Die Funktionsfähigkeit der Armaturen ist durch regelmäßige Kontrollen bei Temperaturen unter 0 °C sicherzustellen. Zu überprüfen ist, ob ein Einsatz beheizter Armaturen erforderlich ist. In diesem Zusammenhang sind die geeigneten Maßnahmen zur Funktionssicherung und Funktionserprobung in Abstimmung mit dem Hersteller der Armaturen zu veranlassen. Bei Tanks, die im Normalbetrieb auf mindestens 50 °C beheizt werden, ist eine Vereisung der Über-/Unterdruck-Armaturen nicht wahrscheinlich. Deshalb soll für besondere Betriebszustände, wie bei Ausfall der Tankheizung, Anfahrbetrieb nach Reparatur, die Funktionssicherheit der Über-/Unterdruck-Armaturen durch den Betreiber sichergestellt werden. Die dazu erforderlichen Maßnahmen sind in der Betriebsvorschrift zu dokumentieren. Für andere nicht beheizte Tanks wird ein Austausch bzw. eine Ausstattung mit frostsicheren Über-/Unterdruck-Armaturen für notwendig erachtet und ist realisiert worden

Bezeichnung (ZEMA)	Einstufung	Datum	Ursache (ZEMA Exzerpt)	Maßnahmen (ZEMA Exzerpt)
2021-04-16 Sauerstoffausbrand mit Stofffreisetzung an einer Vakuumpumpe einer Sauerstofffüllanlage	Einstufung Anhang VI Teil1: III	16.04.2021	Fehlfunktion des Vakuumventiles, mechanische Fehlfunktion, die Ventilstellung (Endlage) war nicht in der SPS Steuerung eingebunden, somit keine Rückmeldung der tatsächlichen Endlage an die Steuerung. Dadurch gelangte verdichteter Sauerstoff über ein Mediumventil direkt bis zu einer im Keller installierten Vakuumpumpe. Am geöffneten Kugelhahn des saugseitigen Eingangs der Vakuumpumpe löste dann der Sauerstoffdruckstoß den Sauerstoffausbrand aus.	Vorkehrungen zur Vermeidung: Es muss eine Überwachung der Ventil-Endlage stattfinden. U. a. durch: a. Vorhandene Endlagen-Schalter sind in die Anlagesteuerung zu integrieren. b. Die Steuerung ist so zu programmieren, dass das Medienventil erst geöffnet wird, wenn die Endlagen der Ventile der Vakuumleitung und der Entspannungsleitung gesichert sind. (gegenseitige Verriegelung). c. Verriegelung der Vakuum-Ventile gegen Überschreitung des Druckes am Füllstand über 1,5 bar (Schließen des Vakuumventiles und der Standventile). Diese oben beschriebenen Maßnahmen werden auch bei vergleichbaren Abfüll-Anlagen für technische und medizinische Gase in den Werken des Betreibers umgesetzt. Vorkehrungen zur Begrenzung: Die Lehren aus diesem Ereignis zeigen, dass für sicherheitsrelevante Stellglieder eine Positionsrückmeldung an das Steuerungssystem erforderlich ist. Die Tatsache, dass ein Steuerungsbefehl abgegeben wird, dafür, dass ein Ventil geschlossen werden soll, bedeutet nicht, dass diese Aufgabe stets zu Ende durchgeführt wird. Daher wird ein Endschalter benötigt, um dem Steuerungssystem zu melden, dass der nächste Schritt sicher ausgeführt werden kann. Diese Lehre ist nicht nur für Anlagen zum Umgang mit technischen Gasen relevant, sondern ist ein wichtiger Grundsatz für alle Anlagen, die mit einem automatischen Prozesssteuerungssystem arbeiten.

5.2.3.3.3.1 Vergleich mit den realisierten Maßnahmen (LOX-Flachbodentank)

Den Maßnahmen, welche in Folge der analysierten ZEMA-Ereignisse getroffen wurden, wurde abschließend die realisierten Maßnahmen in der Sicherheitstechnik der Vergleichsanlage der Fallstudie LOX Flachbodentank gegenübergestellt.

Tabelle 51: Gegenüberstellung von Maßnahmen aus den Ereignissen und dem an der Anlage realisierten Stand der Sicherheitstechnik (LOX-Flachbodentank)

Maßnahmen aus Ereignissen mit vergleichbaren Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen	Umsetzung an analysierter Anlage
Endlagenüberwachung im Prozess betätigter sicherheitsrelevanter Ventile	Endlagenüberwachung für PV 7106.1/2 als Maßnahme aus HAZOP umgesetzt
Stationäre Überwachungseinrichtung und Alarmierung von Mitarbeitern und einfahrenden Fahrzeugen im Betriebsgelände und im Gebäude	Keine stationäre Überwachung der Sauerstoffkonzentration; jedoch mitgeführter Gasdetektor als persönliche Schutzausrüstung für Mitarbeiter und Tankwagenfahrer; Gasdetektor wird außen am Körper mitgeführt
Windmesser am Tank	Windmesser am höchsten Punkt der Anlage
Auslösung Pumpenstopp bei Überfüllung bzw. Überdruck des Tanks	Überfüllsicherung durch Ventile HV7111 bzw. LV3211.1 (SIL2) realisiert mit gleichzeitiger Abschaltung der Pumpe /Umleitung der LOX Zufuhr (SIL0)
Abgleich der Arbeitsanweisungen mit identifizierten Gefährdungen aus HAZOP; Berücksichtigung menschlicher Fehler bei der Auswertung von Alarmen, Störungsmeldungen, Betriebs- und Instandhaltungsanweisungen	Lessons Learned Prozedur im Sicherheitsmanagement realisiert, HAZOP wird bei Erstellung von Arbeitsanweisungen berücksichtigt
Keine sicherheitsrelevanten Messungen über PLS; Sicherheitsabschaltung bei Störungen sicherheitsrelevanter Sensorik	Auf Anlage realisiertes PCS7 als Sicherheitsleitsystem anerkannt
Besondere Kontrollen bei niedrigen Außentemperaturen (<0°C) Beheizung sicherheitsrelevanter Armaturen	Nicht notwendig, am Standort sind Eistage möglich, keine Eistage seit 1982, Frosttage alljährlich, sehr tiefe Temperaturen aber selten

Im Ergebnis sind bei der betrachteten Anlage keine wesentlichen Defizite zu aus anderen Ereignissen resultierenden Schutzmaßnahmen erkennbar.

Vergleich mit den realisierten Maßnahmen (LOX-Drucktank)

Tabelle 52: Gegenüberstellung von Maßnahmen aus den Ereignissen und dem an der Anlage realisierten Stand der Sicherheitstechnik (LOX-Drucktank)

Maßnahmen aus Ereignissen mit vergleichbaren Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen	Umsetzung an analysierter Anlage
Endlagenüberwachung im Prozess betätigter sicherheitsrelevanter Ventile	Endlagenüberwachung HZT 7111

Maßnahmen aus Ereignissen mit vergleichbaren Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen	Umsetzung an analysierter Anlage
Stationäre Überwachungseinrichtung und Alarmierung von Mitarbeitern und einfahrenden Fahrzeugen im Betriebsgelände und im Gebäude	Keine stationäre Überwachung, dafür verpflichtendes Tragen eines mobilen Gaswarngerätes für alle Mitarbeiter und Tankwagenfahrer.
Windmesser am Tank	Windsack vorhanden
Auslösung Pumpenstopp bei Überfüllung bzw. Überdruck des Tanks	Abschaltung der Befüllung durch Schließen der Eintrittsarmatur HV7111
Abgleich der Arbeitsanweisungen mit identifizierten Gefährdungen aus HAZOP; Berücksichtigung menschlicher Fehler bei der Auswertung von Alarmen, Störungsmeldungen, Betriebs- und Instandhaltungsanweisungen	Lessons learned Prozess, um jegliche Gefährdungen in Prozessen zu berücksichtigen. Menschlicher Fehler wird bei Klassifizierung von Schaltungen berücksichtigt.
Keine sicherheitsrelevanten Messungen über PLS; Sicherheitsabschaltung bei Störungen sicherheitsrelevanter Sensorik	Sicherheitsrelevante Schaltungen werden immer unabhängig vom normalen PLS ausgeführt. Bei Störung sicherheitsrelevanter Schaltungen wird abgeschaltet.
Besondere Kontrollen bei niedrigen Außentemperaturen (<0°C) Beheizung sicherheitsrelevanter Armaturen	Niedrige Außentemperaturen sind in der Auslegung der Anlage inklusive Instrumentierung berücksichtigt.

Im Ergebnis sind bei der betrachteten Anlage keine wesentlichen Defizite zu aus anderen Ereignissen resultierenden Schutzmaßnahmen erkennbar.

5.2.3.3.4 Ergebnisdiskussion

5.2.3.3.4.1 Erkenntnisse hinsichtlich der Anwendung der Methodik

Eine Fehlzustandsbaumanalyse (FTA) befasst sich mit dem Aufzeigen und Untersuchen von Bedingungen und Einflussgrößen, die zum Auftreten eines festgelegten Hauptereignisses (TOP-Ereignisses) führen oder dazu beitragen können.

Die beispielhafte Untersuchung zeigt, dass es grundsätzlich möglich ist:

- Störfallereignisse und deren Auswirkungen als Fehler- bzw. Ereignisbaum zu modellieren,
- begründete Abschätzungen für probabilistische Eingangswerte für alle in der Störfall-Verordnung geforderten betrieblichen und umgebungsbedingten Gefahrenquellen inkl. menschlicher und sonstiger Fehler zu treffen, wobei Eingriffe Unbefugter im vorgenannten Beispiel nicht untersucht wurden.

Die Fehlerbaumanalyse ist ein Analyseverfahren, welches vor allem entwicklungsbegleitend Nutzen bringt. In der vorliegenden Fallstudie waren die Anlagenplanung und Genehmigung abgeschlossen, so dass Design-Alternativen zunächst nicht zu beurteilen waren.

Soll die Fehlerbaumanalyse nicht ausschließlich internen Zwecken dienen, so sind die Kriterien für deren Aufstellung so zu gestalten, dass die Ansätze nachvollziehbar geprüft werden können.

Die vorhandenen Methoden (z.B. ARAMIS, vgl. H. Andersen et al., 2004), Methode der BAM (s. Schalau, B. und Zach. U. (2005) zeigen, dass dies grundsätzlich möglich ist, eine einheitliche Herangehensweise allerdings noch nicht existiert.

Um aus den Ergebnissen einer Fehlerbaumanalyse einzelne Maßnahmen im Sicherheitsmanagement ableiten zu können, ist es notwendig, die Schätzgrundlagen für die Ermittlung der Häufigkeit des Eintritts des Störfallszenarios zu kennen und entsprechend transparent darzustellen.

Im Fehlerbaum selbst können die Schätzgrundlagen nicht transparent dargestellt werden, weshalb dieser um eine entsprechende Zusatzdokumentation zu ergänzen ist.

Wie die Fallstudien zeigen, kann sich für die Schätzung der Eintrittshäufigkeiten der Elementarereignisse eine vorgelagerte Betrachtung der Schutzebenen bzw. Barrieren (ähnlich des LOPA Verfahrens) als hilfreich erweisen.

Logikgatter, wie Sie in der Fehlerbaumanalyse auftreten können auch bei der Ereignisbaumanalyse Verwendung finden, um zu signalisieren, dass die Ereignisse simultan oder als Alternative Szenarien stattfinden.

Eine Zusammenfassung der verschiedenen Folgeereignisse und Auswirkungen für unterschiedliche Störfallszenarien (Brand, Explosion, Stofffreisetzung und daraus resultierende Gesundheitsschäden bzw. Umweltauswirkungen) in einem Fehlerbaum im Sinne einer Gesamtsicherheitsbetrachtung ist jedoch nicht möglich bzw. hinsichtlich der Darstellung der Ursache-Wirkungskette nicht praktikabel.

Zur Illustration: Beispielsweise können Brände durch Überhitzung von Reaktoren verursacht werden, bei einer Stofffreisetzung aber andere Umwelt- Gesundheitsauswirkungen eintreten, als bei einem Brand am Reaktor.

Beim Ereignisbaum gilt dies sinngemäß für das Elementarereignis (d.h. das Störfallszenario).

Die Fehlerbaumanalyse ist also vor allem dann geeignet, wenn mehrere oder eine Vielzahl von Elementarereignissen zu einem abgrenzbaren Störfallszenario führen.

Nicht abschließend geklärt wurde aber die Frage, ob auch systematische Risiken ausreichend in den Quantifizierungsmodellen abgebildet werden.

Der Hauptaufwand des Verfahrens besteht nach den Erkenntnissen der Studie weniger in der logischen Aufstellung des Fehler- bzw. Ereignisbaumes, sondern in der Analyse und Schätzung der ursächlichen Häufigkeiten für das Eintreten der Elementarereignisse und der Wirkung der Barrien, die den Eintritt des kritischen Ereignisses, oder dessen Auswirkungen verhindern.

Sehr große Fehlerbäume können mit leistungsfähigen Programmen zwar gut dokumentiert werden. Allerdings stellt sich die Frage, ob eine solche Darstellung auf Bildschirmen (bzw. Ausdrucken) noch durchgängig lesbar ist, da ein Bildschirm bzw. Seite nicht mehr ausreicht.

Die Fehlerbaumanalyse hat nur bedingt explorativen Charakter, d.h. neue Fehlerarten im Vergleich zu bestehenden Fehleranalysen deckt die Methode selbst nicht auf, da keine Hilfsfragen gestellt werden (wie z.B. in einer HAZOP-Analyse oder HAZID-Analyse).

Sie eignet sich aber aus Sicht der Autoren, um Gefahrenquellen, welche in einer bestehenden Risikoanalyse nicht im Fokus standen, zu einer gesamthaften Betrachtung des Störfallszenarios zu vertiefen und zu ergänzen. Im Praxisbeispiel sind dies vor allem umweltbedingte Gefahrenquellen und Risiken durch instandhaltungsbedingte Fehler gewesen.

Diese Erkenntnisse sind aber nicht ausschließlich durch die Anwendung der Fehlerbaumanalyse als Methodik, sondern auch oder vor allem durch die zur Durchführung der Methode notwendige systematische Schätzung der Eintrittshäufigkeiten für die Elementarereignisse begründet.

Hauptziel der Fallstudie für die Anlagenart Luftzerlegungsanlagen war es, zu prüfen in wieweit ein auf der Fehler- und Ereignisbaumanalyse basierendes Bewertungsverfahren umsetzbar ist, um die Erfüllung der Betreiberpflichten der Störfall-Verordnung mit Hilfe eines solchen Verfahrens nachzuweisen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Methodik grundsätzlich geeignet ist, um eine Risikoanalyse und Bewertung im Rahmen der Anforderungen der Störfall-Verordnung vorzunehmen.

Dies allerdings nur unter folgenden Bedingungen:

- Die Datenquellen und die Grundlagen von Häufigkeitsschätzungen müssen für Fehler- und Ereignisbaum hinreichend genau angegeben werden.
- Dies betrifft auch die Frage, welche Ereignisarten in den Fehlerbaum aufgenommen werden, und welche Ereignisarten als in der Schätzung der Eintrittshäufigkeit enthalten angesehen werden (s. dazu auch die obige Diskussion zum Behälterversagen).
- Es existieren hinreichend vergleichbare Vorgaben zur Ermittlung der Eintrittshäufigkeiten für die Elementarereignisse entsprechend des jeweils aktuellen Standes der Sicherheitstechnik und der bekannten Risiken für nicht betriebsbedingte Gefährdungen.
- Die für den Einzelfall getroffenen Annahmen und Voraussetzungen zur Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeiten müssen transparent dokumentiert werden, und zwar zusätzlich zum eigentlichen Fehlerbaum.
- Der in einer solchen Analyse vorgenommene Modellansatz der Analyse wird vollständig in Bezug zur Aussagekraft der durch die Analyse abgebildeten Erkenntnisquelle (also im Hinblick auf das im vorab definierte Analyseziel und den Analysegegenstand) geprüft.
- Die anderen auszuwertenden Erkenntnisquellen bezüglich des Standes der Sicherheitstechnik sind zu den Ergebnissen der Analyse und dem abgedeckten Modellansatz konsistent und werden vollständig herangezogen. (keine Wiedersprüche oder aufgedeckte GAP's zu anderen Ergebnissen und der Anwendung der abgeleiteten Maßnahmen).

Der Nutzen des Verfahrens ist abhängig von der Ausgangssituation oder Fragestellung. In Bezug auf den Nutzen können mehrere Kriterien herausgearbeitet werden, welche gleichzeitig wirken können.

Tabelle 53: Nutzenkriterien für die Anwendung der FTA

Nutzenkriterium	Beschreibung
Strukturierung	Durch die strukturierte Anwendung der FTA-Methode werden die Ereignisse bzw. Ereignisfolgeketten, die zum TOP-Ereignis führen, systematisch strukturiert dokumentiert. Dies hilft, die Unterschlagung von Ereignisketten bzw. Elementarereignissen zu vermeiden bzw. zu minimieren. Je mehr Elementarereignisse zu betrachten sind, desto höher ist hier der Nutzen einer systematischen Strukturierung durch die Zuordnung von

Nutzenkriterium	Beschreibung
	Elementarereignissen bzw. Ereignisfolgen zu einem TOP-Ereignis in einen Fehlerbaum.
Erkenntnisgewinn/ Erkenntnishorizont	Mit der FTA bzw. QRA kann eine bestimmte Fragestellung (die einen Beitrag zu einer oder mehrerer Erkenntnisquellen bezüglich des Standes der Sicherheitstechnik leistet) beantwortet werden. Im Falle einer quantitativen Analyse sollte diese Fragestellung auch quantitativ unterlegt sein. (z.B. „Sind mehr als x Störfälle pro Jahr wahrscheinlich?/ Liegt die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Störfalles oder Auswirkungsszenarios über 10-5 pro Jahr?, Werden vorrangig Auswirkungen innerhalb oder außerhalb des Betriebsbereiches analysiert?)
Beleg/Transparenz	Durch die dokumentierte Anwendung des FTA-Verfahrens wird gegenüber Behörden, Gutachtern oder Entscheidern im Unternehmen belegt, dass die Risiken und Eintrittswahrscheinlichkeiten entsprechend systematisch geprüft und zu sachorientierten Entscheidungen zu risikomindernden Maßnahmen zur Verfügung gestanden haben. Entscheidungen, die auf dieser Basis getroffen wurden sind rational und transparent nachvollziehbar.
Priorisierung	Durch die Erkenntnis, welchen Anteil Ereignisarten (Elementarereignisse) an der Wahrscheinlichkeit eines TOP-Ereignisses (Störfall) haben, werden die Maßnahmen ergriffen, welche mit gegebenen Mitteln einen hohen Beitrag zur Störfallvermeidung und Auswirkungsreduzierung leisten.
Aufwand/Nutzen	Der erforderliche Aufwand wird von den beteiligten Personen als sehr hoch eingeschätzt. Da es sich bei dem Praxispartner um ein Unternehmen mit langjähriger Erfahrung im Anwendungsbereich Luftzerlegungsanlagen handelt und eine bestehende Anlage bewertet wurde, wird der Erkenntnisgewinn bezüglich der Anlagensicherheit und der aus der Durchführung der Analyse im Vergleich dazu gering eingeschätzt. Hinzu kommt, dass es Stand der Sicherheitstechnik ist, die für eine solche Analyse in aller Regel erforderlichen Schätzungen der Eintrittswahrscheinlichkeiten von mehreren Personen im Team durchführen zu lassen.

Die Fehlerbaumanalyse ist insbesondere für die Anwendungen geeignet, wo neue Technologien oder Verfahren zu bewerten sind, und keine ausreichenden Anwendungserfahrungen vorliegen.

Bei professionalisierten, betriebsbewährten Einrichtungen und Verfahren ist der Erkenntnisgewinn hingegen nur in einigen Fällen gegeben. Eine typische Anwendung wäre hier der Vergleich von Design-Alternativen zur Einsparung von Kosten oder der Erhöhung oder Bestätigung des Sicherheitsniveaus.

Bei der Aufstellung der Analysen (z.B. der Kalkulationssheets für die Elementarereignisse bei Luftzerlegungsanlagen) wurde in der vorliegenden Analyse noch nicht betrachtet, durch welche Indikatoren (Warnhinweise, Alarme, Messwerte, visuelle Hinweise) ein potenziell gefährlicher Zustand erkannt werden kann. Die Aufnahme dieser Aspekte im Rahmen der Analysen, und das Erstellen geeigneter Hilfsmittel, könnte die richtige Reaktion der verantwortlichen Personals bei Eintreten eines Situation, die zu einem Störfall führen kann oder auf einen Störfall hinweist, deutlich verbessern.

Dies könnte z.B. erreicht werden durch: Checklisten für die Prüfung von Alarmen oder automatische Hinweise der Leittechnik auf erforderliche Sicherheitsprüfungen und Vorgänge (visuelle Inspektion, Beobachtung weiterer Messwerte, Räumen von Bereichen, Tragen von Schutzkleidung, Absperren oder Entsperren von Rohrleitungen usw.).

Der praktische Erkenntnisgewinn und die Art der einzubeziehenden Einflussgrößen ist dabei nicht nur von den Erkenntnissen für die Eintrittswahrscheinlichkeit der Störfallszenarien abhängig.

Vielmehr ist vor der Aufstellung der Methodik genau zu prüfen, welche Aussage erreicht werden soll. Beispiel: Vielfach sind die Ereignisauswirkungen differenziert, so dass entweder mehrere Bow-Tie Modelle (Fehlerbaum/Ereignisbaum) aufgestellt werden müssen oder diese hinsichtlich der Auswirkungen zu differenzieren sind.

Es ist dabei nicht unerheblich für die Aufstellung des Ansatzes, ob

- der Eintritt eines bestimmten Störfallszenarios
- die gesamte Wahrscheinlichkeit kritischer Ereignisse oder Auswirkungen in einem Betriebsbereich
- der Eintritt einer Auswirkung (mehrerer Auswirkungen) im Betriebsbereich (Menschen, Sachwerte, Umwelt)
- der Eintritt einer Auswirkung (mehrerer Auswirkungen) außerhalb des Betriebsbereiches (Menschen, Sachwerte, Umwelt, andere Betriebsbereiche)

quantitativ abgeschätzt werden soll.

Da die Störfallverordnung mit dem verankerten Ansatz „Stand der Sicherheitstechnik“ keine Methoden oder Prüfkriterien zu den Gefahrenquellen und den abzuleitenden Erkenntnisquellen vorgibt ist es besonders wichtig, dass das Analyseziel und die abgeleiteten Schlussfolgerungen sauber definiert sind.

Eine prüfende Behörde müsste stets die gesamte Analyse heranziehen, um eine Erkenntnis bezüglich ihres Prüfgegenstandes zu erhalten, und kann sich keinesfalls nur auf das Ergebnis oder das Vorhandensein einer solchen Analyse (bei Erwähnung im Sicherheitsbericht oder im Konzept zur Verhinderung von Störfällen des Betreibers) stützen.

Der Prüfgegenstand einer Behörde (und analog eines Gutachters) ist dabei auch mit dem Analyseziel und dem daraus abgeleiteten Betrachtungsumfang abzugleichen, der in der Analyse klar definiert sein muss.

Hierbei ist auch daran zu denken, dass sowohl der Betreiber, als auch eine Genehmigungsbehörde im Zeitverlauf neue Erkenntnisse erlangen können (Beispiel: Verdichtung der Bebauung oder Ausweisung von Naturschutzgebieten in der Nachbarschaft einer Anlage), welche den Blick auf eine solche quantitative Schätzung ändern können.

Anderenfalls ist eine solche Analyse nur zu innerbetrieblichen Zwecken verwendbar, und der Stand der Sicherheitstechnik dann anderweitig (z.B. durch das Aufzeigen der in Folge der Analyse getroffenen Maßnahmen) zu belegen.

5.2.3.3.4.2 Erkenntnisse bezüglich der Aussagekraft der Ergebnisse

Aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren (Prozesse und Prozesszeiten, Wirkungsketten, räumliche Gegebenheiten) ist die probabilistische Schätzung von Eintrittshäufigkeiten mit einer Vielzahl an Unsicherheiten behaftet. Viele Parameter, welche einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis haben können, sind nur vergleichsweise grob schätzbar.

Im Ergebnis wird ein Modell aufgestellt, welches versucht, mit begründeten Annahmen eine Justierung bekannter und beobachteter Zusammenhänge auf die Gegebenheiten einer spezifischen Anwendung abzubilden. Wenn Normvorgaben fehlen, können diese Modelle völlig unterschiedlich aussehen und begründbar sein.

Eine Vergleichbarkeit probabilistischer Analysen wird daher nur dann zu erzielen sein, wenn normierte und allgemein akzeptierte Verfahrensanweisungen sowie gut nachvollziehbare und handhabbare Schätztabellen vorliegen, auf welche man bei der Aufstellung einer solchen Analyse zurückgreifen kann. Als Beispiel dafür mögen die in der Fallstudie verwendeten Ansätze für menschliche Fehler dienen.

Bei der Handhabung solcher Tabellenwerke oder der Übernahme von Werten aus Datensammlungen als Prognosewerte muss zudem darauf geachtet werden, dass die Werte für vergleichbare Bedingungen und Ursache-Wirkungs-Szenarien verwendet werden. Dies erfordert entweder eine gründliche Recherche und Begründung bei den Anwendern, was mit einem entsprechenden Zeitaufwand verbunden ist, oder aber eine praktikable Anwendungsempfehlung in Tabellenwerken bzw. Normen, Leitfäden und Anwendungsrichtlinien.

a) Betriebsbedingte Gefahrenquellen

Für die Eintrittshäufigkeit durch technische Störungen bedingter Gefahren gibt es eine Reihe von Datenquellen, welche herangezogen werden können. Nicht immer ist jedoch (s. Beispiel des Versagen des Tankes aufgrund von Materialfehlern) ganz klar, ob nur vom System ausgehende Fehler, oder auch externe Störeinflüsse die Basis für die in Datensammlungen gemachten Expertenschätzungen sind. Die Datensammlungen nehmen zum Teil die Werte anderer Erhebungen bzw. Schätzungen auf. Entsprechend groß ist auch die Bandbreite. Dort, wo Störungen ein unterschiedliches Ausmaß annehmen können (z.B. Leckgröße) ist die Bewertung störfallrelevanter Ereignisse stark abhängig von der Bewertung der als typisch eingeschätzten Ausmaße (Eintrittswahrscheinlichkeit, Ausmaß).

Die anzusetzenden Fehlerhäufigkeiten für gefahrbringende Ausfälle sollten gleichfalls den Zustand der Einrichtungen im Versagensfall (z.B. Fails closed) mit berücksichtigen können, um die richtigen Schlüsse bezüglich ggf. notwendiger Maßnahmen ziehen zu können. Nicht immer führt ein Komponentenfehler dabei zur Möglichkeit des Eintritts eines Störfallszenarios.

Zu den betrieblichen Gefahrenquellen zählen auch Einflüsse aus dem Werksverkehr und von benachbarten Anlagen. Diese sind nicht unbedingt in einer HAZOP abgebildet.

Gleichfalls kann es Zeiträume geben, in denen ein erhöhtes Gefahrenpotenzial vorhanden ist (z.B. Aufenthalt von Personen oder temporäre Einrichtungen bei Instandhaltungsarbeiten). Gerade hier ist die Anfälligkeit für kritische Situationen, die einen Störfall auslösen können, sowohl was den Eintritt der Ereignisse betrifft, als auch deren Auswirkungen in erhöhtem Maße gegeben.

b) Umgebungsbedingte Gefahrenquellen

Hinsichtlich umgebungsbedingter Gefahren hat sich im Verlaufe der Analyse gezeigt, dass einerseits die meisten Gefährdungsarten hinsichtlich der Eintrittshäufigkeit abschätzbar sind.

Es erscheint notwendig, eine standortspezifische Betrachtung vorzunehmen.

Es wurde festgestellt, dass bei einigen Auslegungsarten (z.B. Sturm/Windlast) die Normen eine Auslegung nach 50, 100 oder 500 Jahres-Ereignissen fordern. Würde hier direkt mit dem Eintritt eines Störfalls gerechnet, so wären das Restrisiko der Höhe nach vermutlich im inakzeptablen Bereich.

Allerdings kann nur sehr ungenau abgeschätzt werden, welcher Anteil an potenziell gefährlichen Situationen (Sturm, Erdbeben usw.) auch zu einem kritischen Ereignis (Versagen sicherheitsrelevanter Einrichtungen oder Leckage des Tanks) führen könnte.

Umgebungsbedingte Gefahren führten bei den betrachteten Anlagen zu relativ kleinen Einzelrisiken, die Summe der verschiedenen Gefährdungen kann ungeachtet dessen allerdings nicht vernachlässigt werden.

c) Einbezug menschlicher Fehler

Die Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler kann modelliert werden, wobei die Einschätzung der Handlungshäufigkeit hier eine wesentliche Rolle spielt. Für die Berücksichtigung von Stress Komplexität der Tätigkeit und Lerneffekten gibt es Modelle, wobei flankierende Maßnahmen im Sicherheitsmanagement (Checklisten, Vier-Augen-Prinzip,…) hinsichtlich der Wirkung einfließen sollten, wozu es allerdings wenig verwertbare Ansätze gibt.

Gerade beim An- und Abfahren von Prozessen oder bei Instandhaltungsvorgängen gibt es auch bei hochinstrumentierten Anlagen noch manuelle Vorgänge, die kein sehr hohes Sicherheitsniveau aufweisen und ohne menschliche Sorgfalt zu Katastrophen führen können (im Beispiel: Tankbefüllung kann bei zu warmem Tank katastrophale Auswirkungen haben).

Weitere Erkenntnis aus den Fallstudien: Möglicherweise kann die Probabilistik in Bezug auf auswirkungsbegrenzende Maßnahmen keinen oder nur einen ungenügenden Erkenntnisbeitrag leisten. Beim Eintritt bzw. Erkennen eines Störfallereignisses ist nämlich in den meisten Fällen eine individuelle Lageeinschätzung und die schnelle Bewertung der verbleibenden Handlungsoptionen unter Zeitdruck erforderlich. Das Risiko eines menschlichen Fehlers ist hier generell so hoch, dass die Probabilistik mit den bekannten Modellen zur Bewertung menschlicher Fehlerrisiken keinen (wesentlichen) Erkenntnisgewinn mehr bringt.

Die Aufstellung der Fehler- und Ereignisbäume kann vor diesem Hintergrund hinsichtlich der unerwünschten Auswirkungen nur eine grobe Schätzung der Häufigkeiten enthalten.

Hier muss also durch eine Analyse der Art der technischen Alarmierung und der Alarm- und Gefahrenabwehrpläne versucht werden, menschliche Entscheidungen so zu vereinfachen, dass die Auswirkungen von Störfällen möglichst sicher begrenzt werden.

Im Rahmen der Fallstudie erfolgte keine Tiefenprüfung der Eingangswerte auf Plausibilität. Vielmehr ging es darum, zu prüfen, ob eine derartige Analyse überhaupt mit vertretbarem Aufwand durchführbar ist, wobei Herstellerangaben und beim Praxispartner verwendeten Ansätzen (hier insb. Werten der CCPS für Initiating Events) der Vorzug gegeben wurde.

5.2.3.3.4.3 Erkenntnisse aus der begleitenden Analyse von Ereignissen aus der ZEMA-Datenbank

Die Auswertung der Ereignisdatenbank zeigte, dass systematische Fehler im Planungsprozess zu Störfallereignissen beitragen (in den ausgewerteten Ereignissen insbesondere: ungenügende Einbindung oder Berücksichtigung von Ausnahmezuständen bei der Leittechnikeinbindung).

Systematische Fehler können allerdings nur im Entwicklungsprozess unterbunden werden, weshalb genau genommen der Entwicklungsprozess der Anlage im Hinblick auf Fehler zu beurteilen ist und nicht die im Betrieb der Anlage möglichen Fehlerarten!

Gleichfalls zeigte die Recherche der ZEMA-Datenbank auch, dass der Analyse- und Entwicklungsprozess durch die Ereignisdarstellungen in der Datenbank befruchtet werden kann. Eindeutige Rückschlüsse, welche zur Erhöhung des Standes der Sicherheitstechnik beitragen, müssen allerdings von den Nutzern selbständig getroffen werden.

Die ZEMA-Datenbank beruht derzeit auf den Anforderungen der 12. BImSchV / Seveso(III)-RL. Aus Sicht der Forschungsnehmenden bietet es sich an, die Ereigsnismeldungen um folgende Informationen zu ergänzen, um so die Anwendbarkeit der Datenbank zu erhöhen::

- Eine Beurteilung des Standes der Sicherheitstechnik der jeweiligen Anlage (was die Beurteilung des Sicherheitsmanagements einschließt)
- Verweise auf Fachnormen, die (im Beispiel etwa für die geltenden Normen zur Leittechnik) den erreichten Stand der Sicherheitstechnik abbilden

Möglicherweise bedarf es hier also einer Diskussion über die Weiterentwicklung des Regulierungsrahmens und des dafür notwendigen Informationsaustausches zwischen den Akteuren. Die Anwendung probabilistischer Verfahren, wie der Fehlerbaumanalyse und/oder die Ergänzung der gängigen HAZOP/LOPA Analysen durch andere Methoden kann hierzu einen Erkenntnisbeitrag leisten.

Der Aufwand zur Durchführung eines solchen Verfahrens darf allerdings nicht unterschätzt werden: Für ein solches Ereignis (z.B. LOC LOX Tank) sind etwa 15-20h reiner Analyseaufwand zu veranschlagen (wobei die Entwicklung der Methodik und die Aufstellung der Kalkulationsblätter sowie die Kennwertbeschaffung nicht mitgezählt wird), und die bereits erstellte HAZOP Analyse als Grundlage diente.

Dieser Aufwand wurde vom beteiligtem Sicherheitsingenieur als sehr hoch eingeschätzt, weshalb Linde derartige Analysen nur fallweise durchführt. Als Erkenntnisgewinn wurde dabei allerdings die gesamthafte Betrachtung und Gegenüberstellung der verschiedenen Fehlerszenarien hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeit gewertet. Als Hemmnis wird dabei allerdings auch angesehen, dass die konzernintern existierenden Risikoakzeptanzkriterien durch den vollständigen Einbezug von menschlichen Fehlern und umweltbedingten Gefahren sowie beim Einbezug konservativer Werte überschritten werden könnten.

Dies könnte dazu führen, dass eigentlich unnötige Schutzmaßnahmen für bereits betriebsbewährte Technik ergriffen werden. Potenzial wird allerdings beim Training des Personals – beispielsweise durch Übungen für das Verhalten bei Eintritt eines Störfallszenarios – gesehen.

Die hohe Eintrittswahrscheinlichkeit menschlicher Fehler gegenüber der von technisch bedingter Gefahren offenbart hier, dass der dadurch erzielte Gewinn an Sicherheit durch die Verminderung der Auswirkungen ggf. höher sein kann, als die Möglichkeit, die Eintrittswahrscheinlichkeit von Störfällen durch noch mehr zusätzliche Sicherheitstechnik zu verringern.

Nach heutigem Stand der Technik gibt es allerdings auch Luftzerlegungsanlagen, die einen höheren Automatisierungsgrad aufweisen, weil sie fernüberwacht sind und ohne Personal vor Ort betrieben werden. Für diese sind nach Aussagen der Praxispartner dann auch weitere Sicherheitsvorkehrungen in Kraft (Sicherheitsverriegelungen).

5.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse und Erkenntnisse

Die Fehlerbaumanalyse sowie die Ereignisbaumanalyse stellen geeignete Analysetechniken der Gefahrenanalyse bzw. zur Entwicklung von Störfallszenarien dar. Vergleichbar mit dem HAZOP-Ansatz lassen sich beliebige Ursache-Wirkungsketten darstellen, wobei im direkten Vergleich zur HAZOP-Methodik Unterschiede in den identifizierten Ursache-Wirkungsketten entstehen können. Mögliche Ursachen dafür können sein:

- Das der HAZOP-Methodik zugrundeliegende Leitwortsystem: Die Verfahren FTA und ETA kommen ohne spezielle Leitworte aus.
- Die unterschiedlichen Ausgangspunkte: Der Startpunkt der Analyse mittels HAZOP-Methodik liegt bei der Analyse möglicher Abweichung vom bestimmungsgemäßen Betrieb. Der Startpunkt der FTA liegt typischerweise auf dem Ereignis „Freisetzung gefährlicher Stoffe“, also auf eine spätere, mögliche Folge der Abweichung vom bestimmungsgemäßen Betrieb.
- Berücksichtigung von Mehrfachfehlern: Das HAZOP-Verfahren ist grundsätzlich ein monokausales Analyseverfahren, die Fehlerbaumanalyse hingegen fokussiert die Betrachtung von Mehrfachfehlern (Stichwort: Redundanzen).
- Berücksichtigung alternativer Entwicklungen der Störungen bzw. des Störfalles: Ausgehend von einem unerwünschten Zustand oder Ereignis lassen sich mit der Ereignisbaumanalyse alternative Störfallabläufe untersuchen bzw. darstellen.

Inwiefern die Techniken FTA und ETA als Ergänzung zur HAZOP-Studie weitere Ursache-Wirkungsketten aufzudecken vermögen ist nicht zuletzt von der konkreten Anwendung bzw. Einbindung in den übergeordneten Analyseprozess des Betreibers abhängig:

- Anwendung von FTA und ETA zur transparenten Quantifizierung der Kausalketten, welche mittels HAZOP-Analyse identifiziert wurden,
- Aufdecken von Kausalketten, welche im Rahmen der HAZOP-Studie noch nicht betrachtet worden sind (z.B. durch systematisches Untersuchen von Mehrfachfehlern, Einbezug bestimmter Themengebiete wie z.B. umgebungsbedingte Gefahrenquellen).

In Abhängigkeit des konkreten Anwendungskontextes geht mit der Durchführung der FTA und ETA ein erheblicher Zeitaufwand einher. So bedarf es einer Reihe von Detailüberlegungen zur Aufstellung der Kausalketten, als auch zur Quantifizierung der Eintrittswahrscheinlichkeiten einzelner Gefahrenquellen und Versagenswahrscheinlichkeiten der Barrieren.

Insbesondere die Etablierung probabilistischer Analysetechniken (erstmalige Anwendungen in einem Betriebsbereich, Konzern, …) wird mit einem erhöhten Aufwand verbunden sein. So müssen allgemeine innerbetriebliche Richtlinien zur Anwendung festgelegt werden, verschiedene Datensammlungen und -Quellen eruiert werden und Mitarbeiter in der Analysetechnik geschult werden.

Teilweise Abhilfe kann hierbei die Erarbeitung einer deutschlandweit einheitlichen und den Betreibern frei zugänglichen Datenbank schaffen. Die Verwendung einer solchen Datenbank würde einerseits den Analyseaufwand seitens der Betreiber reduzieren, andererseits die Beurteilung ausgearbeiteter Analysen durch die Behörden erleichtern und so insgesamt die Anwendung probabilistischer Verfahren in Deutschland fördern. Vor dem Hintergrund, dass tatsächliche Risiken aufgrund der Verwendung von Daten aus der einheitlichen Datenbank grob unterschätzt (aber auch überschätzt) werden können, sollten diese Werte nicht zur Abschätzung von absoluten Risiken, sondern lediglich für vergleichende Betrachtungen herangezogen werden.

Die Untersuchungen mit den Betreibern haben gezeigt, dass die verschiedenen verfügbaren Datensammlungen bzw. Informationsquellen teils sehr unterschiedliche Aussagen zu Komponentenzuverlässigkeiten treffen. Auffällig war hierbei, dass die Angaben der Komponentenhersteller in ihren Datenblättern teils signifikant bessere Werte (d.h. höhere

Zuverlässigkeiten) als andere Quellen ausgewiesen haben. Dies wird darauf zurückgeführt, dass die Komponenten explizit für einen sicherheitsgerichteten Einsatz konzipiert worden sind.

Bei der Quantifizierung einzelner Ereignisse im Rahmen der FTA/ETA-Analyse anfallende Nebenrechnungen bzw. Annahmen sollten in allen Fällen transparent dokumentiert werden.

- Quellenangabe für jede verwendete Ausfallrate, Eintrittshäufigkeit, etc.
- Bei Verwendung von Handbüchern zur Zuverlässigkeitsbestimmung Angaben zu verwendeten Stressfaktoren (Beispiel MIL-HDBK 217, Siemens SN 29500, FIDES) oder zu berücksichtigen Failure Modes (Beispiel OREDA-Datensammlung)
- Abschätzungen zu Häufigkeiten für Routinehandlungen und von Handlungen jenseits der Routine. Einerseits ist die Wahrscheinlichkeit einer „Fehlhandlung“ im Anforderungsfall stark abhängig von der Häufigkeit durchgeführter gleichartiger Handlungen, andererseits bedingt die Häufigkeit der durchzuführenden Handlungen die Häufigkeit anzunehmender Störungen oder Störfälle (Beispiel: Be- und Entladevorgänge).

Mit der zusammenfassenden Darstellung mehrerer Kausalketten in einem Fehler- und. Ereignisbaum können gewisse Unschärfen entstehen, welche sich auf die nachfolgenden Quantifizierungen von Schadensausmaßen auswirken können. So können unterschiedliche Ursachen für ein bestimmtes unerwünschtes Ereignis unterschiedliche Detektionszeiten aufweisen, welche wiederum zu unterschiedlichen langen Stofffreisetzungsdauern führen können.

Aus Sicht der Forschungsnehmenden wird ein potentieller Mehrwert im punktuellen und zweckgebundenen Einsatz der FTA und ETA-Techniken als Ergänzung zu bestehenden Analysetechniken gesehen. Beispiele:

- Entscheidungsgrundlage bei komplexen Sachverhalten
- Bewerten von Designalternativen

Als nicht zielführend wird hingegen der Einsatz von FTA und ETA zum Zwecke der Berechnung des kumulativen Risikos des Betriebsbereiches (Vgl. Individual- und Gruppenrisiko) angesehen. Einem unklaren Verwertungszweck (Wozu, wenn nicht durch Behörden gefordert?) steht ein beachtlicher Aufwand gegenüber. Fragen über zu verwendende Daten und Risikokenngrößen, sowie Grenz- und Zielwerten schlössen sich an.

Im Verlauf der begleitenden Recherchen in der ZEMA-Datenbank ist aufgefallen, dass diese in der bestehenden Form nur bedingt einen Erkenntnisgewinn zum erforderlichen Stand der Sicherheitstechnik liefern kann.

Hier ist zu fragen, welche Informationen den Betreibern, Gutachtern und zuständigen Verwaltungseinheiten noch bereitgestellt werden sollten, um die Beurteilung des Standes der Sicherheitstechnik und der daraus resultierenden Ableitung geeigneter Maßnahmen im jeweiligen Verantwortungsbereich für die im Rahmen des eigenen Sicherheitsmanagements untersuchten meldepflichtigen Ereignisse zu verbessern.

Eine solche Information könnten zum Beispiel Empfehlungen eines unabhängigen Expertengremiums sein, welche bei den Ereignissen in der Datenbank hinterlegt und/oder auf andere Art und Weise proaktiv verteilt werden[36].

[36] Dieser Aspekt wird in einer Arbeitsgruppe des AISV beachtet. ZEMA-Datenbank stellt hierfür basierend auf der 12.BImSchV die Daten bereit

Während der Erprobungen mit den Betreibern wurden keine gravierenden Sicherheitsmängel festgestellt. Für manuelle Prozeduren wurden teils hohe Risiken ermittelt, wobei organisatorische Maßnahmen entscheidend zur Risikoreduktion beitragen.

Im Nachgang der Erprobungen mit den Betreibern wurden die Ergebnisse und Erkenntnisse den Behördenvertrerter:innen des AISV dargestellt. Folgende Stellungnahmen wurden seitens des AISV getroffen:

- Einstimmige Meinung der Teilnehmer:innen: Das Konzept des „Standes der Sicherheitstechnik“ ist ein bewährtes Instrument zur Bewertung des Anlagenrisikos und sollte nicht um quantitative Ziel- und Grenzwerte ergänzt werden. Probabilistische Analysen sollten ausschließlich als Ergänzung deterministischer Analysen angewandt werden.
- Die Anwendung probabilistischer Methoden sollte ausschließlich auf freiwilliger Basis, d.h. im Eigenermessen der Betreiber erfolgen
- In der Prozessindustrie bzw. bei international aufgestellten Konzernen sind quantitative Verfahren bereits heute häufig anzutreffen.
- Probabilistische Untersuchungen sind eher für komplexe Anlagen geeignet, bei kleineren Anlagen stellt sich Frage der Verhältnismäßigkeit
- Die Etablierung einer gemeinsamen Datenbasis (nach schweizerischem Vorbild) für den Raum Deutschland würde die Akzeptanz bzw. Anwendung solcher Verfahren weiter erhöhen bzw. begünstigen.
- Die Festlegung allgemeingültiger, zu untersuchender Szenarien im Kontext StörfallV (Vergleichbar zu den FTA-Betrachtungen von Anlagen der Kernenergie) wird aufgrund der Vielfalt der zu berücksichtigenden Anlagenarten als schwierig angesehen.
- Konkrete Anwendungskontexte der Probabilistik sind teilweise noch unklar.
- Die Schwelle von „vernünftigerweise auszuschließen“ zu „vernünftigerweise nicht auszuschließen“ für Gefahrenquellen kann nicht sinnvoll mit einem fixen Häufigkeitswert assoziiert werden, es sollte das potentielle Schadensausmaß der jeweiligen Gefahrenquelle mitgedacht werden. Wichtiger ist, dass durch den Betreiber glaubhaft vermittelt werden kann, dass Gefahrenquellen vernünftigerweise ausgeschlossen wurden. Hierbei stehen konkrete Belege, z.B. in der Form von Arbeitsanweisungen im Fokus.

6 Vergleichende Betrachtungen ausgewählter Verfahren

6.1 Auswahl der vergleichend zu betrachtenden Verfahren

Die Auswahl der im weiteren Projektverlauf zu untersuchenden sechs Verfahren beruht auf

- Rechercheergebnissen,
- den (vorläufigen) Bewertungen der identifizierten Verfahren anhand der dafür entwickelten Kriterien (siehe Kapitel 4.2),
- den Rückmeldungen aus dem 1. Fachgespräch,
- sowie den geführten Interviews mit Betreibern und Behörden im Rahmen der Praxisuntersuchungen („Praxis der Anwendung bei Betriebsbereichen“).

Im Ergebnis wurden folgende Verfahren final ausgewählt:

1. HAZOP
2. HAZOP-Modifikationen
3. Methoden und Verfahren in den Niederlanden und Flandern zur quantitativen Risikobeurteilung (QRA-Quantitative Risk assessment) (u.a. VROM: „Guidelines for quantitative risk assessment“, Departement Omgeving “RISK CALCULATIONS MANUAL - Guidelines for quantitative risk analysis, indirect risks and environmental risk analysis”)
4. Fehler- und Ereignisbaumanalyse (FTA/ETA)
5. Layer of Protection Analysis (LOPA)
6. Accidental Risk Assessment Methodology For Industries In The Context Of The Seveso II Directive (ARAMIS)

Begründungen für die Auswahl:

1. HAZOP; HAZOP-Modifikation; Methoden und Verfahren in den Niederlanden und Flandern zur quantitativen Risikobeurteilung: In der Leistungsbeschreibung als gesetzt gekennzeichnete Verfahren und Methoden.
2. FTA/ETA:
   a. Gemäß KAS-55 eine „in der Verwaltungspraxis akzeptierte Methode“
   b. Die Kombination aus Fehler- und Ereignisbaumanalyse stellt eine Basismethode für probabilistische/quantitative Betrachtungen dar (vgl. BAFU / FOEN: „Handbuch Störfall-Verordnung“)
   c. Die QRA-Verfahren in den Niederlanden und Flandern sowie das ARAMIS-Verfahren benutzen FTA/ETA – Techniken
   d. Im Rahmen der Erprobung probabilistischer Verfahren (Praxisuntersuchungen) sollen die FTA/ETA-Methodik angewendet werden.
3. LOPA:
   a. Gemäß KAS-55 eine „in der Verwaltungspraxis akzeptierte Methode“.
   b. Während des 1. Fachgespräches als klassische Ergänzung zur HAZOP als Instrument der Risikobewertung erwähnt.
   c. Bestätigung der weit verbreiteten Anwendung und Akzeptanz durch Interviews mit Betreibern und Behörden.
4. ARAMIS:
   a. ARAMIS ist der Versuch, deterministische und probabilistische Ansätze zu vereinen. Es enthält viele Elemente bzw. Weiterentwicklungen bereits etablierter Verfahren (u.a. QRA-Verfahren in den Niederlanden und Flandern, HAZOP, FTA/ETA).

b. Es enthält aber ebenso neue Elemente, wie das Konzept zur Quantifizierung der Qualität des Safety Managements (genauer: der Zuverlässigkeit der safety barriers) anhand eines eigens entwickelten Fragenkataloges.
c. Anwendungsfälle des Verfahrens sind den Praxispartnern nicht bekannt. Das Verfahren wird von ihnen als zu ambitioniert/akademisch geprägt beschrieben. Aus Sicht der Forschungsnehmenden hingegen stellt das ARAMIS-Verfahren einen vielversprechenden integrativen Ansatz dar und wird deshalb in die weitere Untersuchung mitaufgenommen.

Begründungen für die Abwahl:

1. Die durch die Leistungsbeschreibung geforderte Untersuchung der Methoden und Verfahren in der Schweiz (u.a. BAFU / FOEN: „Handbuch Störfall-Verordnung“) wurde durch die Fehler- und Ereignisbaumanalyse ersetzt, da die Recherchen ergeben haben, dass das Handbuch der BAFU kein bestimmtes Analyseverfahren beschreib, jedoch die Kombination aus Fehler- und Ereignisbaumanalyse als eine Basismethode für probabilistische/quantitative Betrachtungen charakterisiert (vgl. Abschnitt „Methoden und Verfahren in der Schweiz“ 4.20).
2. Zurich Hazard Analysis: Gemäß KAS-55 ist das Verfahren eine „in der Verwaltungspraxis akzeptierte Methode“. Jedoch konnte keine nennenswerte Praxisrelevanz festgestellt werden
3. ROGA: Gemäß KAS-55 ist das Verfahren eine „in der Verwaltungspraxis akzeptierte Methode“. ROGA wurde während 1. FG als geeigneter Kompromiss zwischen qualitativen und quantitativen Verfahren charakterisiert. Gespräche mit den Behörden bestätigen die vereinzelte Anwendung. Als problematisch wird von den meisten Praxispartnern die mangelnde Transparenz des Verfahrens angesehen (z.B. sind Bewertungskriterien für Risikoklassen unveröffentlicht).
4. FMEA: Gemäß KAS-55 ist das Verfahren eine „in der Verwaltungspraxis akzeptierte Methode“. Das Verfahren weist eine starke Ähnlichkeit zu HAZOP auf (Betrachtungen möglicher Abweichungen von zu definierenden Sollfunktionen, sowie Analyse möglicher Ursachen und Folgen -> Kreativtechnik, vorzugsweise in interdisziplinären Workshops erarbeitet). Gleichzeitig scheint das Verfahren keine ausgeprägte Praxisrelevanz im Bereich der Analyse von Prozessrisiken zu haben.
5. Risikograph nach VDI 2180: Mit dem Risikographen werden SIL-Anforderungen für PLT-Einrichtungen ermittelt, womit es sich um ein Spezialthema innerhalb der (Störfall-) Risikobeurteilung handelt.
6. Checklistenverfahren: Checklisten werden in der Praxis als ergänzende Tools, teils aber auch als primäres Analyseinstrument angewandt. Die Checklisten werden dabei von den Unternehmen bzw. Analysten für die jeweiligen Anwendungskontexte bzw. Fragestellungen erarbeitet, Bei den Checklisten handelt es sich weder um eine formalisierte Methodik, noch existiert eine fixe Menge an Checklisten, denen eine gewisse Allgemeingültigkeit eigen ist.

6.2 Vergleichende Betrachtungen für die Analyseschritte „Gefahrenanalyse“ und „Bestimmung des Standes der Sicherheitstechnik“

6.2.1 HAZOP-Verfahren

Ermittlung der relevanten Gefahrenquellen (inkl. (inter-) organisationale und menschliche Fehler), Ereignisse und Störfalleintrittsvoraussetzungen inklusive ihrer Eintrittswahrscheinlichkeiten

Die Ermittlung der relevanten Gefahrenquellen basiert auf Sollfunktionen, welche zu Beginn der HAZOP-Untersuchung formuliert werden. Die Sollfunktionen beschreiben den bestimmungsgemäßen Betrieb mit einem Detailierungsgrad, der für die nachfolgende Analyse

möglicher Abweichungen (vom Sollzustand), deren Ursachen, sowie den entsprechend festzulegenden Vorkehrungen und Maßnahmen geeignet ist.

Ausgehend von den Sollfunktionen werden anhand sogenannter Leitworte mögliche Abweichungen von ebendiesen Sollfunktionen, sowie die entsprechenden Ursachen für diese Abweichungen identifiziert. Im Anschluss werden mögliche Auswirkungen abgeschätzt. (Bei der Arbeit mit den Leitworten haben sich vom „Standard" des IVSS branchen- und konzernspezifische Ableger etabliert, welche auf die jeweiligen Besonderheiten der Branche, des Konzerns, des Betriebsbereiches oder Anlagenteils eingehen. Insbesondere betrifft das die Zuhilfenahme von Parametern, welche mit den Leitworten kombiniert werden). Die Arbeit mit den Leitworten ist einerseits als Kreativtechnik zu verstehen, andererseits wird so eine Systematisierung und Vollständigkeit der durchgeführten Analyse angestrebt.

Die Analyse wird in einem iterativen Verfahren durchgeführt, wobei in der ersten Iteration sämtliche bereits angedachten Vorkehrungen und Maßnahmen weggedacht werden müssen. Dies dient dazu, sämtliche Vorkehrungen und Maßnahmen zu prüfen/zu motivieren, da erst so transparent wird, in welchem Maße die Maßnahmen voraussichtlich zur Risikoreduktion beitragen.

Grundsätzlich können so sämtliche Gefahrenquellen (betrieblich, umgebungsbedingt, Eingriffe Unbefugter) identifiziert werden. Dies beinhaltet ebenso menschliche/(inter-)organisationale Fehler. Welche Gefahrenquellen schlussendlich identifiziert werden, hängt dabei maßgeblich von der Zielstellung der mit der HAZOP verbundenen Betrachtung, der Projektphase, der Teamzusammenstellung, sowie von der Expertise der Teilnehmer:innen ab. In den Praxisuntersuchungen hat sich abgezeichnet, dass die Betreiber die HAZOP in der Regel für betriebliche Gefahrenquellen nutzen, bzw. die Gefahrenanalyse um weitere Tools/Listen etc. ergänzen, um so themenspezifische Fragestellungen nachgehen zu können. Dies deckt sich mit Aussagen der ISSA-Broschüre „Das PAAG-Verfahren" (2002), welche eine Analyse externer Gefahrenquellen mittels HAZOP als nicht geeignet ansieht. Behördenaussagen zufolge bereiten die adäquate Berücksichtigung menschlicher Faktoren (inkl. Managementsysteme), sowie umgebungsbedingter Gefahrenquellen Schwierigkeiten bei der HAZOP-Analyse.

Das Verfahren als solches gibt keine Hinweise, wie Eintrittswahrscheinlichkeiten zu bestimmen sind. Hier können unternehmensspezifische Leitfäden Abhilfe geschaffen. Insbesondere obliegt es dem Analyseteam in den jeweiligen Einzelfällen, die Klassifizierung der Gefahrenquellen nach „vernünftigerweise auszuschließen: ja/nein" vorzunehmen.

Ein Konzept zur Bewertung vergangener Ereignisse wird durch das HAZOP-Verfahren nicht beschrieben.

Bestimmung der erforderlichen, dem Stand der Sicherheitstechnik entsprechenden Vorkehrungen zur Störfallverhinderung und Maßnahmen zur Störfallbegrenzung

Es werden bei diesem Verfahren keine Hinweise zur Ermittlung des Standes der Sicherheitstechnik (im Sinne eines Vorgehens vgl. mit SFK-GS-33) gegeben.

6.2.2 LOPA-Verfahren

Ermittlung der relevanten Gefahrenquellen (inkl. (inter-) organisationale und menschliche Fehler), Ereignisse und Störfalleintrittsvoraussetzungen inklusive ihrer Eintrittswahrscheinlichkeiten

Die LOPA-Analyse baut auf den Erkenntnissen der Gefahrenanalyse auf, stellt selbst jedoch kein Verfahren der Gefahrenanalyse im Sinne der Identifizierung von Gefahrenquellen bzw. von Ereignissen dar.

Die LOPA-Technik erlaubt jedoch zu einem gewissen Grade eine Prüfung der Ergebnisse der Gefahrenanalyse:

- So kann anhand des Schutzebenenmodells kritisch geprüft werden, ob alle für das Szenario relevante Schutzebenen bzw. Gegenmaßnahmen in der Gefahrenanalyse berücksichtigt worden sind.
- Die systematische Abfrage nach enabling factors und conditional modifier, welche die Häufigkeit und den Verlauf des Störfallablaufs beeinflussen führt ggf. zu einem besseren Verständnis des selbigen.

Die Ermittlung der Eintritts- bzw.- Ausfallwahrscheinlichkeiten erfolgt keinem festen Muster. Als Basis können firmenspezifische Eintrittshäufigkeiten, Datensammlungen, Industriestandards/Handbücher und/oder Expert:innen-Schätzungen dienen.

Bestimmung der erforderlichen, dem Stand der Sicherheitstechnik entsprechenden Vorkehrungen zur Störfallverhinderung und Maßnahmen zur Störfallbegrenzung

Es werden keine Hinweise zur Ermittlung des Standes der Sicherheitstechnik (im Sinne eines Vorgehens vgl. mit SFK-GS-33) gegeben.

Das LOPA-Verfahren liefert nur einen bedingten Beitrag zur Gefahrenanalyse nach deutschem Störfallrecht.

6.2.3 Fehlerbaumanalyse und Ereignisbaumanalyse

Ermittlung der relevanten Gefahrenquellen (inkl. (inter-) organisationale und menschliche Fehler), Ereignisse und Störfalleintrittsvoraussetzungen inklusive ihrer Eintrittswahrscheinlichkeiten

Die Fehlerbaumtechnik kann als Kreativtechnik zur Ermittlung denkbarer Störfälle herangezogen werden.

Der Beitrag der Fehlerbaumanalyse zur Gefahrenanalyse liegt im deduktiven Ansatz: Für ein identifiziertes Top-Ereignis (beispielsweise ein Loss Of Containment-Ereignis) wird systematisch nach Ursachen resp. nach Gefahrenquellen (insb. betrieblich, umgebungsbedingt, Eingriffe Unbefugter) gefragt. Dabei wird nicht nur nach „alleinigen Verursachern“ (single point of failures) Ausschau gehalten, sondern auch das gleichzeitige Versagen mehrerer Teilsysteme (resp. das zeitliche Zusammentreffen mehrerer ungünstiger Umstände) bewusst ins analytische Kalkül einbezogen.

Die FTA unterscheidet sich im Wesentlichen vom HAZOP-Verfahren durch

1. ihren deduktiven Charakter (ausgehend von einem kritischen Ereignis (z.B. Leckage) werden mögliche Ursachen ermittelt)
2. den Ausgangspunkt der Analyse (Fehlerbaum: Top-Ereignis, HAZOP: Abweichung von Sollfunktion des bestimmungsmäßen Betriebes)
3. das Nichtvorhandensein anzuwendender Leitworte
4. das der Methodik zugrundeliegende Kalkül zur Berechnung von Eintrittshäufigkeiten von kritischen Ereignissen auf Basis von Zuverlässigkeits- und Instandhaltbarkeitsdaten der ermittelten Ursachen und dabei durch
   a. die Berücksichtigung von Mehrfachfehlern
   b. die Berücksichtigung von common-cause-Fehlern
   c. die grafische Darstellung der Ursache-Wirkungsketten

Vergleichbar mit dem HAZOP-Verfahren entscheidet die mit der Analyse verbundene Zielstellung, die Projektphase, die Teamzusammenstellung sowie von der Expertise der Teilnehmer, welche Gefahrenquellen schlussendlich identifiziert werden.

Die Eintrittshäufigkeit des Top-Ereignisses kann analytisch über die Eintrittshäufigkeiten der Basisereignisse (die „letzten" Ursachen, sprich die „Blätter" im Fehlerbaum) berechnet werden. Die dafür nötigen Eingangsdaten können beispielsweise aus Standardwerken/Datenbanken (MIL HDBK217, SN29500, OREDA, FRED (frequency and event data)…), aus Datenblättern der Komponentenlieferanten oder aus eigenen Erfahrungswerten abgeleitet werden. Damit wird - unter Vorbehalt der Güte/Eignung der Eingangsdaten sowie unter Vorbehalt der Vollständigkeit des erstellten Fehlerbaumes – der Beitrag zum Gesamtrisikos der zu analysierenden Anlage durch das Top-Ereignis quantifiziert, sowie der Beitrag der einzelnen Ursachen zu eben diesem Risiko.

Die Güte der Analyse steigt dabei noch einmal, wenn sogenannte gemeinsam verursachte Fehler (Common Cause-Fehler (CCF)) berücksichtigt werden und damit Annahme der Unabhängigkeit zwischen redundanten Teilsystemen (bzw. Systemen mit mehreren Sicherheitseinrichtungen) kritisch hinterfragt wird. Eine Berechnung der Systemzuverlässigkeit würde unter Nichtbeachtung der CCF's zu optimistischen Abschätzungen führen. Der Einfluss der CCF's lässt sich beispielsweise über sog. Beta-Faktoren-Scoring-Verfahren bestimmen. (vlg. IEC 61508-6, Bestimmung von beta-Faktoren).

Die FTA-Technik als solche liefert darüber hinaus keine Anhaltspunkte über zu berücksichtigende Störungen, Störfälle bzw. zu damit zusammenhängenden Gefahrenquellen, Ereignissen bzw. zu Störfalleintrittsvoraussetzungen: Weder werden wie im Purple book konkrete Vorschläge für Loss Of Containment-Ereignissen, noch werden Kreativtechniken mit Leitworten/Tabellen wie beim HAZOP-Verfahren, bereitgestellt. Das Analyseergebnis hängt maßgeblich von der Expertise/dem Erfahrungswissen der an der Analyse beteiligten Personen ab.

Bestimmung der erforderlichen, dem Stand der Sicherheitstechnik entsprechenden Vorkehrungen zur Störfallverhinderung und Maßnahmen zur Störfallbegrenzung

Es werden keine Hinweise zur Ermittlung des Standes der Sicherheitstechnik (im Sinne eines Vorgehens vgl. mit SFK-GS-33) gegeben.

Somit liefert die Fehlerbaumanalyse nur einen bedingten Beitrag zur Gefahrenanalyse nach deutschem Störfallrecht.

6.2.4 QRA-Verfahren in den Niederlanden

Ermittlung der relevanten Gefahrenquellen (inkl. (inter-) organisationale und menschliche Fehler), Ereignisse und Störfalleintrittsvoraussetzungen inklusive ihrer Eintrittswahrscheinlichkeiten

Im „Reference Manual BEVI risk assessments" (nachfolgend als „Manual" bezeichnet) wird eine Liste mit Loss of Containment-Ereignissen für verschiedene Anlagenteile bereitgestellt, welche potentiell in die Analyse aufzunehmen sind. Jedem dieser Loss of Containments (LOC's) ist eine Eintrittshäufigkeit als Referenzwert beigestellt.

Beispiel - Reaktorbehälter und Prozessbehälter:

- schlagartige Freisetzung des gesamten Inhalts (5×10^{-6} [y^{-1}]),
- Freisetzung des gesamten Inhalts in 10 Minuten in einem kontinuierlichen und konstanten Strom (5×10^{-6} [y^{-1}]),

- Kontinuierliche Abgabe des Inhalts aus einem Loch mit einem effektiven Durchmesser von 10 mm (1×10^{-4} [y^{-1}])

Mit der Angabe von Referenzwerten für die Eintrittshäufigkeiten erfolgt eine mehr oder weniger bewusste Übereinkunft über berücksichtigte Gefahrenquellen sowie Loss Of Containment (LOC)-verhindernder Maßnahmen.

Grundsätzlich werden mit den Referenzwerten für die Eintrittshäufigkeiten betriebliche Gefahrenquellen abgedeckt. Technische umgebungsbedingte Gefahrenquellen müssen bei Überschreitung bestimmter Eintrittshäufigkeiten separat berechnet und in die QRA aufgenommen werden. In der Praxis wird diese Anforderung jedoch nicht konsequent umgesetzt[37]. Natürliche umgebungsbedingte Gefahrenquellen sowie Eingriffe Unbefugter werden im Rahmen der QRA nicht berücksichtigt[38].

Im Manual wird darauf hingewiesen, dass die Qualität des Sicherheitsmanagementsystems (SMS) einen Einfluss auf die Ereignishäufigkeiten haben kann, eine Quantifizierung jedoch als schwierig angesehen wird, sodass im Manual keine konstruktiven Vorschläge zur Berücksichtigung des SMS's bei den anzusetzenden Eintrittshäufigkeiten gemacht werden.

Davon abgesehen wird im Manual dazu ermutigt, von den vorgegebenen Referenzwerten für Eintrittshäufigkeiten abzuweichen, sollten gute Gründe dafür vorgebracht werden können:

- Realisierung technischer Maßnahmen, welche über den Stand der Technik hinaus gehen,
- Thermisches Durchgehen, umgebungsbedingte Gefahrenquellen, sowie interne Dominoeffekte sind als Gefahrenquellen in den Referenzwerten nicht enthalten und müssen, sofern sie ein signifikantes Risiko darstellen, in die QRA mit aufgenommen werden.

Im Falle der Anwender von den Referenzwerten abweichende Eintrittshäufigkeiten vorschlagen möchte, müssen diese durch entsprechende Analysen, zum Beispiel in Form eines Fehlerbaumes dokumentiert werden.

Praktisch wird dies aber nur schwer zu realisieren sein, da nicht unmittelbar ersichtlich ist, welche Annahmen (über berücksichtige Ursachen sowie über berücksichtige konkrete Sicherheitseinrichtungen) bei der Festlegung des Referenzwertes getroffen worden sind.

Dies wird unter anderem in den folgenden Studien deutlich:

Eine 2006 durch die britische Regierungsbehörde HSE (Health and Safety Executive) durchgeführte Studie[39] kommt zu dem Schluss, dass im niederländischen Kalkül die verschiedenen Mechanismen, welche zu den LOC's führen können, nur teils berücksichtigt und die bereitgestellten Ausfallraten somit zu optimistisch sind. Die angegebenen Ausfallraten für die LOC's von Druckbehältern („Vessels") basieren beispielsweise auf der Annahme, dass Korrosion, Ermüdung durch Vibrationen, Bedienungsfehler und äußere Einwirkungen ausgeschlossen sind. Im Manual impliziert wird also eine gewisse „good practise", welche solche Ursachen ausschließt.

[37] Einschätzung durch das RIVM

[38] Dies bedeutet aber nicht, dass entsprechende Gefahrenquellen von den Betreibern und Behörden ignoriert werden. In den Sicherheitsberichten sind zumindest Risiken von Erdbeben und Überflutungen darzustellen und entsprechende Gegenmaßnahmen abzuleiten)

[39] Failure frequencies for major failures of high pressure storage vessels at COMAH sites: A comparison of data used by HSE and the Netherlands by Clive Nussey, December 2006

Zu vergleichbaren Aussagen kommt 2014 eine Studie der TU Eindhoven, welche anhand eines Beispiels (BLEVE während eines Befüllvorganges eines Tanklasters mit LPG) argumentiert, dass a) die vorgeschlagene Eintrittshäufigkeit auf veraltete Daten beruht und b) die aus den Referenzdaten gewonnene Ausfallhäufigkeit ohne stichhaltige Argumentation um einen Faktor >10 reduziert wurde. Die HSE schlägt für das benannte Beispiel eine 40-140-fache so hohe Eintrittshäufigkeit im Vergleich zum Manual vor[40]. Die Studie zeigt weiterhin auf, dass die tatsächliche Häufigkeit des BLEVE's und damit auch die Position der 10^{-6} Iso-Risikolinie (Individualrisiko) im genannten Beispiel signifikant davon abhängt,

- wie viele Beladevorgänge per Jahr durchgeführt werden,
- wie lange ein einzelner Beladevorgang dauert,
- ob die LPG-Straßentankwagen wärmegedämmt sind[41].

Die angestrebte Verifizierbarkeit des QRA-Verfahrens ist somit hinsichtlich der zur Anwendung kommenden Eintrittshäufigkeiten nur bedingt gegeben.

Das QRA-Verfahren beschränkt sich explizit auf die Abschätzung von Todesfolgen außerhalb des Betriebsgeländes beziehen (keine Todesfolgen bei Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, grundsätzlich keine Verletzungen, keine weiteren Schutzgüter). Dieser Umstand sollte bei der Beantwortung der Frage, ob mit dem Verfahren grundsätzlich alle (für das deutsche Störfallrecht) relevanten LOC's ermittelt werden (können), berücksichtigt werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit dem Verfahren eine indirekte, gewissermaßen auch systematische, aber sicherlich nicht vollständige Berücksichtigung relevanter Gefahrenquellen, jedoch keine explizite Identifizierung derselben, erfolgt.

Bestimmung der erforderlichen, dem Stand der Sicherheitstechnik entsprechenden Vorkehrungen zur Störfallverhinderung und Maßnahmen zur Störfallbegrenzung

Es werden keine Hinweise bezgl. zu berücksichtigender Erkenntnisquellen zur Ermittlung des Standes der Sicherheitstechnik (im Sinne eines Vorgehens vgl. mit SFK-GS-33) gegeben.

Mit der Anwendung des Manuals erfolgt weder eine systematische Identifizierung von Gefahrenquellen, noch eine Ableitung von entsprechend geeigneten Vorkehrungen und Maßnahmen zu Begrenzung des Risikos. Das Manual möchte primär eine Berechnungslogik bereitstellen, welche verifizierbare, reproduzierbare und vergleichbare Berechnungsergebnisse für das quantitative Risiko liefert.

Das niederländische Verfahren liefert nur einen bedingten Beitrag zur Gefahrenanalyse und Bestimmung des Standes der Sicherheit nach deutschem Störfallrecht.

[40] Xanten, van, N. H. W., Pietersen, C. M., Pasman, H. J., Torn, van der, P., Vrijling, H. K., Wal, van der, A. J., & Kerstens, J. G. M. (2014). Risk evaluation in Dutch land-use planning. Process Safety and Environmental Protection, 92(4), 368-376. https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.06.002

[41] Gemäß zitierter Studie ist die Wärmedämmung Teil der Standardausführung von Tanklastwagen und in den Niederlanden rechtlich gefordert (-> REVI (Regeling externe veiligheid inrichtingen [External Safety Order])), andererseits wird im Reference Manual Version 3.3, Kap. 3.15 „Loading activities" explizit auf Standards bezgl. Ausführung der involvierten Anlagenteile eingegangen, jedoch ohne die Wärmedämmung zu adressieren.

6.2.5 QRA-Verfahren in Flandern

Ermittlung der relevanten Gefahrenquellen (inkl. (inter-) organisationale und menschliche Fehler), Ereignisse und Störfalleintrittsvoraussetzungen inklusive ihrer Eintrittswahrscheinlichkeiten

Das Risk calculation Manual stellt für verschiedene Systeme (Lager- und Prozessbehälter, Pumpen und Kompressoren, Wärmetauscher, Pipelines etc.) jeweils anzuwendende Freisetzungsszenarien (Loss of containment-Ereignisse, LOC's) bereit. Den LOC's sind generische Eintrittshäufigkeiten zugeordnet.

Die anzuwendenden Eintrittshäufigkeiten basieren größtenteils auf Statistiken. Diese werden im Manual abgebildet und beinhalten in der Regel prozentuale Aufschlüsselungen nach den jeweilen Ursachen.

Grundsätzlich werden mit den Referenzwerten für die Eintrittshäufigkeiten betriebliche Gefahrenquellen abgedeckt.

- Technische umgebungsbedingte Gefahrenquellen werden separat betrachtet und nur teilweise in die QRA aufgenommen:So wird beispielsweise ein separates Handbuch zu Berechnung der von Windenergieanlagen ausgehenden Risiken bereitgestellt[42].
- Risiken, welche von benachbarten Seveso-Anlagen ausgehen, sind hingegen nur qualitativ zu betrachten (Vgl. Risk calculation Manual, Kap. 23).
- Für die Hochspannungsinfrastruktur wird derzeit eine (quantitative) Methodik für die Masten entwickelt. Bei den Kabeln handelt es sich um einen qualitativen Ansatz.
- Beim Transport gefährlicher Güter handelt es sich um einen qualitativen Ansatz.

Natürliche umgebungsbedingte Gefahrenquellen, sowie Eingriffe Unbefugter werden im Rahmen der QRA nicht berücksichtigt, es sei denn diese sind als Fehlerursachen in den Statistiken mit aufgeführt.

Die flämische Behörde hat ein Forschungsprojekt initiiert, welches untersuchen soll, inwiefern „indirekte" Gefahrenquellen (gemeint sind technische und natürliche umgebungsbedingte Gefahrenquellen, sowie Eingriffe Unbefugter) in Zukunft im Rahmen der QRA-Betrachtungen berücksichtigt werden sollen.

Die konkret vorgegebenen LOC's sowie die assoziierten Eintrittshäufigkeiten sind nicht deckungsgleich mit denen des Reference Manual Bevi. Jedoch kann ein hoher Grad an Übereinstimmung attestiert werden. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass beide Manuals kontinuierlich weiterentwickelt werden und auch auf einander Bezug nehmen. Ein Beispiel für eine Abweichung stellen die druckbeaufschlagten Behälter dar. Im Risk Calculation Manual werden explizit Korrosion und menschliche Fehler als Ursachen berücksichtigt (Vgl. 6.7.1.1), während dies im Reference Manual Bevi aufgrund der Annahme „einer guten Betreiberpraxis" als ausgeschlossen angesehen wird.

Als weiteres Beispiel dienen die angegebenen LOC's für Pumpen ohne Dichtungen. Für das Ereignis „Leak (10% of nominal Diameter)" wird im Risk Calculation Manual der Wert 1*10^-4 (je Jahr, je Pumpe) angegeben, im Reference Manual Bevi hingegen der Wert 5*10^-5, ein Unterschied mit Faktor 2. Für das LOC „Bruch" wird im Gegensatz zum Reference Manual Bevi im Risk Calculation Manual kein konkreter Wert genannt.

[42] https://omgeving.vlaanderen.be/nl/instrumentarium-windturbines

Vom Anwender des Manuals wird eine Anpassung der Eintrittshäufigkeiten lediglich für „spezielle Fälle“ gefordert. Eine systematische Auseinandersetzung mit zugrundeliegenden Gefahrenquellen wird vom Anwender nicht gefordert.

Die LOC's im Risk calculation manual sind speziell für die Bestimmung des individuellen Risikos und des gesellschaftlichen Risikos, d.h. zur Analyse möglicher Todesfolgen in der Bevölkerung, entwickelt worden. Dies sollte bei einer Anwendung des Verfahrens nach deutschem Störfallrecht berücksichtigt werden.

Bestimmung der erforderlichen, dem Stand der Sicherheitstechnik entsprechenden Vorkehrungen zur Störfallverhinderung und Maßnahmen zur Störfallbegrenzung

Es werden keine Hinweise bezgl. zu berücksichtigender Erkenntnisquellen (Technische Regeln Anlagensicherheit, etc.) zur Ermittlung des Standes der Sicherheitstechnik (im Sinne eines Vorgehens vgl. mit SFK-GS-33) gegeben.

Mit der Anwendung des Manuals erfolgt weder eine systematische Identifizierung von Gefahrenquellen, noch eine Ableitung von entsprechend geeigneten Vorkehrungen und Maßnahmen zu Begrenzung des Risikos. Das Manual möchte primär eine Berechnungslogik bereitstellen, welche vergleichbare, reproduzierbare Berechnungsergebnisse für das quantitative Risiko liefert.

Das flämische Verfahren liefert nur einen bedingten Beitrag zur Gefahrenanalyse und Bestimmung des Standes der Sicherheitstechnik nach deutschem Störfallrecht.

6.2.6 ARAMIS-Verfahren

Ermittlung der relevanten Gefahrenquellen (inkl. (inter-) organisationale und menschliche Fehler), Ereignisse und Störfalleintrittsvoraussetzungen inklusive ihrer Eintrittswahrscheinlichkeiten

Das Verfahren definiert zwölf kritische Ereignisse (critical events (CE)), welche im Rahmen der Durchführung der Analyse potentiell zu berücksichtigen sind. Welche dieser kritischen Ereignisse vom Anwender tatsächlich analysiert werden sollen, hängt dabei von der Art des betrachteten Anlagenteils (equipment type (EQ)) und dem physikalischen Zustand des zugrundeliegenden Gefahrstoffes (physical state (STAT)) ab.

Der vorgelagerte Analyseschritt, die Auswahl der in der Analyse zu betrachtenden Anlagenteile, erfolgt unter Berücksichtigung der R-Sätze (Risikosätze). Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass es sich bei den R-Sätzen (und S-Sätzen (Sicherheitssätzen)) um eine mittlerweile veraltete Gliederung von kodifizierten Warnhinweisen zur Charakterisierung von Gefahrenmerkmalen von Gefahrstoffen handelt. Die R- und S-Sätze wurden in H (hazards)- und P (Precautionary)-Sätze überführt[43].

Die Anwendung von R- bzw. H-Sätzen kann dazu führen, dass Zwischenprodukte im Rahmen der Untersuchung nicht berücksichtigt werden (da diese nicht zwangsläufig mit R bzw. H-Sätzen erfasst werden müssen). Weiterhin werden im Benutzerhandbuch ARAMIS R-Sätze angegeben, die anscheinend gar nicht existieren (R-Sätze 103 – 106).

[43] Die H- und P-Sätze („Gefahren- und Sicherheitshinweise“, englisch hazard statements und precautionary statements) sind standardisierte, kurze Sicherheitshinweise für Gefahrstoffe, die im Rahmen des global harmonisierten Systems zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien (GHS) verwendet werden. Die H- und P-Sätze haben in der GHS-Kennzeichnung eine analoge Aufgabe wie die R- und S-Sätze der alten EU-Kennzeichnung.

Abbildung 42: Matrix „Anlagentyp - kritisches Ereignis“

		CE1 Decomposition	CE2 Explosion	CE3 Materials set in motion (entrainment by air)	CE4 Materials set in motion (entrainment by a liquid)	CE5 Start of a fire (LPI)	CE6 Breach on the shell in vapour phase	CE7 Breach on the shell in liquid phase	CE8 Leak from liquid pipe	CE9 Leak from gas pipe	CE10 Catastrophic rupture	CE11 Vessel collapse	CE12 Collapse of the roof
Mass solid storage	EQ1	X	X	X	X	X							
Storage of solid in small packages	EQ2					X					X		
Storage of fluid in small packages	EQ3					X	X	X			X		
Pressure storage	EQ4					X	X	X	X	X	X		
Padded storage	EQ5					X		X	X		X	X	
Atmospheric storage	EQ6					X		X	X		X	X	X
Cryogenic storage	EQ7					X	X	X	X	X	X	X	
Pressure transport equipment	EQ8					X	X	X	X	X	X		
Atmospheric transport equipment	EQ9					X		X	X		X	X	
Pipe	EQ10					X			X	X			
Intermediate storage equipment integrated in the process	EQ11	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Equipment devoted to the physical or chemical separation of substances	EQ12					X	X	X	X	X	X		
Equipment involving chemical reactions	EQ13					X	X	X	X	X	X		
Equipment designed for energy production and supply	EQ14					X	X	X	X	X	X		
Packaging equipment	EQ15			X	X	X			X	X			
Other facilities	EQ16					X	X	X	X	X	X		

Quelle: ARAMIS Final User Guide, H.Andersen et al, 2004

Abbildung 43: Matrix „Phase - kritisches Ereignis“

		CE1 Decomposition	CE2 Explosion	CE3 Materials set in motion (entrainment by air)	CE4 Materials set in motion (entrainment by a liquid)	CE5 Start of a fire (LPI)	CE6 Breach on the shell in vapour phase	CE7 Breach on the shell in liquid phase	CE8 Leak from liquid pipe	CE9 Leak from gas pipe	CE10 Catastrophic rupture	CE11 Vessel collapse	CE12 Collapse of the roof
Solid	STAT1	X	X	X	X	X	X			X	X		
Liquid	STAT2					X		X	X		X	X	X
Two-phase	STAT3					X	X	X	X	X	X		
Gas / Vapour	STAT4					X	X			X	X		

Quelle: ARAMIS Final User Guide, H.Andersen et al, 2004

Das Verfahren sieht eine systematische Analyse möglicher Gefahrenquellen, welche zum critical event führen können, vor. Die Analyse ist in einem iterativen Prozess zunächst ohne und dann mit Gegenmaßnahmen durchzuführen. Als primäre Technik wird die Fehlerbaumanalyse mit dem kritischen Ereignis als Top-Ereignis des Fehlerbaumes angewandt. Im Rahmen des ARAMIS-Projektes wurden generische Fehlerbäume (ohne Gegenmaßnahmen) für die definierten kritischen Ereignisse entwickelt, welche durch den Anwender zunächst geprüft und auf die konkret vorliegende Situation abgeändert werden sollen, bevor in einem zweiten Schritt entsprechende Gegenmaßnahmen festgelegt werden.

Die generischen Fehlerbäume bilden grundsätzlich alle Arten von Gefahrenquellen ab (betrieblich und umgebungsbedingte Gefahrenquellen, Eingriffe Unbefugter). Dabei wird auf auslegungsbedingte Fehlermöglichkeiten ebenso wie auf prozessbedingte Fehlermöglichkeiten eingegangen.

Beispiel: Für das kritische Ereignis " Großer Bruch am Gehäuse oder Leckage (Large breach on shell or leak)“ (CE6, CE7, CE8, CE9) werden als notwendige und hinreichende Ursachen des kritischen Ereignisses untersucht:

- innerer Überdruck (Flüssigkeit) (internal overpressure (liquid))
- Innerer Überdruck (Feststoff) (Internal overpressure (Solid material))
- Innerer Überdruck (Feststoff) (Internal overpressure (Gas material))
- Bruch aufgrund übermäßiger mechanischer Beanspruchung aufgrund äußerer Ursachen (Rupture tied to an excessive mechanical stress due to external causes)
- Unzureichende anfängliche mechanische Eigenschaften der Struktur (unter normalen Nutzungsbedingungen) (Insufficient initial mechanical properties of the structure (below normal use conditions))
- Sprödbruch (Brittle rupture)

Für die Ursache „innerer Überdruck (Flüssigkeit) (internal overpressure (liquid))“ wird durch ARAMIS folgender Teilfehlerbaum bereitgestellt:

Abbildung 44: Ausschnitt Fehlerbaum für das kritische Ereignis " Großer Bruch am Gehäuse oder Leckage (Large breach on shell or leak)"

Undesirable event		Detailed direct causes		Direct causes	
excessive liquid transfer in batch system (due to human or command error)	or	filled beyond normal level		overfilling vessel causes overpressure	or
insufficient capacity available in batch system (design error, defective maintenance)					
Loss of utilities					
blocked internals leads to overfilling of continuous system (defective maintenance, unexpected reaction)					
blocked outlet leads to overfilling of continuous system (defective maintenance, unexpected reaction (crystallisation))					
Lacking or defective maintenance (not replaced like with like)	or	more flow in than out	and	Pump causes overpressure	
Incorrect command and/or control signal					
Loss of utilities					
Incorrect sensor signal					
Interpretation error					
Transmission error					
Other human error					
Normal situation	or	vessel filled at maximum			
Abnormal situation (errors, failure)					
internal flammable or explosive mixture	and	internal combustion/explosion		combustion/explosion causes overpressure	
ignition source					
wrong substance introduced	or	runaway reaction		overpressure	
substance introduced in the wrong form					
substance introduced in wrong ratio/order					
stirrer failure					
primary cooling/ reaction control fails					
substance introduced too rapidly					
vessel filled by design has blocked inlet and outlet	or	filled vessel containing liquid	and	thermal expansion of liquid filled vessel causes overpressure	
vessel left in overfilled condition					
refrigeration fails	or	temperature rise			
warmed up externally					
rapid valve closure	or	sudden blockage		back pressure wave causes overpressure	
sudden sediment blockage					
		stratification potential in vessel (e.g. LNG)	and	roll-over of vessel contents causes overpressure	
Lacking or defective maintenance	or	no mixing in vessel			
Excessive conditions due to process or product lead to failure of the mixing system					
Loss of utilities					
Human error					
Conception error					
Installation error					
Command failure					
evaporating upper layer (gets colder)	or	difference in temperature between layers (temperature inversion)			
warmed up lower layer					
filling of a vessel					
Normal presence	or	Presence of water in the pipe	and	freezing and expansion of aqueous phase	
Contamination					
Defect in heating	or	Low temperature			
Cold weather					

Quelle: ARAMIS D1C - APPENDIX 4 Generic Fault Trees (2004)

Die generischen Fehlerbäume wurden mit der Intention entwickelt, erschöpfend sämtliche denkbaren Ursachen abzubilden, sodass der Anwender den spezifischen, d.h. für seine Anwendersituation passenden Fehlerbäum weitestgehend durch Streichen der nichtpassenden Fehlerursachen generieren kann.

Als Hilfestellung für die Bestimmung der Eintrittshäufigkeiten und Fehlerraten wurde im Rahmen des ARAMIS-Projektes zwei Appendizes erarbeitet:

- "Appendix 7 of deliverable D.1.C.: Frequencies and probabilities data for the fault trees",
- "Appendix 10 of deliverable D.1.C.: Generic frequencies data for the critical events".

Die bereitgestellten Daten liefern einerseits generische Werte für die kritischen Ereignisse, andererseits liefern sie Daten zur Quantifizierung der einzelnen Ursachen und Faktoren, sodass für individuell erstellte Fehlerbäume entsprechend individuelle Eintrittshäufigkeiten für das kritische Ereignis gerechnet werden können.

Im fortgeschrittenen Stadium des ARAMIS-Projektes wurden Case studies durchgeführt, welche die Anwendbarkeit und Validität des ARAMIS-Verfahrens untersuchen sollten. Die durch ARAMIS erarbeiteten Fehlerbäume mussten von den Anwendern auf den beiden obersten Ebenen nahezu nirgends angepasst oder ergänzt werden, auf den tieferen Ebenen hingegen waren einige Ergänzungen und Anpassungen nötig. Die Quantifizierung der Fehlerbäume unter Verwendung verfügbarer, generischer Datensammlungen wurde von den Teilnehmern aufgrund der damit einhergehenden Unsicherheiten als schwierig angesehen. Der Einsatz von Daten aus dem eigenen Anlagenbetrieb solle demnach bevorzugt werden. Insbesondere wurde der Mangel an zuverlässigen Daten zu menschlichen Faktoren als problematisch eingeschätzt, da diese Fehler einen hohen Anteil an der Gesamtheit aller Gefahrenquellen ausmachen.[44]

Ergänzend ist festzuhalten, dass die Forschungsnehmenden des UBA-Projektes eine gewisse Unvollständigkeit in Bezug auf mögliche Konstellationen in den oben abgebildeten Auswahlmatrizen vermuten. So werden beispielsweise folgende Kombinationen nicht berücksichtigt:

- Zersetzung (decomposition, CE1) oder Explosion (CE2) bei Gefahrstoffen im liquid state.

Auf den zweiten Schritt der Gefahrenanalyse, der Bestimmung geeigneter Gegenmaßnahmen inkl. einer Bewertung deren Performanzen wird in Kapitel 6.3.6 (Szenarienentwicklung mit dem ARAMIS-Verfahren) eingegangen. (Das ARAMIS-Verfahren sieht bezgl. der zu betrachtenden Kausalketten ganzheitliche Betrachtungen der festgelegten Gegenmaßnahmen vor).

Bestimmung der erforderlichen, dem Stand der Sicherheitstechnik entsprechenden Vorkehrungen zur Störfallverhinderung und Maßnahmen zur Störfallbegrenzung

Es werden keine Hinweise zur Ermittlung des Standes der Sicherheitstechnik (im Sinne eines Vorgehens vgl. mit SFK-GS-33) gegeben.

6.3 Vergleichende Betrachtungen für den Analyseschritt „Szenarienentwicklung"

6.3.1 HAZOP-Verfahren

Grundgedanke des HAZOP-Verfahrens ist die szenarische Betrachtung möglicher Störungen und Störfälle, welche aus möglichen Abweichungen des bestimmungsmäßen Betriebes resultieren können. Dabei werden Ursachen und Auswirkungen der Abweichungen analysiert, um so geeignete und verhältnismäßige Vorkehrungen und Maßnahmen zur Reduzierung der identifizierten Risiken ableiten zu können. Der Fokus liegt hierbei auf der Identifizierung möglicher Gefahrenquellen, weniger in der detaillierten Beschreibung sämtlicher, denkbarer Störfallablaufszenarien für die jeweils identifizierte Abweichung. Das HAZOP-Verfahren beschreibt – abgesehen von der Vorgabe der Leitworte zur Identifikation möglicher

[44] A global view on ARAMIS, a risk assessment methodology for industries in the framework of the SEVESO II directive. Olivier Salvi, Bruno Debray, INERIS, Direction des Risques Accidentels, F-60550 Verneuil en Halatte, France Available online 19 October 2005

Abweichungen vom bestimmungsmäßen Betriebes – jedoch nicht, in welcher Tiefe die Szenarien zu entwickeln sind (Tiefe im Sinne des Umfangs der Ursachen-Wirkungen-Kausalketten), bzw. welche Ursachen und Folgen zu berücksichtigen sind.

Es bleibt dem Analystenteam überlassen, den Grad der Quantifizierung der Häufigkeit bzw. der Schwere der Auswirkung der identifizierten Szenarien zu bestimmen. Es sind jedoch mindestens binäre Abschätzungen bezgl. der Aspekte „Gefahrenquelle vernünftigerweise auszuschließen (ja/nein)“ sowie „Sicherheitsrelevanz: Ernste Gefahr liegt vor (ja/nein)“ zu treffen. In der Praxis werden häufig detailliertere Abstufungen angewendet (Stichwort „Risikomatrix“ bzw. „Risikograph“).

Die Abschätzungen dienen der Einordnung, ob Gegenmaßnahmen notwendig sind, bzw. die bisher im Szenario berücksichtigten Vorkehrungen und Maßnahmen ausreichend sind. Risikomatrizen werden in der Regel konzernweit einheitlich festgelegt und beinhalten ein Bewertungselement bezgl. der Akzeptabilität des analysierten Szenarios (Akzeptabilität aus Sicht des Unternehmens).

Ebenso bleibt es dem Analystenteam überlassen, den Detailierungsgrad der Analyse festzulegen. In der Praxis hängt der gewählte Detailierungsgrad der Untersuchung und somit die Güte bzw. Qualität der quantitativen Abschätzung von der Komplexität des betrachteten Szenarios ab. Ein höherer Detailierungsgrad wird unter anderem durch die ergänzende Anwendung weiterer Analysetechniken (FMEA, FTA/ETA, etc.) erreicht.

Häufig werden von den Betreibern im Anschluss der HAZOP-Analyse für ausgewählte Szenarien quantitative Betrachtungen in Form von Ausbreitungs- und Auswirkungsberechnungen vorgenommen, umso wichtige Informationen

- zur Erstellung interner Alarm- und Gefahrenabwehrpläne
- zur Abschätzung möglicher Dominoeffekte („Angemessener Abstand“ KAS 18)

zu generieren.

Die folgende Tabelle stellt überblicksweise die mit der Erstellung der Szenarien verbundenen Ziele dar:

Tabelle 54: Zielstellungen der Szenarienentwicklung – HAZOP-Verfahren

Zielstellung	Zusammenfassende Auswertung
Bestimmung der zur Verhinderung von Störfallen erforderlichen Vorkehrungen	Bedingt ja. Mittels HAZOP-Technik sollen geeignete bzw. verhältnismäßige Gegenmaßnahmen abgeleitet werden. Zu berücksichtigen sind jedoch folgende Punkte: a) HAZOP selbst ist ein qualitatives Verfahren. Ein Kalkül zur Quantifizierung von Risiken bzw. zur Quantifizierung von Zuverlässigkeiten von Gegenmaßnahmen liefert HAZOP nicht. b) Infrage kommende Gegenmaßnahmen können lediglich für identifizierte Gefahrenquellen diskutiert werden. Gerade umgebungsbedingte und menschliche Fehlerquellen sind erfahrungsgemäß nicht notwendiger Bestandteil von HAZOP-Analysen. c) HAZOP beinhaltet kein Kalkül zur Bewertung von Restrisiken
Bestimmung der zur Minderung von Störfallauswirkungen erforderlichen Maßnahmen,	siehe oben

Zielstellung	Zusammenfassende Auswertung
Identifikation, Abschätzung und Bewertung verbleibender Risiken,	Bedingt ja: Die HAZOP-Analyse bietet zumindest eine Ausgangsposition zur Abschätzung und Bewertung verbleibender Risiken. Eintrittshäufigkeiten und Auswirkungen können entweder grob abgeschätzt oder detailliert gerechnet werden (z.B. durch Anwendung von FTA/ETA und Berechnung der Auswirkungen von Störfallablaufszenarien mittels mathematisch/physikalischer Modelle)
Abschätzung des Ausmaßes und der Schwere von Störfällen und Ermittlung der von Störfällen betroffenen Gebiete,	bedingt ja: siehe oben.
Bestimmung der geeigneten Notfallmaßnahmen (incl. Alarm- und Gefahren-abwehrplanung)	Bedingt ja: Siehe oben.

6.3.2 LOPA-Verfahren

Die mittels LOPA zu betrachtenden Szenarien werden in den Grundzügen durch die vorgelagerte Gefahrenanalyse beschrieben. Aufgrund des vorrangigen Analysezieles der Bewertung der mit dem Szenario assoziierten Gegenmaßnahmen (bzw. der Ableitung von SIL-Leveln für PLT-Sicherheitseinrichtungen) erfolgt darüber hinaus keine detaillierte Szenarienentwicklung. Die im Rahmen der Gefahrenanalyse identifizierten Folgen werden via Urteil der Beteiligten semiquantitativ abgeschätzt. Die dafür notwendigen Annahmen werden mehr oder weniger implizit getroffen, soweit keine konkreten Angaben in der HAZOP gemacht wurden (z.B. Annahmen über Stofffreisetzungsdauern- oder mengen, betroffene Flächen im Falle der Ausbreitung eines toxisch wirkenden Stoffes, …).

Die folgende Tabelle stellt überblicksweise die mit der Erstellung der Szenarien verbundenen Ziele dar:

Tabelle 55: Zielstellungen der Szenarienentwicklung – LOPA-Verfahren

Zielstellung	Zusammenfassende Auswertung
Bestimmung der zur Verhinderung von Störfallen erforderlichen Vorkehrungen	Bedingt ja. Mittels LOPA-Technik sollen geeignete bzw. verhältnismäßige Gegenmaßnahmen abgeleitet werden. Zu berücksichtigen sind jedoch folgende Punkte: a) LOPA ist ein semiquantitatives Verfahren. Eintrittshäufigkeiten und Zuverlässigkeiten von Gegenmaßnahmen werden (semi)quantitativ abgeschätzt, die Schwere der Auswirkungen wird durch Urteil der Beteiligten abgeschätzt. b) Infrage kommende Gegenmaßnahmen können lediglich für identifizierte Gefahrenquellen diskutiert werden. Gerade umgebungsbedingte und menschliche Fehlerquellen sind erfahrungsgemäß nicht notwendiger Bestandteil von HAZOP-Analysen (auf welche die LOPA in Praxis häufig aufsetzt).
Bestimmung der zur Minderung von Störfallauswirkungen erforderlichen Maßnahmen,	siehe oben
Identifikation, Abschätzung und Bewertung verbleibender Risiken,	Teilweise ja: Mittels LOPA erfolgt eine semiquantitative Abschätzung und Bewertung der Restrisiken einzelner Szenarien. Die Identifikation des Risikos ist hingegen Teil der Gefahrenanalyse.

Zielstellung	Zusammenfassende Auswertung
Abschätzung des Ausmaßes und der Schwere von Störfällen und Ermittlung der von Störfällen betroffenen Gebiete,	Teilweise. Das Ausmaß, bzw. die Schwere der Auswirkungen wird lediglich grob abgeschätzt
Bestimmung der geeigneten Notfallmaßnahmen (incl. Alarm- und Gefahren-abwehrplanung)	Bedingt. Die äußerste Schutzebene des LOPA-Modells stellt zwar die Gefahrenabwehr dar, entsprechende Maßnahmen werden aber als gegeben vorausgesetzt bzw. nicht abgeleitet.

6.3.3 Fehlerbaumanalyse und Ereignisbaumanalyse

Fehler- und Ereignisbäume können in Form moderierter Workshops entwickelt werden, oder aus bestehenden Analysen (z.B. HAZOP-Studie) abgeleitet werden. Generische Ereignisbäume sind beispielsweise für die QRA-Verfahren Niederlande und Flandern entwickelt worden. ARAMIS stellt generische Fehlerbäume bereit, die als Ausgangspunkt für eigene Untersuchungen verstanden werden müssen und entsprechend angepasst werden sollen.

Grundsätzlich gilt: Detaillierungsgrad sowie Betrachtungstiefe und -umfang hängen von der mit der Erstellung der Fehler- und Ereignisbäume verbundenen Zielstellung ab.

Die Qualität eigenständig entwickelter Fehler- und Ereignisbäume hängt maßgeblich von der Zusammensetzung des Teams ab.

Die folgende Tabelle stellt überblicksweise die mit der Erstellung der Szenarien verbundenen Ziele dar:

Tabelle 56: Zielstellungen der Szenarienentwicklung – Fehlerbaum- und Ereignisbaumanalyse

Zielstellung	Zusammenfassende Auswertung
Bestimmung der zur Verhinderung von Störfallen erforderlichen Vorkehrungen	Bedingt. Die entwickelten Fehler- und Ereignisbäume können zur Bestimmung geeigneter Vorkehrungen zur Verhinderung von Störfällen und Maßnahmen zur Minderung von Störfallauswirkungen für die identifizieren Gefahrenquellen herangezogen werden. Dazu werden in Kombination mit dem Risikographen oder einer Risikomatrix verbleibende Risiken bewertet. Infrage kommende Gegenmaßnahmen können lediglich für identifizierte Gefahrenquellen diskutiert werden
Bestimmung der zur Minderung von Störfallauswirkungen erforderlichen Maßnahmen,	siehe oben
Identifikation, Abschätzung und Bewertung verbleibender Risiken,	Bedingt ja: Die Fehler- und Ereignisbäume bieten zumindest eine Ausgangsposition zur Abschätzung und Bewertung verbleibender Risiken. Eintrittshäufigkeiten können über Eintrittshäufigkeiten der Initialereignisse sowie von Verzweigungswahrscheinlichkeiten gerechnet werden. Die Auswirkungen können entweder durch die an der Analyse beteiligten Personen abgeschätzt oder detailliert gerechnet werden (Berechnung der Auswirkungen von Störfallablaufszenarien mittels mathematisch/physikalischer Modelle)
Abschätzung des Ausmaßes und der Schwere von Störfällen und Ermittlung der von Störfällen betroffenen Gebiete,	Bedingt ja. Siehe oben

Zielstellung	Zusammenfassende Auswertung
Bestimmung der geeigneten Notfallmaßnahmen (incl. Alarm- und Gefahren-abwehrplanung)	Bedingt ja. Siehe oben

6.3.4 QRA-Verfahren in den Niederlanden

Im „Reference Manual BEVI risk assessments“ (nachfolgend als „Manual“ bezeichnet) wird eine Liste mit Loss of Containment-Ereignissen für verschiedene Anlagenteile wie beispielsweise Lagerbehälter, verfahrenstechnische Behälter, Pipelines, Pumpen, Kompressoren und Wärmetauscher bereitgestellt, welche potentiell in die Analyse aufzunehmen sind.

Tabelle 57: Übersicht Anlagenteile und Loss of Containment-Ereignisse (Auszug)

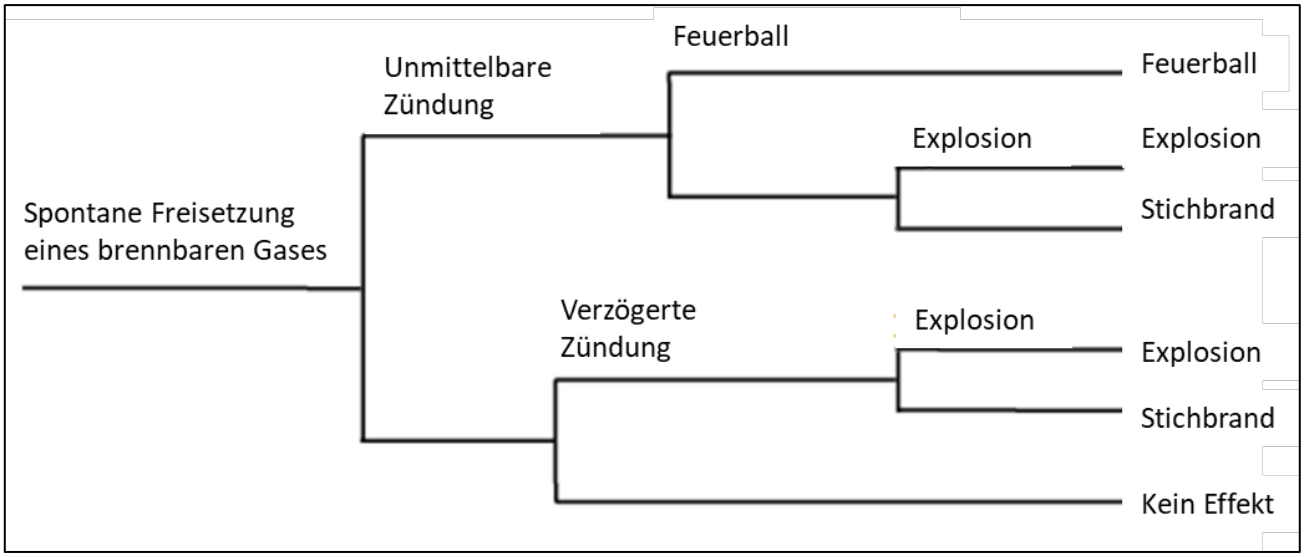
Anlagenteil	Loss of Containment-Ereignisse
Druck beaufschlagte Lagerbehälter (ober- und unterirdisch), Atmosphärische Lagerbehälter (Typ: „single containment“), verfahrenstechnischer Behälter (Typ: „Reactor vessel“, „process vessel“)	Spontane Freisetzung des gesamten Stoffinventars, kontinuierliche Freisetzung des gesamten Stoffinventars über einen Zeitraum von 10 Minuten, kontinuierliche Freisetzung des Stoffinventars über eine effektive Leckage 10mm,
Atmosphärische Lagerbehälter (Typ: “protective outer shell” oder “double containment”)	spontanes Versagen des Primärbehälters und der Außenhülle; Freisetzung des gesamten Inhalts spontaner Ausfall des Primärbehälters; Freisetzung des gesamten Inhalts in die intakte Außenhülle Versagen des Primärbehälters und der Außenhülle; Freisetzung des gesamten Inhalts in 10 min. in einem kontinuierlichen und konstanten Strom Ausfall des Primärbehälters; Freisetzung des gesamten Inhalts in 10 min. in einem kontinuierlichen und konstanten Strom in die intakte Außenhülle Ausfall des Primärbehälters; kontinuierliche Freisetzung aus einem Loch mit einem effektiven Durchmesser von 10 mm in die intakte Außenhülle
Pipelines (oberirdisch)	Bruch in der Rohrleitung, Leckage mit einem wirksamen Durchmesser von 10 % des Nenndurchmessers bis maximal 50 mm
Pumpen und Kompressoren	Bruch Leckage (10 % Durchmesser)

Beim Freisetzen von brennbaren Gasen und Flüssigkeiten sind unterschiedliche Folgewirkungen möglich: BLEVE und/oder Feuerball, Jet fire, Lachenbrand (Pool fire), Dampfwolkenexplosion (Vapour cloud explosion) und Stichbrand (Flashfire). Das Auftreten dieser Phänomene hängt von der Substanz (dem Gefahrstoff), dem Szenario und weiteren Bedingungen ab. Ereignisbäume für die verschiedenen Szenarien, einschließlich der anzuwendenden Wahrscheinlichkeiten sind beschrieben. So ist beispielsweise die Wahrscheinlichkeit einer

direkten Zündung abhängig vom Flammpunkt[45], sowie von der Freisetzungsmenge.

Beispiel eines Ereignisbaumens für das Szenario „Spontane Freisetzung eines entflammbaren Gases (Instantaneous release of an inflammable gas)“:

Abbildung 45: Spontane Freisetzung eines entflammbaren Gases (Instantaneous release of an inflammable gas)



Quelle: Reference Manual BEVI risk Assessments, Module B, Version 3.3 (REVI, 2015)

Für folgende Szenarien sind Ereignisbäume entwickelt worden:

1. Spontane Freisetzung eines entflammbaren Gases (Instantaneous release of an inflammable gas)
2. Kontinuierliche Freisetzung eines entflammbaren Gases (Continuous release of an inflammable gas)
3. Spontane Freisetzung eines unter Druck stehenden, verflüssigten, brennbaren Gases (Instantaneous release of a pressurized liquefied inflammable gas)
4. Kontinuierliche Freisetzung eines unter Druck stehenden, verflüssigten, brennbaren Gases (Continuous release of a pressurized liquefied inflammable gas)
5. Freisetzung einer brennbaren Flüssigkeit (Release of an inflammable liquid)

Bei der Modellierung der Folgen der LOC-Ereignisse können sogenannte „Repressionsfaktoren (Repression factors)" berücksichtigt werden. Diese reduzieren Auswirkungen und Häufigkeit der LOC‘s. Das Manual beschreibt für die folgenden Vorkehrungen und Maßnahmen, wie diese in die Analyse zu integrieren sind (Vgl. Modul C, Kapitel 4):

- Bund (Bunding, Bund wall): Begrenzt die Fläche eines Poolfeuers
- Sperrsysteme: Begrenzt die Freisetzungsdauer und damit -menge auf 2 resp. 10 Minuten. Besteht z.B. aus einem Detektionssystem sowie einem Absperrventil. Ereignisbäume sind aufzustellen, damit das mögliche Versagen der Sperrsysteme modelliert wird. Das Manual

[45] Teilweise wurde eine Zuordnung zu den Kategorien gemäß WMS („Wet milieugevaarlijke stoffen“, Dutch Chemical Substances Act) mit den Ausprägungen „inflammable“, „higly inflammable“, „extremely inflammable“ hergestellt. Die im Reference Manual angegebenen Flammpunktbereiche für jede dieser Kategorien deckt sich nahezu mit den im GHS angegebenen Flammpunktbereichen (GHS, Global harmonisierten Systems zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien)

gibt Referenzwerte für die Versagenswahrscheinlichkeiten von automatischen, semiautomatischen und manuellen Sperrsystemen an.

- Überströmventile (Excess flow valve): Begrenzt die Freisetzungsdauer und damit -menge auf 5 Sekunden (bei beispielsweise Schlauchabriss). Das Manual gibt Referenzwerte für die Versagenswahrscheinlichkeiten an.
- Rückschlagventil: Nur regelmäßig getestete Rückschlagventile sind in der QRA zu berücksichtigen. Das Manual gibt Referenzwerte für die Versagenswahrscheinlichkeiten an.
- Wegfahrsperren und Nottrennkupplungen: Werden als Stand der Technik betrachtet und sind somit in den Standardwerten berücksichtigt.
- Eingriff durch Bediener: Begrenzt die Freisetzungsmenge. Unter der Annahme bestimmter Voraussetzungen gibt das Manual Referenzwerte für die Versagenswahrscheinlichkeit an.
- Brandschutzsysteme
- Andere Repressionssysteme: weitere risikoreduzierende Vorkehrungen und Maßnahmen können grundsätzlich in die QRA aufgenommen werden. Es sind die Reaktionszeit sowie die Versagenswahrscheinlichkeit zu bestimmen. Fehler- und Ereignisbäume sind aufzustellen.

Das Manual verweist auf die Problematik, dass die Effektivität LOC-verhindernder Maßnahmen im Vergleich zu den LOC-auswirkungsbegrenzenden Maßnahmen wesentlich schwieriger zu beziffern sind, da die Statistiken über die Häufigkeiten der LOC's nicht zwingend Auskunft darüber geben, welche LOC-verhindernde Maßnahmen jeweils vorhanden waren.

Modellierung des Schadens:

Es werden verschiedene Modelle, welche Stofffreisetzungen, Gasausbreitungen, Brände und Explosionen, sowie die physikalischen Effekte auf die Menschen beschreiben, angewandt. Die Anwendung des Softwarepaktes Safeti-NL der DNV ist verbindlicher Bestandteil der BEVI-Berechnungsmethodik. Auf die in dem Softwarepaket implementieren Modelle wird in Kapitel 6.4 eingegangen.

Die resultierend zu belegenden Modellparameter sind durch die Anwender teilweise frei einstellbar und teilweise vorgeben. Hintergrund ist eine Abwägung zwischen einer möglichst realitätsnahen Abbildung des Restrisikos einerseits und Minimierung der Beeinflussung der Berechnungsergebnisse durch die subjektive Entscheidung der Anwender andererseits.

Frei einstellbare Parameter (keine vollständige Auflistung):

- Richtung Freisetzung: Standardmäßig horizontale Freisetzung (in Windrichtung) mit Ausnahme für unterirdische Behälter und Rohrleitungen. Davon abweichende Freisetzungsrichtungen können angewandt werden.
- Rauigkeitslänge der Rohrleitung (Pipeline Roughness length): Standardmäßig 5 µm
- Druckverlust in Pipelines aufgrund von Ventilen, Verbindungsstücken und Biegungen: Standardmäßig wird kein Druckverlust angenommen
- Freisetzungsrate: Standardmäßig wird eine konstante Freisetzung angenommen, es können aber auch zeitabhängige Freisetzungsraten modelliert werden

- Beckenwände („Bund wall“): Werden standardmäßig als 100% zuverlässig angenommen (im Sinne, dass diese mengenmäßig den gesamten Stoffinhalt im Falle eine Freisetzung aufnehmen können. Die anzugebende Höhe der Beckenwände determiniert die Möglichkeit, dass sich außerhalb des Beckens eine Lache bildet)
- Rauheit der Umgebung: Beeinflussung der Umgebung auf anzunehmende Windgeschwindigkeiten. (Offenes Wasser -> geringer Rauheit, Stadtzentrum -> hohe Rauheit). Standardmäßig wird der Wert 0,3 angenommen. Weitere Werte für spezielle Terrains sind vorgegeben.
- Wetterstationen: Die zutreffende Wetterstation muss ausgewählt werden, alternativ kann mit einem Set an Standardwerten (Windrichtung, Umgebungstemperatur etc.) gerechnet werden.
- Verteilung Bevölkerung: Standardwerte für prozentuale Aufteilung der Bevölkerung in Gebäuden vs. im Freien (Differenzierung nach Tag und Nacht) ist vorgegeben. Abweichende Eingaben sind möglich.
- Großereignisse: Größere Menschenmengen, welche sich nur punktuell im angrenzenden Gebiet aufhalten sind zu berücksichtigen und entsprechend anzugeben

Nicht frei einstellbare Parameter (keine vollständige Auflistung):

- Position Stofffreisetzung: x, y-Koordinate entspricht dem Mittelpunkt des Behälters. Ggf. sind mehrere Punkte zu berechnen (für Pipelines werden 50 Meter Abstand als Initialwert vorgeschlagen, schlussendlich soll die berechnete Risikokontur möglichst realistisch sein)
- Position Stofffreisetzung: z-Koordinate entspricht dem Boden des Behälters
- Freisetzungen innerhalb von Gebäuden: Transport ins Freie via Ventilation muss berechnet werden, ebenso der Effekt des Gebäudes auf die weitere Ausbreitung
- BLEVE: Druck, bzw. Temperatur bei der eine BLEVE entsteht (1,21 × Öffnungsdruck (absolut) des Sicherheitsventils)
- Ausbreitungsmodelle basieren auf einer Mittelungszeitkonstante, die benötigt wird, um die maximale Konzentration und die Breite der Wolke zu berechnen. Für entflammbare und toxische Substanzen sind jeweils solche Konstanten festgelegt (18,75 Sekunden und 600 Sekunden).
- Maximale Freisetzungsdauer, bzw. Verdunstungsdauer einer Lache
- Bei einer Freisetzung im Freien wird ein ungehinderter Abfluss angenommen
- Die am BLEVE beteiligte Masse ist gleich der Dampfphase + 3 × Flash-Anteil j beim Versagensdruck, jedoch maximal der gesamte Stoffinhalt.
- Ereignisbäume für brennbare Stoffe.
- Probit-Beziehungen wurden für eine Reihe von toxischen Substanzen bestimmt. D.h. Parameter der Probitfunktion sind vorgeben.
- Eine Probitfunktion für inerte Substanzen ist vorgegeben

- Sterbewahrscheinlichkeiten für verschiedene Bereiche von Sauerstoffkonzentrationen sind vorgegeben

Eine Studie der TU Eindhoven von 2014 bescheinigt dem Verfahren eine hohe Robustheit, im Sinne, dass die einzustellenden Parameter für „Standard Anlagen" weitestgehend vorgegeben sind und somit Berechnungsergebnisse nicht stark abweichen. Negativ wird angeführt, dass das hohe Maß an Vorgaben bezgl. einstellbarer Parameter dazu führt, dass tatsächliche, reale Situationen nicht ausreichend gewürdigt werden. Abweichungen von den Standardparametern führen zu signifikant anderen Berechnungsergebnissen, was wiederum eine hohe Sensitivität der zur Anwendung kommenden Modelle impliziert. Dies wurde exemplarisch am Beispiel eines BLEVES im Kontext eines Befüllvorganges eines Straßentankwagens mit LPG aufgezeigt.[46].

Die Studie zeigt weiterhin auf, dass neben der im Green Book verwendeten Probitfunktion für Wärmestrahlung auf internationaler Ebene weitere Probitfunktionen entwickelt wurden[47], welche deutlich weniger pessimistische Aussagen über die Relation Abstand-Sterbewahrscheinlichkeit machen.

Darüber hinaus kritisiert die Studie den im Manual postulierten Zusammenhang zwischen der angenommenen Wahrscheinlichkeit eines BLEVEs mit Feuerball und der freigesetzten Menge. In der aktuellen Version des Manuals ist dieser Zusammenhang so nicht mehr gegeben. Dies ist ein Indiz dafür, dass mit den Fortschreibungen des Manuals Kritiken reflektiert und entsprechend umgesetzt werden.

Der primäre Zweck des QRA-Verfahrens in den Niederlanden und somit der Szenarienentwicklung ist die Berechnung des Risikos (Individualrisiko und gesellschaftliches Risiko). Unter der Annahme, dass die Berechnung der Risiken mit minimiertem Aufwand erfolgt (Verwendung der Standardwerte für Eintrittshäufigkeiten, keine Modellierung zusätzlicher safeguards), muss davon ausgegangen werden, dass die Berechnungsergebnisse nicht das reale, mit der Anlage verbundene Risiko widerspiegeln. Eine Bewertung des vorhandenen Sicherheitskonzeptes ist damit nicht, bzw. nur bedingt möglich.

Der Zielkonflikt zwischen Sicherheitsrelevanz und Robustheit (im Sinne der Reproduzierbarkeit=Limitation Freiheitsgrade) wird tendenziell zugunsten der Robustheit aufgelöst.

Die folgende Tabelle stellt überblicksweise die mit der Erstellung der Szenarien verbundenen Ziele dar:

Tabelle 58: Zielstellungen der Szenarienentwicklung – QRA-Verfahren Niederlande

Zielstellung	Zusammenfassende Auswertung
Bestimmung der zur Verhinderung von Störfallen erforderlichen Vorkehrungen	Bedingt. Das Manual beschreibt ausgewählte technische Maßnahmen, welche in die Analyse integriert werden können. Eine systematische Untersuchung möglicher Vorkehrungen findet jedoch nicht statt. Der Bestimmung von Vorkehrungen soll mit dem ab 2024 zur Anwendung kommenden Konzept der Fokusbereiche ein höherer Stellenwert eingeräumt werden.

[46] Xanten, van, N. H. W., Pietersen, C. M., Pasman, H. J., Torn, van der, P., Vrijling, H. K., Wal, van der, A. J., & Kerstens, J. G. M. (2014). Risk evaluation in Dutch land-use planning. Process Safety and Environmental Protection, 92(4), 368-376. https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.06.002

[47] Verglichen wurden u.a. die Modelle gemäß HSE, 2004. Planning Case Assessment Guide, Lees, F.P., 1996. Loss Prevention in the Process Industries – HazardIdentification, Assessment, and Control, vol. 1–3.Butterworth-Heinemann, Oxford, 12/94-98, Eisenberg, sowie eine Variante des Green book Modells, in welcher Fluchtverhalten unterstellt wird.

Zielstellung	Zusammenfassende Auswertung
Bestimmung der zur Minderung von Störfallauswirkungen erforderlichen Maßnahmen,	siehe oben
Identifikation, Abschätzung und Bewertung verbleibender Risiken,	Bedingt. Primäres Ziel des QRA-Verfahrens ist die quantitative Abschätzung und Bewertung des Restrisikos (Individualrisiko und gesellschaftliches Risiko). Beschränkung des Schutzziels: Störfälle mit potentiell tödlichen Folgen für die Bevölkerung
Abschätzung des Ausmaßes und der Schwere von Störfällen und Ermittlung der von Störfällen betroffenen Gebiete,	siehe oben.
Bestimmung der geeigneten Notfallmaßnahmen (incl. Alarm- und Gefahren-abwehrplanung)	Bedingte Verwertbarkeit: Im Vergleich: In Frankreich werden die entwickelten Szenarien nach langsamen und schnellen Unfallverläufen unterschieden, separate Fokusbereiche für toxikologische Effekte, Wärmestrahlung und Überdruck gerechnet, sowie die Vulnerabilität der Umgebung (Anwohner, Personal, Natur, Kulturgüter) auf Karten dargestellt. Dies soll die Diskussion und Bewertung risikoreduzierende Maßnahmen inkl. Maßnahmen zur Selbstrettung und Kontrolle des Störfalls fördern[48]

6.3.5 QRA-Verfahren in Flandern

Im „Reference Calculation Manual“ (nachfolgend als „Manual“ bezeichnet) wird eine Liste mit Freisetzungsszenarien (Loss of Containment-Ereignissen, LOC’s) für verschiedene Anlagenteile wie beispielsweise Lagerbehälter, verfahrenstechnische Behälter, Pipelines, Pumpen, Kompressoren und Wärmetauscher bereitgestellt, welche potentiell in die Analyse aufzunehmen sind.

Tabelle 59: Übersicht Anlagenteile und Loss of Containment-Ereignisse (Auszug)

Anlagenteil	Loss of Containment-Ereignisse
Atmosphärische Lagerbehälter (Typ: „single containment“), Druckbeaufschlagte Lager- und Prozessbehälter	Spontane Freisetzung des gesamten Stoffinventars, kontinuierliche Freisetzung des gesamten Stoffinventars über einen Zeitraum von 10 Minuten, kontinuierliche Freisetzung des Stoffinventars: Kleine Leckage Mittlere Leckage Große Leckage
Atmosphärische Lagerbehälter (Typ: “double containment” und “full containment”)	Versagen des Primärbehälters und der Außenhülle: Spontane Freisetzung des gesamten Inhalts Freisetzung 10% des Inhaltes kontinuierliche Freisetzung des Stoffinventars über einen Zeitraum von 10 Minuten: Freisetzung des gesamten Inhalts Freisetzung 10% des Inhaltes Für double containment zusätzlich:

[48] Xanten, van, N. H. W., Pietersen, C. M., Pasman, H. J., Torn, van der, P., Vrijling, H. K., Wal, van der, A. J., & Kerstens, J. G. M. (2014). Risk evaluation in Dutch land-use planning. Process Safety and Environmental Protection, 92(4), 368-376. https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.06.002

Anlagenteil	Loss of Containment-Ereignisse
	kontinuierliche Freisetzung des Stoffinventars in die intakte Außenhülle: Kleine Leckage Mittlere Leckage Große Leckage Versagen des Primärbehälters; Freisetzung des gesamten Inhalts in die intakte Außenhülle
Atmosphärische Lagerbehälter (unterirdisch bzw. aufgetürmt)	Schlagartige Freisetzung des gesamten Stoffinventars, kontinuierliche Freisetzung des gesamten Stoffinventars über einen Zeitraum von 10 Minuten,
Pipelines (oberirdisch)	Bruch in der Rohrleitung, Leckage: Kleine Leckage Mittlere Leckage Große Leckage
Pumpen und Kompressoren	Bruch Leckage (10 % Durchmesser)

Im direkten Vergleich zum niederländischen Manual lassen sich viele Gemeinsamkeiten feststellen. Das betrifft die Auswahl der zu betrachtenden Systeme, sowie der angenommenen Freisetzungsszenarien. Unterschiede bestehen u.a. darin, dass das flämische Kalkül

- Für Behälter standardmäßig drei Leckagegrößen vorgibt
- Bei der schlagartigen Freisetzung nach 10% und 100% freigesetzter Menge unterscheidet
- Für full containment tanks nebst schlagartiger Freisetzung eine kontinuierliche Freisetzung über 10 Minuten annimmt.

Beim Freisetzen von brennbaren Gasen und Flüssigkeiten sind unterschiedliche Folgewirkungen (Phänomene) möglich: BLEVE und/oder Feuerball, Freistrahlflamme (Jetfire), Lachenbrand (Pool fire), Dampfwolkenexplosion (Vapour cloud explosion) und Stichbrand (Flashfire). Das Auftreten dieser Phänomene hängt von der Substanz, den Bedingungen und dem Szenario ab. Ereignisbäume für die verschiedenen Szenarien, einschließlich der nachfolgenden Wahrscheinlichkeiten sind beschrieben, dabei werden Klassifizierungen nach CLP-Verordnung angewandt.

Für folgende Szenarien sind Ereignisbäume entwickelt worden:

1. Spontane Freisetzung eines komprimierten brennbaren Gases (Instantaneous release of an compressed inflammable gas)
2. Kontinuierliche Freisetzung eines komprimierten brennbaren Gases (Continuous release of an compressed inflammable gas)
3. Spontane Freisetzung eines unter Druck stehenden, verflüssigten, brennbaren Gases (Instantaneous release of a pressurized liquefied inflammable gas)
4. Kontinuierliche Freisetzung eines unter Druck stehenden, verflüssigten, brennbaren Gases (Continuous release of a pressurized liquefied inflammable gas)
5. Freisetzung einer brennbaren Flüssigkeit unterhalb/über dem Siedepunkt (Release of an inflammable liquid below/above boiling point)
6. Kontinuierliche/sofortige Freisetzung von gekühltem Flüssiggas in einen atmosphärischen Tank (Continuous/instantaneous release of cooled liquefied gas in an atmospheric tank)

Die Nummer 6 stellt dabei eine im direkten Vergleich zum Verfahren in den Niederlanden zusätzliche Kategorie dar.

Nachfolgende wird ein Beispiel eines Ereignisbaumens für das Szenario „Spontane/kontinuierliche Freisetzung eines komprimierten brennbaren Gases Instantaneous/continuous release of an compressed inflammable gas“ gegeben:

Abbildung 46: Ereignisbaum „Spontane/kontinuierliche Freisetzung eines komprimierten brennbaren Gases (Instantaneous/continuous release of an inflammable gas)“

Phänomen		Wahrscheinlichkeit [-]					
	Reaktivität →	Hoch			Gering		
	Freisetzungsmenge →	Klein	Mittel	Groß	Klein	Mittel	Groß
Spontane Freisetzung	Kontinuierliche Freisetzung						
Feuerball	Freistrahlflamme	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

Quelle: Risk Calculations Manual, Version 2.0 (Department Omgeving, 2019)

Ein stichprobenartiger Vergleich mit den Ereignisbäumen des Verfahrens in den Niederlanden zeigt, dass vereinzelt unterschiedliche Annahmen in den möglichen Phänomenen sowie in Verzweigungswahrscheinlichkeiten getroffen wurden. So nimmt das Verfahren in Flandern beispielweise an, dass

- Im Falle des “Instantaneous release of a pressurized liquefied inflammable gas” ein BLEVE mit 100% Eintrittswahrscheinlichkeit anzunehmen ist (in den Niederlanden hingegen wird eine Wahrscheinlichkeit von 0,7*Wahrscheinlichkeit einer direkten Zündung angenommen).
- Als mögliche Folge des BLEVE ein Feuerball entsteht ().
- Im Falle des „Continous pressurized liquefied (flammable) gas” kein Lachenbrand als weitere Folge zu modellieren ist

Bei der Modellierung der Folgen der LOC-Ereignisse können sogenannte auswirkungsmindernde Maßnahmen berücksichtigt werden. Das Manual beschreibt für die folgenden Maßnahmen, wie diese in die Analyse zu integrieren sind (Vgl. Modul 13):

- Sperrsysteme: Begrenzt die Freisetzungsdauer und damit -menge auf 2 resp. 10 Minuten. Das Manual gibt Referenzwerte für die Versagenswahrscheinlichkeiten (PFD, probability of failure on demand) von automatischen und semiautomatischen Sperrsystemen unter Berücksichtigung möglicher Redundanzkonzepte an.
  Für automatische Systeme: Einfache Ausführung = 0,1, Redundant=0,01, divers redundant=0,001. Im Reference Manual Bevi wird hingegen ohne weitere Anforderungen an das System eine PFD von 0,001 vorgeschlagen, d.h., dass der flämische Ansatz diesbezüglich wesentlich konservativer ist. (Analoge Aussage für Semiquantitative Sperrsysteme)

- Überströmventile (Excess flow valve): Begrenzt die Freisetzungsdauer und damit -menge auf 5 Sekunden (bei beispielsweise Schlauchabriss). Das Manual gibt Referenzwerte für die Versagenswahrscheinlichkeiten an. Diese sind deckungsgleich mit denen im Reference Manual Bevi.
- Rückschlagventil: Nur regelmäßig getestete Rückschlagventile sind in der QRA zu berücksichtigen. Das Manual gibt Referenzwerte für die Versagenswahrscheinlichkeiten an. Diese sind deckungsgleich mit denen im Reference Manual Bevi.
- Eingriff durch Bediener bei Umfüllprozessen (Loading): Begrenzt die Freisetzungsmenge. Unter der Annahme bestimmter Voraussetzungen gibt das Manual Referenzwerte für die Versagenswahrscheinlichkeit an. Diese sind deckungsgleich mit denen im Reference Manual Bevi.
- Andere Repressionssysteme: weitere risikoreduzierende Vorkehrungen und Maßnahmen können grundsätzlich in die QRA aufgenommen werden. Es sind die Reaktionszeit sowie die Versagenswahrscheinlichkeit zu bestimmen. Fehler- und Ereignisbäume sind aufzustellen.
- Bund (Bunding, Bund wall) werden im Modul 13 nicht explizit aufgeführt. Jedoch in den Modulen zur Szenarienentwicklung von Behältern thematisiert.

Modellierung des Schadens:

Es werden verschiedene Modelle, welche Stofffreisetzungen, Gasausbreitungen, Brände und Explosionen sowie die physikalischen Effekte auf die Menschen beschreiben angewandt. Auf die anzuwendenden Modelle wird in Kapitel 6.4 eingegangen.

Die resultierend zu belegenden Modellparameter sind durch die Anwender teilweise frei einstellbar und teilweise vorgeben. Hintergrund ist eine Abwägung zwischen einer möglichst realitätsnahen Abbildung des Restrisikos einerseits und Minimierung der Beeinflussung der Berechnungsergebnisse durch die subjektive Entscheidung der Anwender andererseits.

Frei einstellbare Parameter (keine vollständige Auflistung):

- Freisetzungsrate: Standardmäßig wird eine konstante Freisetzung angenommen, es können aber auch zeitabhängige Freisetzungsraten modelliert werden
- Druckverlust in Pipelines aufgrund von Ventilen, Verbindungsstücken und Biegungen: Standardmäßig wird kein Druckverlust angenommen
- Freisetzungen innerhalb von Gebäuden: keine Aussage möglich
- BLEVE: Bei einem thermisch induzierten BLEVE beträgt der Ausfalldruck das 1,21-fache des Öffnungsdrucks (im Überdruck) des Sicherheitsventils. Ist kein Sicherheitsventil vorhanden, wird ein Ausfall beim 2,5-fachen Auslegungsdruck angenommen.
- Beckenwände („Bund wall“): keine Aussage möglich
- Rauheit der Umgebung: Beeinflussung der Umgebung auf anzunehmende Windgeschwindigkeiten. (Offenes Wasser -> geringer Rauheit, Stadtzentrum -> hohe Rauheit). Anwendung eines Excelfiles „Meteodata“, alternativ können aus einer dem purple book entlehnten Liste für verschiedene Terraintypen Rauheitswerte entnommen werden

Nicht frei einstellbare Parameter (keine vollständige Auflistung):

- Position Stofffreisetzung: x, y-Koordinate entspricht dem Mittelpunkt des Behälters. Ggf. sind mehrere Punkte zu berechnen (für Pipelines werden 50 Meter Abstand als Initialwert vorgeschlagen, schlussendlich soll die berechnete Risikokontur möglichst realistisch sein)
- Position Stofffreisetzung: Höhe im Bezug zur Umgebung = 1m, bzw. Boden des Behälters, wenn sich der Boden des Behälters über einen 1m hoch befindet.
- Richtung Freisetzung: horizontale Freisetzung (in Windrichtung) mit Ausnahme für unterirdische Behälter und Rohrleitungen.
- Rauigkeitslänge der Rohrleitung (Pipeline Roughness length): 45 µm
- Wetterstationen: Es werden allgemeingültige Vorgaben bezgl. zu verwendenden meteorologischen Kennzahlen (Temperaturen Luft, Erde und Wasser, Luftdruck und -feuchtigkeit, Sonnenstrahlung) gemacht. Durchschnittliche Windgeschwindigkeiten und Stabilitätsklassen sind standortbezogen einer entsprechenden Datenbank zu entnehmen.
- Ausbreitungsmodelle basieren auf einer Mittelungszeitkonstante, die benötigt wird, um die maximale Konzentration und die Breite der Wolke zu berechnen. Für entflammbare und toxische Substanzen sind jeweils solche Konstanten festgelegt (18,75 Sekunden und 600 Sekunden).
- Maximale Freisetzungsdauer, bzw. Verdunstungsdauer einer Lache
- Am BLEVE beteiligte Masse: keine Aussage möglich
- Ereignisbäume für brennbare Stoffe.
- Verteilung Bevölkerung: Prozentuale Aufteilung der Bevölkerung in Gebäuden vs. im Freien (Differenzierung nach Tag und Nacht sowie nach Industrie- und Wohngebieten).
- Großereignisse: Größere Menschenmengen, welche sich nur punktuell im angrenzenden Gebiet aufhalten

Im direkten Vergleich zum QRA-Verfahren in den Niederlanden bestehen lediglich im Detail viele kleinere Unterschiede. Das gesamthafte Fazit zum QRA-Verfahren Flandern ist daher deckungsgleich mit dem Fazit zum QRA-Verfahren Niederlande: Der primäre Zweck der Szenarienentwicklung ist die Berechnung des Risikos (Individualrisiko und gesellschaftliches Risiko). Unter der Annahme, dass die Berechnung der Risiken mit minimalem Aufwand erfolgt (Verwendung der Standardwerte für Eintrittshäufigkeiten, keine Modellierung zusätzliche safeguards), muss davon ausgegangen werden, dass die Berechnungsergebnisse nicht das reale, mit der Anlage verbundene Risiko widerspiegeln und eine Bewertung des Sicherheitskonzeptes nicht möglich ist. Der Zielkonflikt zwischen Sicherheitsrelevanz und Robustheit (im Sinne der Reproduzierbarkeit=Limitation Freiheitsgrade) wird tendenziell zugunsten der Robustheit aufgelöst.

Die folgende Tabelle stellt überblicksweise die mit der Erstellung der Szenarien verbundenen Ziele dar:

Tabelle 60: Zielstellungen der Szenarienentwicklung – QRA-Verfahren Flandern

Zielstellung	Zusammenfassende Auswertung
Bestimmung der zur Verhinderung von Störfallen erforderlichen Vorkehrungen	Bedingt. Das Manual beschreibt ausgewählte technische Maßnahmen, welche in die Analyse integriert werden können. Eine systematische Untersuchung möglicher Vorkehrungen findet jedoch nicht statt.
Bestimmung der zur Minderung von Störfallauswirkungen erforderlichen Maßnahmen,	siehe oben
Identifikation, Abschätzung und Bewertung verbleibender Risiken,	Ja. Primäres Ziel des QRA-Verfahrens ist die quantitative Abschätzung des Restrisikos (Individualrisiko und gesellschaftliches Risiko). Beschränkung des Schutzziels: Störfälle mit potentiell tödlichen Folgen für die Bevölkerung
Abschätzung des Ausmaßes und der Schwere von Störfällen und Ermittlung der von Störfällen betroffenen Gebiete,	siehe oben.
Bestimmung der geeigneten Notfallmaßnahmen (incl. Alarm- und Gefahren-abwehrplanung)	Bedingte Verwertbarkeit: Im Vergleich: In Frankreich werden die entwickelten Szenarien nach langsamen und schnellen Unfallverläufen unterschieden, separate Fokusbereiche für toxikologische Effekte, Wärmestrahlung und Überdruck gerechnet, sowie die Vulnerabilität der Umgebung (Anwohner, Personal, Natur, Kulturgüter) auf Karten dargestellt. Dies soll die Diskussion und Bewertung risikoreduzierende Maßnahmen inkl. Maßnahmen zur Selbstrettung und Kontrolle des Störfalls fördern[49]

6.3.6 ARAMIS-Verfahren

6.3.6.1 Entwicklung der Störfallszenarien

Grundlage für die Szenarienentwicklung bilden die als Bestandteil des ARAMIS-Verfahren vordefinierten kritischen Ereignisse (critical events (CE)), welche in der Analyse potentiell zu berücksichtigen sind (Vgl. Kapitel 6.2.6).

Das ARAMIS-Verfahren beschreibt eine Methode zur Entwicklung von Ereignisbäumen, welche die Folgen der kritischen Ereignisse abbilden.

Die zu erstellenden Ereignisbäume weisen folgende Struktur bzw. Stufen auf: kritisches Ereignis -> sekundäres kritisches Ereignis -> tertiäres kritisches Ereignis -> gefährliches Phänomen -> Art der Auswirkungen auf Schutzziele.

Kritische Ereignisse sind beispielsweise Stoffzersetzung, Leckage am Behälter im Dampfraum oder der Flüssigphase, Leckage Rohrung (Pipeline).

Sekundäre Effekte sind beispielweise Lachenbildung, Gasstrahl, Spontanverdampfung.

Tertiäre Effekte sind beispielsweise Zündung einer Lache oder eines austretenden Gasstrahles, Lachenverdampfung- und verdunstung, Gasausbreitungen.

[49] Xanten, van, N. H. W., Pietersen, C. M., Pasman, H. J., Torn, van der, P., Vrijling, H. K., Wal, van der, A. J., & Kerstens, J. G. M. (2014). Risk evaluation in Dutch land-use planning. Process Safety and Environmental Protection, 92(4), 368-376. https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.06.002

Gefährliche Phänomen sind beispielsweise Poolfires, Tankfires, Jetfires, Vapour Cloud explosions, Flashfires, Ausbreitungen toxischer Wolken, Staubexplosionen.

Arten der Auswirkungen auf Schutzziele sind mechanische Effekte, toxische Effekte, Wärmestrahlung und Überdruck.

Für jede Stufe (d.h. vom kritischen Ereignis zum sekundären Ereignis, vom sekundären Ereignis zum tertiären Ereignis, etc.) stellt das ARAMIS-Verfahren eine Matrix bereit, welche definiert, welche Folgen auf der jeweils nächsten Ebene in den Ereignisbaum aufzunehmen sind.

Beispiel: Die Stufe vom tertiären kritischen Ereignis (TCE) zum gefährlichen Phänomen (DP) wird mittels folgender Matrix umgesetzt:

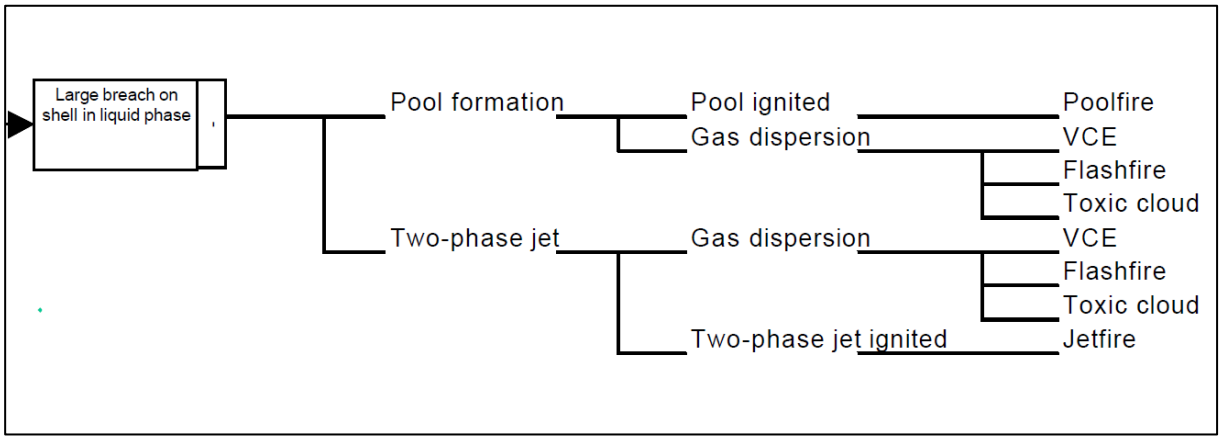
Abbildung 47: Matrix "Tertiäres Ereignis - gefährliches Phänomen"

		DP1 Poolfire	DP2 Tankfire	DP3 Jetfire	DP4 VCE	DP5 Flashfire	DP6 Toxic cloud	DP7 Fire	DP8 Missiles ejection	DP9 Overpressure generation	DP10 Fireball	DP11 Environmental damage	DP12 Dust explosion	DP13 Boilover and resulting poolfire
Fire	TCE1							X						
Catastrophic rupture	TCE2								X	X				
Pool ignited inside the tank	TCE3		X				X					X		X
Pool ignited	TCE4	X					X					X		
Gas dispersion	TCE5				X	X	X					X		
Toxic secondary products	TCE6						X					X		
Gas jet ignited	TCE7			X			X					X		
Gas puff ignited	TCE8						X				X	X		
Two-phase jet ignited	TCE9			X			X					X		
Aerosol puff ignited	TCE10						X				X	X		
Pool not ignited / Pool dispersion	TCE11											X		
Explosion	TCE12								X	X				
Dust cloud ignited	TCE13												X	
Dust dispersion	TCE14						X					X		

Quelle: ARAMIS D1C – APPENDIX 5 July 2004, Methodology for the building of generic event trees (MIMAH)

Ein resultierender Ereignisbaum sieht beispielsweise wie folgt aus:

Abbildung 48: Ereignisbaum für das kritische Ereignis " Großer Bruch an der Hülle in flüssiger Phase (Large breach on shell in liquid phase)" gemäß ARAMIS-Methodik“



Quelle: ARAMIS D1C – APPENDIX 5 July 2004, Methodology for the building of generic event trees (MIMAH)

Der resultierende Ereignisbaum wird durch die folgenden Einflussfaktoren vollständig bestimmt:

- Das kritische Ereignis,
- die Anlagenart,
- die Stoffphase und
- der Risikosatz des an der Freisetzung beteiligten Stoffes.

Der Risikosatz wird lediglich für die letzte Stufe (die Bestimmung der gefährlichen Phänomene) herangezogen.

Die Einbindung der Risikosätze wird an Beispiel des Risikosatzes R 26 illustriert:

- R 26 – Sehr giftig beim Einatmen.
- Führt zu dem gefährlichen Phänomen „toxische Wolke“
- Dieses Phänomen wird nur im folgenden Fall ausgewählt: Es ist zu beachten, dass eine „toxische Wolke“ in Folge der Freisetzung eines toxischen Stoffes oder als Folge eines Brandes (R101 – R100) entstehen kann. Mit dem Gefahrenhinweis R26 ist der Stoff an sich giftig und kein Folgeprodukt eines Brandes. Das Phänomen „toxische Wolke“ darf nur dann ausgewählt werden, wenn eine Freisetzung und Ausbreitung eines toxischen Stoffes erfolgt. Das bedeutet, dass der tertiäre Effekt entweder Gasausbreitung oder Staubverteilung sein muss.

6.3.6.2 Identifikation, Analyse und Bewertung von Gegenmaßnahmen

Nachdem die Fehler- und Ereignisbäume aufgestellt worden sind, sind durch den Anwender Gegenmaßnahmen (d.h. der Sicherheitsfunktionen bzw. Barrieren) festzulegen und an den entsprechenden Stellen in den Fehler- und Ereignisbäumen einzufügen, um so darzustellen, an welcher Stelle die Gegenmaßnahmen auf die Kausalkette wirken.

1. Schritt: Identifizierung der Gegenmaßnahmen.

Die Funktionen werden im ARAMIS-Verfahren in vier Kategorien unterteilt:

- Verhindern,
- Vermeiden,
- Steuern/Kontrollieren,
- Begrenzen.

Für jedes Ereignis auf jeder Stufe im Fehler- sowie im Ereignisbaum muss durch den Anwender die Frage beantwortet werden, ob es eine Sicherheitsfunktion resp. Barriere gibt, mithilfe dieser das Ereignis verhindert, vermieden, gesteuert oder begrenzt werden kann.

In "ARAMIS D1C – APPENDIX 08 July 2004, Checklists of safety functions and barriers" werden umfassende Checklisten mit möglichen Sicherheitsfunktionen und Barrieren vorgestellt. Die Checklisten sind dabei nach den einzelnen Ebenen in den Fehlerbäumen und Ereignisbäumen strukturiert. Es wird seitens ARAMIS darauf hingewiesen, dass die Checklisten nicht erschöpfend sind (und auch nicht sein können), und anderseits nicht jede dokumentierte Maßnahme auch automatisch durch den Anwender zu implementieren ist. Beispiel:

Abbildung 49: Auszug Checkliste Sicherheitsfunktionen und -barrieren für die Gefahrenquelle Korrosion im ARAMIS-Verfahren

Function	Detailed safety function	Safety barriers
Corrosion		
Avoid	Use anticorrosion materials	Plant design : use of appropriate steel (or other material) grade
	Use non corrosive chemicals	Process design
Prevent	Prevent unexpected exposition to corrosive chemicals	Avoid
	Protect materials from corrosion	Protective layer Anticorrosion paint Metallic coatings: electroplating electrolyse plating galvanizing pack segmentation cladding thermal spraying physical vapour deposition ...
	Prevent effect of corrosion	Use corrosion resistant material Procedures for adequate replacement of potentially corroded pieces by appropriate grades
Detect	Detect corrosion evolution	Direct techniques : Corrosion Coupons Electrical Resistance (ER) Inductive Resistance Probes Linear Polarization Resistance Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Harmonic Analysis Electrochemical Noise (EN) Zero Resistance Ammetry (ZRA) Potentiodynamic Polarization Thin Layer Activation (TLA) and Gamma Radiography Electrical Field Signature Method (EFSM) Acoustic Emission (AE) ...
Control	Stop corrosion	Use corrosion inhibitors • passivating inhibitors • cathodic inhibitors • organic inhibitors • precipitation inhibitors • volatile corrosion Inhibitors Maintenance : replace corroded parts

Quelle: ARAMIS D1C – APPENDIX 08 July 2004, Checklists of safety functions and barriers

Damit eine Gegenmaßnahme in der Analyse berücksichtigt werden darf, müssen einige Kriterien erfüllt sein:

- Unabhängigkeit zu PLT-Betriebsfunktionen und anderen Gegenmaßnahmen,
- Entwicklung der Funktion/Barriere anhand einschlägiger Normen, Regeln, etc.,
- Anwendung eines bewährten Konzeptes,

- regelmäßige Funktionstests,
- planmäßige Instandhaltung.

Ein detaillierte Checkliste wird in "ARAMIS D1C – APPENDIX 9 July 2004 Assessment of the performances of safety barriers" bereitgestellt.

Für Gegenmaßnahmen, welche Störfallauswirkungen begrenzen, sind an der entsprechenden Stelle im Ereignisbaum Verzweigungen einzubauen (Gegenmaßnahme funktioniert/versagt).

2. Schritt: Bestimmung der „Performanz" der Gegenmaßnahmen

Die „Performanz (Performance)" setzt sich aus den Aspekten „Grad des Vertrauens (Level of Confidence, LC)", „Effektivität" und „Reaktionszeit" zusammen.
Als Level of Confidence (LC) wird die Versagenswahrscheinlichkeit im Anforderungsfall (Probability of Failure on Demand, PFD) verstanden. In Anlehnung an die Sicherheitsintegritätslevel (Safety Integrity Level, SIL-Level) für sicherheitsgerichtete Funktionen (safety instrumented function, SIF) wird das Level of confidence für gesamtheitliche Funktionen und nicht nur für einzelne Komponenten bestimmt. Im Falle aktiver Einrichtungen (Aktorik, Sensorik, Logik) bestimmt die Komponente mit der geringsten LC das LC der gesamten Funktion (wobei Redundanzen berücksichtigt werden). Entsprechende Tabellen und Übersichten werden durch ARAMIS vorgeben bzw. vorgeschlagen[50]:

- Tabellen, welche die LC's den PFD's gegenüberstellen,
- Tabellen mit LC-Werten für ausgewählte aktive und passive Komponenten sowie für menschliche Handlungen.

Unter Effektivität wird beispielsweise die Reduktion eines unerwünschten Mengenstromes nach Schließung eines Sicherheitsventils (Angabe in %) verstanden.

Die Reaktionszeit ist der zeitliche Verzug, bis eine Gegenmaßnahme ihre Wirkung entfaltet (Beispiele: Autom. Schließen eines Sicherheitsventils mehrere Sekunden, Aufstellen und aktivieren mobiler Wasserwände mehrere Minuten).

Geringe Effektivitäten bzw. hohe Reaktionszeiten sind potentielle Ausschlusskriterien aus der Betrachtung.

Neben der LC sind die Reaktionszeiten und die Effektivitäten der Maßnahmen zu bewerten und ggf. mögliche Verbesserungen zu diskutieren.

Bei der Bestimmung der LC's aktiver Gegenmaßnahmen sind nicht nur die LC's der beteiligten Baugruppen (Aktorik, Sensorik, Logik) zu berücksichtigen, sondern auch deren Effektivitäten und Reaktionszeiten. Ein entsprechendes Berechnungsschema konnte in dem entsprechenden Dokument[51] seitens der Forschungsnehmenden nicht ausfindig gemacht werden.

3. Schritt: Festlegung des akzeptablen Risikos und Bewertung der Gegenmaßnahmen.

Für jede (erste) Ursache im Fehlerbaum wird die Kausalkette von der Ursache startend, über das kritische Ereignis, bis hin zu dem gefährlichen Phänomen mit dem größten anzunehmenden Schaden betrachtet.

[50] ARAMIS D1C – APPENDIX 9 July 2004 Assessment of the performances of safety barriers

[51] ARAMIS D1C – APPENDIX 9 July 2004 Assessment of the performances of safety barriers

Für jede dieser Kausalketten wird anhand eines Risikographen ein minimal notwendiges Level of Confidence für die mit der Kausalkette assoziierten Gegenmaßnahmen bestimmt. Dies geschieht unter der Anwendung eines Risikographens, welche im Rahmen des ARAMIS-Projektes und in Anlehnung an die IEC 61508/61511 entwickelt wurde[52].

Angedachte oder bereits implementierte Gegenmaßnahmen werden als akzeptabel angesehen, wenn die Summe der LC's der Gegenmaßnahmen größer oder gleich dem aus dem Risikographen abgeleiteten LC ist.

Der Risikograph berücksichtigt die folgenden Parameter:

- Konsequenz: Potentielle Konsequenz des gefährlichen Phänomens.
- Frequenz: Zeitanteil der Exposition der Schutzziele
- Möglichkeit der Schadensvermeidung durch Intervention oder Evakuierung
- Häufigkeit des auslösenden Ereignisses

6.3.6.3 Evaluierung des Einflusses des Sicherheitsmanagements auf die Zuverlässigkeit der Gegenmaßnahmen

Das ARAMIS-Verfahren beinhaltet ein Konzept zur Evaluierung des Einflusses der Effektivität bzw. Leistungsfähigkeit des Sicherheitsmanagements auf die Zuverlässigkeit der Gegenmaßnahmen.

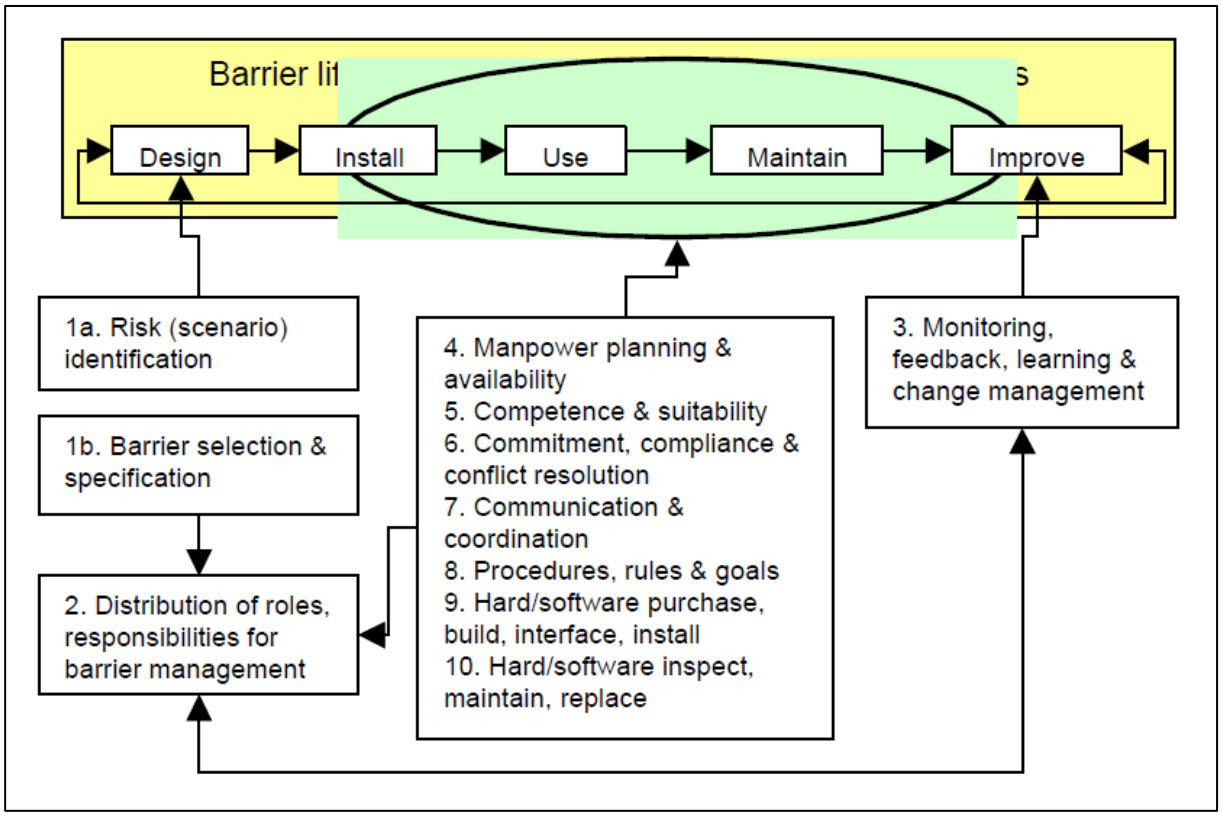
Damit die vermutete Performanz der Gegenmaßnahmen („nominale" LC, Effektivität, Reaktionszeit) über die gesamte Betriebsphase sichergestellt werden kann, wird ein effektives bzw. leistungsfähiges Sicherheitsmanagement benötigt.

Berücksichtigt werden das Sicherheitsmanagementsystem, das Top-Down den Rahmen (d.h. Prinzipien, Pläne, Verantwortlichkeiten) vorgibt, sowie die Sicherheitskultur, die die individuellen Haltungen, Werte, Praktiken der Mitarbeiter widerspiegelt (Bottom-up).

Das ARAMIS-Projekt hat 10 strukturelle Faktoren für das Sicherheitsmanagementsystem herausgearbeitet, die maßgeblich die Zuverlässigkeit der Barrieren beeinflussen. Die mit den Faktoren verbundenen Funktionen sind von einem leistungsfähigen Sicherheitsmanagement abhängig, wie die nachfolgende Abbildung verdeutlicht.

[52] ARAMIS D1C – APPENDIX 14 July 2004 The Risk Graph

Abbildung 50: Strukturelle Faktoren des Sicherheitsmanagementsystems



Quelle: ARAMIS – Final User Guide, 2004

Für die Evaluierung der Faktoren wurden Auditkataloge entwickelt. Nachfolgend ist beispielhaft der Katalog für den Strukturfaktor „Monitoring, feedback, learning & change management“ inkl. Beispielbewertungen (Ratings) abgebildet.

Abbildung 51: Auditkatalog Strukturfaktor „Monitoring, feedback, learning & change management

ARAMIS Delivery system	Step No.	Steps	Rating (1-5)
Monitoring, feedback, learning & change management		*Quantification not necessary*	
	1	Collect information over state of the art of barrier design & management	4
	2	Record barrier state & performance	5
	3	Record incidents & accidents with, & failures of barriers & management	4
	4	Audit management system relating to barrier performance	2
	5	Assess data & propose changes in barrier choice, design & management	5
	6	Inventory of plans for changes in processes	5
	7	Assess risks of proposed changes & need for (changed) barriers	5
	8	Inventory of plans for organisational changes	
	9	Assess risks of proposed changes for allocation of tasks related to barriers	3
	10	Decide on changes, implement & evaluate	4

Quelle: ARAMIS – Final User Guide, 2004

Die Sicherheitskultur hingegen wird durch die folgenden Faktoren bestimmt:

- Lern- und Berichtsbereitschaft
- Sicherheitspriorisierung, Regeln und Compliance
- Engagement der Führung

- Wahrnehmung von Risiken und menschlichen Leistungseinschränkungen
- Gefühlte Verantwortung
- Vertrauen und Fairness
- Atmosphäre und Unterstützung im Arbeitsteam
- Motivation, Einfluss und Engagement

Die Evaluation des Sicherheitsmanagements erfolgt in Kombination

- einer Prüfung des Sicherheitsmanagementsystems anhand der strukturellen Faktoren. Die Prüfung konzentriert sich darauf, wie das standortabhängige Sicherheitsmanagementsystem eine Reihe ausgewählter, repräsentativer Sicherheitsbarrieren (d. h. konkretisiert in Bezug auf reale, vorhandene bauseitige Sicherheitsbarrieren) adressiert und
- einer fragebogenbasierten Untersuchung der Sicherheitskultur bei den Mitarbeitern des Betriebsbereiches.

Das ARAMIS-Verfahren beschreibt ein Verfahren, welches die Umrechnung des „nominalen (optimalen)“ LC‘s in „operativen“ LC auf Basis der gegebenen Antworten erlaubt. Dazu werden die gegebenen Antworten quantifiziert und zu Gewichtungsfaktoren verrechnet, mit denen wiederum der „operativen“ LC berechnet werden kann.

Das Verfahren wird durch das ARAMIS-Projekt selbstkritisch als aufwändig und teils fehleranfällig für Fehlinterpretationen seitens der Anwender beschrieben. Ebenso wird darauf hingewiesen, dass die Abschätzung des operativen LC‘s anhand der Gewichtungsfaktoren keinen Anspruch auf Wahrheit bzw. Richtigkeit begründet. Das Ziel besteht darin, ein transparentes, begründbares Vorgehen zur Abschätzung eines operativen „LC“ zur Verfügung zu haben.

Es wird durch das ARAMIS-Projekt darauf verwiesen, dass im Regelfall allein mit der qualitativen Auseinandersetzung des Sicherheitsmanagements verwertbare Informationen gewonnen werden können. Die von ARAMIS entwickelte Methodik ist aus Sicht der Autoren des ARAMIS User Guide dazu geeignet, von den Betreibern für interne Audits, aber auch von Behörden, bzw. beauftragten Sachverständigen durchgeführt zu werden.

Ob die Evaluierung der Leistungsfähigkeit des Sicherheitsmanagements in den übergeordneten Prozess der Risikobeurteilung einfließen soll, wurde von den Teilnehmern des ARAMIS-Projektes unterschiedlich beantwortet:

- Als nachteilig wird die geringe Beständigkeit in den Managementprozessen gesehen, weshalb eine Beurteilung immer nur einen augenblicklichen Moment einfängt
- Dem gegenüber steht der Einwand, dass das Nichtberücksichtigen zu optimistischen LC-Werten und somit einer Unterschätzung des Restrisikos führt. Außerdem würde ein Sicherheitsbericht, der explizit die Evaluierung des Sicherheitmanagements beinhaltet, den Behörden bessere Ansatzpunkte für Inspektionen sowie für Festlegungen von Anforderungen an das Sicherheitsmanagement bereitstellen.

6.3.6.4 Berechnung der Häufigkeiten und Abschätzung der Konsequenzen der gefährlichen Phänomene

Die Grundlage für die Berechnung der Häufigkeit eines gefährlichen Phänomens bildet die Berechnung der Häufigkeit des kritischen Ereignisses. Dieses wiederum erfolgt

- Entweder unter Verwendung generischer Werte für kritische Ereignisse unter Verwendung des „Appendix 10 of deliverable D.1.C.: Generic frequencies data for the critical events“,
- oder anhand der individualisierten Fehlerbäume und somit unter Berücksichtigung der identifizierten initialen Ereignisse („erste“ Ursachen) und LC's der Gegenmaßnahmen. Hier wird durch ARAMIS der „Appendix 07 of deliverable D.1C.: Frequencies and probabilities data for the fault tree“ als Hilfsmittel bereitgestellt.

Aussagen zu dem Vorgehen der Berechnung der Häufigkeit der kritischen Ereignisse sowie zu den oben genannten Hilfsmitteln wurden bereits in Kapitel 6.2.6 (Gefahrenanalyse mit dem ARAMIS-Verfahren) getroffen.

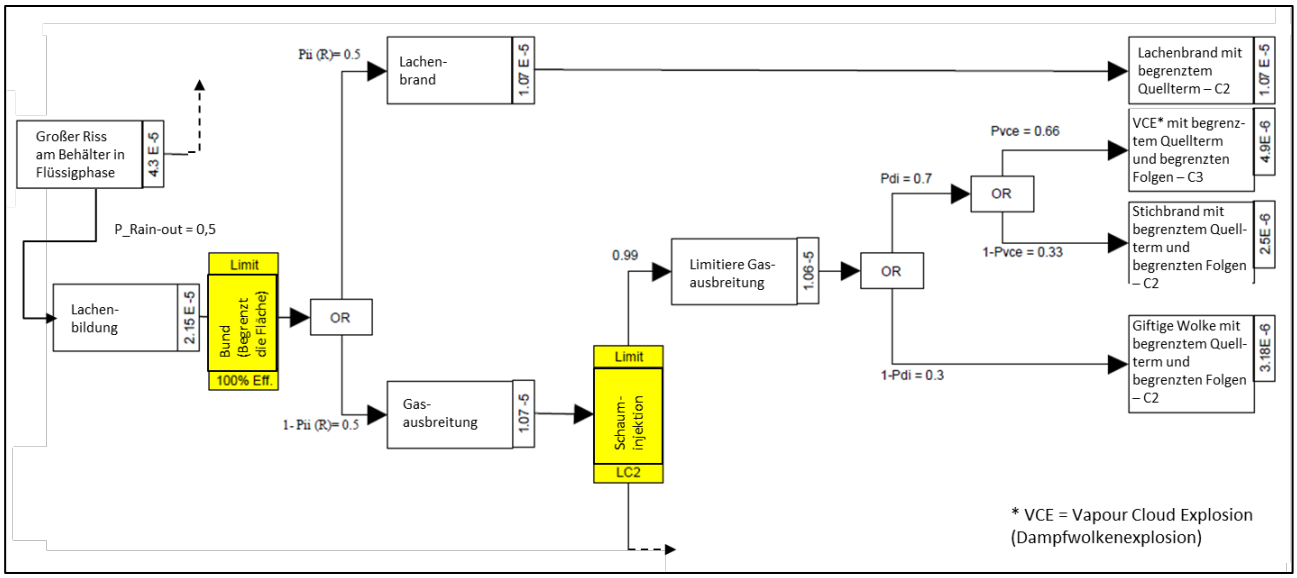
Ausgehend von den Häufigkeiten der kritischen Ereignisse werden die bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten der folgenden sekundären kritischen Ereignissen, tertiären kritischen Ereignissen und gefährliches Phänomen abgeschätzt.

Für die verschiedenen Effekte wie beispielsweise Rain-Outs, sofortige oder verzögerte Zündung oder Gaswolkenexplosion werden mit dem „Appendix 12 of deliverable D.1.C.: Probability aspects in the event tree“ Referenzwerte für die bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten bereitgestellt.

Verhindernde und steuernde/kontrollierende Gegenmaßnahmen reduzieren dem LC entsprechend die Eintrittshäufigkeit des gefährlichen Phänomens. Auswirkungsbegrenzende Gegenmaßnahmen reduzieren lediglich die Auswirkungen.

Die Abschätzung der Konsequenz erfolgt semiquantitativ (C1=gering bis C4=hoch) durch die an der Analyse beteiligten Personen. Verbale Beschreibungen der Konsequenzklassen sowie Vorschläge, welche Klassen für welche gefährlichen Phänomene anzuwenden sind, wurden seitens ARAMIS erarbeitet.

Abbildung 52: Beispiel eines Ereignisbaumes mit Gegenmaßnahmen



Quelle: ARAMIS – Final User Guide, 2004

6.3.6.5 Ermittlung von Severity Indizes

Für die Ermittlung von Risikoschwerekennzahlen (Severity-Indizes) werden sog. Referenzstörfallszenarien (Reference Accident Szenarios, RAS)) herangezogen. Dies sind Szenarien mit einem vergleichsweise großen Risiko und werden anhand einer Risikomatrix[53] ausgewählt, welche durch ARAMIS bereitgestellt wird.

Anand der Referenzstörfallszenarien können unterschiedliche Severity Indices gerechnet werden:

- Für mechanische Effekte,
- Für toxische Effekte,
- Für Wärmestrahlung und
- für Überdruck (Vgl. Fokusbereiche im QRA-Verfahren Niederlande)

der Severity Index kann dabei auf unterschiedlichen Aggregationsebenen berechnet werden:

- Für einzelne gefährliche Phänomene,
- für einzelne gefährliche Szenarien oder
- Für die gesamte Anlage.

Die Indizes berücksichtigen die Effekte der RAS's sowie deren Eintrittshäufigkeiten.

In Kombination mit der Berechnung von „Vulnerabilitätsindizes (Vulnerability indices)" sollen so die Diskussionen von Aspekten der Landnutzungs- bzw. Notfallplanung unterstützt bzw. gefördert werden.

Für die Berechnung der Severity indicies werden die Effektschweren zunächst in vier Level untergliedert (in Anlehnung an Störfallbeurteilungswerte wie beispielsweise AEGL oder TEEL).

Die nachfolgend dargestellte Untergliederung sollte nicht als Vorschlag bzw. Vorgabe eines harmonisierten Ansatzes seitens ARAMIS verstanden werden, sondern wurde während der Erprobungsphase des ARAMIS-Projektes angewandt und dient somit ausschließlich der Illustration:

Abbildung 53: Festlegung der Schwellenwerte für die unterschiedliche Effektschwere

Level of effects	Radiation[1] (kW/m²)	Instantaneous Radiation	Blast (mbar)	Missiles[2] (%)	Toxic effects	Description
1	< 1.8	< 0.5·LFL	< 30	0	< TEEL-1	Small or non effects
2	1.8 – 3		30 – 50		TEEL-1 – TEEL-2	Reversible effects
3	3 – 5		50 – 140		TEEL-2 – TEEL-3	Irreversible effects
4	> 5	= 0.5·LFL	> 140	100	>TEEL-3	Start of lethality and/or domino effects

(1) For 60 s exposure
(2) Range distance of the indicated percentage of missiles.

[53] Bei ARAMIS erfolgt die Bewertung des Risikos eines Szenarios anhand des Risikographens (Vgl. Kap. 6.3.6.2). Die Risikomatrix ist lediglich als tool gedacht, das die Auswahl der Referenzszenarien steuert.

Quelle: ARAMIS – Final User Guide, 2004

Im direkten Vergleich zu den QRA-Verfahren in den Niederlanden und Flandern werden mit dem ARAMIS-Verfahren also auch reversible und irreversible Schäden (und nicht nur mögliche Todesfolgen) in das Risikomodell einbezogen.

Für die gefährlichen Phänomene der RAS's sind durch die Anwender die räumlichen Distanzen zu berechnen, bei denen die Schwellenwerte zu den jeweils nächsten Effektleveln erreicht werden. Dabei sind entsprechende mathematische Modelle bzw. Computerprogramme anzuwenden. ARAMIS macht bezgl. der Anwendung konkreter Modelle keine Vorgaben, hat aber eine Zusammenstellung aus Ihrer Sicht geeigneter Modelle vorgenommen. Weitere Aussagen zu den Modellen können dem Kapitel 6.4.7.3 entnommen werden.

Den berechneten Distanzpunkten werden in einem Umrechnungsverfahren Severity-Werte zwischen 0 und 100 zugeordnet. Zwischen den Distanzpunkten werden linear verlaufende Severities angenommen[54].

Die Severities für kritische Ereignisse (-> S_{CE}) und die Gesamtheit der RAS's (-> S) berechnet sich dann wie folgt:

Abbildung 54: Formel zur Berechnung der Severity für ein einzelnes kritisches Ereignis

$$S_{CE}(d) = \sum_{i=1}^{n} \left(P_{DP_i} * S_{DP_i}(d) \right)$$

Quelle: ARAMIS – Final User Guide, 2004

Abbildung 55: Formel zur Berechnung der Severity für eine Menge kritischer Ereignisse

$$S(d) = \sum_{j=1}^{m} \left(f_{CE_j} * S_{CE_j}(d) \right)$$

Quelle: ARAMIS – Final User Guide, 2004

Mit

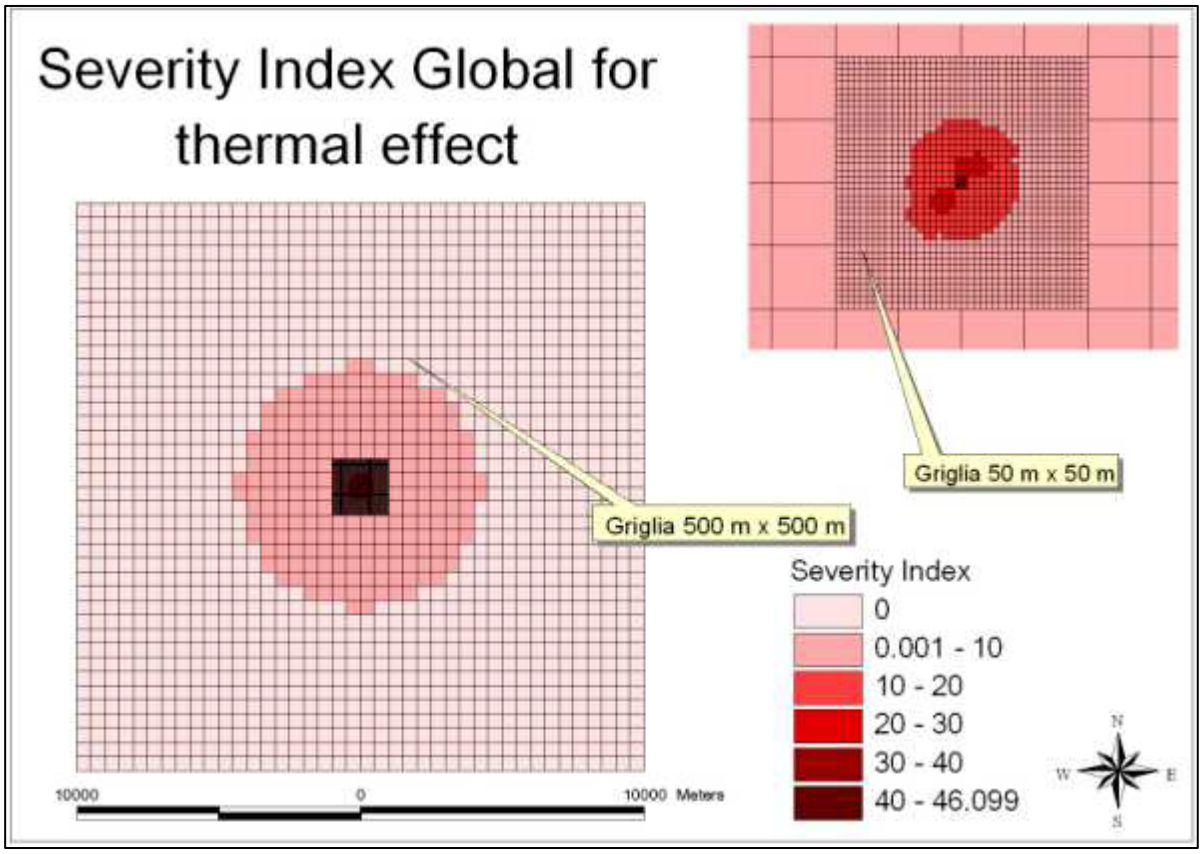
- i=1,…,n, der Laufindex über alle gefährlichen Phänomen eines kritischen Ereignisses (CE),
- P_DP_i , die (bedingte) Wahrscheinlichkeit, dass das gefährliche Phänomen i eintritt
- d, der Distanz vom Freisetzungs- bzw. Entstehungsort
- j=1,…,m, der Laufindex über alle RAS[55]
- f_CE_j, die Eintrittshäufigkeit des kritischen Szenarios

Mit einer Filterung nach den entsprechenden gefährlichen Phänomen können Severity-Kennzahlen für mechanische Effekte, toxische Effekte, Wärmestrahlung und Überdruck berechnet werden.

[54] Das genaue Umrechnungsverfahren ist dem Dokument „ARAMIS – Final User Guide" nicht zu entnehmen

[55] Im ARAMIS Final User Guide wird eine Berücksichtigung sämtlicher kritischer Ereignisse (nicht nur der RAS's) gefordert, was seitens der Forschungsnehmenden als Ungenauigkeit in der Verfahrensbeschreibung gedeutet wird.

Abbildung 56: Berechneter Risikoschwereindex für eine Anlage für thermische Auswirkungen



Quelle: ARAMIS – Final User Guide, 2004

Zur Abbildung der Severity-Kennzahlen wurde von ARAMIS ein sogenanntes Severity-GIS-tool „Arc View“ entwickelt, in welches der Anwender lediglich die ermittelten Effektdistanzen eingeben muss.

6.3.6.6 Erstellung von Vulnerabilitätskarten

Bei der Erstellung von Vulnerabilitätskarten werden berücksichtigt:

- die verschiedenen Schutzziele (Mensch, Umwelt und Sachgüter),
- die physikalischen Effekte (Überdruck, Thermische Strahlung, etc.)
- und die Auswirkungen im weiteren Sinn (Integrität, Ökonomie, psychologische Wirkungen).

Die Schutzziele werden in drei Kategorien und jeweils 4 Typen unterschieden:

- Menschen: Mitarbeiter des Betriebsbereiches, lokale Bevölkerung, öffentliche Einrichtungen, Transport (Auto, Bahn, etc.)
- Umwelt: Landwirtschaftliche Flächen, Naturgebiete, spezifische Naturgebiete, feuchtgebiete und Gewässer
- Sachgüter: Industriestandorte, öffentliche Versorgungsbetriebe und Infrastrukturen, private Strukturen, öffentliche Bauten

Die Berechnung des Vulnerabilitätsindex erfolgt mit der „Saaty multicriteria decision method“[56]. Der Index berechnet sich in den folgenden Schritten:

- für eine Kategorie von Schutzzielen und einen bestimmten physikalischen Effekt wird die Vulnerabilität der Kategorie bezogen auf den physikalischen Effekt über relative Vergleiche der Vulnerabilitäten der der Kategorie zugehörigen Schutzzieltypen bestimmt.
- Für eine Kategorie von Schutzzielen wird die Vulnerabilität der Kategorie über relative Vergleiche der Wichtigkeiten aller physikalischer Effekte bestimmt
- Schließlich wird die Vulnerabilität jeder Kategorie mit den anderen verglichen, um die gesamtheitliche Vulnerabilität zu bestimmen.

Diesen Ansatz folgenden wurden diverse Formeln entwickelt und entsprechend vereinbarte Einflussfaktoren quantifiziert. Dazu wurden diverse Experten konsultiert[57].

Folgende Formeln sind hierbei schlussendlich berechnet erarbeitet worden:

Abbildung 57: Berechnung des Vulnerabilitätsindex im ARAMIS-Verfahren

$$V_{global} = 0.752 \text{ x } V_H + 0.197 \text{ x } V_E + 0.051 \text{ x } V_M \quad (1)$$

Where the vulnerability of each class of targets depend on its vulnerability to the physical effects (overpressure = op, thermal radiation = tr, toxicity = tox, pollution = poll)

$$V_H = 0.242 \text{ x } V_H^{op} + 0.225 \text{ x } V_H^{tr} + 0.466 \text{ x } V_H^{tox} + 0.067 \text{ x } V_H^{poll} \quad (2)$$

$$V_E = 0.071 \text{ x } V_E^{op} + 0.148 \text{ x } V_E^{tr}\ 0.277 \text{ x } V_E^{tox} + 0.503 \text{ x } V_E^{poll} \quad (3)$$

$$V_M = 0.446 \text{ x } V_M^{op} + 0.410 \text{ x } V_M^{tr} + 0.069 \text{ x } V_M^{tox} + 0.075 \text{ x } V_M^{poll} \quad (4)$$

Quelle: Tixier J. et al.. Assessment of the environment vulnerability in the surroundings of an industrial site, ESREL 2003, Maastricht, Pays-Bas, 16-18 juin 2003

Zur Anwendung der Methodik werden viele Informationen bzgl. der Schutzziele in der Umgebung des Anlagenbereiches benötigt.

Relevante Informationen zur Umwelt und den Sachgütern können der Corine Land Cover (IFEN, 2002) Datenbank sowie der TeleAtlas Datenbank entnommen werden. Informationen zur Bevölkerung müssen aus nationalen Datenbanken entnommen werden (Beispielsweise: INSEE in Frankreich, ISTAT in Italien).

Grundsätzlich gilt, je aussagekräftiger die erstellten Karten sein sollen, umso mehr bzw. genauere Informationen müssen berücksichtigt werden (exakte Modellierung der Bevölkerungsdichte mit hochauflösendem Raster, Berücksichtigung zoologischer Gärten, etc.)

Auf diesen Daten aufbauend werden für jedes Raster (z.B. 500 m^2 Raster Fernfeld, 50 m^2 Nahfeld) das tatsächliche Vorhandsein von Schutzzielen in Bezug auf den jeweiligen physikalischen Effekt quantitativ abgeschätzt. Der entsprechende Vulnerabilitätsfaktor nimmt den Wert 0 an, wenn das Schutzziel in diesem Raster nicht präsent ist und nimmt den Wert 1 an, wenn der Census das erwartete Maximum annimmt.

[56] Saaty T.L. 1984. Décider face à la complexité. Les éditions ESF.

[57] Tixier J. et al.. Assessment of the environment vulnerability in the surroundings of an industrial site, ESREL 2003, Maastricht, Pays-Bas, 16-18 juin 2003

Die exakte Rechenprozedur ist im Deliverable D.4.A[58] des ARAMIS-Projektes beschrieben.

Mit dem Verfahren können Vulnerabilitätskarten für einzelne Kategorien von Schutzzielen, für einzelne physikalische Effekte aber ebenso für die Gesamtheit erstellt werden.

6.3.6.7 Zielstellung der Szenarienentwicklung

Tabelle 61: Zielstellungen der Szenarienentwicklung – ARAMIS-Verfahren

Zielstellung	Zusammenfassende Auswertung
Bestimmung der zur Verhinderung von Störfallen erforderlichen Vorkehrungen	Ja. Aus den aufgestellten Fehler- und Ereignisbäumen werden entsprechende Gegenmaßnahmen abgeleitet. Dies geschieht unter Anwendung bereitgestellter Hilfsmittel: Generische Fehlerbäume, Anleitungen zum Erstellen von Ereignisbäumen, Checklisten zu möglichen Sicherheitsfunktionen und Barrieren, Angaben zu Häufigkeiten und Wahrscheinlichkeiten, Anleitung zur Analyse der Leistungsfähigkeit des Sicherheitsmanagements einem Risikographen zur Beurteilung der Gegenmaßnahmen.
Bestimmung der zur Minderung von Störfallauswirkungen erforderlichen Maßnahmen,	Ja. siehe oben
Identifikation, Abschätzung und Bewertung verbleibender Risiken,	Ja. Die Abschätzung der Risiken erfolgt per Abschätzung, bzw. unter Zuhilfenahme entsprechender Richtwerte für einzelne gefährliche Phänomene
Abschätzung des Ausmaßes und der Schwere von Störfällen und Ermittlung der von Störfällen betroffenen Gebiete,	Ja, für ausgewählte Szenarien mit ausreichend hohem Risiko. Berechnung diverser Severity-Kennzahlen (für einzelne gefährliche Phänomen, physikalische Effekte, kritische Ereignisse oder die gesamte Anlage)
Bestimmung der geeigneten Notfallmaßnahmen (incl. Alarm- und Gefahren-abwehrplanung)	Mit den berechneten Severity-Kennzahlen und erstellten Vulnerabilitätskarten werden relevante Informationen für die Festlegung geeigneter Notfallmaßnahmen bereitgestellt.

6.4 Vergleichende Betrachtungen für den Analyseschritt „Auswirkungsbetrachtungen“

Zur Abschätzung der Schadensausmaße der Störfallszenarien kommen in den ausgewählten Verfahren unterschiedliche Ansätze zur Anwendung. Während mit der Anwendung der Verfahren HAZOP, FTA/ETA und LOPA typischerweise erfahrungsbasierte, semiquantitative Abschätzungen von Schadensausmaßen einhergehen, sind bei den QRA-Verfahren mathematische Modelle zur Berechnung der Auswirkungen anzuwenden. Das Kapitel adressiert daher zunächst und in knapper Form die Situation bei den erstgenannten Verfahren, bevor im Weiteren eine tiefergehende Auseinandersetzung zu den angewendeten Modellen in den QRA-Verfahren erfolgt.

[58] Deliverable D.4.A “Guide describing the methodology to calculate the spatial vulnerability index V” WP 4: Environment vulnerability Tixier J., Dandrieux A., Dusserre G., Mazzarotta B., Di Cave S., Bubbico R., Londiche H., Debray B., Hubert E., Rodrigues N.

Im Rahmen der HAZOP-Analyse wird je Szenario eine binäre Abschätzung vorgenommen, ob im Falle einer Abweichung vom bestimmungsgemäßen Betrieb mit einer sicherheitsrelevanten Auswirkung bzw. mit einem Störfall zu rechnen ist (eventuelle Gegenmaßnahmen nicht berücksichtigt). In diesem Falle sind entsprechende Gegenmaßnahmen festzulegen. Da diese Maßnahmen verhältnismäßig sein sollen, bedarf es zusätzlich einer Abschätzung des Schadensausmaßes, was genaugenommen nicht Bestandteil der HAZOP-Analyse ist.

In der Praxis wird die HAZOP-Analyse daher häufig um erfahrungsbasierte, semiquantitative Auswirkungsabschätzungen ergänzt (u.a. mittels Anwendung von Risikomatrizen, Risikographen oder dem LOPA-Verfahren). Die so vorgenommenen Abschätzungen hängen maßgeblich von den Erfahrungswerten des Analystenteams, von den verfügbaren Informationen (z.B. Beispielrechnungen) sowie von den getroffenen Annahmen zum Störfallablauf ab (das sind z.B. Annahmen zu Freisetzungsmenge und -dauer eines Gefahrstoffes, Ausmaß eventueller Brände/Explosionen/Toxischer Wolken, Anzahl Personen im Gefahrenbereich, Berücksichtigung von Fluchtmöglichkeiten, meteorologische Bedingungen, …).

Die Verfahren Fehlerbaumanalyse und Ereignisbaumanalyse stellen ebenso wie das HAZOP-Verfahren ein Kreativtechnik dar, mittels derer Störfallablaufszenarien entwickelt werden können. Die Verfahren beinhalten kein Kalkül zur Abschätzung der Ausmaße von Störfallauswirkungen.

Bei den QRA-Verfahren in den Niederlanden und Flandern kommen hingegen mathematische Modelle zum Einsatz, mittels welcher die Auswirkungen der entwickelten Störfallablaufszenarien berechnet werden. Dies sind Modelle zur Berechnung von

- Stofffreisetzungen aus einer Umschließung,
- Quelltermen bei Lachen,
- Gasausbreitungen,
- Bränden von Flüssigkeiten, Gasen und Feststoffen,
- Explosionen von Gaswolken und Bersten von Gehältern,
- Störfallbeurteilungswerten.

Das ARAMIS-Verfahren gibt nicht vor, welche Modelle anzuwenden sind. Das ARAMIS-Projekt hat seinerzeit jedoch eine Zusammenstellung favorisierter Modelle vorgenommen. Eine vollständige Übersicht konnte das EC JRC (Joint Research Center der Europäischen Kommission) den Forschungsnehmenden allerdings nicht mehr zur Verfügung stellen, sodass den Forschungsnehmenden nur punktuelle Informationen zu den favorisierten Modellen vorlagen.

In den folgenden Kapiteln werden die Modelle, welche in den niederländischen und flämischen QRA-Verfahren, sowie im ARAMIS-Verfahren zur Anwendung kommen, mit den Modellen, wie sie in der einschlägigen deutschsprachigen Literatur diskutiert werden, bzw. in den Computerprogrammen des EC JRC implementiert sind, verglichen. Diese sind

- Forschungsbericht „Ermittlung und Berechnung von Störfallablaufszenarien nach Maßgabe der 3. Störfallverwaltungsvorschrift“ (Kaiser, W. et al. TÜV Anlagentechnik GmbH, Berlin 1999, UBA-FB 000039),
- Statuspapier „Auswirkungsbetrachtungen bei störungsbedingten Stoff- und Energiefreisetzungen in der Prozessindustrie - Methodenübersicht und industrielle Anwendung“ (DECHEMA, Frankfurt 2017),

- ADAM (Accident Damage Analysis Module), EC JRC,
- Rapid-N, EC JRC.

Mit dem Vergleich erfolgt in erster Linie eine Darstellung eines Lagebildes bezgl. der Diversität der entwickelten, diskutierten bzw. zur Anwendung kommenden Modelle zur Berechnung von Störfallauswirkungen.

Die vergleichenden Darstellungen stellen keine Anwendungsempfehlungen einzelner Modelle dar. Die oben genannten Verfahren, Berichte, sowie die Dokumentationen zu den Computerprogrammen gehen ausführlich auf Anwendungsbedingungen und -restriktionen bzw. Stärken und Schwächen einzelner Modelle ein. Vor der Anwendung der Modelle sind die entsprechenden Dokumente zu konsultieren.

Für die in den QRA-Verfahren zur Anwendung kommenden Modelle werden nach Möglichkeit Aussagen zur Validität und Sensitivität der einzelnen Modelle getroffen.

Komplementiert werden die Betrachtungen um

- Aussagen zu möglichen Einsatzwecken, wie sie die Autoren der jeweiligen Verfahren, Berichte, Computerprogramme einschätzen.
- Aussagen zur Anwendung der Verfahren, Berichte und Computerprogramme seitens der interviewten Praxispartner (siehe auch Praxisuntersuchungen, Kapitel 5.1)
- Weitere Auswertungen, bzw. wissenschaftliche Untersuchungen zu den diskutierten Modellen (Validierungen, wissenschaftlicher Austausch)

6.4.1 Stofffreisetzung aus einer Umschließung

Bei der Modellierung der Stofffreisetzung aus einer Umschließung werden u.a. folgende Parameter berechnet:

- Freisetzungsrate am Behälterausgang bzw. Gesamtmenge des freigesetzten Stoffes (bei spontanem Behälterversagen)
- Stoffeigenschaften am Behälterausgang: Druck, Temperatur, Geschwindigkeit
- Ausbreitungsverhalten, thermodynamischer Zustand in der Nähe des Behälterausganges aufgrund der Druckentlastung („flashing“)
- Tröpfchenbildung und Berechnung der Rain-Out-Fraktionen

Dabei werden u.a. folgende Randbedingungen berücksichtigt:

- Art und vorhandene Menge des an der Freisetzung beteiligten Stoffes,
- Behälterform: Horizontaler oder vertikaler Zylinderbehälter, Kugel
- Lage der Ausströmöffnung: Gas/Dampfraum oder flüssigkeitsbenetzter Teil des Behälters (-> Phasenzusammensetzung)
- Phase: Flüssigkeit (drucklos, tiefkalt, druckverflüssigt), Gas (komprimiert),
- Ausströmgeometrie: Düsenartige Öffnung, Riss in einer Wand, Leckage in einer Rohrleitung, Abriss einer Rohrleitung, Spontanes Behälterversagen bzw. schlagartige Freisetzung des gesamten Behälterinventars („Total rupture“ / Catastrophic Release“),

- Art Freisetzung: schlagartige Freisetzung vs. kontinuierliche Freisetzung (Freisetzungszeit)
- Richtung und Höhe der Freisetzung,
- Freisetzungsrate (zeitkonstant vs. -variabel),
- Nachförderung in Prozessanlagen, Rückströmung und Reibungsverluste durch eine Rohrleitung.

Die nachfolgende Tabelle stellt eine Übersicht über die in den oben genannten Quellen diskutierten Ansätze zur Modellierung der Stofffreisetzung dar.

Tabelle 62: Vergleichende Darstellung – Stofffreisetzung aus einer Umschließung

Teilaspekt	QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
Freisetzung einer Flüssigkeit – Bestimmung des Massenstroms bzw. der freigesetzten Gesamtmasse							
Spontane Freisetzung	Einfache isentrope Expansion auf atmosphärischen Druck	Bildung einer Lache („Pools“)	-		-	Spontane Freisetzung Behälterinventars. Möglicher Splitterauswurf. Erzeugung einer Druckwelle aufgrund der Ausbreitung des Behälterinventars. Modellierung einer plötzlichen Druckentlastung einer druckverflüssigten Flüssigkeit als isentrope Expansion.	Vorgabe zu berücksichtigender LOC’s mit entsprechenden Angaben: („Continuous releases” mit unterschiedlichen Öffnungsgrößen, Freisetzungsdauern und -mengen, “Instantaneous release” mit der Freisetzung des gesamten Behälterinhaltes). Es werden keine Berechnungs-modelle vorgestellt.
Kontinuier-liche Freisetzung	Das Kernmodell ist ein stationäres Leckmodell für Öffnungen und kurze Rohre. Alternativ: Modell der transienten Freisetzung nach Stene et al. [2014, 2016].	Leckage an einem Behälter, Rohr, Schlauch, Ladearm: Modellierung der Freisetzungsrate mittels Bernoulli-Gleichung mit Ausflussbeiwert.	-	Vgl. Kap 2.3: Freisetzung aus Behältern und Schutzsystemen: Berechnung des Massenstroms mittels Modells der Düsenströmung unter der Annahme einer eindimensionalen, isentropen Strömung.	Bernoulli-Gleichung mit Ausflussbeiwert Bernoulli – Gleichung mit Druckverlusten	Leckage an einem Behälter: Bernoulli-Gleichung mit Ausflussbeiwert Leckage Pipeline: Bernoulli – Gleichung mit Reibungsverlusten. Iterativer Berechnungsansatz zur	Siehe oben

Teilaspekt	QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
	Berücksichtigung der variablen Volumenstroms aufgrund des abnehmenden Überdrucks.	Annahme einer konstanten Freisetzungsrate Abriss eines Rohres, Schlauches, Ladearmes: ->zwei Fälle: a) Förderung von Flüssigkeiten: Freisetzungs-rate = 1,5-fache des Nennpumpen-durchflusses, b) Aufpumpen von Flüssigkeiten („Pumping up liquids“): Bernoulli-Gleichung mit C_d = 1,0		Bernoulli-Gleichung, Freisetzungs-koeffizient C_d = 0,62 Zur Berücksichtigung eines Druckabfalls (Leckage langes Rohr) wird auf ein Modell des Yellow books verwiesen		Modellierung einer zeitabhängigen Freisetzungsrate	
Freisetzung eines komprimierten Gases- Bestimmung des Massenstroms bzw. der freigesetzten Gesamtmasse							
schlagartige Freisetzung	einfache isentrope Expansion auf atmosphärischen Druck	Annahme: Isentrope Expansion auf Atmosphärendruck	-	-	-		Siehe oben
Kontinuier-liche Freisetzung	Das Kernmodell ist ein stationäres Leckmodell für	Annahme: Isentrope Expansion auf Atmosphärendruck	-	Vgl. Kapitel 2.2: Freisetzung aus Behältern und Schutzsystemen: Berechnung des	Grundlegende Annahme: Freisetzung bis Überdruck im Behälter abgebaut ist. Näherungsweise	Annahme: adiabatischer isentroper Prozess im Inneren des Behälters.	Siehe oben

Teilaspekt	QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
	Öffnungen und kurze Rohre. Alternativ: Modell der transienten Freisetzung nach Stene et al. [2014, 2016]. Berücksichtigung der variablen Volumenstroms aufgrund des abnehmenden Überdrucks.			Massenstroms mittels Modell der Düsenströmung unter der Annahme einer eindimensionalen, isentropen Strömung Freisetzung aus einer Rohr: -Modellgleichung des Yellow book der TNO -Modellgleichung nach Crowl und Louvar	adiabatischer isentroper Prozess im Inneren des Behälters. Vorgeschlagene Vereinfachung: zeitkonstante Freisetzungsrate (Schwierigkeit bei zeitabhängiger Modellierung ist die Berücksichtigung folgender Aspekte: a) Aufwallen der Flüssigkeit bzw. dem Druckwiederanstieg durch Verdampfung, b) Gasentlösung oder c) gar Gasfreisetzung durch eine chemische Reaktion). Modellierungen: Düse, “kurzes” Leck: Ideales Ausströmen, Korrektur mit Ausflussbeiwert. Abriss Rohrleitung: Kompressible, reibungsbehaftete Gasströmung	Alternative Gleichungen zur Berechnung der Gasdichte als Funktion von Druck und Temperatur: 1. Ideale Gase (wird nicht empfohlen) 2. Soave Modifizierung von Redlich–Kwong (Redlich, 1949, wird als Standard verwendet) 3. Peng–Robinson (Peng, 1976) In künftiger Programm-version Ergänzung um die GERG-2008 Zustands-gleichung (Kunz and Wagner, 2012) (Anwendung: für sehr hohe Drücke) Berechnung der Ausflussrate in einem iterativen Verfahren, d.h. dass die Ausflussrate einer zeitlichen Änderung unterliegt. Für Stofffreisetzungen aus einem Behälter sowie einer Pipeline werden	

Teilaspekt	QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
					Vorgeschlagene Vereinfachung: zeitkonstante Freisetzungsrate	unterschiedliche Formeln für die Ausflussraten bereitgestellt (u.a. Berücksichtigung Ausflussziffer bei Leckagen am Behälter, sowie der Rohrreibungszahl bei Rohrleitungen)	
Zweiphasenfreisetzung - Bestimmung des Massenstroms							
schlagartige Freisetzung	einfache isentrope Expansion auf atmosphärischen Druck	Annahme: Isentrope Expansion auf Atmosphärendruck	-		-		Siehe oben
Freisetzungs-rate – Leckage an einem Behälter oder Rohr	Anwendung von Gleichgewichts-strömungsmodellen	Annahme: Leckentstehung durch den Abbruch eines 10 cm langen Rohrs am Behälter. Hierzu wird ein homogenes Gleichgewichtsmodell (wie TPDIS[59] oder Leung) verwendet. Es wird davon ausgegangen, dass die Zuströmung in das Rohr ideal ist. Mit anderen Worten: Es wird kein	-	Vgl. Kap 2.4: Homogenes Gleichgewichts-Strömungsmodell Homogenes eingefrorenes Gleichgewichts-strömungsmodell Fauske Modelle: Fauskes empirisches Modell, Henry und Fause Ungleichgewichtsmodell	Homogenes Ungleich-gewichtsmodell nach Diener - Schmidt		Siehe oben

[59] TPDIS -> siehe Yellow Book 2.5.3.5 – “Two Phase DIScharge through Pipe”

Teilaspekt	QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
		Zulauf oder Druckverlust berücksichtigt.		Fauske Slip Gleichgewichtsmodell, Fauske Ungleichgewichtsmodell, Fauske Gleichgewichts-Geschwindigkeits-Modell, FauskeModell für unterkühlte Flüssigkeiten Leung Modelle: Homogenes Gleichgewichts-Strömungsmodell nach Leung, Modell für hochgradig unterkühlte Flüssigkeit, Yellow book Modelle: -Freisetzung eines druckverflüssigten Gases aus einem Behälter -Freisetzung eines Flüssigkeits/Dampf-Gemisches aus einem Rohr			
Freisetzungs-rate – Abriss eines Rohres		In Situationen, in denen die Durchflussmenge durch eine Pumpe bestimmt wird, entspricht die Fördermenge dem 1,5-fachen des nominalen Pumpendurchflusses,	-		Homogenes Gleichgewichts-modell mit Druckverlusten (Leung/Grolmes)		Siehe oben

Teilaspekt	QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
Bestimmung der Flash-, Spray- und Rain-Out-Fraktionen		schlagartige Freisetzung: Der Flash-Anteil χ basiert auf der isentropen Expansion vom Ausgangszustand auf Umgebungsdruck. Wenn Flash-Anteil <10%: Kletz-Regel Wenn Flash-Anteil>36%: Rain-Out-Anteil=0% Wenn Flash-Anteil zwischen 10% und 36%: Linearer Zusammenhang zwischen Flash und Spray δ: δ=(0,54·χ−0,028)/0,26 Kontinuierliche Freisetzung: Bestimmung Flash-Anteil auf der Grundlage der Massen-, Impuls- und Energieerhaltungssätze. Die Spray- und Rain-Out-Anteile (δ und α) werden mit den	-	Flashverdampfung: 2 Modelle (mit und ohne Annahme konstanter physikalischer Eigenschaften über den Temperaturbereich T_0 bis T_b) $\Phi_{F1} = \frac{m_F}{m_0} = 1 - \mathrm{Exp}\left[-\frac{c_{pl}(T_0 - T_S)}{h_v}\right]$ $\Phi_{F2} = \frac{m_F}{m_0} = \frac{c_{pl}(T_0 - T_S)}{h_v}$ Aerosolanteil: Faustregel Flash = Aerosol %	Ergebnis-darstellung experimenteller Untersuchungen. Modelle Flashverdampfung: Identisch TÜV Spray-Modelle: Einfache Korrelationsgleichungen zur Bestimmung des Rain-Out-Anteils: – Kletz – DeVaull und King – Fauske – Lautkaski – Tickle Modellgleichungen zur Bestimmung des Rain-Out-Anteils: - Yellow book - Modell von Papadourakis, Caram und Barner - Release-Modell - Modell von Al Rabadi et al. -	Alternativer Berechnungsansatz über Korrelationsgleichungen zur Bestimmung des Rain-Out-Anteils: – DeVaull und King – Lautkaski Modellgleichungen zur Bestimmung des Rain-Out-Anteils: -	Siehe oben. Flashanteil an freigesetzter Menge = 50%

Teilaspekt	QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
		folgenden Formeln bestimmt: δ=min(4χ,1−χ) α=1−(δ+χ)					
Freisetzungen mit nicht-homogenen Stoffinhalten							
		Separate Modellierung der einzelnen Phasen. Aufteilung der Fehlerhäufigkeiten	-	-	-		-

Hinweise zur Validität der QRA-Verfahren:

- QRA-Verfahren in den Niederlanden: Die Ergebnisse wurden in einer Vielzahl von Experimenten umfassend validiert. Eine aktuelle Übersicht wurde von Witlox et al. 2018 veröffentlicht[60]. QRA-Verfahren in Flandern: Das Referenzmanual macht keine Angaben zur Validität. Zur Anwendung kommen wissenschaftlich anerkannte Modelle.

[60] Henk W.M. Witlox, Maria Fernandez, Mike Harper, Adeyemi Oke, Jan Stene, Yongfu Xu, Verification and validation of Phast consequence models for accidental releases of toxic or flammable chemicals to the atmosphere, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 55, 2018,

6.4.2 Verdampfung und Verdunstung aus einer Lache

Nach Freisetzung einer Flüssigkeit aus einer Umschließung regnet ein Teil aus und bildet eine Lache. Dabei beginnt ein Verdampfungs- und Verdunstungsprozess, wodurch die Flüssigkeit in den gasförmigen Zustand übergeht. Die entstehende Wolke wird in der Phase der Gasausbreitung dann weiterbetrachtet. Auch die Möglichkeit eines Lachenbrandes besteht, was im Rahmen der Brände weiterbetrachtet wird.

Verdampfung ist der Wechsel des Aggregatzustandes einer Flüssigkeit über dem Siedepunkt. Verdunstung findet dagegen unterhalb des Siedepunktes statt.

Die hier dargestellten Rechercheergebnisse behandeln immer drei Aspekte: Lachenausbreitung, Energiebilanz und Verdampfung/ Verdunstung. Wichtige Berechnungsgrößen sind die Größe und die Temperatur der Lache, die Temperatur der abgehenden Gase, die Verdampfungsrate und die Verdunstungsrate.

Die untenstehende Tabelle geht auf diese Aspekte ein und zeigt dabei die wichtigsten Elemente der Vorgehensweise bei der Berechnung der Ergebnisgrößen auf.

Tabelle 63: Vergleichende Darstellung – Verdampfung und Verdunstung aus einer Lache

Teilaspekt	QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
Ausbreitung der Lache							
Berechnungs-ansätze	PVAP Modell nach Cook und Woodward; 1993 und Verallgemeinerung durch Fernandez et al.; 2012	Anwendung der Formeln von Webber; 1990 (zeitliche Änderung des Volumens , des Radius, der Ausbreitungsgeschwindigkeit) Maximale Lachenfläche $A_{Lache} = V/h_{lim}$ nach Brambilla und Manca; 2009	-	$A_{Lache} = V_{stoff}/h_{l,min}$ Lachentiefe nach Opschoor; 1981	Maximale Lachenfläche $A_{Lache} = V/h_{min}$ h_{min} gemäß Yellow Book; 2005 Ausbreitung der Lache nach Briscoe und Shaw; 1980 Schalau; 2010 Wu und Schroy; 1979 Webber; 1991 Manning- Strickler (siehe Arnold; 1993) Rauhigkeitsbeiwerte in Jirka; 2007	GASP (Gas Accumulation over Spreading) Modell von UKAEA; Entspricht großenteils QRA-Flandern Alternativmodell nach Opschoor: dR/dt=√(2g(h-h_min)) (nicht empfohlen) Volumenänderung: dV/dt=q/(ρL) -π*R2*qev	Rapid-N arbeitet mit ADAM, sofern diese Option aktiviert ist
Ergebnisse	Größe der Lache Auch zeitliche Entwicklung	Größe der Lache Auch zeitliche Entwicklung (Radius, Volumen, radiale Ausbreitungsgeschwindigkeit)	-	Größe der Lache	Größe der Lache Auch zeitliche Entwicklung (Fläche bzw. Radius)	Größe der Lache Auch zeitliche Entwicklung (Radius, Volumen, radiale Ausbreitungsgeschwindigkeit)	
Besonder-heiten	Untergrund = Boden oder Wasser	Untergrund = Boden oder Wasser Berücksichtigung eines Tiefenprofils des Pools	-	Untergrund = Boden oder Wasser Nur offene Lachen	Untergrund = Boden Berücksichtigung eines geneigten Untergrundes Nur offene Lachen	Keine Spezifizierung des Untergrunds	

Teilaspekt	QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
	Berücksichtigung einer Umrandung			Keine Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der Lachengröße			
Energiebilanz							
Berechnungs-ansätze	PVAP Modell nach Cook und Woodward; 1993 und Verallgemeinerung durch Fernandez et al.; 2012	Energiebilanz: Änderung der Lachenenergie durch Temperaturänderung = Änderung von Qconduction + Änderung Qconvection + Änderung Qradiation + Änderung durch Massenzustrom – Änderung durch Massenverlust	-	Berücksichtigung der Wärmeströme durch Strahlung (Ein- und Abstrahlung) q̇Str, durch Konvektion (bei Wind) q̇K, durch Wärmeleitung (Lache an Luft) q̇L, durch Wärmeübertrag aus dem Boden q̇B	Konvektiver Wärmestrom Q̇U aus Q̇U = *(TLuft-Tfl)ALache gemäß VDI-Wärmeatlas; 2006 Wärmestrom Q̇B (Lache <-> Boden) aus Wärmeleitungsgleichung Lebuser, Schecker; 1987 Wörsdorfer; 1994 Wärmestrahlung Q̇Str (Lache <-> Luft) aus Energiebilanz Q̇Str=(0,86*Q̇Sonne - 0,9 *σ(Tfl)4+ 0,46*σ*((TLuft)4 – (Tfl)4)) ALache	Temperaturänderung: $\frac{dT}{dt} = \frac{A}{C_p^L \cdot \rho^L \cdot V} \cdot (H_{Tot} - q_{ev} \cdot h_V) + \frac{q}{\rho^L \cdot V} \cdot (T_0 - T)$ HTot=HC+Ha+Hr HC Heat transfer from ground (formula Webber; 1987) Ha=h·A·(Ta-T) Heat from ambient air, h analog zu Massentransfer Brighton; 1985 Hr=Hsr+ε*σ*((Ta)4-T4) Strahlungswärme Hsr gemäß Raphael; 1962	Rapid-N arbeitet mit ADAM, sofern diese Option aktiviert ist
Ergebnisse	Temperatur der Wolke und der Lache	Berechnung von Q̇convection nach Kunsch; 1998, Q̇conduction	-	Keine Berechnung der einzelnen Energieanteile	Konvektiver Wärmestrom Q̇U (Wind, Turbulenzen) Wärmestrom Q̇B (Lache <-> Boden)	Temperaturänderung der Lache Wärmestrom HC (Lache <-> Boden)	

Teilaspekt	QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
		nach Briscoe und Shaw; 1980 + van den Bosch; 2005 $\dot{Q}$radiation			Wärmestrahlung $\dot{Q}$Str (Lache <-> Luft)	Wärmestrom Ha (Lache <-> Luft Wärmestrahlung Hr	
Besonder-heiten	Untergrund = Boden oder Wasser	Rechteckige und kreisförmige Lachenflächen Conduction für Boden und Wasser	-	Ohne Bilanzgleichung Untergrund = Boden	Rechteckige und kreisförmige Lachenflächen Untergrund = Boden	Untergrund = Boden	
Verdampfung und Verdunstung							
Berechnungs-ansätze	PVAP Modell nach Cook und Woodward; 1993 und Verallgemeinerung durch Fernandez et al.; 2012	Verdunstung berechnet nach $\dot{m}v = -hm \cdot Atop \cdot \Delta c \cdot Pa / Pv \cdot \ln(1 - Pv / Pa)$	-	Verdampfung auf Boden nach Wärmeleitungsgesetz (Fourier), Shaw und Briscoe; 1978 Programm SPILL Verweis auf Yellow Book Verdampfung auf Wasser: Shaw und Briscoe; 1978 Verdunstung: Sutton, Pasquill, Mackay/Matsugu, Kawamura/Mackay (Diplomarbeit Calaminus; 1990) Clancay; 1974 Flothmann und Heudorfer; 1980 Schecker und Lebuser; 1989	Verdampfung: $\dot{m}$va = ($\dot{Q}$B + $\dot{Q}$U + $\dot{Q}$Str)/hv Verdunstung: Empirische Verfahren aus Sutton; 1934, Pasquill; 1943, Lees; 2005 Habib; 2010 Lebuser; 1989 Clancey; 1974 Mackay und Matsugu; 1973 Deutsch mit Berücksichtigung eines Rauigkeitswertes; 1995 TÜV-Modell; 1999 Meurer; 1991 Brötz; 1979 Khajehnajafi; 2011	Brighton model; 1985 Verdunstung berechnet nach Mw $\cdot Pv / (R \cdot T) \cdot u \cdot j \cdot Pa / Pv \cdot \ln(1 - Pv / Pa)$ Verdampfung HTot/hV	Rapid-N arbeitet mit ADAM, sofern diese Option aktiviert ist

Teilaspekt	QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
				Fleischer; 1980 Brötz; 1979	Habib und Schalau; 2015 Analytisches Grenzschichtverfahren Habib; 2010		
Ergebnis	Vaporisation	Evaporation rate (Verdunstung)	-	Verdampfungsrate, Verdunstungsrate	Verdampfungsrate, Verdunstungsrate	Verdampfungsrate, Verdunstungsrate	
Besonder-heiten	Spezielle Handhabung für Ammoniakaustritt auf Wasser	Rechteckige und kreisförmige Lachenflächen Berechnung der Verdampfung ist nicht erkennbar	-	Trennung Verdampfung und Verdunstung Trennung Boden und Wasser als Untergrund Rechteckige und kreisförmige Lachenflächen	Rechteckige und kreisförmige Lachenflächen	Kein Hinweis auf Lachenform	
Einflussgrößen	Zuflussrate (Rainout) Umgrenzungen, atmosphärische Bedingungen, Oberflächen	Form des Pools (Umrandung) – auch in die Tiefe gehende Form, Art des Untergrunds, Anfangswerte für Lachenvolumen, Lachenradius, radiale Ausbreitungsgeschwindigkeit, Stoffeigenschaften der Flüssigkeit, Oberflächen, Luftdruck,	-	Boden (Rauhigkeit, Temperatur), atmosphärische Bedingungen (Temperatur, Druck, Wind), Lachenstoff, Lachenform, …	Lachenform, Temperatur des zufließenden Stoffes, Zuflussrate, Art des zufließenden Stoffes, Umgebungsdruck, Temperatur der Luft, Windgeschwindigkeit, Art des Bodens, Temperatur des Bodens, …	Art des Bodens (Rauhigkeit), Art der Flüssigkeit, Zuflussrate, Temperatur der Flüssigkeit bei Zufluss, athmosphärische Bedingungen (Temperatur von Luft und Boden, Wind)	Art der Flüssigkeit, Meteorologische und Umgebungsbedingungen, Bodentemperatur, Wärmeleitfähigkeit des Bodens, Temperaturturbulenz im Boden, Bodenrauigkeit

Teilaspekt	QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
		Sättigungsdruck, Zuflussrate, …					

Zusammenfassende Bemerkungen:

Lachenausbreitung: Das Prinzip zur Flächenberechnung einer Lache nach Ausbreitung des gesamten Volumens erfolgt in allen Quellen gleich, indem man das Volumen durch die minimale Höhe des Flüssigkeitsstandes dividiert. Das in QRA-NL verwendete Modell PVAP zur Beschreibung der zeitlichen Lachenausbreitung wird in den anderen Quellen nicht erwähnt. Dagegen werden die Formeln von Webber (ebenfalls zur Beschreibung der zeitlichen Lachenausbreitung) nicht nur in QRA-Flandern sondern auch in ADAM genutzt.

Energiebilanz: Eine Besonderheit des Verfahrens nach QRA-NL besteht darin, dass auch die Temperatur des abgehenden Gases als Ergebnis angegeben wird. Die anderen Verfahren weisen nur die Lachentemperatur als Berechnungsergebnis aus.

Verdampfung/ Verdunstung: Die Verdunstung betreffend sind in den Ausführungen zum Verfahren nach QRA-Flandern lediglich Ähnlichkeiten zu erkennen gegenüber den Verfahren nach ADAM. Eine Formel für den Massenverlust durch Verdampfung ist dem Verfahren nach QRA-Flandern nicht zu entnehmen. Die Beschreibung für QRA-NL ist zu unausführlich, um Aussagen über Ähnlichkeiten der Verfahren feststellen zu können.

6.4.3 Gasausbreitung

Bei der Ausbreitung gasförmiger Gefahrstoffe (brennbar, toxisch) ist insbesondere die räumliche und zeitliche Verteilung des Stoffes (Stoffkonzentration) von Interesse. Da die Ausbreitung von Gefahrstoffen in der Atmosphäre ein komplexes Phänomen darstellt, beinhalten die entwickelten Modelle mehr oder weniger stark vereinfachende Annahmen.

Berechnungsergebnisse der Modelle sind:

- Ausbreitung von Gefahrstoffen in der Atmosphäre in Raum und Zeit (Stoffkonzentrationen)
- Für impulsbehaftete Stofffreisetzungen: Abstand vom Quellort, ab dem ein Stoff passiv der atmosphärischen Luftbewegung folgt.
- Abstand vom Quellort, bei dem die Konzentration die untere Explosionsgrenze unterschreitet (bzw. bei toxisch wirkenden Stoffen, der Abstand bei dem bestimmte Störfallbeurteilungswerte unterschritten werden)

Bei der Modellierung von Gasausbreitungen werden unter anderem folgende Aspekte berücksichtigt:

Stofffreisetzungsbedingungen:

- Ausbreitungsmechanismen: Impulsbehaftete und impulsarme (bzw. -freie) Freisetzung und Ausbreitung
- Freisetzungsart: Kontinuierliche oder schlagartige Freisetzung
- Quelle: Punktquelle, linienförmige Quelle, Flächen (Lachen), räumliche Quellen
- freigesetzte Stoffmengen, Stoffeigenschaften
- Freisetzungsort und -höhe
- Austrittsimpuls Freistrahl: senkrecht, horizontal
- Chemisches und physikalisches Verhalten des freigesetzten Stoffes: chemische Reaktionen, Phasenübergänge, Schwereeinflüsse

Meteorologische Bedingungen:

- Windrichtung und Windgeschwindigkeit
- Atmosphärische Turbulenzen
- Luftfeuchtigkeit und -temperatur

Umgebungsbedingungen:

- Strömungshindernisse (Gebäude, Bewuchs, Geländetyp)
- Stabilitätsklassen bzw. Ausbreitungsklassen (Einteilung der möglichen Turbulenzzustände der bodennahen Atmosphäre)

Tabelle 64: Vergleichende Betrachtung – Gasausbreitung

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
Zur Anwendung kommt das vom DNV entwickelte „Unified Dispersion Model“ (UDM). UDM ist ein Integralmodell, welches im Vergleich zu CFD-Modellen relativ schnell ausgeführt wird. Das Konzentrationsprofil innerhalb der Wolke variiert je nach den physikalischen Eigenschaften der Wolke; Auf diese Weise entfällt die Notwendigkeit, zwischen einem Gaußschen Modell und einem Boxmodell zu wählen. Es kann ein breites Spektrum an Freisetzungsszenarien, Materialien und Prozessbedingungen modellieren, darunter • schlagartige (z. B. Behälterbersten), kontinuierliche (z. B. Lecks) und zeitlich veränderliche (z. B. Pipelines) Freisetzungen	Untergliederung nach a) passiver (bzw. neutrale Gas-) Dispersion und b) Schwergasdispersion. **Passive Dispersion:** Anwendung, wenn Dichteunterschied zwischen Gas und Luft vernachlässigbar ist. Modellierung mittels Gaußmodellen (Bakkum & Duijm, 2005). Unterscheidung zwischen der Verwendung von Punktquellen, virtuellen Punktquellen und Erf-Funktionen zur Modellierung der Ausbreitung, sowohl für kontinuierliche als auch für augenblickliche Freisetzungen. Zur Anwendung kommende Formeln sind dem Yellow Book entnommen.	. Nur ausschließlich frei verfügbare Modelle werden empfohlen (wie zum Beispiel die Gaußschen Dispersionsgleichungen oder die Software ALOHA der US-amerikanischen EPA). Nicht freiverfügbare,	Gauß’sches Ausbreitungsmodell (Anwendung für leichte Gase) Schwere Gase: - VDI 3783 Blatt 2: Umweltmeteorologie - Ausbreitung von störfallbedingten Freisetzungen schwerer Gase - Modifizierte konventionelle Modelle (Konventionelle Modelle von Pasquill, Gifford, Sutton von dichteneutralen oder leichten Gasen) - Box- und Scheibenmodelle (Bsp.: SIGMET, SLAB, FEM3) - K-Theorie und weitere 3D-Modelle (Bsp.: HEGADAS, HEGABOX, SLUMP, DEGADIS)	Untergliederung nach a) Freisetzungen/Ausbreitungen mit Strahlcharakter sowie b) Ausbreitungen schwerer Gase und passiver Luftbeimengungen (Freisetzungen mit Strahlcharakter gehen idR in passive Ausbreitungen über). **(impulsbehafteter) Freistrahl eines Gases:** Es werden diverse empirische Modelle, Integralmodelle und CFD-Modelle vorgestellt und diskutiert. Ergebnisse von Vergleichsrechnungen werden vorgestellt. Betrachtete Modelle: Emp. Modelle: - Chen und Rodi - Giesbrecht, Seifert und Leuckel - Hoehne und Luce - Hoot, Meroney und Peterka - Briggs - VDI Richtlinie 3783 Blatt 1 Integralmodelle:	Modifiziertes SLAB Modell (SLAB-Modell ist ein Integralmodell. Primär anwendbar auf Schwergaswolken, aber auch für Leichtgaswolken, bzw. Wolken mit neutralen Auftrieb anwendbar). **SLAB-Modell:** Berücksichtige Freisetzungsarten: Lachenverdampfung bzw. -verdunstung, erhöhter horizontaler/vertikaler Strahl, schlagartige Freisetzung. Quellen: Reiner Dampf oder Mischung aus Dampf und Flüssigkeitströpfchen. Die atmosphärische Ausbreitung wird durch die Lösung räumlich gemittelter Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls,	Der RMP Guidance stellt Referenztabellen bereit, mittels derer Worst-case Distanzen für toxische Stoffe bereit. In Abhängigkeit des Stoffes und der Freisetzungsrate wird ein Distanz angegeben, bei welche mit keinen dauerhaften Verletzungen/Schäden zu rechnen ist („Endpoint distance“). Die Tabellen wurden bevorzugt mittels ERPG-2 Werten erstellt (wo keine ERPG-Werte verfügbar waren, kamen alternativ LOC-Werte (Level of concern) zur Anwendung)

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
• Dampf-, Flüssigkeits- und 2-Phasen-Materialien • Integrierte Momentanexpansions-, Jet-, Schwergas- und passive Submodelle mit genau definierten Übergängen zwischen ihnen • Integrierte Berechnungen von Tröpfchen, Niederschlag, Lachen und Lachen-Wiederverdunstung, einschließlich Lachenquellen • Materialspezifische Handhabung, einschließlich Verfestigung und Sublimation von CO2, Auflösung von Ammoniak sowie Oligomerisierung von HF und Reaktion mit atmosphärischem Wasserdampf. Für kontinuierliche und zeitlich variierende Freisetzungen wird eine nachverarbeitete Korrektur (genannt „Along-wind diffusion“ (AWD)) angewendet, um Fernfeldvorhersagen zu verbessern (Witlox und Harper, 2013).	**Schwergasdispersion:** Anwendung, wenn Dichteunterschied zwischen Gas und Luft nicht vernachlässigbar ist. Es wird ein auf der Flachschichttheorie (“shallow layer theory“) basierendes SLAB-Modell verwendet (Bakkum & Duijm, 2005). Das UDM-Modell der DNV wird als mögliche Alternative benannt.	und genauere Modelle wie CHARM, EFFECTS werden daher nicht empfohlen		- Schatzmann - PHAST und AEROPLUME (Modelle waren den Autoren des Berichtes nicht zugänglich->keine Beurteilung möglich) CFD-Modelle: - Keine **Impulsfreie Freisetzung/passive Ausbreitung:** Es werden diverse Windfeldmodelle und Ausbreitungsmodelle vorgestellt und deren Anwendungsbereiche und -grenzen diskutiert. Abschließende wird auf mehrere Berechnungsprogramme Bezug genommen. Windfeldmodelle: - 1D-Windfeldmodelle (u.a. „uniform flow model”) - Diagnostische Windfeldmodelle - Prognostische Windfeldmodelle Ausbreitungsmodelle:	Energie und Arten berechnet. Die Erhaltungsgleichungen werden räumlich gemittelt, um die Wolke abhängig von der Dauer der Freisetzung als eine stationäre Wolke, einen vorübergehenden Hauch („Puff“) oder eine Kombination aus beiden zu behandeln. Modifikationen des ADAM-SLAB-Modell: - alternative Berechnung der durchschnittlichen Konzentration für schlagartige Freisetzungen - Kalkulation für zeitlich variierende Freisetzungen; - Einbeziehung des Beitrags der	

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
Das Wetter und die Eigenschaften des Geländes können vom Benutzer angegeben werden. Das Modell sagt räumliche und zeitliche Konzentrationen für ausgewählte Mittelungszeiten voraus, einschließlich Entfernungen zu bestimmten Konzentrationen und „Fußabdruck“-Diagrammen. Die Ausbreitungsergebnisse liefern automatisch den erforderlichen Input für nachgelagerte Folgen- und Risikomodelle wie Blitzbrände, Explosionen und Toxizitätsberechnungen.				- Dimensionsanalytische Modelle - Gaußmodelle - Lagrange’sche Modelle - Euler’sche Modelle Berechnungsprogramme: - PHAST (Klassifizierung des UDM-Modells als dimensionsanalytisches Modell) - Weitere Programme	Poolverdunstung bei Regen; - Modifikation der SLAB-Routine zur Berechnung der Fahnengeschwindigkeit.	

Hinweise zur Validität der einzelnen Modelle:

QRA-Verfahren in den Niederlanden:

Das Dispersionsmodell „Unified Dispersion Model“ (UDM) wurde von DNV über viele Jahre hinweg entwickelt. Ursprünglich von Cook und Woodward (1993) entwickelt, wurde es anschließend von Witlox und Holt (1999) und zuletzt von Hart und Harper (2022) umfassend überarbeitet.

Die Ergebnisse wurden in einer Vielzahl von Experimenten umfassend validiert. Eine aktuelle Übersicht wurde von Witlox et al. 2018 veröffentlicht[61]. Spezifischere Veröffentlichungen konzentrierten sich auf Themen wie Tröpfchenbildung und Niederschlag (Witlox und Harper, 2013), CO2 (Witlox et al., 2014), LNG-Austritt (Witlox et al. 2013) und druckbeaufschlagte schlagartige Freisetzung (Witlox et al., 2017), Schornsteinfreisetzungen und Schwergasausbreitung (Hart und Harper, 2022) oder Ammoniak (McGillivray et al., 2022).

QRA-Verfahren in Flandern:

Bei der Auswahl des Schweregasmodells wurden mitunter SLAB, UDM, Hegadas und Charm als mögliche Kandidaten berücksichtigt. SLAB wird als das am häufigsten verwendete Modell eingeschätzt und ist zudem frei verfügbar. SLAB wird im Yellow Book als präferiertes Modell beschrieben und im kommerziellen Softwarepaket Effects der TNO (Niederländische Organisation für Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung) verwendet. Daher wird im QRA-Verfahren Flandern das SLAB-Modell bevorzugt. Allerdings wurde festgestellt, dass SLAB nicht immer das geeignetste Modell für eine bestimmte Situation ist, z.B. für Berechnungen mit LNG (LNE, 2016[62]). In solchen Fällen kann daher ein anderes Modell verwendet werden.

Beide QRA-Verfahren betreffend:

In dem Bericht „Weiterentwicklung Screening- und Risikoermittlungsmethodik. Freisetzung, Ausbreitung und Wirkung von brennbaren schweren Gasen. Bericht Nr. Z16734-1a“ (suisseplan Ingenieure AG Zürich, 2018) wird festgehalten, dass Integralmodelle (z.B. bei Phast und Effects angewendet) Gasausbreitungen anhand von vergleichsweise wenigen Parametern und unter idealisierten Bedingungen beschreiben. Weshalb diese Modelle bzw. Computerprogramme für komplexe Geometrien wie überbautes Gebiet, komplexe Topographien und im Nahbereich der Freisetzung ungeeignet sind. In diesen Situationen sind CFD-Berechnungen vorzuziehen.

[61] Henk W.M. Witlox, Maria Fernandez, Mike Harper, Adeyemi Oke, Jan Stene, Yongfu Xu, Verification and validation of Phast consequence models for accidental releases of toxic or flammable chemicals to the atmosphere, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 55, 2018,

[62] LNE. (2016b, december 20). Overlegmoment december 2016 met erkende VR-deskundigen omtrent ontwerpmodules Handboek Risicoberekeningen (verslag). Brussel: Vlaamse overheid, Departement Leefmilieu, Natuur en Energie.

6.4.4 Brände

Die Modellierung von Bränden dient der Berechnung von (unter anderem) folgenden Kenngrößen (Vgl. Schalau, B., et al. (2017)):

- Brennstoffmassenstrom
- Brandproduktmassenstrom
- gesamter Massenstrom in der Plumezone
- gesamter Wärmestrom an der Flammenspitze

Eingangsparameter sind (unter anderem):

- Basisdurchmesser
- Abbrandgeschwindigkeit
- Massenabbrandrate
- sichtbare Flammenlänge
- Höhe der klaren Verbrennungszone
- Flammenneigungswinkel
- Flammendrag
- Entrainment-Massenstrom der Umgebungsluft
- konvektive Wärmestrom in der Plumezone
- Branddauer
- Brandfläche
- spezifische Ausstrahlung (Surface Emissive Power, SEP) der Flamme
- Umgebungsluftfeuchtigkeit, Einfluss des Windes

Wärmeübertragung bei einem Brand geschieht durch Strahlung sowie konvektiv durch Verbrennungsgase. Bei Modellansätzen zur Abschätzungen der Effekte von Bränden in Folge von Störfällen wird der konvektive Anteil mitunter nicht berücksichtigt, da hier vornehmlich im Nahfeld nennenswerte Effekte auftreten.

Tabelle 65: Vergleichende Darstellung – Brände

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
Allgemeines						
Modelliert werden die Phänome Pool fires, Jet fires, Fireballs, Flash fires, Warehouse fires. Die Berechnung von Jet-Fire-, Pool-Fire- und Fireball liefert folgende Ergebnisse: • Strahlung an einem Punkt • Strahlung versus Entfernung • Strahlungsellipse für eine benutzerdefinierte Strahlungsintensität • Strahlungskonturen auf einer Ebene (Fußabdruck, Seitenansicht, Seitenwind oder benutzerdefiniert)	Modelliert werden die Phänome pool fire, jet fire und fireball. Die zur Anwendung kommenden Modelle beschreiben die Intensität der Wärmestrahlung I in Abhängigkeit des Abstandes des Phänomenes. Für Flashfires wird Letalität ausschließlich bei direkten Flammenkontakt unterstellt. Die Strahlungsintensität (I) wird durch den atmosphärischen Transmissionsgrad (τ), die Form der Flamme (view factor F) und dem abgestrahlten Wärmestrahlungsstrom (E) berechnet: $I=\tau \cdot E \cdot F$		Modelliert werden die Phänomene Dampfwolkenbrand (oder Flashfeuer), Feuerball, Lachenfeuer, Jet-Feuer (Strahlflammen). Betrachtet werden folgende Strahlungsmodelle: - Punktquellenstrahlungsmodell - Zylinderflammen-Strahlungsmodell - Ballenstrahlungsmodelle	Modelliert werden die Phänomene Poolfeuer (und daraus abgeleitet Lachenfeuer, Tankfeuer, Boilover-Feuer, Multible-Pool-feuer), Fackelflammen, Strahlflammen, UVCE, VCE, Gaswolkenfeuer und BLEVE, Feuerball. Entwickelte bzw. zur Anwendung kommende Modelles sind in folgende Typen unterteilt - Semi-empirische Modelle - Feldmodelle - Integralmodelle - CFD-Modelle	Modelliert werden die Phänomene Poolfeuer, Jet fires, Gaswolkenfeuer (Flash fire) und Feuerball. Zur Anwendung kommen semi-empirische Ansätze, welche auf validierte Korrelationsformeln basieren. CFD-Ansätze werden nicht umgesetzt. Bis auf Flash fires setzen alle Modelle auf semi-empirische Solid Flame auf. Modellierung der Flamme als Zylinder, Sphäre oder Kegel. Form und Größe hängen von Substanzeigenschaften sowie den Windverhältsnissen ab.	Modelliert werden die Phänomene Poolfeuer und Gaswolkenfeuer

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
	Der View factor wird nach Mulan gerechnet Nachfolgend werden für jedes Phänomen E und F erörtert. Der atmosphärische Transmissionsgrad berücksichtigt die Absorption der Strahlung durch die Umgebungsluft und wendet die Korrelation nach Wayne (1990) an.				Strahlungsleistung (SEP): Abhängig von Substanzeigenschaften, Größe der Flamme sowie der Temperatur Die Strahlungsintensität (I) wird durch den atmosphärischen Transmissionsgrad (τ), die Form der Flamme (view factor F) und dem abgestrahlten Wärmestrahlungsstrom(E) berechnet: $I=\tau \cdot E \cdot F$ Der View factor wird nach Mulan gerechnet	

Pool fire

Modelle zu Lachenfeuern setzen sich meist aus den folgenden Untermodellen zusammen:
- Abbrandgeschwindigkeit (bzw. Brennstoffmassenstromdichte bzw. Abbrandrate)
- Lachengröße
- Flammenhöhe
- emittierte Strahlungsleistung (bzw. emittierte Wärmestrahlung [W/m^2])
- atmosphärische Transmission
- Bestrahlungsstärke (bzw. radiant flux at receptor location, bzw. Strahlungsintensität. Die Belastung durch Wärmestrahlung pro Flächeneinheit im Abstand r [W/m^2])
- Einstrahlzahlen (bzw. View factor. Maß dafür, welcher Anteil bei den gegebenen geometrischen Verhältnissen von der Oberfläche höherer Temperatur auf der Oberfläche der niedrigeren Temperatur noch auftritt [-])

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
Das Poolfeuermodell wurde ursprünglich von Cook et al. (1990) für Kohlenwasserstoff-Poolbrände zur Vorhersage der Verbrennungsrate, der Feuergeometrie und der Oberflächenemissionskraft der Flamme (surface emissive power) entwickelt. Als Grundlage für das Modell diente der Überblick von Mudan und Croce (1995). Die Flamme wird durch einen geneigten Zylinder dargestellt und die Strahlung wird mit denselben „View factor"-Methoden wie für Feuerbälle berechnet. Die Brenngeschwindigkeit berücksichtigt Materialeigenschaften und den Oberflächentyp. Leuchtende und rauchige Flammen werden modelliert. Letztere verwenden einen 2-Zonen-Ansatz, bei dem davon ausgegangen wird, dass der untere Teil der Flamme mehr Strahlung aussendet als der obere, rauchige Teil der Flamme, Rew und Hulbert (1996).	Modellierung der Flamme als schräger elliptischer Zylinder. Die maximale Verbrennungsrate wird nach einer Formel von Burgess & al, (1961) berechnet. Für einige Kohlenwasserstoff-verbindungen und Wasserstoff wird eine einfachere Formel verwendet. Die Berechnung der Flammenlänge benutzt eine Korrelation von Thomas (1963) und berücksichtigt die Einwirkungen des Windes. Der aus dem Wind resultierende Neigungswinkel der Flamme berechnet sich aus einer Korrelation von Rew & Hulbert (1996) Bei Bränden mit Rußbildung wird der	Das Punktquellenmodell wird von den ARAMIS-Autoren als äußerst einfach und leicht anzuwenden angesehen. Die erzielten Ergebnisse werden hingegen als nicht sehr zuverlässig angesehen. Das	Abbrandgeschwindigkeit und Brennstoffmassenstromdichte: - Modell nach Burgess und Zabetakis - Babrauskas Modell - Burgessmodell Flammenlänge unter ruhigen Windverhältnissen: - Pauschalangabe - Nach Thomas - Nach Heskestad - Nach Werthenbach Flammenlänge unter Einfluss des Windes: - Nach Thomas - Nach AGA (American Fas Association) - Nach Moorhouse Flammenlänge unter Berücksichtigung des Flammenwiderstandes: - Nach Welker und Sliepcevich	Betrachtet werden folgende Strahlungsmodelle: (Semi)-empirische Modelle: o Punktquellen-Strahlungsmodelle: PSM, bzw. API 521 Modell o Oberflächen-Strahlungsmodelle: z.B. - SFM (Zylinderflammen Strahlungsmodell (SFM: Solid Flame Model), eine Art von Ein-Zonen-Strahlungsmodell (ohne Rußzone)), - MSFM (modifiziertes SFM, Berücksichtigung Rußentwicklung) - Thermische Strahlungsmodelle, die leuchtende spots und schwarze Rußzonen berücksichtigen(	Folgende Modelle sind implementiert: 1. Modifiziertes TNO (in ADAM empfohlenes Modell): Entstammt dem TNO-Verfahren, jedoch mit unterschiedlichen Korrelationen zur Beschreibung der Flammengeometrie. 2. Shokri und Beyler: Basierend auf Heskestads Korrelation für die Flammenlänge. Es gibt keine Neigung und keinen Widerstand der Flamme. Es berücksichtigt nicht die Durchlässigkeit der Atmosphäre. 3. Mudan: Basierend auf der Thomas-Korrelation für die Flammenlänge und der AGA-Korrelation für die Flammenneigung. Von obiger Modellwahl unabhängig werden die folgenden Parameter wie folgt gerechnet:	Berechnet wird die Endpunktdistanz, bzw. Der Abstand D zum Feuer bei dem die Strahlung 5kW/m^2 beträgt. Folgende Formel wird angewandt: D= A*PFF. A ist die Poolfläche und PFF der Pool fire factor. Substanzspezifische PFF-Werte sind hinterlegt. Die Formel ist aus dem Punktquellen-Poolbrandmodell, (TNO Yellow Book) abgeleitet. Für nicht regulierte Stoffe wird eine weitere Formel vorgeschlagen.

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
Die Basis der Flamme war ursprünglich kreisförmig und wurde von Xu (2022) zu rechteckigen Beckenformen erweitert. Das Modell basiert auf Experimenten und KFX-Simulationen für Rechtecke bis zu einem Seitenverhältnis von 4:1. Die Erweiterung wurde anhand zusätzlicher Datenrechteck-Seitenverhältnisse von bis zu 30:1 validiert.	Strahlungswärmefluss nach Mudan & Croce, (1988) berechnet. Für helle Flammen wird eine einfachere Formel angewendet.	etwas komplexere Zylinderflammen-Strahlungsmodell (solid flame model) liefert bessere Ergebnisse und wird daher durch die ARAMIS-Autoren empfohlen.	- Nach Moorhouse Wärmestromdichte: - Zylinderflammen-Strahlungsmodell - Tabellarische Werte Weitere Modelle: - Moorhouse Modell (Flamme als konische Form) - Babrauskas Modell (Unterscheidung Strahlungsleistung in Nahfeld und Fernfeld)	nach Mudan und Beyler), - Lokale aktuelle spezifische Ausstrahlung nach Raj und Fay o OSRAMO II/ III Feldmodelle sind mathematisch anspruchsvoll und benötigen relativ lange CPU-Zeiten Integralmodelle: z.Zt. liegen keine brauchbaren Konsequenzmodelle vor Transiente Modelle, d.h. CFD-Modelle Massenabbrandrate: - nach Burgess Sichtbare Flammenlänge und Länge der klaren Verbrennungszone: - geneigte zylindrische Flamme (ggf. elliptische Flammenbasisdurchmesser)	Abbrandgeschwindigkeit: - Babrauskas Modell Flammenlänge: - Modifiziertes TNO (Pritchard-Binding's correlation) - Shokri und Beyler (Heskestad's correlation) - Mudan (Thomas' correlation) Flammenneigungswinkel: - Modifiziertes TNO (Welker and Sliepcevich correlation with Pritchard-Binding's coefficients) - Shokri und Beyler (No tilt considered) - Mudan (AGA correlation)	

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
				- geneigte konische Flamme - Angabe div. Korrelationen (u.a Thomas, Moorhouse, AGA) Flammenneigungswinkel: - Angabe div. Korrelationen (u.a. Thomas, Moorhouse, AGA, Rew & Hulbert) Flammendrag: - Modell nach Moorhouse Einstrahlzahl:	Flammendrag: - Modifiziertes TNO: (Pritchard and Binding) Emittierte Strahlungsleistung: - Modifiziertes TNO (Moorhouse, 1982) - Shokri und Beyler (Empirische Gleichung nach Shokri) - Mudan (AGA correlatio Moorhouse, 1982)	
Jet Feuer (Jet fire, Strahlenflamme)						
Das JFSH-Modell wird zur Simulation von ein- und zweiphasigen Strahlenflammen verwendet. Es stehen zwei Optionen für die Flammenform zur Verfügung: - kegelförmige Flammen und - linienförmige Emitterflammen.	Die Wirkung einer Strahlflamme wird durch die Annahme einer Oberflächenstrahlung in Form eines Kegelstumpfes bestimmt.	Zur Modellerung der Wärmestrahlung eines Strahlfe	TNO-Modell: Modellierung des Jets als langen Zylinder. Chamberlain-Modell Cook, Bahrami und Whitehouse Modell	Freistrahlflamme: - Modell nach Chamberlain gemäß TNO Yellow Book. Das Modell von Chamberlain wurde entwickelt	Die in ADAM implementierte Methodik ist das Chamberlain-Modell (Chamberlain, 1987) mit dem Modell von Johnso als Variante für horizontale Strahlen (Johnson, 1994).	n/a

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
Bei kegelförmigen Flammen wird die Strahlflamme als Kegelstumpf dargestellt, der als Festkörper Strahlung mit gleichmäßiger Oberflächenemissionsleistung (SEP) aussendet. Das Modell sagt verschiedene Eigenschaften der Flamme voraus, wie z. B. Kegelstumpflängen (frustum lengths), Kegelstumpfbasis (frustum base) und Spitzenbreiten (tip widths), Abhebeabstand des Kegelstumpfs von der Freisetzungsebene (lift-off distance) sowie den Winkel zwischen Kegelstumpf und Freisetzungsachse. Darüber hinaus berechnet es den Anteil der von der Flammenoberfläche abgestrahlten Wärme und die maximale Oberflächenemissionsleistung der Flamme. Drei konische Kegelstumpf-Jet-Flammenmodelle sind enthalten: - JFSH-Chamberlain, basierend auf dem Shell-Reindampfmodell von Chamberlain (1987); - JFSH-Cook, basierend auf den von Cook et al (1990). vorgeschlagenen	Das Berechnungsmodell zur Bestimmung der Flammengeometrie und des abgestrahlten Wärmestroms wird in Abhängigkeit von der Strahlflammenrichtung und der Freisetzungsart gewählt: - Gasaustritt: Richtung des Strahlfeuers vertikal: Modell von Chamberlain; - Freisetzung von unter Druck stehendem Flüssiggas: Strahlflamme in alle Richtungen: Cooks Modell.	uers wird das Modell im „Yellow Book“ vorgeschlagen, da das Yellow book aus Sicht der ARAMIS-Autoren eine große Akzeptanz hat, weit verbreitet ist und genutzt wird.	Considine und Grint Modell	und überprüft für senkrechte Freistrahlflammen. - Für Winkelbereiche < 45° gegenüber der Horizontalen wird als konservative Abschätzung das Modell von Johnson empfohlen. - Für Wasserstoff wird ein weiteres Modell vorgeschlagen		

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
modifizierten Jet-Flammen-Korrelationen zur Berücksichtigung von Dampf- und insbesondere Flüssigkeits- und Zweiphasenfreisetzungen; - JFSH-Johnson, das eine Verbesserung des JFSH-Chamberlain-Modells darstellt, um horizontale/nahezu horizontale Dampfphasenfreisetzungen zu berücksichtigen. Die Abmessungen des Kegelstumpfs und seine Ausrichtung im Raum, wie sie in den JFSH-Chamberlain- und JFSH-Johnson-Modellen verwendet werden, wurden semiempirisch anhand von Ergebnissen von Labor- und Feldstudien korreliert. Die Modelle von Chamberlain, Cook und Johnson (1994) berücksichtigen den Einfluss von Windgeschwindigkeit, Luftporenrate und Seitenwindeffekten auf die Flammeneigenschaften. Das Multi-Point-Source-Emitter-Flammenmodell, „Miller-Modell“, basiert auf der „AP-Flamme“ (Miller, 2017).						

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
Das Miller-Modell ist eine Erweiterung des Chamberlain-Modells, insbesondere für Gase mit geringer Leuchtkraft wie Wasserstoff (Miller, 2017). Die Strahlflamme wird als Verteilung einzelner Punktquellen entlang der Flammenmittellinie modelliert. Das Miller-Modell prognostiziert Flammeneigenschaften wie das Chamberlain-Modell, mit Ausnahme der Kegelstumpfbasis- und -spitzenbreiten und der maximalen Oberflächenemissionsleistung. Die entlang der Flammenmittellinie emittierte Strahlung wird anhand eines Gewichtungsfaktors modelliert, der den Anteil der Verbrennungsenergie multipliziert mit einem festen Anteil der an verschiedenen Positionen entlang der Flammenlänge abgestrahlten Wärme darstellt. Die JFSH-Cook-, JFSH-Chamberlain-, JFSH-Johnson- und Miller-Mehrpunktquellenmodelle (M-MPS) wurden validiert, indem ihre Vorhersagen mit geeigneten Felddaten verglichen wurden, die von Chamberlain, Bennett et al. (1991), Miller (2017), Selby und Burgan gemeldet wurden. Innerhalb						

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
der Grenzen der Unsicherheit zeigen die Vorhersagen der JFSH-Cook- und JFSH-Chamberlain-Modelle für reine Dampfstrahlflammen, die aus vertikalen Freisetzungen resultieren, eine gute Übereinstimmung mit den Felddaten mit einer maximalen absoluten Abweichung und einer mittleren Abweichung von 12,5 % bzw. 5,0 % im Vergleich zu den Vorhersagen vom Chamberlain-Modell. Basierend auf den verfügbaren Felddaten für horizontale Flüssigkeits-/Zweiphasen-Freisetzungen sagt das JFSH-Cook-Flüssigkeits-/Zweiphasen-Jet-Brandmodell im Allgemeinen Flammenlängen innerhalb von ±30 % der Messungen voraus, während die durchschnittlichen Schätzungen des Flammen-SEP innerhalb von -30 % liegen Messdaten. Für horizontale Dampfphasenfreisetzungen prognostiziert das JFSH-Johnson-Modell Flammenlängen mit einer Genauigkeit von ±10 % der verfügbaren Felddaten. Die Simulation der empfangenen Strahlung von Objekten in einer Entfernung von einer Strahlflamme mithilfe des RADS-Modells wurde anhand von Felddaten validiert, die						

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
Chamberlain und Bennett für vertikale bzw. horizontale Strahlflammen gesammelt haben. Die simulierten Ergebnisse basierten auf Flammeneigenschaften, die von den Modellen JFSH-Cook, JFSH-Chamberlain und JFSH-Johnson vorhergesagt wurden. Die vorhergesagte einfallende Strahlung über einen weiten Bereich von Beobachterstandorten und -ausrichtungen lässt sich gut mit Felddaten vergleichen und liegt im Allgemeinen innerhalb von ±40 % der Messungen. Der Vergleich jedes Modells einschließlich des von Miller zur Entwicklung seines Modells verwendeten Datensatzes wird in den technischen Referenzdokumenten erläutert, die mit Phast und Safeti geliefert werden. Die Ergebnisse haben zu einigen Ratschlägen geführt, welches Modell für verschiedene Arten der Freisetzung verwendet werden sollte: - Das Cook-Modell für dampffreie Freisetzungen - Das Miller-Modell für Gase mit geringer Leuchtkraft (z.						

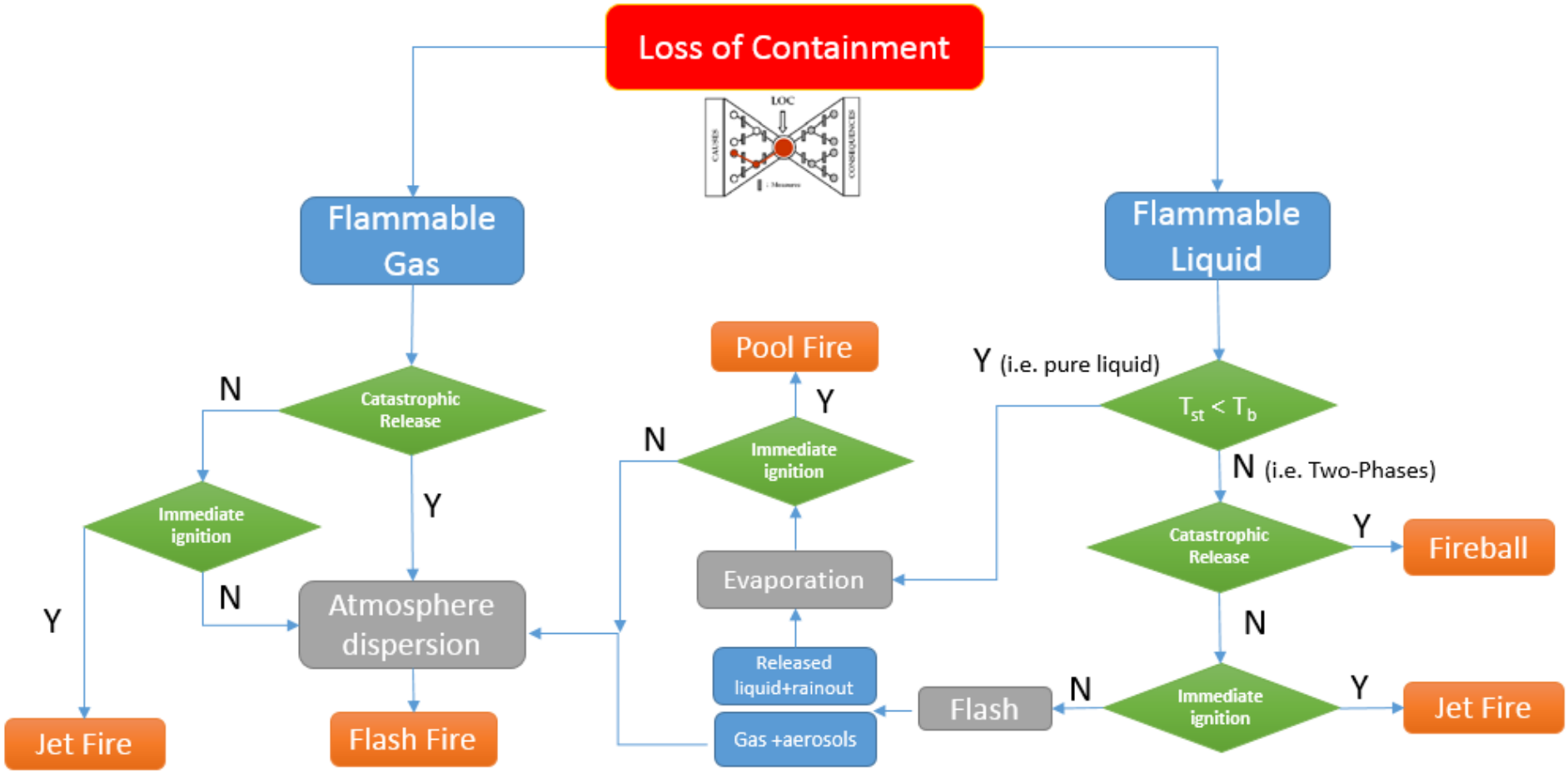
QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
B. Wasserstoff und Synthesegas) - Das Chamberlain-Modell für alle anderen Freisetzungen mit Ausnahme horizontaler Dampffreisetzungen, bei denen das Johnson-Modell empfohlen wird. Ein weiteres alternatives Jet-Fire-Modell kann angewendet werden. Dies basiert auf API521 und wird wie von Cook et al. (1990) beschrieben implementiert.						
Feuerball (Fire ball)						
Das Standard-Feuerballmodell basiert auf Matthieson und Marx (1999). Dies ist ein dynamisches Modell, bei dem die als Kugel modellierte Flamme mit der Zeit anwächst, zunächst auf der Freisetzungshöhe und dann später aufsteigend und abhebend. Die Strahlung ist somit eine Funktion der Zeit. Die Strahlung wird mithilfe eines numerischen View factor-Ansatzes berechnet und berücksichtigt die Umgebungsfeuchtigkeit und der	Das dynamische Modell von Martinsen & Marx, (1999) wird verwendet, um die Masse im Feuerball, die Dauer, den Durchmesser, die Höhe, den Strahlungswärmefluss und den View-factor als Funktion der Zeit zu berechnen.		Modelle: - Bader, Donaldson und Hardee (1971) - Hardee und Lee (1973) - Fay und Lewis (1977) - Jaggers, Roger et. Al (1986) - Roberts (1982) - Marshall (1987) - CCPS (1989) -	Modelle: - Roberts (1982)	Modelle: - Roberts (1982)	n/a

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
daraus resultierenden verringerten Transmissivität. Strahlungsdosis und thermische Letalität werden durch Integration über die Zeit berechnet. Die Wirkungszonen sind kreisförmig, da keine Abdrift in Windrichtung stattfindet. Es gibt auch zwei statische Feuerball-Modelle, die die Feuerballabmessungen (Radius, Abhebehöhe), die Oberflächenemissionsleistung und die Dauer des Feuerballs berechnen. Diese Berechnungsergebnisse werden mithilfe von Korrelationen bestimmt, die von TNO (Van den Bosch) abgeleitet wurden. In Phast und Safeti wird das Feuerballmodell für Behälterversagen („Vessel rupture“) und BLEVE-Szenarien verwendet. Verschiedene Failure pressures können bei beiden Szenarien angegeben werden.						

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
Das Feuerballmodell kann auch auf Szenarien mit sehr kurzer Freisetzungsdauer und auf Rohrbrüche angewendet werden, bei denen sich die Flamme eher wie ein Feuerball als wie ein Dauerstrahlfeuer verhält.						

Eine Übersicht möglicher Feuerarten wird z.B. durch Fabbri, L. et al. (2017) bereitgestellt:

Abbildung 58: Brandentwicklung nach Verlust der Eindämmung eines brennbaren Stoffes



Quelle: Fabbri, L. et al (2017)

6.4.5 Explosionen

Bei der Abschätzung der Auswirkungen von Explosionen ist insbesondere das Phänomen des Überdrucks von Interesse. Berechnungsergebnisse sind u.a.

- Druckspitze in Abhängigkeit zum Abstand vom Entstehungsort.
  (die Zeitdauer der Druckwirkung hat ebenso einen Einfluss auf die Auswirkungen, wird aber meist nicht berücksichtigt. Die alleinige Berücksichtigung der Druckspitze dient der Vereinfachung und stellt einen konservativen Ansatz dar)

Bei der Modellierung von Explosionen werden unter anderem berücksichtigt

- Explosionstyp: chemisch (z.B. Gaswolkenexplosion (Vapour cloud explosion, VCE), Staubwolkenexplosion), physisch (z.B. BLEVE, Dekompression komprimierter Gase)
- Explosionsabläufe bei Gaswolkenexplosionen: Einfaches Abbrennen ohne Druckaufbau, Deflagration, Detonation (wiederum abhängig von Homogenität und Turbulenzen in einer Gaswolke)
- Explosionsdruck bei Gaswolkenexplosionen: Verbrennungsgeschwindigkeit (Abhängig von der Art des Gases, Stärke des Zündpotentials, Turbulenzerzeugende Hindernisse (Obstructions), …)

Tabelle 66: Vergleichende Darstellung – Explosionen

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
Chemische Explosionen - Gaswolkenexplosionen						
Die Folgen von Dampfwolkenexplosionen können in Phast/Safeti mit dem Obstructed Region Explosion Model (OREM) bewertet werden. OREM beinhaltet 2 Modelle zur Vorhersage der Auswirkungen von VCEs, nämlich: das TNO Multi-Energy Model (MEM) und das Baker-Strehlow-Tang (BST)-Modell (siehe auch AIChe/CCPS, 2010). In seiner einfachsten Form bietet OREM eine Nachschlagefunktion für wichtige VCE-Merkmale (Überdruck, positive Phasendauer und Impuls) auf der Grundlage von Explosionskurvenfamilien, die mit der Zündung idealisierter, stöchiometrischer Kraftstoff-Luft-Ladungen verbunden sind. Der spezielle Satz von Explosionskurven, den OREM für eine bestimmte Analyse verwendet, hängt vom Benutzer ausgewählten Explosionsmodell ab.	Das (Gas-)Ausbreitungsmodell berechnet die explosive Masse in der Wolke als Funktion der Zeit (explosive Masse = Masse in den Grenzen oberer und unterer Explosionsgrenzen). Zur Berechnung des Ergebnisses einer Dampfwolkenexplosion wird die Wolke mit der höchsten Explosionsmasse in den ersten 30 Minuten nach der Freisetzung ausgewählt. Die Verbrennung innerhalb der brennbaren Wolke, die aus der Dampfwolkenexplosion resultiert, d. h. nach verzögerter Zündung und nach der Explosion, hat den gleichen Zündzeitpunkt wie die Dampfwolkenexplosion. Der Explosionsüberdruck in Abhängigkeit von der Entfernung zum Explosionszentrum wird auf Basis der Multienergiemethode (van den Berg, 1985) berechnet	Das Multienergiemodell zur Überdruckberechnung von Dampfwolkenexplosionen erfordert viel mehr Informationen als das TNT-Äquivalentmodell. Für die Fälle, in denen nur wenige Informationen	TNT Äquivalenzmodell TNO Modell (basierend auf Wiekema) Multi-Energie-Modell der TNO Kogarko RSI-513-Modell	Für die Berechnung der Explosionsüberdrücke existieren mehrere Modelle, die eine Berücksichtigung spezieller Freisetzungs- und Umgebungsbedingungen erlauben. Für eine genaue Betrachtung sind numerische Modelle entwickelt worden, die die bei einer Explosion vorliegenden turbulenten Strömungsverhältnisse berücksichtigen Äquivalenzmodelle / Methoden: • TNT Äquivalenz-modell Analytische Modelle: • Kogarko • Wiekema • Multi-Energy-Modell • Tang-Baker Modell • Giesbrecht	Equivalent TNT TNO MultiEnergy Backer-Strehlow-Tang (BTS) (Standardmethode in ADAM)	TNT-equivalent model

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
OREM enthält außerdem Routinen, die die Modellierung potenzieller Explosionsquellen in blockierten/verbauten Regionen erlaubt. Explosionsquellen werden anhand der Ergebnisse der Ausbreitungsmodellierung und der Geometrie der blockierten Regionen definiert.		verfügbar sind, wird das TNT-Modell ausgewählt. Andernfalls, wenn alle erforderlichen Informationen verfügbar sind, wird das Multienergiemodell ausgewählt.		• CAM (Congestion Assessment Method) von Puttock Numerische Modelle: • SCOPE von Puttock (SCOPE=Shell Code for Overpressure Prediction in gas Explosions) • CFD-Programme wie FLACS, EXSIM, AutoReagas, CFX und Fluent		
Physikalische Explosionen						
Das BLBL-Modell sagt die Explosionsparameter des Spitzenüberdrucks und des daraus resultierenden positiven Phasenimpulses voraus.	BLEVE: Zur Bestimmung des Überdrucks des Behälterinneren bei Behälterversagen wird nach thermisch induzierten und	-	BLEVE: Abschätzung der Druckwelle: • TNT Äquivalent-Methode • Baker's Methode	BLEVE: Die beim BLEVE freigesetzte Energie lässt sich mit den zum Zeitpunkt des Behälterberstens	BLEVE: • Keine Angaben zu BLEVE's	BLEVE: -lediglich Betrachtung der Wärmestrahlung eines angenommenen

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
Durch das Platzen von Druckbehältern, die mit Gas, Dampf oder Flüssigkeit über dem normalen Siedepunkt gefüllt sind, oder einer Mischung aus Dampf und Flüssigkeit. Das Modell basiert auf der in den CCPS-Richtlinien empfohlenen integrierten Methodik (AIChe/CCPS,2010) zur Bewertung der Eigenschaften von VCEs, Blitzbränden und expandierenden Dämpfen kochender Flüssigkeiten Explosionen (BLEVEs)	nichtthermisch induzieren BLEVEs unterschieden. Der Überdruck infolge der Explosion wird mittels Baker-Modell für nicht-ideale Gase berechnet (Baker, Cox, Westine, Kulesz, & Strehlow, 1983). Physikalische Explosion komprimierter Gase: Der aus einer physikalischen Explosion resultierende Explosionsüberdruck wird mit der Baker-Methode sowohl für ideale als auch für nichtideale Gase berechnet (van Doormaal & van Wees, Chapter 7: Rupture of Vessels, 2005).			vorliegenden gasförmigen und flüssigen Massen bzw. Volumina berechnen, wobei zur Berücksichtigung der Reflexion von Stoßwellen am Boden die Energie verdoppelt wird. Die Bestimmung des Explosionsüberdruckes in Abhängigkeit von der Entfernung erfolgt mit Intergralmodellen für zur Beschreibung eines impulsbehafteten Austrittes eines Freistrahles komprimierte Gase: • TNT Äquivalenz-modell • Baker		Feuerballs. Berechnung des Endpunktes (=Distanz bei welcher eine Dosis äquivalent zu 5kW/m^2 über 40 Sekunden aufgenommen wird)
Weitere Formen von Explosionen						
Die Explosion in Innenräumen basiert auf den NFPA68-Richtlinien für belüftete Explosionen in Gebäuden (NFPA, 2007 und 2013).	Explosive Substanzen, Thermisches Durchgehen, Staubexplosionen	-	Staubexplosionen		-	
Trümmerflug						

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
-	-	-	Abschätzung Anzahl Fragmente: • Abschätzungen auf Basis der Analyse realer Explosionen Anfangsgeschwindigkeit: • Kinetische-Energie-Methode • Empirische Gleichung nach Moore • Empirische Werte Reichweite von Fragmenten: • Einfache Beziehung • Reichweite nach Clancey • Reichweite nach Baker et al		-	

Hinweise zur Validität der einzelnen Modelle:

- QRA-Verfahren in den Niederlanden: Die Ergebnisse wurden in einer Vielzahl von Experimenten umfassend validiert. Eine aktuelle Übersicht wurde von Witlox et al. 2018 veröffentlicht[63].

[63] Henk W.M. Witlox, Maria Fernandez, Mike Harper, Adeyemi Oke, Jan Stene, Yongfu Xu, Verification and validation of Phast consequence models for accidental releases of toxic or flammable chemicals to the atmosphere, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 55, 2018,

- QRA-Verfahren in Flandern: Das Referenzmanual macht keine Angaben zur Validität. Zur Anwendung kommen wissenschaftlich anerkannte Modelle.

6.4.6 Störfallbeurteilungswerte

Die QRA-Verfahren arbeiten mit Probitfunktionen, die sich im Vergleich zu den Störfallbeurteilungswerten ERPG, AEGL, etc. in zwei Merkmalen unterscheiden:

- Es wird ausschließlich die letale Auswirkung betrachtet (Im Allgemeinen können mit den Probitfunktionen auch andere Wirkungskategorien betrachtet werden. In den QRA-Verfahren Niederlande und Flandern jedoch wird ausschließlich auf die Letalität abgestellt),
- Es wird für jeden Konzentrationswert (Dosis) eine Wahrscheinlichkeit (!) angegeben, mit welcher eine dieser Dosis ausgesetzten Person stirbt. (Alternativ kann die Wahrscheinlichkeit auch als Anteil der Gesamtheit einer Menge an Personen interpretiert werden, die bei einer Aussetzung der Dosis sterben würde.)

Die mit den Probitfunktionen berechneten Werte (meist mit Pr bezeichnet) stellen jedoch noch nicht die gesuchten Wahrscheinlichkeiten dar, erst mit dem Einsetzen der berechneten Werte in die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung Φ ergeben sich die gewünschten Wahrscheinlichkeiten W:

$W = \Phi(Pr-5)$

In der Verfahrensbeschreibung QRA-Flandern wird diese Funktion angewandt, jedoch eine anderer Schreibweise gewählt (Darstellung mittels Fehlerfunktion erf).

Probitfunktionen werden grundsätzlich in der Form $Pr = a + b*\ln(V)$ dargestellt, wobei V die Intensität bzw. Dosis darstellt und a und b einstellbare Parameter sind.

6.4.6.1 Luftgetragene Schadstoffe

Störfallbeurteilungswerte gehen von verschiedenen Wirkungskategorien mit zugeordneten Konzentrationsbereichen aus, welche durch Konzentrationsschwellen voneinander abzugrenzen sind.

So stellen

- ERPG-Werte (Emergency Response Planning Guidelines),
- AEGL-Werte (Acute Exposure Guideline Levels) und
- EEI-Werte (Emergency Exposure Indices)

verschiedene Konzepte mit jeweils vier Wirkungskategorien

- Bereich erster sensorischer Effekte (Wahrnehmbarkeit),
- Bereich nachteiliger, aber reversibler gesundheitlicher Auswirkungen (Belästigung),
- Bereich erster irreversibler oder schwerwiegender gesundheitlicher Auswirkungen oder einer Beeinträchtigung der Fluchtmöglichkeit,
- Bereich lebensbedrohlicher Auswirkungen und tödlich verlaufender Vergiftungen.

Dar.

Während die ERPG-Werte für eine Expositionsdauer von einer Stunde ermittelt worden sind, sind die AEGL-Werte für fünf Expositionszeiträume von 10 Minuten, 30 Minuten, 1 Stunde, 4 Stunden und 8 Stunden festgelegt worden (Vgl. Schalau, B., et al. (2017)).

Der Leitfaden SFK-GS-28 schlussfolgert, dass das AEGL-/EEI-Konzept als wissenschaftlich ausgewogener zu bewerten ist, als das ERPG-Konzept (das EEI-Konzept entspricht im Grunde dem AEGL-Konzept).

Im KAS-18 wird im Kontext der Ermittlung von Sicherheitsabständen in der Bauleitplanung die Anwendung der ERPG-Werte nahegelegt. Im Falle diese nicht vorliegen, soll auf AEGL-Werte zurückgegriffen werden. Die Entscheidung zugunsten der ERPG-Werte ergab sich aus der Tatsache, dass zum Zeitpunkt der Erarbeitung der ersten Fassung des Leitfadens (SFK/TAA-GS-1) im Jahr 2001 mehr ERPG-Werte als AEGL-Werte vorlagen (Schalau, B., et al. (2017)).

Tabelle 67: Vergleichende Darstellung – Störfallbeurteilungswerte für luftgetragene Schadstoffe

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
Luftgetragene Schadstoffe						
Pr = a + b*ln(V), mit einer Intensität bzw. Dosis V Und V ein Integral von Cn(t) über den betrachteten Zeitraum Es werden beispielhaft für ausgewählte Stoffe Stoffparameter angegeben. Die Werte unterscheiden sich teilweise von den Werten des QRA-Verfahrens in Flandern sowie von Werten in Kaiser, W., et al. (2000). RIVM hat eine Arbeitsgruppe beauftragt, für Gefahrstoffe, für welche bisher noch keine Probit-Funktion ermittelt worden sind, diese zu erarbeiten. Die zur Anwendung kommende Methodik wird in Hansler, R.J, et al (2016) vorgestellt.	Pr = a + b*ln(V), mit einer Intensität bzw. Dosis V Und V = Cn*t Es werden beispielhaft für ausgewählte Stoffe Stoffparameter angegeben. Die Stoffparameter wurden in div. Forschungsprojekten erarbeitet, Die Untersuchungen der RIVM wurden dabei berücksichtigt sowie Expertenmeinungen angehört (Vgl. VITO (2018)). Als Alternative dürfen Probitfunktionen aus anderen Literaturquellen sowie AEGL-Werte herangezogen werden. Ebenso können Stoffparameter für eine Probitfunktion über LC50-Werte hergeleitet werden (ein Algorithmus wird in der Verfahrensbeschreibung bereitgestellt)	-	ERPG-Werte AEGL-Werte EEI-Werte IDLH-Werte (Immediately Dangerous to Life or Health) LOC-Werte (Level of Concern) Probitfunktion Pr: Pr = a + b*ln(V), mit einer Intensität bzw. Dosis V Und V = Cn*t, mit einer C Konzentration in mg/m3) und a,b und n stoffspezifische Parameter. Alternativ kann C als zeitvariabel betrachtet werden. V ist dann das Integral von Cn(t) über den besagten Zeitraum. Es werden beispielhaft für ausgewählte Stoffe Stoffparameter angegeben.	ERPG-Werte AEGL-Werte EEI-Werte TEEL-Werte (Temporary Emergency Exposure Limits. Im Falle keine ERPG oder AEGL-Werte vorliegen) Probitfunktion Pr: Pr = a + b*ln(V), mit einer Intensität bzw. Dosis V Und V = Cn*t, mit einer C Konzentration in mg/m3) und a,b und n stoffspezifische Parameter. Alternativ kann C als zeitvariabel betrachtet werden. V ist dann das Integral von Cn(t) über den besagten Zeitraum. Es wird herausgestellt, dass die in der Literatur angegebenen Stoffparameter teils deutlich voneinander unterscheiden.	Pr = a + b*ln(V), mit einer Intensität bzw. Dosis V Und V = Cn*t. Die verwendeten Werte für a,b und n stammen aus maßgeblich aus den Quellen • „Green Book“ (TNO, 1992), • Lees' Loss Prevention Guidebook (Lees, 205), • AIChE Guidelines for CPQRA (AIChE, 2010) und • der RIVM-Probit-Funktions-Website . Eine ähnlich umfassende Liste von Probit-Funktionen findet sich auch in Anhang 3 des irischen	IDLH, ERPG, etc. können angewandt werde, um Endpunkte zu berechnen.

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
			Beurteilung von zeitabhängigen Konzentrationsverläufen: • TÜV Anlagentechnik (Konzept gewichtete Dosis „DISMA-Ansatz)	Beurteilung von zeitabhängigen Konzentrationsverläufen: • TÜV Rheinland (Konzept "Belastung") • Stage • Boris-Patnaik („Toxic Load rate")	HSE-Richtliniendokuments zur Landnutzungsplanung (HSE, 2009). In ADAM wurde das Kriterium implementiert, die RIVM-Werte standardmäßig auszuwählen, sofern verfügbar. Dies wird durch das strenge Verfahren des RIVM und die Verwendung aktueller Informationen zu Toxizitätsdaten gerechtfertigt Mögliche Ergänzung von Pr um den Summanden c*ln(X), um beispielsweise nach dem Geschlecht zu unterscheiden: Pr = a + b*ln(V) + c*ln(X) Als Alternative zum Wahrscheinlichkeits-	

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
					Probit-Modell kann der Personenschaden auch durch Schadensendpunkte ausgedrückt werden, insbesondere durch: LC50 (tödliche Konzentration 50 %) LC1 (tödliche Konzentration 1 %) IDLH (unmittelbar gefährlich für Leben und Gesundheit) LOC (Besorgnisgrad)	

6.4.6.2 Wärmestrahlung

Tabelle 68: Vergleichende Darstellung – Störfallbeurteilungswerte für Wärmestrahlung

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
Wärmestrahlung						
Die Probit-Funktion nutzt die Expositionszeit und die Strahlungsintensität an einem bestimmten Ort $Pr = -36.38 + 2.56*\ln(I^{43}*t)$ mit I=Radiation Intensity und t = Zeit	Gleicher Ansatz, gleiche Formeln wie QRA-NL	-	Annahme: Tödliche Schwelle bei 10 kW/m^2 über 40 Sekunden	Angabe von Bestrahlungsstärken: - bei denen verschiedene Stoffe sich selbst bzw. fremdentzünden - zulässige Wärmestrahlungsin	Vorstellung von Parametern a, b und n für Probitfunktionen für den Schädigungsgrad Tödliche Verbrennung: - Eisenberg, 1975	-

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
T wird mit max. 20 Sekunden angesetzt. Innerhalb der Flammenzone sowie bei einer Wärmstrahlung >35 kW/m^2 wird eine Letalitätswahrscheinlichkeit = 1 angenommen. Bei einer Wärmstrahlung < 35 kW/m^2 wird bei der Berechnung des gesellschaftlichen Risikos für Personen in Innenräumen eine Letalitätswahrscheinlichkeit = 0 und für Personen im Freien eine um den Faktor 0,14 korrigierte Letalitätswahrscheinlichkeit (im Vergleich zum dem Berechnungsergebnis mit obiger Formel für Pr) angenommen				tensität DIN EN 1473 für Anlagenteile - Relationen Bestrahlungs-dauer und -intensität ab denen Schmerzgrenzen erreicht werden - Einzuhaltende Grenzwerte - Relationen Bestrahlungsintensität und Auswirkung auf die menschliche Haut Vorstellung von Parametern a, b und n für Probitfunktionen für unterschiedliche Schädigungsgrade (Die Parameter für Tödliche Verbrennung, ungeschützte Person) sind identisch mit den Parametern der QRA-Verfahren). Diskussion Einfluss Fluchtmöglichkeit auf Bestrahlungsdauer.	- Tsao & Perry, 1979 - Lees,1994 - TNO, Opschoor, 1992 Das Eisenberg-Modell beruht auf Nukleardaten und beschreibt die Wirkung von Wärmestrahlung mit Prävalenz im UV-Spektrum. Das Tsao & Perry-Modell basiert auf dem Eisenberg-Modell, wurde jedoch an Experimente an Kohlenwasserstoffbränden angepasst und berücksichtigt den Infrarotanteil der Strahlung. Das Lees-Probit basiert auf Daten zur Verbrennungs-sterblichkeit bei Strahlungen, die auch im UV-Spektrum vorherrschen, und berücksichtigt Kleidung. Das TNO-Modell	

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
				Diskussion Einfluss (positiv wie negativ) von Kleidung bezgl. des zu erwartenden Schadens	(Opschoor, 1992 mit a= -37.23 und b= 2,56) basiert auf der Probit-Funktion von Tsao & Perry und wurde so modifiziert, dass Kleidung berücksichtigt wird. Dies wird als empfohlenes Probit in ADAM verwendet.	

6.4.6.3 Überdruck

Tabelle 69: Vergleichende Darstellung – Störfallbeurteilungswerte für Überdruck

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
Überdruck						
Es werden keine stetigen Probitfunktionen gerechnet, stattdessen werden für drei Wertebereich Überdruck die Letalitätswahrscheinlichkeiten angegeben. Dabei wird nach Individualrisiko und gesellschaftlichem Risiko unterschieden:	Es werden zwei Probit-Funktionen angewandt. Zur Berechnung des Individualrisikos wird eine konservative Probitfunktion gewählt, welche Fluchtmöglichkeiten (Aufenthalt in Gebäuden, bzw. in der Nähe zu	-	Angabe div. Übersichten: - Angabe verschiedener Relationen Überdruck und Auswirkungen Gebäudeschäden („Richtlinie BMI“)	Angabe div. Übersichten: - Schadensbilder Glasscheiben, Schäden an Häusern,, Schäden an Anlagenteilen, Personenschäden (Untere	Probitfunktionen - Spitzenüberdruck (barg) (Hurst (1989)) - Impuls (Pa s) (Eisenberg (1975))	-

QRA-NL	QRA-Flandern	ARAMIS	TÜV	Dechema	ADAM	Rapid-N
Überdruck >= 0,3 bar => Letalitätswahrscheinlichkeit = 1 für beide Risikoarten 0,3 > Überdruck >= 0,1 bar => Letalitätswahrscheinlichkeit = 0 für Individualrisiko und Gesellschaftliches Risiko (Personen im Freien, Letalitätswahrscheinlicheit = 0,25 für Personen in Innenräumen Überdruck < 0,1 bar => Letalitätswahrscheinlichkeit = 0 für beide Risikoarten	Fenstern mit erhöhtem Risiko) außer Acht lässt. Zur Berechnung des gesellschaftlichen Risikos wir eine zweite Probit-Funktion angewandt, welche diese Aspekte berücksichtigt. Konservative Probitfunktion: 1 % Letalität bei einem Explosionsüberdruck von 56 mbar, 10 % Letalität bei 175 mbar und 100 % Letalität bei 550 mbar und höher. Die Funktion ist zwischen diesen Punkten linear.		- Detaillierte Auflistungen: Schadensbilder Glasscheiben, Schäden an Häusern,, Schäden an Anlagenteilen, Personenschäden (Untere Letalitätsgrenze 2,08 [Deltap in bar])	Letalitätsgrenze 2,08 [Deltap in bar]) Diverse Probitfunktionen für - Tödliche Lungenschädigung - Tödliche Schädelfraktur - Tödliche Schädigung des Körpers	Andere Probit-Funktionen, die auf der Kombination von Spitzenüberdruck und Impuls basieren und die Folgen zwischen Lungenschäden, Kopfaufprall und Ganzkörperverlagerung unterscheiden (Bowen, 1968), sind in ADAM noch nicht implementiert.	

6.4.7 Abschließende Bemerkungen zu den untersuchten Verfahren, Berichten, Computerprogrammen

6.4.7.1 QRA-Verfahren in den Niederlanden

Vor dem Hintergrund der verbindlichen Anwendung des Computerprogrammes Safeti-NL als Bestandteil des QRA-Verfahrens in den Niederlanden wurde auf eine Auswertung des Yellow Books verzichtet, zumal die Modelle des Yellow Books ausgiebig in den Berichten der Dechema, bzw. des Forschungsberichtes der TÜV Anlagentechnik GmbH diskutiert worden sind. Ausgewertet wurde stattdessen eine durch die DNV erstellte Übersicht der in den Computerprogrammen Phast/Safeti/Safeti-NL zur Anwendung kommenden Modelle. Diese Übersicht ist zum Zeitpunkt der Erstellung des hier vorliegenden Berichtes noch in Erarbeitung und wird in eine überarbeitete Version Lees „Loss Prevention in the Process Industries Book“ Eingang finden.

6.4.7.2 QRA-Verfahren in Flandern

Die Festlegungen der anzuwendenden Modelle basieren auf einer Vielzahl von Studien (u.a. DNV, Protec Engineering), Diskussionen mit entsprechenden SR-Experten sowie mit Softwareentwicklern der Programme Phast, Phast Risk, Effects und Riskcurves. Hintergründe für die jeweiligen Festlegungen bzw. Auswahlen sind im Manual dokumentiert.

Grundsätzlich erfolgten die Festlegungen unter den Gesichtspunkten:

- Berücksichtigung aktuell verwendeter Methoden, damit Arbeitsweisen möglichst wenig geändert werden müssen;
- wissenschaftliche Grundlage: möglichst realistische Risikobewertungen;
- Leistungsfähigkeit der verfügbaren Softwareprogramme: Durchführbarkeit der Berechnungen sicherstellen.

6.4.7.3 ARAMIS-Verfahren

Im Rahmen des ARAMIS-Forschungsprojektes wurde eine Zusammenstellung favorisierter Modelle vorgenommen, dabei wurde folgende Kriterien angewandt:

- Komplexität des Modells und der Auflösung seiner Gleichungen.
- Für die Nutzung des Modells erforderliche Informationen.
- Modellverfügbarkeit, als Gleichungssatz oder als freie Software.
- Grad der Akzeptanz und Nutzung durch die wissenschaftliche Gemeinschaft.

Den Anwendern des ARAMIS-Verfahren stehen weiterhin die Auswahl beliebiger mathematische Modelle zur Abschätzung der Unfallauswirkungen frei. Die durch ARAMIS vorgeschlagenen Modelle sind nicht verpflichtend anzuwenden.

Gegenwärtig liegt die Zusammenstellung der favorisierten Modelle den Forschungsnehmenden nicht vor, eine entsprechende Anfrage bei dem JRC wurde erstellt.

6.4.7.4 Accident Damage Analysis Module (JRC ADAM)

ADAM wurde mit der Intention entwickelt, die Arbeit von Risikoanalysten, Standortinspektoren und Prüfern von Sicherheitsberichten zu unterstützen. ADAM-Berechnungen sollen belastbare

Informationen für Risikoabschätzungen, und damit für entscheidungsunterstützende Aktivitäten liefern:

- Identifizierung kosteneffizienter Schutzmaßnahmen,
- die Organisation interner und externer Notfallpläne,
- die Bereitstellung korrekter Informationen für die Öffentlichkeit
- Definition der Landnutzung rund um eine Industrieanlage.

Vor diesem Hintergrund wurden alle implementierten Modelle während der Forschungsphase eingehend getestet. So wurden beispielsweise zur Verifikation der in ADAM implementierten Modelle wurden u.a. die Softwarelösungen PHAST (DNV) und EFFECTS (TNO) herangezogen.[64]

Im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg wurde 2021 durch die CSE (center of Safety Excellence) eine vergleichende Betrachtung zu den folgenden Berechnungsmethoden und Computerprogrammen angestellt:

- ADAM (EC JRC)
- KAS-18
- Statuspapier Dechema „Auswirkungsbetrachtungen bei störungsbedingten Stoff- und Energiefreisetzungen in der Prozessindustrie, Methodenübersicht und industrielle Anwendung""

Die Ergebnisse sind in dem Abschlussbericht „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" festgehalten.

6.4.7.5 JRC Rapid N

Die im Softwareprogramm Rapid-N implementieren Modelle beruhen teilweise auf den für die US-Behörde Environmental Protection Agency (EPA) entwickelten Modelle zur Abschätzung von Störfallauswirkungen (RMP guidance (EPA, 1999)). Die Modelle werden entsprechend den in den USA zu befolgenden Risk Management plan policies als RMP-Modelle bezeichnet.

Als Ergänzung wurden die ADAM-Module 1 und 2 in RAPID-N implementiert. Die ADAM-Modelle stellen eine Alternative zu den schnellen, aber weniger detaillierten RMP-Modellen dar. Dies soll mehr Optionen zur individuellen Anpassung der Risikoanalyse bieten und die Genauigkeit der RAPID-N-Ausgaben verbessern.[65]

6.4.7.6 Statuspapier DECHEMA

Mit dem Statuspapier werden Modelle zur Berechnung der Auswirkungen der störungsbedingten Freisetzung von Stoffen zur Verfügung gestellt, deren physikalische Grundlagen erläutert, Einsatzbereiche im Vergleich zu experimentellen Untersuchungen diskutiert und exemplarische Berechnungen gezeigt. Mit den vorgestellten Modellen werden der Stand der Modellierung in der Industrie im deutschsprachigen Raum dargestellt und darüberhinausgehend auch aktuelle Modelle der Wissenschaft vorgestellt. Der Fokus liegt auf

[64] 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

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

der Anwendung von relativ einfachen, handhabbaren Formeln. Das Statuspapier soll durch die vergleichende Diskussion verschiedener Ansätze und Modelle dem Anwender Entscheidungsmöglichkeiten eröffnen, eine der jeweiligen Fragestellung angepasste Berechnungsmethode auszuwählen.

6.4.7.7 Aktueller Stand der Anwendung der Verfahren, Berichte, Computerprogramme in Deutschland

Die folgende Tabelle bildet die Aussagen der interviewten Betreiber und Behörden bezgl. Bekanntheit bzw. Anwendung der Verfahren, Berichte, Computerprogramme ab:

	QRA-NL und Flandern	**ARAMIS**	**TÜV Forschungsbericht (Kaiser et. al. 2000)**	**Statuspapier Dechema**	**ADAM**	**Rapid-N**
Betreiber 1	Bekannt	Nicht bekannt	Nicht bekannt	Nicht bekannt	Nicht bekannt	Nicht bekannt
Betreiber 2	Bekannt (Teilweise Anwendung Red und Yellow book)	Nicht bekannt	Wird angewendet	Wird angewendet (Ergänzung zum „TÜV“)	Nicht bekannt	Nicht bekannt
Betreiber 3	Nicht bekannt	Nicht bekannt	Nicht bekannt	Nicht bekannt	Nicht bekannt	Nicht bekannt
Betreiber 4	Bekannt	Bekannt	Wird angewendet	Wird angewendet	Nicht bekannt	Nicht bekannt
Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim	Nicht bekannt	Nicht bekannt	Nicht bekannt	Wird angewendet	Bekannt	Nicht bekannt
Regierungspräsidium Darmstadt	Nicht bekannt	Nicht bekannt	Nicht bekannt	Bekannt	Nicht bekannt	Nicht bekannt
Berufsgenossenschaft Rohstoffe und Chemische Industrie (BG RCI)	Bekannt (Anwendung in D nicht bekannt)		Nicht bekannt	Wird angewendet	Nicht bekannt	Nicht bekannt
Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV)	Bekannt (Purple book wird nicht akzeptiert)	bekannt	Wird angewendet	Bekannt (Anwendung in NRW ist nicht bekannt)	Bekannt (Anwendung in NRW ist nicht bekannt)	Bekannt (Anwendung in NRW ist nicht bekannt)

6.4.8 Weiterführende Literatur

Im Auftrag des schweizerischen Bundesamtes für Verkehr wurde 2018 durch die Suisseplan Ingenieure AG eine vergleichende Betrachtung anhand der Freisetzung von Propan aus einem Bahnkesselwagen, sowie dessen Ausbreitung, Abbrandes und Auswirkung auf den Menschen durchgeführt. Dabei wurden folgende Berechnungsmethoden und Computerprogramme berücksichtigt:

- Niederländische Methodik: Handleiding Risicoanalyse Transport (HART)
- SAPHEDRA Projekt: Der Bericht „SAPHEDRA Identification of existing tools“ klassifiziert verschiedene Phänomene, die modelliert werden müssen und stellt bestehende Modelle zusammen
- Effects (TNO): Softwarepaket zur Konsequenzmodellierung. Basierend auf Methodiken des niederländischen Yellow- und Greenbooks.
- Phast (DNV GL): Softwarepaket zur Konsequenzmodellierung. Vielfach werden andere Modelle als bei Effects eingesetzt, teils Eigenentwicklungen des DNV.
- FLACS (Gexcon AS): CFD Tool zur Berechnung von Gasausbreitung und –explosion, Staubexplosionen und Flammenberechnung.

Die Ergebnisse sind in dem Abschlussbericht „Weiterentwicklung Screening- und Risikoermittlungsmethodik. Freisetzung, Ausbreitung und Wirkung von brennbaren schweren Gasen. Bericht Nr. Z16734-1a“ festgehalten.

6.4.9 Fazit

Die Auswertung der verschiedenen Quellen offenbart eine teils erhebliche Vielfalt an entwickelten, vorgeschlagenen und zur Anwendung kommender Modelle. Dies ist unter anderem zu erklären durch:

- Anwendbarkeit: Komplexität der Modelle, Inklusion/Exklusion einzelner Parameter
- Abwägung zwischen Genauigkeit und Rechenaufwand (empirische Modelle bis hin zu CFD-Modellen)
- Weiterentwicklungen bestehender Modelle: z.B. aufgrund von Ergebnissen experimentaler Untersuchungen, wissenschaftlicher/theoretischer Erkenntnisse oder aufgrund steigender Rechnerleistungen.
- Abwägung zwischen Wahrung von Kontinuität vs. Anwendung des Standes der Technik
- Verfügbarkeit: (Kosten)freier Zugang zu Formeln bzw. Software kann ein Kriterium darstellen

Bei Modellentwicklungen und -auswahlen sind Kompromissentscheidungen zu treffen.

Insbesondere die Autoren des TÜV-Forschungsberichtes, sowie des DECHEMA-Statuspapieres gehen bei den Modellbeschreibungen weitestgehend auf Aspekte wie Anwendungsbedingungen und -einschränkungen, sowie Stärken und Schwächen ein.

Positiv hervorzuheben sind bei beiden QRA-Verfahren die jeweiligen Validierungsaktivitäten bzw. die Berücksichtigung wissenschaftlicher Untersuchungen und Erkenntnisse sowie der gemeinsame regelmäßige Austausch untereinander.

Aufgrund der Menge der in der in den QRA-Verfahren vorgestellten Modelle und damit einhergehenden Validierungsaktivitäten beschränken sich die in den vorangestellten Kapiteln gemachten Aussagen zur Validität auf Verweise zu den entsprechenden Validierungsaktivitäten.

Die in den QRA-Verfahren zur Anwendung kommenden Modelle sind weitestgehend Diskussionsgegenstand des Forschungsberichtes des TÜV-Anlagenbaus sowie des Dechema Statuspapieres und teilweise in den Computerprogrammen des EC JRC implementiert, was als weiteres positives Zeichen bezgl. der Validität gedeutet werden kann.

Aussagen zur Sensitivität der Modelle wurden in den untersuchten Quellen nur spärlich getroffen. Dies wird auf die Tatsache zurückgeführt, dass Sensitivität keine pauschale Modelleigenschaft ist, sondern immer in Kombination mit einem fixen Wert für einen bestimmten Eingangsparameter zu betrachten ist. Der Umstand, dass die Modelle im Allgemeinen mehrere Eingangsparameter aufweisen und der Aufwand einer vollumfänglichen Betrachtung der Sensitivität mit der Anzahl der Parameter exponentiell wächst, machen proaktive vollumfängliche Betrachtungen praktisch unmöglich. Eine hohe oder niedrige Sensitivität sollte aus Sicht der Forschungsnehmenden nicht per se als gute oder schlechte Modelleigenschaft verstanden werden. Parameterbereiche mit hoher Sensitivität erfordern lediglich einen hinreichend genauen Kenntnisstand über die Eingangsparameter oder alternativ die Durchführung solche Analysen. Im Dechema-Statuspapier wird beispielsweise der Hinweis an potentielle Anwender der Modelle für Gasausbreitungsmodelle gegeben, bei nicht hinreichend genauen Kenntnisstand bzgl. der Freisetzungs- und Ausbreitungsbedingungen eigene Sensitivitätsstudien durchzuführen.

Abschließend muss festgehalten werden, dass die vergleichenden Betrachtungen durch die teilweise unterschiedlichen Gliederungslogiken bzw. Fallunterscheidungen in den jeweiligen Quellen teils erheblich erschwert wurde. Eine eindeutige Gegenüberstellung der benannten Modelle war somit nicht immer möglich.

Weiterhin gilt, dass die Verfahren, bzw. Modelle und Computerprogramme stets weiterentwickelt worden sind, bzw. weiterentwickelt werden, sodass in Studien gemachte Aussagen zur Anwendbarkeit und Validität einzelner Modelle stets kritisch auf Aktualität zu prüfen sind.

6.5 Vergleichende Betrachtungen für den Analyseschritt „Risikobewertung“

6.5.1 HAZOP-Verfahren

Das HAZOP-Verfahren beinhaltet kein Element der Risikobewertung. Die Praxisuntersuchungen haben jedoch aufgezeigt, dass die HAZOP häufig in Kombination mit einer Risikomatrix, einem Risikographen bzw. dem LOPA-Verfahren zur Anwendung kommt.

6.5.2 LOPA-Verfahren

Risikobewertungen erfolgen entweder anhand von Risikomatrizen oder alternativ über einen Abgleich zwischen Targetfaktoren und Kreditfaktoren (Vgl. Kapitel 4.8.1).

6.5.3 Fehlerbaumanalyse und Ereignisbaumanalyse

Die Analysetechniken dienen der Darstellung von Störfallszenarien, sowie der Berechnung derer Eintrittshäufigkeiten. Risikobewertungsansätze werden durch die Verfahren selbst nicht beschrieben.

6.5.4 Niederlande

Zwischen dem Parlament und dem Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM, Ministerium für Wohnungswesen, Raumordnung und Umweltschutz [66]) wurden für das Individualrisiko und das gesellschaftliche Akzeptanzkriterien im Laufe der Zeit mehrfach diskutiert und in Folge dessen konkrete Ziel- und Grenzwerte festgelegt bzw. angepasst. Letztmalig wurden die Werte 2010 angepasst. Mit dem Besluit externe veiligheid inrichtingen (BEVI) in der Fassung von 2016 gelten gegenwärtig folgende Werte:

Grenzwerte für das Individualrisiko für (besonders) schutzwürdige Objekte (Krankenhäuser, Schulen, Wohngebäude):

- für bestehende Gebäude: 10^{-6} je Jahr
- für geplante Gebäude: 10^{-6} je Jahr

Zielwerte für das Individualrisiko für begrenzt schutzwürdige Objekte (Industriebereiche, Bürogebäude):

- für bestehende Gebäude: 10^{-6} je Jahr
- für geplante Gebäude: 10^{-6} je Jahr

Die Grenzwerte dürfen – im Gegensatz zu den Zielwerten – grundsätzlich nicht überschritten werden. Bei den Zielwerten besteht ein Ermessenspielraum.

Das Akzeptanzkriterium für das gesellschaftliche Risiko bildet eine fest definierte Gerade im doppelt logarithmischen FN-Diagramm mit der Steigung -2, d.h., dass schwerwiegende Unfälle überproportional kritisch betrachtet werden. Zum Beispiel wird eine Störung mit 100 Todesopfern genauso kritisch angesehen, wie 100 Störungen mit je 10. Die Akzeptanzlinie verläuft durch die Punkte ((10, 10^{-5}), (100, 10^{-7}), (1000, 10^{-9})) (siehe auch Abbildung 18).

Eine Überschreitung der Akzeptanzlinie ist kein automatisches Ausschlusskriterium. Vielmehr sind bei der Erarbeitung neuer Flächennutzungsplänen bzw. bei Genehmigungsentscheiden von neuer Seveso-Anlagen folgende Aspekte bei der Betrachtung des gesellschaftlichen Risikos zu berücksichtigen[67]:

- Das gesellschaftliche Risiko für die aktuelle Situation.
- Das gesellschaftliche Risiko für die neu vorgeschlagene Situation.
- Die Möglichkeiten zur Reduzierung des Risikos an der Quelle.
- Die Möglichkeiten zur Notfallvorbereitung und -reaktion.
- Die Möglichkeiten für Menschen, sich im Schadensfall selbst zu retten, also Selbsthilfe.
- Speziell für neue Bebauungspläne: Vor- und Nachteile unterschiedlicher räumlicher Entwicklungsmöglichkeiten, beispielsweise einer Bebauung an anderen Standorten.

Grundsätzlich gilt bei der Festlegung der numerischen Akzeptanzkriterien, dass die Regierung in erster Linie für die Gesetzgebung verantwortlich ist und entscheidet, ob und wann Kriterien

[66] VROM wurde 2010 mit dem Verkehrs- und Wasserwirtschaftsministerium Ministerie van Verkeer en Waterstaat zum Infrastrukturministerium Ministerie van Infrastructuur en Milieu (IenM) fusioniert

[67] Summary of the Dutch QRA and land-use planning policy for major accidents with hazardous substances (Arbeitspapier RIVM, 2023)

überarbeitet werden müssen. Das Parlament kontrolliert die Regierung und kann auch Veränderungen fordern. Neue oder geänderte Gesetze müssen vom Parlament genehmigt werden.

Mehrere Veröffentlichungen von Ben J. M. Ale erörtern den wissenschaftlichen Hintergrund und die Geschichte zur Festlegung der Kriterien[68].

Grundlage für die Festlegung der Grenz- und Zielwerte für das Individualrisiko ist die Mortalitätsrate bei Jugendlichen in einem Alter von 12 bis 16 Jahren, welche in den 80er Jahren mit 10^{-4} je Jahr abgeschätzt wurde. Diese Rate, die sämtliche Todesursachen (Unfälle wie Krankheiten) beinhaltet, wird als Referenzrate herangezogen. Das durch einen Betriebsbereich entstehende zusätzliche Risiko sollte verhältnismäßig klein sein. Aufgrund der Tatsache, dass Menschen sich in der Regel mehreren bzw. vielen Risiken gleichzeitig aussetzen, wurde der Wert 10^{-5} als potentieller Kandidat als nicht ausreichend klein angesehen. Der Wert 10^{-6} schien hingegen ein geeigneter Wert zu sein, der außerdem zum Zeitpunkt der Diskussion in vielen sicherheitsgerichteten Kontexten weltweit Anwendung fand. Zu dem Zeitpunkt der Diskussion lagen Berechnungsergebnisse zu externen Risiken von LPG-Anlagen vor. Der Wert 10^{-6} wurde von den betrachteten Anlagen eingehalten, was als Indiz dafür gedeutet wurde, mit dem Wert eine realistische, aber gleichzeitig anspruchsvolle Forderung aufzustellen. Gleichzeitig wird mit der berechneten Gefahr von hochwasserbedingten Überflutungen (ebenso von der Größenordnung 10^{-6})[69] argumentiert, dass strengere Vorgaben das Gesamtrisiko, dem sich Anwohner aussetzen (bzw. ausgesetzt sind), nicht signifikant reduzieren würden.

Der Ansatzpunkt für die Akzeptanzlinie beim gesellschaftlichen Risiko (gemeint ist der Wert (10, 10^{-5})) wurde vom Ziel- bzw. Grenzwert für das Individualrisiko (10^{-6}) unter Berücksichtigung einer konservativen Abschätzung der Bevölkerungsdichte abgeleitet. Der Steigungsfaktor -2 auf dem doppelt logarithmischen Chart drückt die sog. Risikoaversion der Bevölkerung aus, welche einen Unfall mit 10 Todesopfern im Vergleich zu zehn Unfällen mit jeweils einem Todesopfer als schlimmer empfindet. Ursprünglich existierte neben der Akzeptanzlinie noch eine weitere Linie, die sog. „negligibility line“, welche aber im Laufe der Zeit aufgegeben wurde. Ursprünglich wurde diese Linie erdacht, um eine untere Grenze für die Involvierung behördlicher Institutionen bei der Diskussion der Akzeptanz des ermittelten Risikos zur Verfügung zu haben. Jedoch wurde von Umweltverbänden, Nachbarn und weiteren Instanzen die untere Grenze eher als eine Art Zielwert im Sinne des ALARA-Prinzips interpretiert bzw. benutzt, was die Betreiber wiederum nicht hinnehmen konnten und wollten, weshalb schlussendlich die „negligibility line“ aufgegeben wurde.

Das Konzept des gesellschaftlichen Risikos soll in Zukunft durch sogenannte Fokusbereiche für Brände, Explosionen und toxische Wirkungen ersetzt werden. Innerhalb dieser Fokusbereiche sollen Optionen zur Reduzierung des Risikos diskutiert werden. Die intendiere Anpassung des Konzepts wurde vom niederländischen Parlament angestoßen und ist u.a. auf folgende Überlegungen zurückzuführen[70]:

- Die Betrachtung des gesellschaftlichen Risikos wird von den Raumplanern und zuständigen Behörden als komplex wahrgenommenen.

[68] Ben J. M Ale, 2023: Third-Party Risk Policies in the Netherlands: A Historical Sketch – Cambridge Scholars Publishing

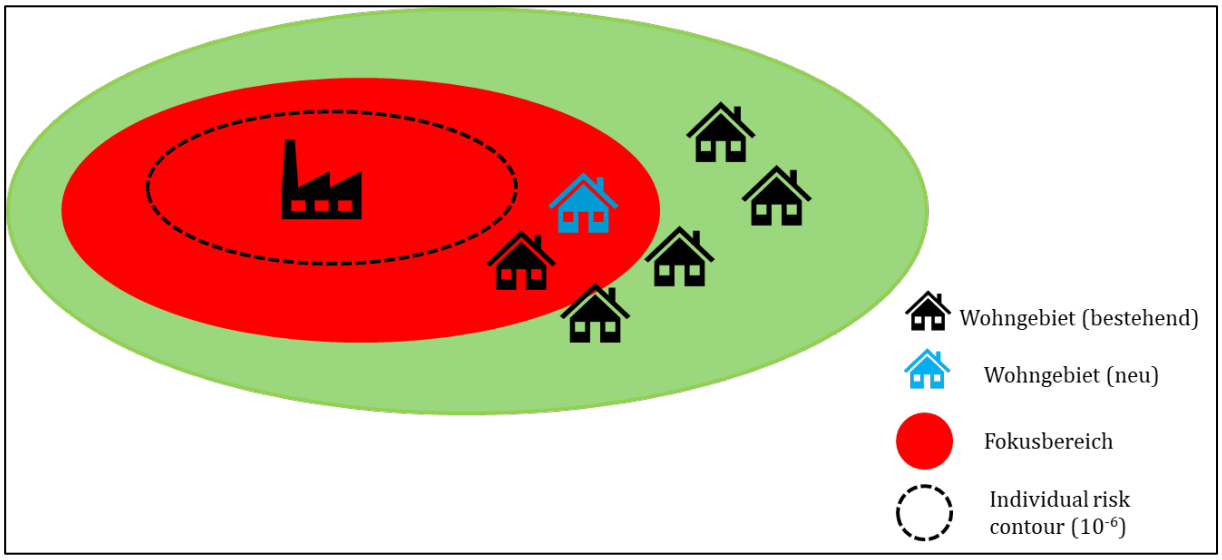
[69] Kalkulation: Ein Hochwasser, welches die Deichhöhe übersteigt tritt alle 10.000 Jahre auf. In einem von 10 Fällen versagt der Deich mit der Folge, dass 10% der Population sterben.

[70] Summary of the Dutch QRA and land-use planning policy for major accidents with hazardous substances (Arbeitspapier RIVM, 2023)

- Betrachtungen von Möglichkeiten zur Reduzierung des gesellschaftlichen Risikos weisen häufig Mängel auf (insbesondere bei der Entwicklung neuer Raumplanungen in direkter Umgebung zu Seveso-Anlagen).
- Sicherheitsmaßnahmen, die in Bebauungsplänen festgelegt waren, wurden oft nicht umgesetzt.

Die folgende Abbildung illustriert das Konzept der kombinierten Anwendung von Individualen Risikokonturen und Fokusbereichen:

Abbildung 59: Illustration – Kombination von individuellen Risikokonturen mit Fokusbereichen



Quelle: IZP. In Anlehnung an RIVM, „Summary of the Dutch QRA and land-use planning policy for major accidents with hazardous substances“

Die Bestimmung der Fokusbereiche soll entlang von Grenzwerten (Wärmestrahlung: 10 resp. 35 kW/10^2, Überdruck: 0,1 bar, toxikologische Konzentration: LTV (life-threatening value, vergleichbar AEGL-3)) erfolgen. Eine Zeitkomponente (z.B. Dauer Vorhandensein einer Stoffkonzentration) mit der bei der Bestimmung der Fokusbereiche soll perspektivisch ebenso berücksichtigt werden. Die Fokusbereiche werden Berechnungsergebnisse der QRA sein.

Das Konzept der Fokusbereiche soll 2024 implementiert werden, wenn das „new Environment Act“ in Kraft tritt.[71]

Aus der Sicht des RIVM werden mit der Einführung der Fokusbereiche nicht alle Probleme bzw. Unzulänglichkeiten behoben werden können. Diskussionsbedarf zu den Risikokenngrößen wird weiterhin bestehen. Folgende Kritikpunkte wurden beispielsweise formuliert:

- Einheitliche Grenz- und Zielwerte für das individuelle Risiko unabhängig vom Nutzen der Aktivität für die Gesellschaft sind nicht gerechtfertigt
- Ränder der Fokusbereiche ergeben sich durch die Auswirkungsgrade der größten Unfallszenarien für Feuer, Explosion und toxische Auswirkungen. Es fehlen Anreize, die Wahrscheinlichkeit der Störfallszenarien zu verringern.

[71] Summary of the Dutch QRA and land-use planning policy for major accidents with hazardous substances (Arbeitspapier RIVM, 2023)

- Die Unsicherheiten in der Risikoberechnung sind erheblich und geringfügige Änderungen können erhebliche Auswirkungen auf die Berechnungsergebnisse und somit auf die Entscheidungsfindung haben (Lage der IR 10-6-Kontur). Ein falsches Gefühl von Präzision kann damit entstehen. Berechnungen erfordern einen erheblichen Zeit- und Arbeitsaufwand für die verschiedenen Beteiligten. Die Komplexität des Rahmenwerks sollte verringert werden und zu eher qualitativen Ansätzen gewechselt werden.
- Es besteht ein Spannungsverhältnis zwischen (a) dem Wunsch nach präzisen Ergebnissen und (b) dem Wunsch, nur eine grobe Risikoschätzung abzugeben. Befürworter der Präzision möchten das Szenario und die Szenariohäufigkeit so gut wie möglich an die Situation anpassen. Gegner behaupten, die Anzahl der Variablen sei endlos und QRA sei immer eine Vereinfachung.
- In Zusammenhang mit der vorherigen Ausgabe gibt es auch eine Reibung zwischen (a) dem Wunsch nach stabilen Ergebnissen, um Kontinuität bei der Genehmigungs- und Landnutzungsplanung zu gewährleisten, und (b) dem Wunsch, kontinuierlich die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse einzubeziehen.

Weitere Bewertungskriterien zur Bewertung von Restrisiken: Seveso-Unternehmen sollten über ein genehmigtes Sicherheitsmanagementsystem/-richtlinie verfügen. Darüber hinaus verlangt die Genehmigung in der Regel, dass die technischen Anlagen den aktuellen Industriestandards oder den besten verfügbaren Techniken entsprechen.

6.5.5 Flandern

Für das individuelle Risiko sind dies die individuellen Risikokonturen 10^{-5}, 10^{-6} und 10^{-7} pro Jahr für die Grenze des Betriebsbereiches, die Grenze eines Wohngebietes und die Grenze eines Gebietes besonders vulnerabler Objekte (Krankenhäuser, Schulen, Seniorenheime).[72]

Für das gesellschaftliche Risiko ist das Akzeptanzkriterium eine Gerade im Log-Log-Diagramm, welche durch die Punkte (10, 10^{-4}) und (1000, 10^{-8}) gezogen wird.

Eine Überschreitung eines der oben genannten Kriterien bedeutet nicht automatisch, dass eine Genehmigung nicht erteilt werden kann. Überschreitungen werden im Einzelfall beurteilt. In diesem Fall können weitere Maßnahmen und/oder Erläuterungen erforderlich sein. Zum Beispiel kann dies ein Nachweis sein, dass diejenigen Szenarien, die die Überschreitung verursachen, hinreichend mit risikomindernden Vorkehrungen und Maßnahmen versehen worden sind.

Die o.g. Zahlenwerte sind in dem Dokument „Code Risikocriteria“ (Vgl. LNE (2006))) festgehalten.

Dieser Kodex wurde nach Konsultationen zwischen der flämischen Regierung, den anerkannten Experten für Sicherheitsberichte und der Industrie (vertreten durch Branchenverbände) erstellt. Am 19.10.2006 hat der flämische Umweltminister diesen Kodex ratifiziert. Dadurch wird das Dokument für alle Verwaltungen verbindlich, die in die Zuständigkeit des Ministeriums fallen. Mit mehreren Branchenverbänden wurde eine formelle Vereinbarung über die Anwendung des Kodex unterzeichnet. Dies sind Essenscia Vlaanderen (Dachverband, der viele Tätigkeitsbereiche der Chemie und Biowissenschaften vertritt) und Agoria (der Branchenverband der Technologiebranche).(K .Imbrechts, Government of Flanders -

[72] Außerhalb ausgewiesener Wohngebiete errichtete Wohnsitze werden ebenso berücksichtigt, wenn diese mindestens 5 Objekte umfasst und räumlich hinreichend nahezu einander positioniert sind. (Vgl. Besluit ruimtelijke veiligheidsrapportage, §2)

Department of Environment & Spatial Development , persönliche Kommunikation, 22. August 2023)

Als Maßstab für die Festlegung der numerischen Akzeptanzkriterien für das Individualrisiko wird die Sterberate für junge Menschen, bedingt auf natürliche Todesumstände, herangezogen. Diese Sterberate wurde zum Zeitpunkt der Festlegung der Kriterien (1988) für den Raum Belgien mit 10^{-4} pro Jahr geschätzt.

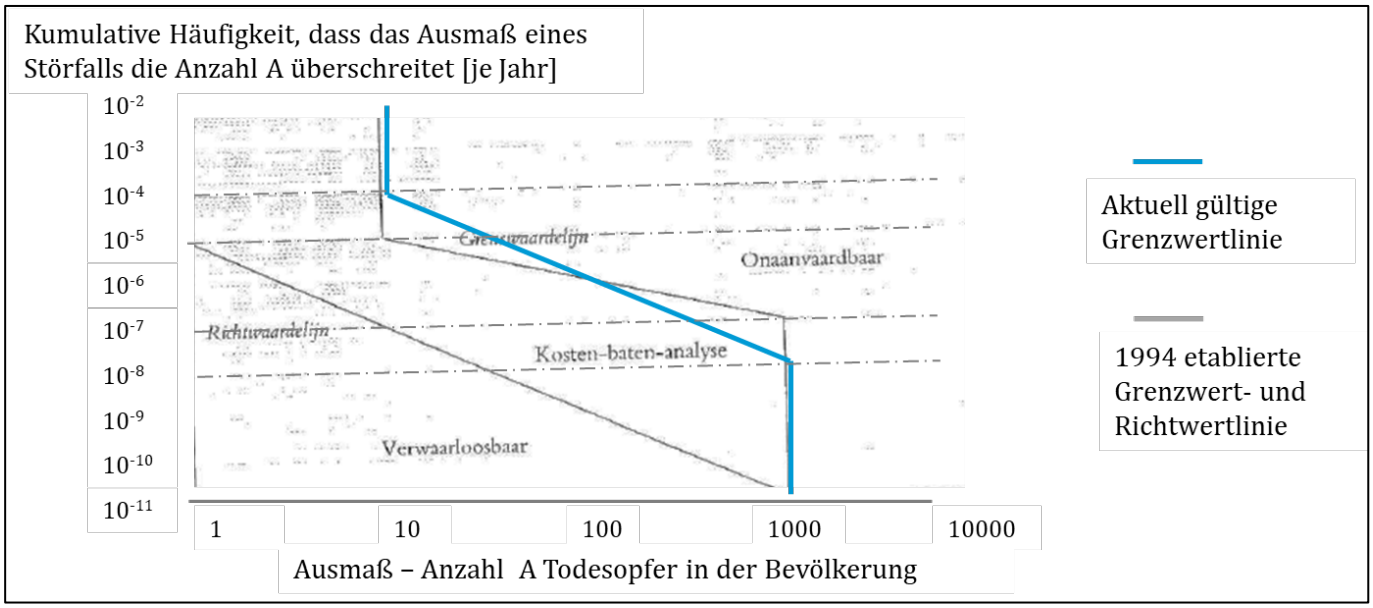
Zusätzliche Risiken durch Seveso-Einrichtungen sollen dieses Risiko in Wohngebieten um max. 1 % erhöhen, daraus ergibt sich als Grenzwert die individuelle Risikokontur von 10^{-6} pro Jahr ($10^{-6} = 10^{-4} * 1\%$). Für Gebiete mit besonders vulnerablen Objekten wird zusätzlich der Faktor 10 angewendet, um den bei den vulnerablen Personengruppen zu vermutenden verringerten Fluchtmöglichkeiten aus Gefahrensituationen sowie der Tatsache Rechnung zu tragen, dass gleiche Einwirkungen (Hitze, Druck oder Giftbelastung) bei diesen Personengruppen zu größeren Schäden führen können. Es ergibt sich also als Grenzwert die individuelle Risikokontur von 10^{-7} pro Jahr ($10^{-7} = 10^{-6} * 10\%$). Für die Betriebsgrenze wird als Grenzwert die individuelle Risikokontur von 10^{-5} gewählt. Damit soll sichergestellt werden, dass die meisten Risiken innerhalb der Betriebsgrenzen „eingedämmt“ werden.

Das Akzeptanzkriterium für das gesellschaftliche Risiko enthielt in einer ersten Fassung zwei Geraden, eine Grenzwertlinie, die nicht überschritten werden durfte sowie eine Richtwertlinie, oberhalb derer zusätzliche Kosten-Nutzen-Analysen denkbarer zusätzlicher risikoreduzierender Maßnahmen durchzuführen waren (Hoorelbeke, L. et al. (1994)).

Die Grenzwertlinie wurde 2006 angepasst, da die Berechnungsergebnisse der Seveso-Betriebe zu häufig das bis dahin geltende Kriterium verletzt hatten und in Folge das Kriterium als zu ambitioniert betrachtet wurde (die bis dahin festgelegte Akzeptanzlinie verlief durch die Punkte (10, 10^{-5}) und (1000, 10^{-7}), welche durch die aktuell geltende Linie (Punkte (10, 10^{-4}) und (1000, 10^{-8})) ersetzt wurde). Die Richtwertlinie wird nicht weiter angewendet.

Sowohl die ursprüngliche sowie die aktuelle Grenzwertlinie verläuft auf vertikaler Ebene bis zum Wert 1000 (Todesopfer im Falle eines Unfalles). Darüber hinausgehende Opferzahlen werden unabhängig der Eintrittshäufigkeit als nicht hinnehmbar angesehen. Für Werte kleiner 10 werden hingegen keine Häufigkeitsanforderungen gestellt (was jedoch nicht von der Pflicht, geeignete Gegenmaßnahmen zu implementieren, befreit). Die ursprüngliche Linie hatte eine Steigung von -1, das Produkt aus Wahrscheinlichkeit und Schadensschwere betrug somit an jeder Stelle 1 Todesfall pro 10.000 Jahre, was einer jährlichen Sterblichkeitswahrscheinlichkeit von 1% der natürlichen jährlichen Sterblichkeit (über alle Altersgruppen) entspricht.

Abbildung 60: Akzeptanzkriterien für das gesellschaftliche Risiko in Flandern - Stand 1994



Quelle: Eigendarstellung IZP aufbauend auf Hoorelbeke, L. et al. (1994)

In Flandern wird im Rahmen eines laufenden Forschungsprojektes evaluiert, inwiefern das Risikomaß „Gesellschaftliches Risiko“ durch Fokusbereiche im Sinne des niederländischen Ansatzes oder durch vergleichbare Ansätze ergänzt bzw. ersetzt werden kann.

An der Festlegung, Überprüfung und Überarbeitung der numerischen Akzeptanzkriterien sind grundsätzliche alle Interessengruppen beteiligt: Regierung, SR-Experten, Verbände, Seveso-Einrichtungen, Forschungsorganisationen, etc.

Die Akzeptanzkriterien gelten für Betriebsbereiche der oberen und unteren Klasse sowie für bestehende und geplante Betriebe. Sicherheitsberichte und QRA-Betrachtungen sind für Betriebsbereiche der oberen Klasse obligatorisch, für Betriebsbereiche der unteren Klasse sind diese auf Anfrage seitens der zuständigen Behörde zu erstellen. Ursprünglich wurden für bestehende und geplante Betriebe bzw. Objekte in der Umgebung des Betriebes unterschiedliche Grenzwerte für das Individualrisiko angewandt (strengere Regeln um Faktor 10 für geplante Betriebe bzw. Objekte). Mit dem Code Risicocriteria wurden diese Werte vereinheitlicht.

Wenn neue räumliche Umsetzungspläne (“ruimtelijk uitvoeringsplan“) in der Nähe des betroffenen Betriebsbereiches vorliegen, ist das flämische Department „Environment und Spatial Development“ zu Rate zu ziehen.[73] Zu diesem Zwecke werden um die Betriebsbereiche sogenannte Konsultationszonen festgelegt[74]. Die Konsultationszonen bzw. deren Ränder werden wie folgt bestimmt: Maximum aus (1) Maximum aller berechneten maximalen Effektdistanzen[75] und (2) einer willkürlichen Entfernung von 850 m für „indirekte“ Risken (d.h. umgebungsbedingte Gefahrenquellen). Unter gewissen Voraussetzungen ist durch den betroffenen Betriebsbereich ein entsprechender Sicherheitsbericht vorzulegen[76].

Im Falle ein Stadtplanungsgesetz („stedenbouwkundige handeling“) vorliegt, ist das Department zu konsultieren, wenn zwischen Betriebsbereichen und geplanten vulnerablen Objekten eine

[73] Vgl. Besluit ruimtelijke veiligheidsrapportage, Anhang 1

[74] Standorte und Konsultationszonen der Seveso-Betriebsbereiche sind online einsehbar: Geopunt.be (Lagen: “Terreinen van Seveso-inrichtingen in Vlaanderen” und “Consultatiezones van Seveso-inrichtingen in Vlaanderen”).

[75] Maximale Effektdistanz ist die Distanz bei der eine 1%-Sterbewahrscheinlichkeit unterstellt wird

[76] Vgl. Besluit ruimtelijke veiligheidsrapportage, Anhang 2

Distanz von weniger als 2 km liegt (Vgl. Art. 35 des Umweltgenehmigungsbeschlusses ("Omgevingsvergunningsbesluit")).

Im Rahmen der Erstellung des SWA-Sicherheitsberichtes wird „interne Sicherheit" betrachtet, für welche zusätzliche Analysen durchgeführt werden (z.B. HAZOP-Studien). Wenn die Regierung auf der Grundlage des Berichts feststellt, dass die Einrichtung nicht „sicher genug" ist, kann sie vorschlagen, die Genehmigung auszusetzen oder den Betrieb zu schließen.

6.5.6 Schweiz

Vorbemerkung: Auch wenn der Schweizer Störfallvollzug keine konkreten Verfahren und Methoden der Störfallrisikobeurteilung vorsieht (siehe Ausführungen in Kapitel 4.20.1), so sind doch zumindest konkrete Vorgaben bezgl. der Einhaltung von Risikoakzeptanzwerten zu berücksichtigen. Um den ursprünglichen Projektanliegen – der Betrachtung der Verfahren und Methoden der Störfallrisikobeurteilung in der Schweiz – weitestgehend Rechnung zu tragen, wird nachfolgend auf die rechtliche Situation der Risikobewertung in der Schweiz eingegangen.

Artikel 3 StFV nennt drei Kriterien, die den Umfang der Sicherheitsmaßnahmen bestimmen:

- Verfügbarkeit nach dem Stand der Sicherheitstechnik,
- Eigene Erfahrungswerte und
- Wirtschaftliche Tragbarkeit.

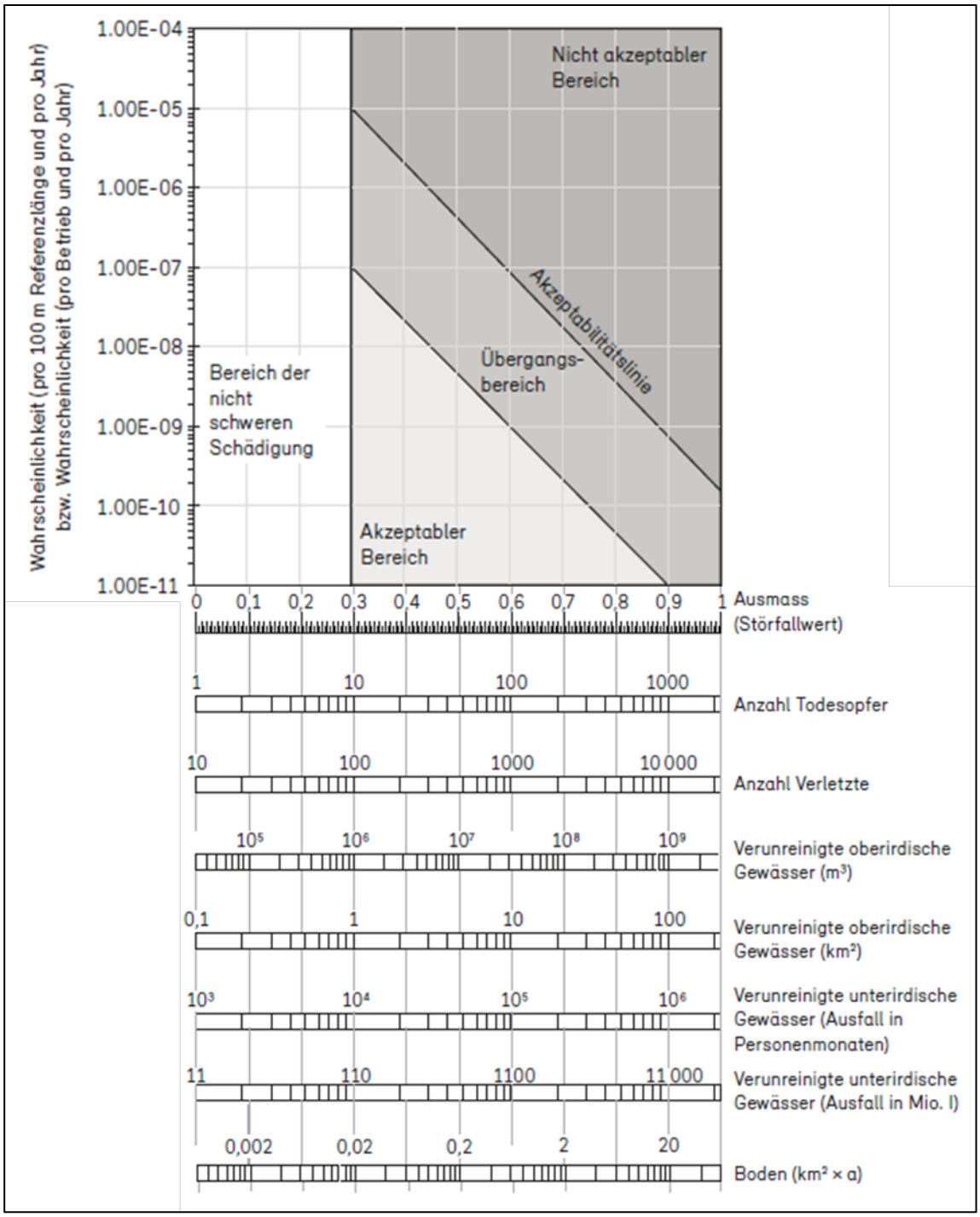
Diese Anforderungen gelten unabhängig vom quantitativ ermittelten Risiko, d.h. dass ein tragbares Risiko den Inhaber einer Anlage nicht vom Treffen entsprechender Maßnahmen befreit.

Im Handbuch zur StFV, allgemeiner Teil wird explizit darauf hingewiesen, dass der Stand der Sicherheitstechnik über die anerkannten Regeln der Technik hinausgeht, da dieser zusätzlich das aktuell in der Fachwelt vorhandene und objektiv zugängliche Wissen über Sicherheitsmaßnahmen berücksichtigt.

Bei der Beurteilung der wirtschaftlichen Tragbarkeit ist nicht die gegenwärtige wirtschaftliche Situation des Betriebes maßgebend, sondern von einem wirtschaftlich gesunden Unternehmen auszugehen. Bei neuen Anlagen lassen sich Maßnahmen in der Regel effizienter umsetzen, sodass bei neueren Anlagen tendenziell größere Risikoreduktionen erreicht werden können.

Falls eine quantitative Risikoermittlung zu erbringen ist, wird das ermittelte Risiko, d.h. die berechnete Summenkurve (zur Definition siehe Kapitel 4.20) anhand folgender Kriterien bewertet:

Abbildung 61: W/A-Diagramm mit Kriterien zur Beurteilung des Risikos



Quelle: BAFU (Hrsg.) (2018)

Störfallszenarien mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit < 1E-11 sind als tragbar zu beurteilen und der Risikoermittlung nicht auszuweisen. Störfälle mit einem Störfallwert > 1 sind in breit gestützten Arbeitsgruppen unter Federführung des BAFU zu beurteilen.

Verläuft die berechnete Summenkurve teilweise im nicht akzeptablen Bereich, kann eine Genehmigung nicht erteilt werden. Der Inhaber muss Vorschläge zur Senkung des Risikos über geeignete zusätzliche Maßnahmen der Vollzugsbehörde vorlegen.

Verläuft die Summenkurve teilweise im Übergangsbereich des W/A-Diagramms, nimmt die Vollzugsbehörde für den entsprechenden Schadenindikator eine Interessenabwägung vor.

Verläuft die Summenkurve vollständig im akzeptablen Bereich des W/A-Diagramms, so ist das Risiko tragbar.

Bei der Wahl der konkreten Werte für die Akzeptanzlinie für den Schadensindikator „Bevölkerung – Anzahl Todesopfer" hat sich die Schweiz an die Akzeptabilitätslinie in den Niederlanden angelehnt. Ein Vergleich mit anderen Risikogrenzwerten bezüglich technischer Risiken hat gezeigt, dass diese Werte auch in diesem Vergleich vernünftig sind.

Im Gegensatz zu den Niederlanden (und Flandern) wird zusätzlich eine zweite Linie definiert, welche zu einem Übergangsbereich führt, indem noch eine Interessenabwägung der Behörden vorgenommen werden kann.

Bei den Umweltrisiken wurde in Abstimmung mit allen Betroffenen die Schadensausmaßskala mit Fallbeispielen so geeicht, dass diese vernünftig ist.[77]

Bei der Festlegung der Akzeptanzkriterien und allgemeiner bei der Erstellung der Vollzugshilfen zur StFV hat das BAFU als Aufsichtsbehörde über die Störfallverordnung die Federführung. Die Vollzugshilfen werden mit breit abgestützten Arbeitsgruppen bestehend aus Bundesvollzugsbehörden, kantonalen Vollzugsbehörden und den betroffenen Industriebranchen erarbeitet. Vor Inkraftsetzung gibt es eine offizielle Anhörung aller Betroffenen.

Detaillierte Berechnungsvorgaben vergleichbar mit den QRA-Handbüchern in den Niederlanden und Flandern werden in der Schweiz nicht gemacht. Jedoch wird für Anlagentypen, welche in einer großen Anzahl in den Kantonen der Schweiz vorhanden sind, eine Harmonisierung und somit Gleichbehandlung der Inhaber angestrebt. Dies drückt sich unter anderem in den Studien

- Rahmenbericht Flüssiggas-Tankanlagen (Gmünder; F. et al. (1992)) und
- Störfallvorsorge bei Kälteanlagen (Wettstein, W. et al. (2023))

aus, welche sich ausführlich mit dem Stand der Sicherheitstechnik der entsprechenden Anlagentypen auseinandersetzen, sowie Vorgaben bzw. Empfehlungen bei der Szenarienentwicklung und -quantifizierung geben.

Viele der in den Studien getroffenen Grundannahmen (z.B. Wetterklassen; Probitfunktionen; statistische Grundlagen für Versagensraten etc.) lassen sich auf andere Anlagenarten übertragen. Grundsätzlich gilt aber, dass die Inhaber der Störfallanlagen die Risikoermittlungen eigenverantwortlich zu erarbeiten haben. Durch die Behörden werden diese auf Plausibilität geprüft. Detailvorgaben durch die Behörden werden daher angestrebt.

6.5.7 Exkurs – Minimale Endogene Mortalität

Festlegungen von Risikoakzeptanzkriterien erfolgen mitunter unter dem Gesichtspunkt der Minimalen Endogenen Mortalität. So findet das Konzept unter anderem Anwendung im Bereich der Anlagensicherheit:

- in Flandern ist es Bemessungsgrundlage für die Festlegung der Grenzwerte für das Individualrisiko.

[77] Weder dem BAFU noch den Forschungsnehmenden sind weitere Länder bekannt, welche quantitative Schutzziele für Umweltschäden definieren.

- TÜV Austria schlägt eine kalibrierte Risikomatrix zur Anwendung im Kontext des LOPA-Verfahrens vor. Die Kalibrierung wird u.a. mit der Minimalen Endogenen Mortalität begründet.

Der nachfolgende Exkurs stellt eine Reflexion und Kritik der Forschungsnehmenden zum Konzept der Minimalen Endogenen Mortalität dar.

Die Minimale Endogene Mortalität (MEM) beschreibt gemäß CENELEC-Norm EN 50126 das Risiko eines europäischen Jugendlichen aufgrund einer natürlichen (endogenen) Ursache zu sterben und wird mit „0,0002 Todesfälle pro Person und Jahr“ abgeschätzt. Die Abschätzung geht auf eine Arbeit von A. Kuhlmann (1981) zurück. Der Begriff „Minimal“ bezieht sich auf die jugendliche Bevölkerung (Alter 5-15 Jahre) als Referenzgruppe, da im Vergleich zu allen anderen Altersgruppen hier die Sterberate am geringsten ist. Der Grundgedanke ist, dass die in die MEM einfließenden „natürlichen“ (endogenen) Todesursachen als unvermeidlich betrachtet werden können und somit die daraus abgeleitete Sterberate als absolutes Grundmaß für technische Risiken angesehen werden kann. Zusätzliche, technische Risiken müssen im Vergleich zur MEM „klein“ sein.

Konkret heißt es in der CENELEC Norm, dass von technischen Produkten ausgehende Risiken die MEM nicht überschreiten dürfen. Unter der Annahme, dass eine Person sich im Schnitt 20 technischen System aussetzt, resultiert die Anforderung an ein einzelnes System, dass dessen Restrisiko <= MEM*1/20 = 0,00001 Tote/je Jahr sein soll, womit ein Grenz- bzw. Zielwert für das Individualrisiko gegeben wird. In der CENELEC Norm wird das MEM-Kriterium ebenso als Basis für die Ableitung eines Akzeptanzkriteriums für das gesellschaftliche Risiko angewendet.

Unklar scheint jedoch zu sein, was genau unter natürlichen (bzw. nichtvermeidbaren) Todesursachen zu verstehen ist. In der CENELEC Norm heißt es: „Die natürliche Sterberate fokussiert nur auf natürliche Todesursachen ohne irgendwelche Arten von Unfällen und die Einflüsse angeborener Fehlbildungen”. In dem Abschlussbericht „Definition von Schutzzielen für Kritische Infrastrukturen – Forschungsstand, rechtlicher Rahmen und politische Entscheidungsfindung“ (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, 2019) heißt es teilweise komplementär „Diese Sterberate umfasst bspw. Verkehrs- oder Sportunfälle, aber keine tödlichen Krankheiten“.

Der TÜV Rheinland argumentiert, dass der von Kuhlmann 1981 ermittelte Wert mittlerweile nicht mehr stimmen kann, da Mortalitäten in allen Altersgruppen seit den 1980ern gesunken sind (Seeger, C. (2013)). Konkret wird anhand von Statistiken der Gesundheitsberichterstattung (GBE) gezeigt, dass die Wahrscheinlichkeit eines Jugendlichen an einer Krankheit zu sterben, heute deutlich kleiner als Anfang der 80er Jahre ist (Reduktion in D um ca. 50%). Und dass die Wahrscheinlichkeit eines Jugendlichen aufgrund eines Unfalls zu sterben, heute deutlich kleiner als Anfang der 80er Jahre (Reduktion in D um ca. 85%). Vergleichbare Reduktionen in den U.S.A. werden aus den “Vital Statistic Reports“ des US Department of Health, Education and welfare ersichtlich. Diese Entwicklungen müssten sich konsequenterweise in Anpassungen der o,g, Risikoakzeptanzkriterien widerspiegeln.

7 UNECE Forschungsprojekt "Risk Assessment Methodologies for Chemical Installations"

Die Durchführung des UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) -Projektes „Risk Assessment Methodologies for Chemical Installations“ ist auf das im Jahr 2018 abgehaltene UNECE-Seminar zu Methoden der Risikobeurteilung („Risk Assessment“) zurückzuführen. Das Seminar sollte die UNECE-Länder bei der Umsetzung der einschlägigen Bestimmungen der UNECE-Konvention für grenzübergreifende Effekte von industriellen Unfällen unterstützen, indem es die Möglichkeit bot, Informationen und Erfahrungen mit Methoden zur Risikobeurteilung auszutauschen. Während des Seminars hat sich herausgestellt, dass Herausforderungen bei der Durchführung einer grenzüberschreitenden Risikobewertung bestehen und somit die Notwendigkeit eines stärkeren Informationsaustauschs über die in der UNECE-Region verwendeten Risikobeurteilungsmethoden (einschließlich verfügbarer Softwaretools) besteht. Das UNECE-Forschungsprojekt wurde im Seminar als eine entsprechende Follow-up-Aktion priorisiert.

Gemäß der Leistungsbeschreibung des UBA-Forschungsprojektes sind Ergebnisse und Erkenntnisse aus dem UNECE-Projekt zu berücksichtigen.

Durch das Eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Umwelt BAFU wurde der Bericht zur Auswertung bereitgestellt:

- REPORT UNECE – RISK ASSESSMENT FOR INDUSTRIAL ACCIDENT PREVENTION Introduction to Methodologies (Part 1, 30 Seiten)
- REPORT UNECE – RISK ASSESSMENT FOR INDUSTRIAL ACCIDENT PREVENTION Selected Case Studies and Available Software Tools (Part 2)

Auswertung Report – Part 1:

Part 1 des Reportes stellt zunächst die grundlegenden Schritte der Risikobeurteilung im Kontext eines gesamtheitlichen Risikomanagementprozesses gemäß IEC 31010[78] dar. Die Aufgaben der einzelnen Schritte werden dargelegt und bewährte Verfahren und Methoden zur Umsetzung dieser Aufgaben bzw. Schritte überblicksweise vorgestellt. Die Verfahren selbst werden jeweils in knapper Form (ca. eine Seite) beschrieben und in einer abschließenden Übersicht mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen gegenübergestellt. Eine Begründung für die Auswahl der dargestellten Verfahren wird im UNECE-Report nicht gegeben. Aufgrund dessen hatte die dargestellten Verfahren im UNECE-Projekt keinen Einfluss auf die Auswahl der Verfahren im UBA-Projekt. Die Beschreibung bzw. Charakterisierung der Verfahren sowie die angegeben Vor- und Nachteile der Verfahren sind mit den eigenen Einschätzungen abgeglichen worden. Festzuhalten ist, dass das UNECE-Projekt größtenteils dieselben Verfahren vorstellt werden, welche im UBA-Projekt vertiefend betrachtet werden (HAZOP, LOPA, FTA, ETA, Bow-Tie und Consequency Analysis (gemeint sind Ausbreitungsrechnungen)). Das UNECE-Projekt stellt weiterhin FMEA/FMECA sowie die what-if-Methodik vor. Das UBA-Projekt befasst sich mit den QRA-Verfahren in den Niederlanden und Flandern sowie dem ARAMIS-Verfahren, welche im ersten Teil des UNECE-Reports nicht direkt adressiert bzw. vorgestellt werden.

Im UNECE-Report wird ebenso auf das Thema Risikobewertung eingegangen. Zunächst werden grundlegende Aussagen zur Festlegung von Risikoakzeptanzkriterien formuliert und anschließend die Risikomatrix als semiquantitatives Bewertungstool und quantitative

[78] International Electrotechnical Commission (IEC) / International Organization for Standardization (ISO). IEC 31010:2019(en). Risk management — Risk assessment techniques. 2019.

Kenngrößen, wie das Individualrisiko und das gesellschaftliche Risiko vorgestellt. Im Zusammenhang mit der Risikobewertung werden die Konzepte ALARP/ALARA (As Low as Reasonably Practicable/Achieveable) und Kosten-Nutzen-Analysen vorgestellt.

Part 1 des UNECE-Reports schließt mit Nutzen und Herausforderungen von Risikobeurteilungen ab, welche im Wesentlichen deckungsgleich mit den Nutzen und Herausforderungen sind, die auch im UBA-Projekt herausgearbeitet worden sind.

Nutzen:

- Raumplanung, Bevölkerungs-/Arbeitnehmerschutz
- Notfallvorsorge
- Kommunikation und Koordination zwischen den Beteiligten (auch über Ländergrenzen hinweg)
- Harmonisierte Methoden zur Risikoeinstufung und -kontrolle
- Demonstration „defence in depth“ (Hinweis: Gemeint sind Schutzebenen)

Herausforderungen:

- Inhärente Einschränkungen der Risikoanalysemethoden
- Terminologie
- Ausbildung, Erfahrung und Fachwissen
- Datenbanken zu Eintrittshäufigkeiten und Zuverlässigkeiten
- Quantifizierung der Umweltauswirkungen
- Einschränkungen bei der Kenntnis und dem Zugriff auf Software
- Unterschiede bezgl. Stand der Technik zwischen den Ländern

Auswertung Report – Part 2:

Part 2 des Reportes stellt einerseits die Ergebnisse der durchgeführten case studies dar, andererseits liefert er einen detaillierten Überblick über verfügbare Softwarelösungen, welche bei Risikobeurteilungen verwendet werden können.

Im Rahmen des UNECE-Forschungsprojektes wurden von den Mitgliedsländern 30 Case studies eingereicht, von welchen im Report 18 dargestellt werden. Diese Fallstudien umfassen fünf Arten von Anlagen: LNG/LPG-Lagertanks, Ammoniak-Kühlanlagen, Ölterminals (Kohlenwasserstoff-Lade-/Entlade-/Speicheranlagen), Ammoniumnitrat-Lagerung und Chloranlagen. Die Fallstudien wurden von mehr als 12 Ländern eingereicht.

Abgefragt wurden je Case Study:

- Beschreibung des Referenzszenarios, dessen Ursachen und Auswirkungen,
- angewandte Analyseverfahren, Modelle und Software Tools,
- Art der Häufigkeitsabschätzung,
- Risikodarstellung (qualitativ – quantitativ)

- gewählter Ansatz für Risikobewertung,
- realisierte Safety Barriers.

Aus Deutschland wurde ein Szenario beigesteuert. Das angewandte Verfahren - Checklist procedure VdTÜV – ist den Forschungsnehmenden nicht bekannt (d.h., es wurde weder im Rahmen der Recherche identifiziert, noch durch die Interviewpartner im Rahmen der Praxisuntersuchungen genannt). Einen Einfluss auf die Auswahl der im UBA-Projekt zu betrachtenden Verfahren hatte die case study in diesem Sinne daher nicht.

Die in den weiteren Case studies genannten Verfahren sind: Bow-tie (qualitativ und quantitativ), FTA+ETA (teils auch alleinstehend FTA oder ETA), HAZOP (+Risikomatrix), ARAMIS, FMEA, Purple book. Die Verfahren werden – bis auf die FMEA – im UBA Projekt vertiefend untersucht.

Die im UNECE-Report dargestellten Softwaretools sind in die Erarbeitung des Kapitels 8.4 „Softwareprogramme“ eingeflossen.

8 Empfehlungen und Hilfestellungen zum Einsatz der betrachteten Verfahren, Methoden und Modelle

8.1 Allgemeines

Störfallrisikobeurteilungen (und Sicherheitsbetrachtungen im Allgemeinen) 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 Sicherheitsbetrachtung hängt darüber hinaus von mehreren Faktoren ab:

- Klare Formulierung der mit der Sicherheitsbetrachtung 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/korrekter/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

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 betrieblicher Prozesse (Vorkehrungen und Maßnahmen)
- Bereitstellung von Informationen für Alarm- und Gefahrenabwehrplanung
- Ableitung eines Instandhaltungskonzepts
- Bereitstellung von Informationen für die Aus- und Weiterbildung der Beschäftigten

Wofür die Ergebnisse der Analysen dann genutzt werden sollen, z.B. für die Erstellung eines Sicherheitsberichts, eines Konzepts zur Verhinderung von Störfällen oder eines Alarm- und Gefahrenabwehrplans spielt bei der Auswahl des geeigneten Instruments zunächst keine entscheidende Rolle. Wichtig ist jedoch zu verstehen, dass in der Regel mehrere Techniken in Kombination bzw. in Ergänzung zueinander angewendet werden können und müssen (siehe Kap. 8.2.10). Bei Planungsprozessen ist die zeitgerechte Anwendung der Verfahren wichtig. In Abhängigkeit der konkreten Fragestellungen bieten sich unterschiedliche Anwendungszeitpunkte an (siehe Kap. 8.1.6).

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 kürzere Schulungen in der Regel lediglich Grundlagenwissen vermitteln können und keine langjährige Erfahrungen bzw. Fachaustausch ersetzen können. Teilweise bieten die schulenden Institutionen neben den Seminaren auch sog. „Training on the job"-Ausbildungen an, welche diese Lücke zu schließen versuchen. (siehe Kap. 8.5).

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

Zur Einführung 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.

8.1.1 Klassifizierung der Verfahren, Methoden und Modelle

Die QRA-Verfahren in den Niederlanden und Flandern dienen primär der Berechnung der Risikokenngrößen „Individualrisiko" und „Gesellschaftliches Risiko". Eine Analyse der tatsächlichen Gefahren und entsprechenden Gegenmaßnahmen steht dabei nicht im Fokus der Betrachtung. Im Kern stellen die Verfahren in Form von generischen Stofffreisetzungsszenarien und Ereignisbäumen hinterlegte Wissensdatenbanken dar, die vom Anwender auf die zu untersuchende Anlage hin anzupassen und als Grundlage für die Berechnung der Risikokenngrößen sind.

Das HAZOP-Verfahren ist die klassische Team-orientierte Kreativtechnik zur Identifizierung möglicher Gefahren und Ableitung der notwendigen Gegenmaßnahmen. Dem Verfahren ist kein quantitatives Kalkül eigen, weshalb dieses häufig in Kombination mit einer Risikomatrix, einem Risikographen oder aber dem LOPA-Verfahren angewendet wird.

HAZOP 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.

Die Fehlerbaumanalyse wird klassischerweise zur Analyse unerwünschter Systemzustände komplexer Systeme (Systeme mit Redundanzen und Rückfallebenen) angewendet. Das mit dem Verfahren hinterlegte wahrscheinlichkeitstheoretische Kalkül erlaubt die Prognose der

Zuverlässigkeit des Systems auf Basis der Zuverlässigkeiten der Elemente (Subsysteme, Komponenten) des Systems. Das Top-Ereignis kann dabei aber nicht nur der Ausfall einer (Sicherheits)funktion sein, sondern auch das Ereignis bzw. der Zustand, in dem der Betreiber die Kontrolle über den verfahrenstechnischen Prozess verliert.

Die Ereignisbaumanalyse stellt gewissermaßen das Pendant zur Fehlerbaumanalyse dar, welche von einem unerwünschten Ereignis ausgeht und strukturiert darstellt, welche weiteren Folgen denkbar sind.

In diesem Sinne kann das TOP-Ereignis des Fehlerbaumes als „Pivotelement" gedacht werden, über welches der Fehlerbaum und der Ereignisbaum zu einer gesamthaften Darstellung sämtlich denkbarer Kausalketten werden können. Das LOPA-Verfahren beinhaltet keine (qualitative) 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 eine Risikomatrix zur Risikobewertung zurück (alternativ kann mit einem System aus sog. Kreditfaktoren und Targetfaktoren gearbeitet werden). Das Einzelszenario entspricht dabei einem worst-case-Pfad des kombinierten Fehler- und Ereignisbaumes.

Die Bow-Tie-Analyse ist in erster Näherung eine Kombination aus Fehlerbaum- und Ereignisbaumanalyse. Ein wesentlicher Unterschied besteht in der Analyse der Versagenswahrscheinlichkeiten der Barrieren und der Maßnahmen, mit denen dies vorgebeugt werden kann. Schlussendlich soll mit dem Verfahren eine Verknüpfung zum Sicherheitsmanagement hergestellt werden, welches die Effektivität der Barrieren aktiv kontrolliert.

Das Verfahren Szenarienanalyse/HAZOP-Master aus dem Hause CMK ist eine EDV-gestütztes Verfahren, welches Elemente der HAZOP, der Fehlerbaumanalyse und von Checklisten beinhaltet. Im Kern stellt es generische Fehlerbäume bereit, die durch die Anwender auf die konkrete Anlage hin zu konkretisieren sind.

Das ARAMIS-Verfahren vereint Elemente der oben aufgeführten Verfahren. Das Verfahren stellt mit seinen generischen Fehler- und Ereignisbäumen eine Wissensdatenbank dar, die vom Anwender auf die zu untersuchende Anlage in einer Art Subtraktionsverfahren hin anzupassen sind.

8.1.2 Entwicklung von Störfallablaufszenarien

Grundsätzlich kann die Modellierung von Störfallablaufszenarien unterschiedlich stark ausgeprägt sein:

- Tiefe (im Sinne der ersten Ursache und der finalen Auswirkung),
- Genauigkeit (qualitative vs. quantitative Angaben) und
- Umfang (wahrscheinlichere/häufigere Ursachen vs. alle denkbaren Ursachen, interne Ursachen vs. externe Ursachen, Einzelfehler vs. Mehrfachereignisse, worst-case-Pfade vs. alle denkbaren Pfade)

Höhere Präzisierungen in den Beschreibungen von Störfallablaufszenarien gehen tendenziell mit höheren Aufwänden in der Analyse einher. Daher muss ein zusätzlicher, verwertbarer Erkenntnisgewinn zumindest begründeterweise vermutet werden können. Welche Form der Detaillierung gewählt werden sollte, hängt dabei nicht nur von Zielstellung der Analyse, sondern auch von der Projektphase ab.

8.1.3 Anwendbarkeit der Verfahren in Abhängigkeit der zu untersuchenden Anlagentypen

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/zeitsparende Alternative zur HAZOP und ähnlich aufwändigen Verfahren angesehen (siehe Kap. 8.2.2).

8.1.4 Probabilistik und Quantifizierungen

Bei der Quantifizierung der Eintrittshäufigkeiten von Gefahrenquellen, Störungen oder Störfallereignissen 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:

- Branche und Einsatzbedingungen,
- Umgebungsbedingungen,
- Instandhaltungsregimes.

Außerdem können z.B. das Alter der Referenzdaten und eventuelle Filterungen der Daten nach bestimmten Fehlerursachen oder anderen Aspekten für weitere Unsicherheiten bzw. „Verfälschungen“ sorgen.

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 Quantifizierung der Zuverlässigkeit bzw. Verfügbarkeit von technischen Einrichtungen bietet es sich an, Herstellerangaben des Lieferanten bevorzugt zu verwenden.

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

Bei regelmäßigen Verwendungen quantitativer Werte bietet sich der Aufbau einer unternehmensinternen Wissensdatenbank an.

8.1.5 Vorkehrungen und Maßnahmen

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 eher 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) macht in der Regel noch keine eigenständige Barriere aus.

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.

Eine Intervention des Bedienungspersonals kann grundsätzlich als Schutzbarriere angesehen werden, sofern gewisse Randbedingungen gegeben sind und diese in ihrer Zuverlässigkeit nicht zu optimistisch geschätzt wird. 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“).

Im LOPA-Leitfaden des TÜV-Austria (Preiss (2017)) werden folgende Werte vorgeschlagen:

Tabelle 70: Zuverlässigkeitsabschätzungen menschlicher Handlungen gemäß Preiss (2017)

Komplexität	Häufigkeit (wie oft wird die Tätigkeit pro durchführender Person ausgeführt)	Stress	Fehlerwahrscheinlichkeit je durchgeführter Handlung
einfach	Häufig (monatlich oder öfter)	Nein	$1x10^{-3}$
	Selten (weniger oft als monatlich)	Nein	$1x10^{-2}$
	Häufig (monatlich oder öfter)	Ja	$1x10^{-2}$
	Selten (weniger oft als monatlich)	Ja	$1x10^{-1}$
Komplex	Häufig (monatlich oder öfter)	Nein	$1x10^{-2}$
	Selten (weniger oft als monatlich)	Nein	$1x10^{-1}$
	Häufig (monatlich oder öfter)	Ja	$1x10^{-1}$
	Selten (weniger oft als monatlich)	Ja	$1x10^{-0}$

Quelle: Preiss (2017)

Zur Erstellung obiger Tabelle wurden folgende Annahmen getroffen: Keine Sabotage, kein Vorsatz, ausreichende Qualifikation des beteiligten Personals. Stress meint Stress in Folge von Zeitdruck, Reizüberflutung, negative Umgebungsbedingungen. Komplexität meint die Zahl der Teiloperationen und möglicher Entscheidungsvarianten (wobei nur eine als richtig zu bewerten ist). Zu beachten ist, dass im schlechtestmöglichen Fall (Komplexität=Komplex, Häufigkeit=Selten, Stress=Ja) eine Fehlerwahrscheinlichkeit von 1 angenommen wird. Wenn die betrachtete Handlung eine Schutzbarriere darstellt, dann bedeutet eine Fehlerwahrscheinlichkeit von 1, dass die Maßnahme keinen positiven Einfluss auf das berechnete Restrisiko hat (es dieses also nicht senkt). Ob die Maßnahme damit als Teil einer Prozedur zur Gefahrenabwehr verworfen werden sollte, sollte damit nicht automatisch entschieden sein. Ggf. lässt eine genauere Analyse der Handlung den Schluss zu, dass die Handlung mit einer hinreichend großen Wahrscheinlichkeit größer 0 erfolgreich durchgeführt werden kann.

Die in der Tabelle oben hinterlegten Zuverlässigkeitsabschätzungen menschlicher Handlungen stellen lediglich ungefähre Abschätzungen dar und lassen sich nicht ohne weiteres auf den eigenen Betriebsbereich übertragen. Die gerundeten Zahlen sollen zum Ausdruck bringen, dass

es sich bei den Zahlen nur um ungefähre Schätzungen und keine exakte Wissenschaft handelt . Beachtet werden sollte weiterhin:

- Je präziser die Faktoren „Komplexität“, „Häufigkeit“ und „Stress“ in ihren möglichen Ausprägungen beschrieben werden, desto geringer ist der Interpretationsspielraum seitens der Anwender der Tabelle. Beispielsweise könnte konkret spezifiziert werden, was unter Zeitdruck oder negativen Umgebungsbedingungen zu verstehen ist.
- Ob die Handlung schlussendlich fehlerfrei durchgeführt wird, hängt von weiteren Faktoren ab. Z.B. von der Person, welche die Handlung durchführt (Kompetenz, Tagesform, Lebenssituation, …)

8.1.6 Einbindung in den 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:

Für die Phase der Machbarkeitsstudie oder die Vorplanung können Screening-Techniken oder spezielle Checklisten zum Einsatz kommen, die strukturiert unterschiedliche Gefahrenfelder abfragen und somit gewissermaßen als vorläufige Gefahrenanalyse gelten können.

Eine HAZOP-Studie baut in der Regel auf einem sicherheitstechnischen Grundkonzept auf und wird in der Regel erst zur Detailplanung angewendet.

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:

Tabelle 71: Grundsätzliche Schritte des Planungsverlaufs sowie deren wesentliche Inhalte unter Sicherheitsaspekten

Machbarkeitsstudie	Vorplanung	Grundplanung	Detailplanung	Realisierung
• Identifizierung der Hauptgefährdungs-potenziale, die mit den Stoffen und dem Verfahren bzw. der Anlage verbunden sind (insbesondere unter Berücksichtigung toxischer, ökotoxischer und energetischer Aspekte)	• Präzisierung der Gefährdungs-potenziale, die mit den Stoffen und dem Verfahren bzw. der Anlage verbunden sind. • Überprüfung des vorgelegten sicherheits-technischen Grundkonzeptes. • Bestätigung und ggf. Ergänzung der	• Verabschiedung und Dokumentation des Anlagensicherheits-konzepts (Sicherheits-, des Gesundheitsschutz- und des Umweltschutz-konzepts). • Überprüfung der Planungsunterlagen	• Detaillierte Überprüfung der Planungs-unterlagen auf Einhaltung des Anlagensicherheits-konzepts • Durchführung und Dokumentation einer Sicherheits-	.Überprüfung der Umsetzung der getroffenen Sicherheits-maßnahmen vor der Inbetrieb-nahme.

Machbarkeitsstudie	Vorplanung	Grundplanung	Detailplanung	Realisierung
• Erstellung eines sicherheitstechnischen Grundkonzepts mit Optionen für inhärente Sicherheit. • Vorentscheidung über Verfahrens-technologie und Standortalternativen. • Erfordernisse an Standort, brandschutz-technische Infrastruktur, Logistik und Umweltschutz sowie Vorschattierung behördlicher Genehmigungs-fragen.	Lösungsstrategie sowie Darlegung und Entscheidung, dass das gewählte Verfahren an dem vorgesehenen Standort aus sicherheits-technischer Sicht durchgeführt werden kann. • Überprüfung des Umweltschutz-konzeptes und der Strategie zum Erhalt der behördlichen Genehmigungen.	auf Einhaltung des sicherheits-technischen Grundkonzeptes sowie allgemeiner sicherheitstechnischer Anforderungen.	betrachtung und Festlegung einzelner Sicherheits-maßnahmen	

Quelle: Das PAAG- / HAZOP-Verfahren und weitere praxisbewährte Methoden “, IVSS Sektion Chemie

8.2 Informationen und Hilfestellungen zur Auswahl und Anwendung der Verfahren, Methoden und Modelle

8.2.1 HAZOP-Verfahren

Auswahlkriterien:

1. Einsatzzweck und Zielstellung des Verfahrens:
   Das HAZOP-Verfahren findet unter anderem Anwendung im Kontext der Planung von Verfahren oder Produkten. Mit der HAZOP sollen Gefahrenquellen erkannt und bewertet werden. Ebenso sollen vorhandene Maßnahmen bewertet und Entscheidungen über angemessene weitere Gegenmaßnahmen getroffen werden. Die Anwendung der HAZOP dient somit dem rechtzeitigen Erkennen von Planungsfehlern und der Erstellung von Sicherheitskonzepten. Schutzgüter können dabei Personen, Umwelt und Sachwerte darstellen. Als Nebenprodukt der Analysetätigkeit ergibt sich ein verbessertes Anlagen- und Prozessverständnis, sowie ein erhöhtes Sicherheitsbewusstsein im Team und im Betrieb. Die Anwendung der Analyse führt tendenziell zu höheren Verfügbarkeiten der Anlage, da die beschlossenen Gegenmaßnahmen eine Reduzierung der im späteren Betrieb tatsächlich auftretenden Störungen und Ausfallzeiten bedeuten. Grundsätzlich ist die HAZOP-Analysetechnik nicht auf Fragestellungen der Prozess- und Anlagensicherheit beschränkt. Die HAZOP-Methodik ist nicht darauf beschränkt, nur solche Störungen zu analysieren, welche im Zusammenhang mit Gefahrstoffen denkbar sind (Sommer, J. et al. (2008)).
2. Eignung des Verfahrens in Abhängigkeit vom Anlagentyp:
   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.
3. Eignung des Verfahrens in Abhängigkeit der Arten von Gefahrenquellen:
   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.

Anwendungshinweise:

4. Benötigte Qualifikationen und Kompetenzen für die Anwendung, sinnvolle Teamzusammensetzungen:
   Die Teamzusammensetzung sollte in Abhängigkeit der Aufgabenstellung und der betrachteten Funktionseinheit erfolgen, wobei Teamzusammensetzungen von ca. 5 Mitgliedern als ideal angesehen werden (Sommer, J. et al. (2008)). Das Team kann dabei aus Planern, Betriebsleiter, Verfahrensentwickler, Betriebsingenieure, Technikern (Mess- und Regeltechniker, Prozessleittechniker), Sicherheitsfachkräften, Anlagenfahrern und Experten in Umweltschutz, Brandschutz, Logistik bestehen. 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 Fragestellung 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 HAZOP-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 HAZOP-Schulung ist von Vorteil. Gleiches gilt für den Moderator, welcher das Team leiten und lenken muss.
5. Hinweise zu Vorbereitung, Durchführung, Nachbereitung:
   Vorbereitende Arbeiten:

   - Formulierung der Zielstellungen der HAZOP-Studie
   - Formulierung der Systemgrenzen und Schnittstellen zu anderen Anlagenteilen, Betriebsbereichen und zur Umwelt
   - Festlegen der Leitworte (Eine Anpassung der Leitworte während der Sitzungen kann zu unerwünschten Nebeneffekten führen und sollte daher möglichst vermieden werden)
   - Beschaffung von Prozessbeschreibungen, Arbeitsanweisungen, R&I-Schemata und weitere Unterlagen
   - Prüfung der Unterlagen auf Aktualität und Konsistenz (ggf. Aufbereitung hilfreich)
   - Recherche anwendbarer Standards. Regelwerke, Herstellerdokumentationen; Recherche relevanter bereits eingetretene Ereignisse inkl. Beinnahe-Störfalle
   - Vorbereitung der Dokumentation der Studie.
   - Abstimmung der Zeitpläne und Teilnehmerkreise. Bei der Zeitplanung beachten, dass die Dauern der einzelnen Sitzungen und die Taktfolge Beschränkungen unterliegen (sinkende Konzentrationsfähigkeit bei längeren Sitzungen, Tagesgeschäft der Teammitglieder kann nur beschränkt aufgeschoben werden)
   - Organisation geeigneter Räumlichkeiten

Ggf. bietet sich die Erstellung einer Checkliste für vorbereitende Arbeiten an, anhand welcher sichergestellt wird, dass sämtliche Vorbereitungen getroffen werden.

Rolle des Moderators:

- Maßgebliche Vorbereitung der HAZOP-Sitzung;
- Während der Sitzung: Leiten der Diskussion, Gruppendynamiken steuern, Vollständigkeit der Diskussion (und später Dokumentation) prüfen.

Fachliche Voraussetzung des Moderators: Kenntnisse entsprechend Sicherheitsfachkraft

Rolle der Teammitglieder:
Hypothetische Störungen auf Basis möglicher Fehlhandlungen und Fehler bei Mensch und Maschine ersinnen zu können. Ableiten von Vorkehrungen und Maßnahmen

Gliedern des Systems („Noding“):
Komplexere Systeme sollten zur Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit der Analyseergebnisse in Funktionseinheiten bzw. Anlagenteile untergliedert werden. Schnittstellen zwischen den Einheiten bzw. Anlageteilen dürfen dabei natürlich nicht unterschlagen bzw. vernachlässigt werden. Zur Trennung des Systems in geeignete Nodes kann eine erfahrene HAZOP-Team-Leitung sinnvoll sein.

Formulieren der Sollfunktionen:
Sollfunktionen sollten nach Möglichkeit überschaubar und abgeschlossen sein. Zu wenig sowie zu stark detaillierte Funktionen können sich dabei negativ auf den Analyseaufwand sowie auf die Analyseergebnisse (übersehende Gefahrenmöglichkeiten) auswirken. Gleiches gilt für Zusammenfassen bzw. Auslagern von Teilaspekten einer einzelnen Funktion in Teilfunktionen. Die Formulierungen sollten den Erfahrungen der Beteiligten mit dem betrachteten System entsprechen. Sollfunktionen müssen relevante Parameter (Stoff, Menge, Temperatur, Druck, Zeitpunkt, Zeitraum, Ort, Richtung) enthalten. Nicht dokumentierte Parameter können nicht als Abweichung erkannt werden

Anwenden der Leitworte und Prognose von Störungen:
Mögliche Abweichungen vom bestimmungsmäßen Betrieb (d.h. von den Sollfunktionen) werden durch konsequentes Anwenden sämtlicher Leitworte auf sämtliche Funktionen ermittelt. Dabei können unterschiedliche Kombinationen zur gleichen Abweichung führen.

Auffinden der Ursachen:
Primäre Ursachen können im Bereich „Versagen technischer Einrichtungen“, „Ausfall von Energien“ und „menschliche Fehlhandlungen liegen“. Organisatorische Fehler können als den primären Ursachen vorgelagerte Ursache angesehen werden und werden daher mittels HAZOP zumindest nicht direkt adressiert. Im Allgemeinen kann eine Abweichung auf mehrere Ursachen zurückgeführt werden. Umfang und Detaillierungsgrad der Darstellung der Ursachen richten sich dabei auch nach dem Analysezweck (Abbilden nur derjenigen Ursachen, die im eigenen Verantwortungsbereich liegen und entsprechend mit Gegenmaßnahmen versehen werden können vs. möglichst transparente Darstellung sämtlich denkbarer Ursachen, z.B. zum Zwecke der Quantifizierung der Eintrittshäufigkeit der Abweichung). Für umfangreichere Ursachenbäume bietet sich eine Darstellung/Dokumentation mittels Fehlerbaumtechnik an (Vgl. Kapitel 4.9). Aus Sicht des bearbeitenden Teams können einzelne Ursachen als Blackboxen wahrgenommen werden,

was eine Delegation der Ursachenbetrachtung an entsprechendes Fachpersonal bedeutet (gleiches gilt für den nächsten Arbeitsschritt der Abschätzung der Auswirkungen).

Berücksichtigung menschlicher Fehlhandlungen:
Denkbare Fehlhandlungen können unterschiedlichster Art sein. Zur Strukturierung und Systematisierung der Fragestellung nach menschlichen Fehlhandlungen bieten sich die folgenden Kategorien an: Eine geplante Handlung wird nicht vorgenommen. Eine geplante Handlung wird fehlerhaft ausgeführt. Eine nicht geplante Handlung erfolgt. Als gesonderte Kategorie bieten sich Fehlhandlungen Rahmen der Instandhaltungsarbeiten an (Sommer, J. et al. (2008)).

Berücksichtigung umgebungsbedingter Gefahrenquellen und Dominoeffekt (extern->intern):
Klassischerweise werden mit dem HAZOP-Verfahren diejenigen Gefahren betrachtet, welche direkt mit den prozesstechnischen bzw. anlagenbezogenen Eigenschaften verknüpft sind. Maßnahmen aus umgebungsbedingten Gefahren werden zudem häufig auf Betriebsbereichsebene getroffen und sollten daher zentral dokumentiert werden. Lediglich spezifische Fragestellungen, welche sich aus den umgebungsbedingten Gefahrenquellen und zu berücksichtigenden Dominoeffekten für das zu untersuchende Anlagenteil ergeben, sind mit dem HAZOP-Verfahren zu dokumentieren (Sommer, J. et al. (2008)).

Abschätzen der Auswirkungen:
Qualitative Beschreibung der Auswirkungen. Insbesondere ist zu ermitteln, ob ein sicherheitsrelevanter Zustand vorliegt. Quantitative Abschätzungen im Sinne von Ausbreitungs- und Auswirkungsrechnungen sind kein obligatorischer Bestandteil einer HAZOP-Studie. Ggf. müssen jedoch Rechnungen angestellt werden, um das grundlegende Gefahrenpotential ermitteln zu können (z.B.: Kann Szenario xyz dazu führen, dass der Auslegungsdruck überschritten wird?).

Festlegen der Gegenmaßnahmen:
Im Rahmen der HAZOP-Studie werden die Gegenmaßnahmen lediglich ihrer Art nach festgelegt. Konkrete Auslegungsparameter der Gegenmaßnahmen wie Auswahl Sensorik, Datenverarbeitung , Grenzwerte und Schaltpunkte, Dimensionierung von Druckentlastungsystemen etc. wird in der Regel durch entsprechendes Fachpersonal festgelegt. Die beschriebenen Gegenmaßnahmen sollten Informationen zu Sensoren und Aktorik genau benennen (Input für Betriebsanweisungen zu organisatorischen Gegenmaßnahmen bzw. für den Funktionsplan der MSR-Technik). (Sommer, J. et al. (2008)).

Dokumentation:
Die Dokumentation der Analyse erfolgt klassischerweise im Tabellenformat und beinhaltet die Spalten „Abweichung“, „Ursache“, „Auswirkung“, „Gegenmaßnahme“. Weitere Untergliederungen der Spalten bzw. zusätzliche Spalten sind durchaus denkbar und üblich. Unterschiede können ebenso im Grad der Dokumentation der besprochenen Abweichungen, Ursachen, Auswirkungen und Gegenmaßnahmen bestehen. Von einer vollumfänglichen Dokumentation aller besprochenen Szenarien und Gegenmaßnahmen hin zur ausschließlichen Dokumentation identifizierter Schwachstellen sind verschiedenste Ansätze denkbar. Ein Ansatz kann auch sein, lediglich sicherheitsrelevante Szenarien zu dokumentieren. Alle Ansätze bringen ihre Vor- und Nachteile mit (Nachvollziehbarkeit und Aufwand).

Die Dokumentation sollte weiterhin umfassen: Zusammenfassung und Schlussfolgerung, Benutzte Entwurfsunterlagen, betrachtete Teilanlagen, angewendetes Leitwortsystem, Empfehlungen zur Durchführung weiterer Studien, Hinweise an Betrieb und Instandhaltung, Liste der Teammitglieder (ggf. mit Unterschriften).

Die Dokumentation der Analyse kann folgenden Zielen dienen:
Dokumentation der Gefahrenquellen und Gegenmaßnahmen im Rahmen der Erstellung eines Sicherheitsberichtes. Auflisten verbleibender Aufgaben an Planung, Errichtung und Betrieb beteiligtem Personal. Umfassende Dokumentation des Sicherheitskonzeptes der Anlage, anhand welcher neue Fachkräfte in sicherheitstechnische Fragestellungen eingearbeitet werden können.
Auf vollständige und fehlerfreie Mitschriften ist größtmöglicher Wert zu legen.

Zur Dokumentation von Störfallrisikobeurteilungen, die nach dem HAZOP-Verfahren erstellt werden, sind auf der Homepage der BG RCI Formblätter auf der Basis von WORD und EXCEL abrufbar[79].

6. Einführung von HAZOP in einem Unternehmen:

   Festlegung der Anwendungskriterien:

   - Anwendung für alle Anlagenteilen oder nur für „kritische“ oder „komplexe“ Anlagenteile? (Besteht für das Anlagenteil ein detailliertes Regelwerk mit Anforderungen bezgl. umzusetzender Maßnahmen und stimmen die Randbedingungen im Regelwerk mit den Randbedingungen der konkret zu betrachtenden Anlage überein?)
   - Anwendung ab welchem Gefahrenpotential? Welche Art von Auswirkungen sollen betrachtet werden (Sicherheit und Umweltschutz, Qualität, Verfügbarkeit)?
   - Bestehen Anforderungen durch Externe/Dritte wie Kunden, Versicherer oder Behörden?

   Festlegung der Kompetenzen des HAZOP-Teams bzw. der einzelnen Teammitglieder:

   - Bezgl. der im Rahmen der Untersuchungen abgeleiteten Gegenmaßnahmen ist festzulegen, inwiefern die Mitglieder mit einem Beschlussrecht versehen werden sollen (ggf. sind personenspezifische Festlegungen zielführend)

7. Anwendungszeitpunkt (Projektphase):
   Die HAZOP-Studie kann während der Planungsphase von Anlagen sowie bei bereits bestehenden und in Betrieb genommenen Anlagen zur Anwendung kommen. Bei einer Anwendung während der Planungsphase dient sie der Ausarbeitung eines in seinen Grundzügen bereits bestehenden Sicherheitskonzeptes. Unter der Annahme, dass das Grundkonzept in der Phase der Grundplanung (Basic design) erarbeitet wird, bietet sich eine Durchführung der HAZOP-Studie in der sich anschließenden Phase der Detailplanung (Detailed Design) an. Grundsätzlich sollte der Analysezeitpunkt so gewählt werden, dass bereits möglichst viele detaillierte Planungsgrundlagen vorliegen (u.a. R&I-Schemata), andererseits aber noch Möglichkeiten für Verbesserungen gegeben sind.

[79] https://www.bgrci.de/anlagensicherheit/fachwissen/prozesssicherheit/arbeitshilfen

In der ersten Phase eines Produktlebenszyklus (d.h. während Konzeptphase als Vorstufe der Entwicklungsphase) werden typischerweise Studien zu allgemeinen Gefahren im Zusammenhang mit dem Vorhaben betrachtet. Hier können zum Beispiel die HAZID (Hazard Identification) und HARA (Hazard analysis and Risk assessment) als Analysetechniken zum Einsatz kommen. Die Fragestellungen während der Konzeptphase adressieren insbesondere die Thematik möglicher Wechselwirkungen mit der Umgebung (inkl. Dominoeffekte). Diese Analysen können dann als eine Erkenntnisquelle bei der Durchführung der HAZOP-Studie herangezogen werden.

Die HAZOP wiederum kann wiederum Ausgangspunkt detaillierterer Betrachtung einzelner Prozesse sein, welche Im Rahmen einer HAZOP-Studie unter Umständen nicht ausreichend detailliert betrachtet können werden, aber nennenswerte Gefahren in sich tragen (Beispielsweise: Inbetriebnahme und Inbetriebsetzung, An- und Abfahren, Instandhaltungsprozesse, Anlagenstilllegung etc.).

Prüfungen und ggf. Anpassungen der HAZOP-Studie können während der Betriebsphase durch unterschiedliche Ursachen notwendig werden: Änderungen und/oder Ergänzungen im Anlagendesign, veränderte Prozessabläufe, aufgetretene Ereignisse (intern oder extern), turnusmäßige Überprüfung (mind. alle 5 Jahre -> StörfallV).

8. Aufwandsabschätzungen
   Dauer der Durchführung des HAZOP-Workshops (gemäß Sommer, J. et al. (2008):

- 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

Das Formulieren eines „Exitkriteriums“ (z.B. „ist die Abweichung sicherheitsrelevant“ kann den Aufwand reduzieren. Ebenso kann das geeignete Clustern von Prozessen in Mehrzweckanlagen den Analyseaufwand reduzieren.

Darüber hinaus 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.

9. Verweise auf relevante Normen, Richtlinien und weitere Literaturhinweise:

Tabelle 72: Literaturhinweise HAZOP

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

Literatur	Thematisierte Aspekte
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	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

10. Restriktionen und Kritikpunkte

- Hoher Aufwand, bzw. hohe Personalbindung: Zur Reduktion des Aufwandes ist eine Vertauschung der Arbeitsschritte des HAZOP-Verfahrens denkbar, so dass nach der der Ermittlung denkbarer Störungen zunächst in Richtung mögliche Auswirkungen analysiert wird, um so feststellen zu können, ob es sich um einen sicherheitsrelevantes Szenario handelt. Es wenn dies bestätigt wurde, wird die Ursachenanalyse und der abschließende Schritt der Festlegung von Gegenmaßnahmen durchgeführt.
- Das Einfehlertoleranzprinzip, d.h. das Nichtberücksichtigen von Mehrfachfehlern kann zur Unterschätzung von Risiken führen (Kompensation durch Anwendung FTA/ETA denkbar)
- Unzureichendes Nachverfolgen der Schnittstellen zwischen den Anlagenteilen bzw. den Verfahrenstechnischen Einheiten kann gerade bei stark vernetzten Systemen eine Fehlerquelle darstellen. Hinweis zur grundsätzlichen Herangehensweise daher: Ursachen einer möglichen Abweichung werden nur im aktuell zu untersuchenden Knoten (Node) gesucht, Auswirkungen der Abweichung hingegen werden im und außerhalb des Knotens gesucht..

11. Verwendung der Arbeitsergebnisse

- Bewerten vorhandener Maßnahmen und Entscheidung über angemessene weitere Gegenmaßnahmen

12. Beispiele

- Siehe Literaturhinweise

8.2.2 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.

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 eine weites Anwendungsfeld zu erarbeiten (siehe das mittlerweile mit einem Sperrvermerk versehende VdTÜV (1990)), finden in der Praxis hauptsächlich unternehmensintern erstellte Checklisten Anwendung. Diese spiegeln jedoch die Erfahrungswerte der Mitarbeiter/des Unternehmens wieder und sind somit subjektiv.

Grundsätzlich gilt: Checklisten können nie den Sachverstand/gesunden Menschenverstand ersetzen. Mitdenken ist immer Pflicht!

Beispiele

Tabelle 73: Beispielhafte Checkliste für exotherme Reaktionen der IVSS-Broschüre "Das PAAG- / HAZOP-Verfahren und weitere praxisbewährte Methoden“

Chemische Energie exothermer Reaktionen und thermisch sensibler Stoffe	Ja	Nein	Nicht zu treffend
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 Chemikalienverwechselungen?			

Ein weiteres Beispiel ist eine Checkliste für Mehrzweckanlagen („Wesentliche prozessspezifische Überprüfungspunkte zu systematischen Sicherheitsbetrachtungen bei Mehrzweckanlagen“) aus dem Hause CMK, welche u.a. im Kontext der Szenarienanalyse/HAZOP-Master Anwendung findet. Diese Checkliste kann dem Anhang C entnommen werden.

Ein weiteres Beispiel ist die Checkliste (Fragenkatalog) der sog. Wacker-Analyse aus dem Hause CMK - Compliance Management Kappelmaier. 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. Dieser Fragenkatalog kann dem Anhang E entnommen werden.

8.2.3 Layer of Protection Analysis

Auswahlkriterien:

1. Einsatzzweck und Zielstellung des Verfahrens:
   Bewertung (hauptsächlich) präventive Schutzmaßnahmen von Einzelrisiken prozessbedingter Störfallszenarien in prozesstechnischen Anlagen. Keine integrale Bewertung im Sinne eines Individualrisikos oder gesellschaftlichen Risikos. Keine Eignung für Notfallplanung oder Maßnahmen der Flächenwidmungsplanung. Klassifizierung von PLT-Sicherheitseinrichtungen.
2. Eignung des Verfahrens in Abhängigkeit vom Anlagentyp:
   Alle Anlagenarten.
3. Eignung für Arten von Gefahrenquellen: Grundsätzlich können sämtliche Arten von Gefahrenquellen mit dem Verfahren abgebildet werden (die Gefahrenanalyse ist jedoch nicht primäres Ziel der LOPA).

Anwendungshinweise:

4. Benötigte Qualifikationen und Kompetenzen für die Anwendung, sinnvolle Teamzusammensetzungen:
   Abhängig davon, ob LOPA auf eine bereits ausgeführte HAZOP, FMEA oder ähnlichem aufbaut, sind entsprechende Teamzusammensetzungen notwendig. Im Falle keine entsprechenden Analysen verfügbar sind und entsprechende Eingangsinformationen erst erarbeitet werden müssen, gelten Aussagen vgl. zur Durchführung einer HAZOP (siehe Kapitel 8.1.6)
5. Hinweise zu Vorbereitung, Durchführung, Nachbereitung:

   Vorbereitende Arbeiten:
   Festlegung von Risikoakzeptanzkriterien (siehe hierzu die beispielhaften Risikomatrizen in Kapitel 4.6). Für weiterführende Hinweise, nach welchen Gesichtspunkten Risikoakzeptanzgrenzwerte festgelegt werden können, wird auf das Kap. 6.5 verwiesen.

   Auffinden der Ursachen: (siehe Punkt 3 „Eignung für Arten von Gefahrenquellen“ oben)

   Dokumentation:
   Die Ergebnisse der LOPA können tabellarisch protokolliert werden. Berechnungen der Barrierenzuverlässigkeiten sind transparent darzustellen.
   Die Dokumentation sollte weiterhin umfassen: Zusammenfassung und Schlussfolgerung, benutzte Entwurfsunterlagen, betrachtete Teilanlagen, Empfehlungen zur Durchführung weiterer Studien, Hinweise an Betrieb und Instandhaltung, Liste der Teammitglieder (ggf. mit Unterschriften). Bei der Formulierung der Komponenten und Ereignisse ist auf Konsistenz zu weiteren Unterlagen und Analysen zu achten.

Anwendungszeitpunkt (Projektphase):
Alle Projektphasen. Tendenziell hängt die Detailierungstiefe vom Projektfortschritt ab (Basic design, Detail design).

6. Aufwandsabschätzungen
   Der Aufwand ist stark abhängig von den bereits vorliegenden Informationen. Sind sämtliche Informationen bereitgestellt, können diese relativ zügig in der LOPA abgebildet werden.
7. Verweise auf relevante Normen, Richtlinien und weitere Literaturhinweise

Tabelle 74: Literaturhinweise LOPA-Verfahren

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

8. Restriktionen und Kritikpunkte

- Quantifizierungen der Versagenswahrscheinlichkeiten der Gegenmaßnahmen (siehe auch Kapitel 8.1.4)

9. Beispiele

- Siehe Literaturhinweise

8.2.4 Fehlerbaumanalyse

Auswahlkriterien:

1. Einsatzzweck und Zielstellung des Verfahrens:
   Analyse der Ursachen und ggf. Quantifizierung der Eintrittshäufigkeit eines unerwünschten Ereignisses. Überprüfung bestehender und ggf. Festlegung weiterer Vorkehrungen und Maßnahmen.
2. Eignung des Verfahrens in Abhängigkeit vom Anlagentyp:
   Für alle Anlagenarten geeignet. Mehrwert entsteht vor allem bei der Betrachtung redundanter Strukturen bzw. von Strukturen mit Rückfallebenen aufgrund des mit der FTA-Technik verknüpften mathematischen Kalküls zur Berechnung der Zuverlässigkeit solcher Strukturen.
3. Eignung für Arten von Gefahrenquellen: Grundsätzlich können sämtliche Arten von Gefahrenquellen mit dem Verfahren betrachtet werden.

Anwendungshinweise:

4. Benötigte Qualifikationen und Kompetenzen für die Anwendung, sinnvolle Teamzusammensetzungen:
   Abhängig davon, ob die Fehlerbaumanalyse auf eine bereits ausgeführte HAZOP, FMEA oder ähnliches aufbaut, oder aber die Fehlerursachen für ein zu betrachtendes TOP-Ereignis erst ermittelt und analysiert werden müssen, sind entsprechende Teamzusammensetzungen notwendig. Sofern sämtliche für die Erstellung und Berechnung der Fehlerbäume notwendigen Eingangsinformationen sind bereits in der HAZOP, FMEA, etc. abgebildet, kann diese durch eine einzelne (geschulte) Person durchgeführt werden. Sofern keine entsprechenden Analysen verfügbar sind und die erforderlichen Eingangsinformationen erst erarbeitet werden müssen, gelten Aussagen vgl. zur Durchführung einer HAZOP (siehe Kapitel 8.2.1)
5. Hinweise zu Vorbereitung, Durchführung, Nachbereitung:

   Vorbereitende Arbeiten:
   Welche vorbereitenden Arbeiten notwendig sind, hängt davon ab, welche Informationen zu den Fehlerursachen zum Zeitpunkt der Durchführung der Fehlerbaumanalyse bereits ausgearbeitet worden sind . Grundsätzlich sind folgende Vorbereitungen zu treffen: Formulierung der Zielstellungen der FTA-Studie, Formulierung des (der) Top-Ereignisse(s), Formulierung des Analyseumfangs (Berücksichtigte Arten von Gefahrenquellen, berücksichtigte Teilsysteme).

   Auffinden der Ursachen:
   Die Analyse möglicher Ursachen des Top-Ereignisses kann beliebig breit und beliebig tief erfolgen. Einerseits können beliebige Gefahrenquellen im Fehlerbaum abgebildet werden, seien es betriebliche oder umgebungsbedingte Gefahrenquellen oder Eingriffe Unbefugter. Andererseits kann für jede ermittelte Ursache mit einer Wie- oder Warum-Frage eine tieferliegende Ursache ermittelt werden. Die zielführende Analysetiefe ergibt auch immer durch den Analysekontext. Folgende Hinweise zur Betrachtungstiefe werden in der EN 61025 gegeben:

- Ein Ereignis, das unabhängig, bzw. kein Mehrfachereignis ist, muss nicht zwingend weiter untergliedert werden

- Der Mehrwert der Granulierung/Zergliederung eines technischen Erzeugnisses (Aggregat, Gerät, Maschine, …) in seine Bestandteile und tiefer in einzelne Fehlermodes der Bestandteile hängt einerseits davon ab, auf welcher Ebene verlässliche Zuverlässigkeits- und Instandsetzbarkeitskennwerte vorliegen und hängt andererseits davon ab, ob die FTA die Plattform dafür sein soll, über eventuelle Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen der einzelnen Fehlermodes zu entscheiden. Je weiter granuliert wird, umso präziser kann der Fehlerbaum modelliert werden, da nicht immer alle denkbaren Failure Modes eines Aggregats Relevanz für das zu betrachtende TOP-Ereignis haben müssen (Beispiel: Ventil defekt kann granuliert werden nach Ventil defekt offen und Ventil defekt geschlossen). Im Projektengineering ist es nicht unüblich, mit voranschreitenden Projektphasen (Angebot, Basic Design, Detailed Design, …) Fehlerbäume zunehmend zu granulieren, bzw. Erkenntnisse aus HAZOP/FMECA, etc. sukzessive im Fehlerbaum abzubilden.
- Dieselben Ereignisse können sich im gleichen, aber auch in unterschiedlichen Fehlerbäumen wiederholen. Teilweise erlauben Softwareprogramme Querreferenzierungen, so dass Ereignisse nicht doppelt eingepflegt werden müssen und gleichzeitig Konsistenz gewährleistet wird.

Festlegen der Gegenmaßnahmen:
Inwiefern die Fehlerbaumanalyse dazu dienen soll, (weitere) Gegenmaßnahmen festzulegen, muss im Rahmen der Formulierung der Zielstellung geklärt werden.

Dokumentation:
Fehlerbäume können mittels spezieller Fehlerbaumprogramme erstellt werden, welche in der Regel pdf-Export-Schnittstellen bereitstellen. Zusätzlich zu den Fehlerbäumen werden häufig die Basisereignisse inklusive hinterlegter Zuverlässigkeits- und Instandsetzungsparameter im Tabellenformat separat dokumentiert. Eine weitere, häufige anzutreffende Dokumentation sind die sogenannten „minimalen Schnitte“ des Fehlerbaums[80]. Sollten im Fehlerbaum Ausfälle gemeinsamer Ursache (Common-Cause Failures) abgebildet sein und diese mit beta-Faktoren hinterlegt sein, ist zu dokumentieren, wie diese hergeleitet worden sind.
Die Dokumentation sollte weiterhin umfassen: Zusammenfassung und Schlussfolgerung, benutzte Entwurfsunterlagen, betrachtete Teilanlagen, Empfehlungen zur Durchführung weiterer Studien, Hinweise an Betrieb und Instandhaltung, Liste der Teammitglieder (ggf. mit Unterschriften). Bei der Formulierung der Komponenten und Ereignisse im Fehlerbaum ist auf Konsistenz zu weiteren Unterlagen und Analysen zu achten.

6. Anwendungszeitpunkt (Projektphase):
   Alle Projektphasen. Tendenziell hängt die Detaillierungstiefe vom Projektfortschritt ab (Basic design, Detail design). Auch im Betrieb kann die Fehlerbaumanalyse angewandt werden, z.B. im Kontext einer Ursachenanalyse eines (Beinahe-)Störfalls.

7. Aufwandsabschätzungen
   Der Aufwand ist stark abhängig von den bereits vorliegenden Informationen. Sind sämtliche Informationen bereitgestellt, können diese relativ zügig im Fehlerbaum abgebildet werden.

[80] Eine Teilmenge von Elementarereignissen eines Fehlerbaums heißt „Schnitt (des Fehlerbaums)“, wenn es folgende Eigenschaft hat: Aus dem zeitgleichen Vorliegen aller Elementarereignisse der Teilmenge folgt der Eintritt des TOP-Ereignisses (des Fehlerbaums). Ein Schnitt heißt „minimaler Schnitt“, wenn keines der Elementarereignisse des Schnittes aus diesem entfernt werden kann, oder das die verbleibende Teilmenge die Schnitteigenschaft verliert. Mit anderen Worten beschreiben die minimalen Schnitte eines Fehlerbaums minimale Ausfall- bzw. Ereigniseintrittskombinationen, die zum TOP-Ereignis führen.

Vergleichsweise großen Aufwand bedeuten eher die Schulung des Personals in der Anwendung in der Fehlerbaumtechnik, sowie die Akquise eines geeigneten Softwareprogrammes (kleinere Fehlerbäume können auch per Hand bzw. mit kostenfreien Online-tools gerechnet werden[81]).

8. Verweise auf relevante Normen, Richtlinien und weitere Literaturhinweise:

Tabelle 75: Literaturhinweise Fehlerbaumanalyse

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 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/dam/bafu/de/dokumente/stoerfallvorsorge/uv-umweltvollzug/methodikbeispielfuereinerisikoermittlungeinerfluessiggas-tankanl.pdf.download.pdf/methodikbeispielfuereinerisikoermittlungeinerfluessiggas-tankanl.pdf	Anwendung der Fehlerbaum- und Ereignisbaumanalysemethodik für Flüssiggas-Tankanlagen im Kontext der schweizerischen Störfall-Verordnung

9. Restriktionen und Kritikpunkte

- Quantifizierungen der Eintrittshäufigkeiten (siehe auch Kapitel 8.1.4)
- 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 für das TOP-Ereignis 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

[81] https://reliabilityanalyticstoolkit.appspot.com/

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.

- Die Fehlerbaumanalyse muss durch einen geschulten Mitarbeiter durchgeführt werden. Bei größeren/komplexeren Fehlerbäumen wird Anschaffung eines speziellen Softwareprogrammes notwendig.

10. Beispiele

- Siehe Literaturhinweise oben
- Gmünder, F. et al. (1992): Rahmenbericht Flüssiggas-Tankanlagen – zum Kurzbericht und zur Risikoermittlung im Hinblick auf die Störfallvorsorge
- Wettstein, W. et al. (2023): Störfallvorsorge bei Kälteanlagen. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Abteilung Gefahrenprävention, Sektion Störfall- und Erdbebenvorsorge

8.2.5 Ereignisbaumanalyse

Auswahlkriterien:

1. Einsatzzweck und Zielstellung des Verfahrens:
   Analyse der Folgen und ggf. Quantifizierung der Eintrittshäufigkeiten der Folgen eines unerwünschten Ereignisses. Überprüfung bestehender und ggf. Festlegung weiterer Vorkehrungen und Maßnahmen.
2. Eignung des Verfahrens in Abhängigkeit vom Anlagentyp:
   Alle Anlagenarten.
3. Eignung für Arten von Gefahrenquellen: N/A. (Nicht Anwendbar. Ereignisbäume werden primär zu Untersuchung denkbarer Auswirkungen von Störfallereignissen bzw. von Störungen verwendet. Eine Untersuchung denkbarer Ursachen bzw. Gefahrenquellen erfolgt mit der Ereignisbaumanalyse nicht)

Anwendungshinweise:

4. Benötigte Qualifikationen und Kompetenzen für die Anwendung, sinnvolle Teamzusammensetzungen:
   Abhängig davon, ob die Ereignisbaumanalyse auf eine bereits ausgeführte HAZOP, FMEA oder ähnlichem aufbaut, oder aber die Fehlerfolgen für ein zu betrachtendes TOP-Ereignis erst ermittelt und analysiert werden müssen, sind entsprechende Teamzusammensetzungen notwendig. Im Falle keine entsprechenden Analysen verfügbar sind und entsprechende Eingangsinformationen erst erarbeitet werden müssen, gelten Aussagen vgl. zur Durchführung einer HAZOP (siehe Kapitel 8.2.1)
5. Hinweise zu Vorbereitung, Durchführung, Nachbereitung:

   Vorbereitende Arbeiten: Welche vorbereitenden Arbeiten notwendig sind, hängt davon ab, welche Informationen zu den Fehlerfolgen zum Zeitpunkt der Durchführung der Ereignisbaumanalyse bereits ausgearbeitet worden sind (siehe Punkt 6 oben). Grundsätzlich sind folgende Vorbereitungen zu treffen: Formulierung der Zielstellungen der ETA-Studie, Formulierung des (der) Top-Ereignisse(s), Formulierung des Analyseumfangs (Berücksichtigte Schutzziele- und -güter).

Auffinden der Ursachen: N/A (siehe Punkt 3 „Eignung für Arten von Gefahrenquellen“ oben)

Festlegen der Gegenmaßnahmen:
Inwiefern die Ereignisbaumanalyse dazu dienen soll, (weitere) Gegenmaßnahmen festzulegen, muss im Rahmen der Formulierung der Zielstellung geklärt werden.

Dokumentation:
Ereignisbäume können mittels spezieller Ereignisbaumprogramme erstellt werden, welche in der Regel pdf-Export-Schnittstellen bereitstellen. Berechnung der Barrierenzuverlässigkeiten sind transparent darzustellen.
Die Dokumentation sollte weiterhin umfassen: Zusammenfassung und Schlussfolgerung, benutzte Entwurfsunterlagen, betrachtete Teilanlagen, Empfehlungen zur Durchführung weiterer Studien, Hinweise an Betrieb und Instandhaltung, Liste der Teammitglieder (ggf. mit Unterschriften). Bei der Formulierung der Komponenten und Ereignisse im Ereignisbaum ist auf Konsistenz zu weiteren Unterlagen und Analysen zu achten.

Anwendungszeitpunkt (Projektphase):
Alle Projektphasen. Tendenziell hängt die Detailierungstiefe vom Projektfortschritt ab (Basic design, Detail design).

6. Aufwandsabschätzungen
   Die Aufwand ist stark abhängig von den bereits vorliegenden Informationen. Sind sämtliche Informationen bereitgestellt, können diese relativ zügig im Ereignisbaum abgebildet werden. Vergleichsweise großen Aufwand bedeuten eher die Akquise eines geeigneten Softwareprogrammes (kleinere Ereignisbäume können auch per Hand erstellt und gerechnet werden).
7. Verweise auf relevante Normen, Richtlinien und weitere Literaturhinweise:

Tabelle 76: Literaturhinweise Ereignisbaumanalyse

Literatur	Thematisierte Aspekte
Verfahren zur Analyse der Zuverlässigkeit - Ereignisbaumanalyse (ETA) (IEC 62502:2010); Deutsche Fassung EN 62502:2010 Kostenpflichtig bei den entsprechenden Verlagen erhältlich	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.
Reference Manual Bevi Risk Assessments (QRA-Verfahren in den Niederlanden); herausgegeben vom National Institute of Public Health and the Environment (RIVM);	Generische Stofffreisetzungsszenarien (Reference Manual; Module C – Kap. 3.3 ff) Ereignisbäume für Stofffreisetzungen entflammbarer Stoffe,

Literatur	Thematisierte Aspekte
Die Version 3.2 vom 1.7.2009 ist als englischsprachiges Dokument kostenfrei verfügbar (auf Niederländisch sind neuere Versionen verfügbar): https://www.rivm.nl/documenten/reference-manual-bevi-risk-assessments-version-32	Verzweigungswahrscheinlichkeiten (Reference Manual; Module B – Kap. 3.4.6)
RISK CALCULATIONS MANUAL (QRA-Verfahren in Flandern); herausgegeben vom flämischen Department für Umwelt und Gesundheit (Department Omgeving) Die Version 2.0 vom 1.4.2019 ist als englischsprachiges Dokument kostenfrei verfügbar (auf Niederländisch sind neuere Versionen verfügbar): https://omgeving.vlaanderen.be/sites/default/files/2021-10/2020%2007%2013%20-%20Risk%20Calculations%20Manual.pdf	Generische Stofffreisetzungsszenarien (Risk Calculation Manual; Module 5 ff) Ereignisbäume für Stofffreisetzungen entflammbarer Stoffe, Verzweigungswahrscheinlichkeiten (Risk Calculation Manual; Module 14.4 ff
ARAMIS Final user Guide Appendix – Appendix 6 of deliverable D.1.C.: Generic event trees generated Englischsprachig, kostenfrei: (Rückmeldung vom EC JRC über Ort/Plattform der Bereitstellung steht noch aus)	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).
Methodikbeispiel für eine Risikoermittlung einer Flüssiggas-Tankanlage (Störfallverordnung); Bundesamt für Umwelt BAFU, 1996 Kostenfrei verfügbar: https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/stoerfallvorsorge/uv-umwelt-vollzug/methodikbeispielfuereinerisikoermittlungeinerfluessiggas-tankanl.pdf.download.pdf/methodikbeispielfuereinerisikoermittlungeinerfluessiggas-tankanl.pdf	Anwendung der Fehlerbaum- und Ereignisbaumanalysemethodik für Flüssiggas-Tankanlagen im Kontext der schweizerischen Störfall-Verordnung

8. Restriktionen und Kritikpunkte

- Quantifizierungen der Versagenswahrscheinlichkeiten der Gegenmaßnahmen und damit der Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisbaum (siehe auch Kapitel 8.1.4)

9. Beispiele

- Siehe Literaturhinweise
- Gmünder, F. et al. (1992): Rahmenbericht Flüssiggas-Tankanlagen – zum Kurzbericht und zur Risikoermittlung im Hinblick auf die Störfallvorsorge
- Wettstein, W. et al. (2023): Störfallvorsorge bei Kälteanlagen. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU), Abteilung Gefahrenprävention, Sektion Störfall- und Erdbebenvorsorge

8.2.6 Bow-Tie-Analyse

Auswahlkriterien:

1. Einsatzzweck und Zielstellung des Verfahrens:
   Im Fokus steht die Betrachtung der Barrieren und wie mögliche Degradierungen dieser Barrieren gemanagt bzw. vorgebeugt werden können. Mit den Bow-Ties wird eine Verknüpfung der zu analysierenden Anlage mit zugrundeliegenden Sicherheitsmanagementsystem angestrebt.
   Typischerweise geht der Anwendung der Bow-Tie-Analyse eine Gefahrenanalyse voraus. 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.
2. Eignung des Verfahrens in Abhängigkeit vom Anlagentyp: Keine Einschränkungen
3. Eignung des Verfahrens in Abhängigkeit der Arten von Gefahrenquellen: Grundsätzlich können sämtliche Arten von Gefahrenquellen mit dem Verfahren abgebildet werden (die Gefahrenanalyse ist jedoch nicht primäres Ziel der Bow-Tie-Analyse).

Anwendungshinweise:

4. Benötigte Qualifikationen und Kompetenzen für die Anwendung, sinnvolle Teamzusammensetzungen:
   -(Vergleichbar HAZOP)
5. Hinweise zu Vorbereitung, Durchführung, Nachbereitung:

Im Zuge der Aktualisierung eines Bow-Tie-Analyse schlägt das Center for Chemical Process Safety (CCPS) vor, folgende Fragen zu stellen (Johnson (2018)):

1. Gib es Änderungen im Kontext unter dem die Barrieren funktionieren müssen (z. B. neue Gefahrenquellen, Änderungen im verfahrenstechnischen Prozess oder in der Umgebung)?
2. Wie ist der aktuelle Barrierezustand?
   a. Funktionieren alle bestehenden Barrieren wie vorgesehen? Wie ist der Status der Barriere im Vergleich zur Designabsicht oder zum Leistungsstandard?
   b. Sind Barrieren vorübergehend oder langfristig nicht verfügbar oder deaktiviert?
3. Ist es sicher, den Betrieb fortzusetzen, oder sollte der Betrieb eingestellt werden?
4. Sind sofortige Maßnahmen zur Verstärkung der Barrieren erforderlich oder sollten vorübergehend zusätzliche Barrieren hinzugefügt werden, um den Weiterbetrieb zu ermöglichen?
5. Wie werden die längerfristigen Maßnahmen priorisiert, um den Zustand der Barriere wieder dem Entwurfsziel anzupassen oder den Leistungsstandard zu erfüllen? In Ausnahmefällen könnten zusätzliche Hindernisse vorgeschlagen werden.

Konsequenzen aus der Umsetzung des Managementsystems (z.B. Training, Kompetenz, Audits, Inspektionen und Instandhaltung) sollten nicht als eigenständige Barrieren angesehen werden. Teilweise bietet sich eine Abbildung als „Degradation controls“ zur Sicherstellung der Effektivität der Barrieren an. Eine konsequente Abbildung sämtlicher Controls für sämtliche Barrieren würde zu einer Überladung der Analyse führen.

Eine das Top-Ereignis-verhindernde Barriere darf nicht mit einer Gefahrenquelle verwechselt werden.

Die Bewertung von Barrieren sollten gemäß CCPS weder anhand eines binären „pass or fail"-Kriteriums, noch mittels eines numerischen Scoring-System erfolgen. Der Mittelweg mittels „colour coding" wird als zielführend angesehen.

Tabelle 77: Barrierenzustände nach CCPS/EI

Zustand	Farbcodierung
Einsatzbereit, verfügbar und effektiv	Grün
Einsatzbereit und verfügbar, aber mit eingeschränkter Leistungsfähigkeit	Gelb
Nicht einsatzbereit, nicht verfügbar	Rot
Keine betrieblichen Informationen verfügbar	Weiß
Nicht einsatzbereit, abgestellt, deaktiviert	Schwarz

6. Einführung des Bow-Tie-Verfahrens in einem Unternehmen:
   Bei der Einführung der Bow-Tie-Methode in ein Unternehmen bietet es sich an, mit zunächst 2-3 Bow-Ties zu starten und Erfahrungswerte zu sammeln, bevor die Methode auf den gesamten Betrieb/Anlagenbestand skaliert wird. Für eine größere Raffinerie oder Chemieanlage ist mit ca. 20-30 zu entwickelnden Bow-Ties für Prozessanlagen, Lagerung und Transport zu rechnen (Johnson (2018))).
7. Anwendungszeitpunkt (Projektphase):

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 (Johnson (2018)):

- 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.
- Sicherheitsnachweis (Safety Case): Unterstützung der Entwicklung und Einreichung des Safety Case. Die Zielgruppe ist a) der Regulator, von dem die Genehmigung einholen ist und b) die Benutzer des Safety Case während der Betriebsphase.
- 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.

8. Aufwandsabschätzungen:
   (keine Aussage möglich)

9. Verweise auf relevante Normen, Richtlinien und weitere Literaturhinweise:

Tabelle 78: Literaturhinweise Bow-Tie-Analyse

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
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
Fiorentini L., Marmo L., 2018, Sound Barriers Management in Process Safety: Bow-tie Approach According to the First Official AIChE - CCPS Guidelines, Chemical Engineering Transactions, 67, 253-258. https://www.energyinst.org/__data/assets/pdf_file/0005/726377/Bow-Tie-for-Covid-19-EI-and-CCPS-April-9-2020.pdf 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
Johnson. M., Manton, M., Cowley, C., Scanlon, M. (2018) Bow Ties in Risk Management; using the new CCPS-EI book to avoid pitfalls, 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)

8.2.7 Szenarienanalyse /HAZOP-Master

Aufwand:

Die HAZOP wird als aufwendiger als die Szenarienanalyse eingeschätzt, gerade für komplexere Anlagen (z.B. Mehrzweckanlagen).

Ein wichtiger zusätzlicher Aspekt ist, ob es sich um Konti- oder Batch-Prozesse und besonders, ob es sich um eine Ein- oder Mehrzweckanlage handelt.

Letztere haben oft eine Vielzahl an möglichen/genehmigten Prozessen, wobei dann bei jedem Prozess für einen Apparat ganz verschiedene

- Stoffe und Stoffmengen,
- Prozessparameter (Drücke, Temperaturen),
- Prozessschritte (z.B. chemische Umsetzungen, Eindicken) und
- verbundene Einheiten

relevant sein können.

Sollen für solche Systeme systematische Störfallrisikobeurteilungen durchgeführt werden, so besteht für alle Verfahren und Methoden deren Startpunkt die möglichen Fehler sind, das besondere Problem darin, dass ein und derselbe Fehler in unterschiedlichen Prozessen ganz verschiedene Auswirkungen haben kann. Somit müsste jeder genehmigte Prozess gesondert betrachtet werden, was mit einem vertretbaren Aufwand kaum zu schaffen ist.

Folglich spricht dieser Aspekt bei Mehrzweckanlagen für Instrumente, die beim zu verhindernden Ereignis ansetzen (z.B. ETA oder HAZOP-Master).

8.2.8 QRA-Verfahren in den Niederlanden und Flandern

Die QRA-Verfahren in den Niederlanden und Flandern dienen primär der Berechnung des Individualrisikos und des gesellschaftlichen Risikos. Bauleitplanung und externe Notfallplanung werden in Deutschland jedoch nach anderen rechtlichen Vorgaben durchgeführt. Eine vollumfängliche Anwendung der QRA-Verfahren wird für Betriebe, die dem deutschen Störfallrecht unterliegen, daher nicht empfohlen.

Die QRA-Verfahren stellen jedoch umfangreiche, regelmäßig aktualisierte Wissensdatenbanken dar und können somit als Erkenntnisquellen bzw. Arbeitshilfen herangezogen werden:

- Generische Stofffreisetzungsszenarien
- Generische Fehler- und Ereignisbäume
- Generische Ausfallraten, Eintrittshäufigkeiten und Zuverlässigkeiten von Barrieren
- Modelle und Parameter für Ausbreitungsrechnungen

Tabelle 79: Literaturhinweise QRA-Verfahren in den Niederlanden und Flandern

Literatur	Thematisierte Aspekte
Reference Manual Bevi Risk Assessments (QRA-Verfahren in den Niederlanden); herausgegeben vom National Institute of Public Health and the Environment (RIVM); Die Version 3.2 vom 1.7.2009 ist als englischsprachiges Dokument kostenfrei verfügbar (auf Niederländisch sind neuere Versionen verfügbar): https://www.rivm.nl/documenten/reference-manual-bevi-risk-assessments-version-32	Generische Stofffreisetzungsszenarien (Reference Manual; Module C – Kap. 3.3 ff) Ereignisbäume für Stofffreisetzungen entflammbarer Stoffe, Verzweigungswahrscheinlichkeiten (Reference Manual; Module B – Kap. 3.4.6)
RISK CALCULATIONS MANUAL (QRA-Verfahren in Flandern); herausgegeben vom flämischen Department für Umwelt und Gesundheit (Department Omgeving) Die Version 2.0 vom 1.4.2019 ist als englischsprachiges Dokument kostenfrei verfügbar (auf Niederländisch sind neuere Versionen verfügbar): https://omgeving.vlaanderen.be/sites/default/files/2021-10/2020%2007%2013%20-%20Risk%20Calculations%20Manual.pdf	Generische Stofffreisetzungsszenarien (Risk Calculation Manual; Module 5 ff) Ereignisbäume für Stofffreisetzungen entflammbarer Stoffe, Verzweigungswahrscheinlichkeiten (Risk Calculation Manual; Module 14.4 ff

8.2.9 ARAMIS

Eine gesamtheitliche, vollumfängliche Anwendung des ARAMIS-Verfahrens wird aus Sicht der Forschungsnehmenden aufgrund der Komplexität und der Vielfalt der adressierten Themen (Gefahren- und Szenarienanalyse, Beurteilung des Sicherheitsmanagements, Auswirkungsrechnungen inkl. Erstellung von Severity- und Vulnerability maps) in den meisten Fällen als nichtzielführend angesehen. Aufgrund des modularen Aufbaus des Verfahrens und der

thematisch aufgegliederten Anhänge der Verfahrensbeschreibung können diese als Erkenntnisquellen bzw. Arbeitshilfe(n) herangezogen werden:

- Generische Stofffreisetzungsszenarien
- Generische Fehler- und Ereignisbäume,
- Generische Ausfallraten, Eintrittshäufigkeiten und Zuverlässigkeiten von Barrieren
- Checklisten für Barrieren,
- Scoring-Verfahren zur Evaluierung der Effektivität des SMS

ARAMIS vereint viele Ansprüche und dadurch entsteht eine umfangreiche, nicht überall vollständige/korrekte Kompromisslösung. Die mit dem Verfahren bereitgestellten Informationen sind daher teils kritisch zu hinterfragen:

- Die ARAMIS-Szenarien sind sehr brandlastig, das Thema Exothermie erscheint unterrepräsentiert
- Die vorgeschlagenen „Critical Events“ scheinen nicht ganz vollständig zu sein (Beispiel: Das „Critical Event“ „Decompostion“ wird nur für Feststoffe vorgeschlagen)
- Die generische Fehlerbäume in ARAMIS sind grundsätzlich sehr gut und detailliert, wenn doch an einzelnen Stellen etwas unspezifisch (Beispiel "Human error" als erste Ursache. Welcher Art ist dieser Error?)

8.2.10 Zusammenhänge zwischen den Analysetechniken, Kombinationsmöglichkeiten

Zusammenhang zwischen HAZOP und weiteren Analysetechniken:

- Häufig anzutreffen sind erweiterte Leitwortsysteme, welche Fragestellungen adressieren sollen, welche 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. Ob die Kombination der beiden Techniken FTA und ETA treffender als Ergänzung oder als Alternative zur HAZOP-Studie charakterisiert werden kann, ist umstritten. 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. Weitere Unterschiede bestehen darin, dass a) mittels HAZOP-Fragentechnik die Analysen mehr geführt werden und b) die Analyseausgangspunkte unterschiedlich sind (HAZOP: Abweichungen vom bestimmungsmäßen Betrieb, FTA/ETA: TOP-Ereignis (z.B.: Verlust Kontrolle über den Prozess oder Versagen eine Barriere/eines komplexen technischen Systems)).

Schlussendlich ist die Wahrnehmung der Unterschiedlichkeit zwischen den Methoden nicht ausschließlich auf methodeninhärente Eigenschaften zurückzuführen, sondern liegt auch ein Stück weit 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.

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 (FMECA) 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. Hierbei ist insbesondere auf Konsistenz in der Beschreibung der Failure Modes/Basisereignisse sowie in den Zuverlässigkeits-, Instandhaltbarkeits- bzw. Verfügbarkeitsangaben zu achten.

Das dem Schlussbericht beiliegende Tutorial „Empfehlungen und Hilfestellungen zur Auswahl und Anwendung Ausgewählter Verfahren, Methoden und Modelle zur Störfallrisikobeurteilung" illustriert die oben genannten Zusammenhänge anhand eines Beispiels (Tutorial, Kapitel 4).

8.3 Hilfestellungen für die Erstellung von Teilen des Sicherheitsberichts

Anhang II der StörfallV formuliert die geforderten Mindestangaben eines Sicherheitsberichtes. Die Kompaktheit der Formulierungen führt tendenziell zu Interpretationsspielräumen bzw. zu unterschiedlichen Auslegungen der Anforderungen seitens der Ersteller von Sicherheitsberichten.

In der Vergangenheit sind daher durch die KAS, das LANUV NRW und andere Behörden und Institutionen eine Vielzahl an Leitfäden zur Erstellung von Sicherheitsberichten mit dem Ziel erarbeitet worden, die Anforderungen weiter zu präzisieren bzw. zu erklären und somit einen einheitlichen Qualitätsstandard zu forcieren.

Nachfolgend werden die wesentlichsten Leitfäden und ihre Inhalte zusammenfassend dargestellt. Dabei wird insbesondere auf die Erstellung folgender Teile des Sicherheitsberichts fokussiert:

1. Anhang II, StörfallV (Mindestangaben im Sicherheitsbericht)
   a. Teil IV (Ermittlung und Analyse der Risiken von Unfällen und Mittel zu deren Verhütung) und
   b. Teil V (Schutz- und Notfallmaßnahmen zur Begrenzung der Auswirkungen von Störfällen)
2. Anhang III, StörfallV (Sicherheitsmanagementsystem)
   a. Teil 1 (Risikobeurteilung) und
   b. 2b (systematische Ermittlung der Gefahren von Störfällen).

8.3.1 KAS-55 Leitfaden – Mindestangaben im Sicherheitsbericht

Ziel des Leitfadens KAS-55 „Mindestangaben im Sicherheitsbericht“ ist, eine bundesweit einheitliche Empfehlung zu formulieren, die zu einer ausreichend hohen Qualität von Sicherheitsberichten insbesondere hinsichtlich Informationsumfang und -tiefe beitragen soll.

Der Leitfaden wurde 2021 veröffentlicht und kann als eine Fortschreibung der Vollzugshilfe zur Störfall-Verordnung gelesen werden, welche mit der Umsetzung der Seveso-III-Richtlinie nicht weiter fortgeschrieben wurde.

Der Leitfaden gibt insbesondere eine Orientierung

- Zum Aufbau und zur inhaltlichen Darstellung des Sicherheitsmanagementsystems im Sicherheitsbericht inkl. eines Beispielinhaltsverzeichnisses
- welche veröffentlichten Verfahren und Methoden der Störfallrisikobeurteilungen in Deutschland üblich sind,
- welche betrieblichen Gefahrenquellen, umgebungsbedingten Gefahrenquellen und Eingriffe Unbefugter grundsätzlich zu berücksichtigen sind,
- was sicherheitsrelevante Anlagenteile sind,
- wie die Ergebnisse einer Störfallrisikobeurteilung für einen Sicherheitsbericht aufbereitet werden können und
- welche Datenbanken zur Ereignisauswertung (externe Ereignisse) konsultiert bzw. zum Erfahrungsaustausch herangezogen werden können.
- Zu Sicherheitsberichten in Chemie- und Industrieparks (Herausforderung: Berücksichtigung gegenseitiger Beeinflussungen mehrerer Betreiber, zusammenfassende Darstellungen auf Ebene Chemie- bzw. Industriepark)

Neben Aussagen zur Dokumentation der Gefahrenanalyse und den dazu üblichen Verfahren beschäftigt sich der Leitfaden auch mit der im Sicherheitsbericht zu dokumentierenden Szenarienbildung.

Hierzu werden Empfehlungen bzw. Beispiele gegeben zu:

- Vernünftigerweise nicht ausschließbaren Szenarien bzw. Gefahrenquellen
- Vernünftigerweise ausschließbaren Szenarien bzw. Gefahrenquellen (Dennoch-Szenario)
- Hinweise zu Auswirkungsbetrachtungen
- Beurteilungswerte für Szenarien/Schadensarten (Selbstentzündung/Bestrahlungsstärken/Überdruckwirkungen auf Gegenstände und Menschen)

8.3.2 KAS-19 Leitfaden – Konzept zur Verhinderung von Störfällen und zum SMS

Der Leitfaden KAS-19 „Konzept zur Verhinderung von Störfällen und zum Sicherheitsmanagementsystem“ (s. Leitfaden KAS-19 (2017)) wurde im Zusammenhang mit der Neufassung der Störfall-Verordnung 2017 erarbeitet, die weitere Anforderungen an das Sicherheitsmanagementsystem formuliert. Der Leitfaden zeigt auf, welche Aspekte im Konzept im Rahmen des Sicherheitsmanagementsystems zu beachten sind, um die in Anhang III der StörfallV genannten Punkte zu erfüllen. Der Leitfaden betrachtet die praktische Umsetzung von Grundanforderungen zum Konzept zur Verhinderung von Störfällen und dem Sicherheitsmanagementsystem, wobei auf die Anforderungen für die Betriebsbereiche oberen und unteren Klasse eingegangen wird.

Der Leitfaden macht weitere Angaben zum Sicherheitsmanagementsystem:

- Dokumentenlenkung und Freigabe
- Kontrolle der Leistungsfähigkeit des Sicherheitsmanagementsystems
- Sicherheitskennzahlen als Leitwerte für das Management und Prüfung der Zielwerterreichung
- Auditsystem und Managementreviews – Die KAS sieht vor allem in letzterem eine große Bedeutung.
- Beurteilung der persönlichen und professionellen Kompetenz von Beschäftigten aller Hierarchieebenen
- Maßnahmenverfolgung
- Festlegung von Aufbewahrungsfristen für Dokumente usw.

Der Leitfaden stellt mit Hinblick auf die Auswahl und Anwendung der Verfahren und Methoden der Störfallrisikobeurteilungen folgendes klar:

- Verantwortlichkeiten und Personenkreisen müssen definiert werden
- Entscheidungen und Analysen müssen nachvollziehbar (begründet) dokumentiert werden
- Aus den Analysen abgeleitete Vorkehrungen und Maßnahmen müssen nachvollziehbar umgesetzt werden und
- Hinsichtlich ihrer Wirksamkeit (z. B. Kennzahlen) laufend überprüft werden.

Der Leitfaden gibt damit eine Arbeitshilfe zum Aufbau eines wirksamen Sicherheitsmanagements und der Einbettung der Störfallrisikobeurteilung in diese.

Empfehlungen zur Verfahrens- bzw. Methodenauswahl werden nicht gegeben. Es werden jedoch Grundanforderungen definiert, denen im Rahmen der Sicherheitsplanung nachzukommen ist.

8.3.3 LANUV NRW – „Der Sicherheitsbericht nach Störfall-Verordnung – Eine Handlungshilfe für Behörden und Betreiber“

Die vom LANUV NRW bereitgestellte Handlungshilfe „Der Sicherheitsbericht nach Störfall-Verordnung - Eine Handlungshilfe für Behörden und Betreiber“ (November 2023[82]) adressiert u.a. folgende Aspekte:

- Rechtliche Grundlagen für die Erstellung eines Sicherheitsberichtes
- Inhalte eines Sicherheitsberichtes
- Hinweise bei der Aufteilung der Inhalte und Ausführungen in einen allgemeinen und einen (oder mehrere) anlagenbezogene(n) Teil(e) des Sicherheitsberichtes
- Hinweise zu den einzelnen Punkten Anhang II und III der StörfallV. Die Hinweise sind weitestgehend deckungsgleich mit denen der Vollzugshilfe bzw. des KAS-55.
- Relativ detaillierte Hinweise zu Auswirkungsbetrachtungen (Modellierung Stofffreisetzungsrate, Modellierung der weiteren Ausbreitung als Lache oder als Gaswolke, sofortige vs. verzögerte Zündung, anwendbare Modelle und Softwareprogramme,

8.3.4 LANUV NRW - „Musterinhaltsverzeichnis eines Sicherheitsberichts entsprechend § 9 Störfall-VO“

Das vom LANUV NRW bereitgestellte „Musterinhaltsverzeichnis eines Sicherheitsberichtes“ (Dezember 2017[83]) formuliert eine mögliche Gliederung des Berichtes inklusive stichpunktartiger Angaben erwarteter Inhalte. Die vorgeschlagene Gliederung berücksichtigt dabei eine Aufteilung des Berichtes in einen allgemeinen und einen (bzw. mehrere) anlagenbezogen(e) Teil(e).

8.3.5 LANUV NRW – Arbeitsblatt 41 „Darstellung des Sicherheitsmanagementsystems im Sicherheitsbericht“

Das vom LANUV NRW bereitgestellte Arbeitsblatt 41 „Darstellung des Sicherheitsmanagementsystems im Sicherheitsbericht“ (April 2019[84]) zeigt beispielhaft, wie das SMS im Sicherheitsbericht beschrieben werden kann. Es soll den Betreibern und Behörden als Orientierung bei der Erstellung und Prüfung von Sicherheitsberichten dienen. Die Struktur der Darstellung entspricht weitestgehend der in der KAS-55 vorgeschlagenen Struktur zur Dokumentation des SMS. Als Pendant zum Arbeitsblatt 41 kann das LANUV-Arbeitsblatt 51 „Anforderungen der Störfallverordnung und deren Umsetzung – Überprüfung des Sicherheitsmanagementsystems – Fragen und Bewertungshilfen“[85] gelesen werden. Dieses richtet sich primär an die Behörden, welche Sicherheitsberichte prüfen müssen. Die formulieren Prüfpunkte geben indirekt Hinweise an die Ersteller von Sicherheitsberichte, welche Kriterien die Berichte erfüllen müssen.

[82] https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/anlagen/pdf/Sicherheitsbericht_Stoerfallverordnung.pdf

[83] https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/anlagen/musterihv.pdf

[84] https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/4_arbeitsblaetter/Arbeitsblatt41_gesichert.pdf

[85] https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/4_arbeitsblaetter/40051.pdf

8.3.6 Checklisten zur Überprüfung von Sicherheitsberichten durch Behörden

Die Niedersächsiche Gewerbeaufsicht stellt auf ihrer Homepage eine „Checkliste für die Überprüfung von Sicherheitsberichten“ (April 2022[86]) bereit. Die Checkliste richtet sich primär an die Behörden, welche Sicherheitsberichte prüfen müssen. Die formulieren Prüfpunkte geben indirekt Hinweise an die Ersteller von Sicherheitsberichte, welche Kriterien die Berichte erfüllen müssen. Die Checkliste basiert im Wesentlichen auf der StörfallV, KAS-19 und -55 und der Vollzugshilfe zur StörfallV.

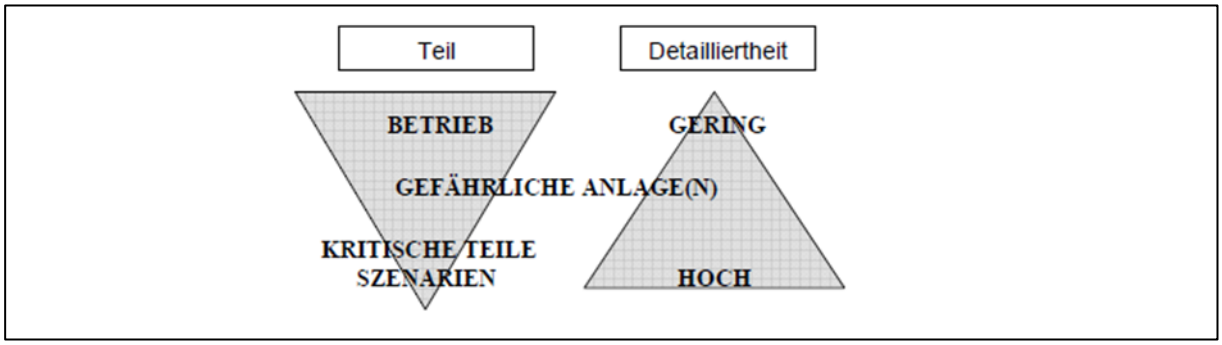
Eine vergleichbare Checkliste wurde durch die UNECE im Auftrag des UBA erarbeitet: „Checklistensystem für Sicherheitsberichte – Anleitung zur Erstellung und Inspektion eines Sicherheitsberichts (SB) gemäß dem UNECE-ÜBEREINKOMMEN ÜBER DIE GRENZÜBERSCHREITENDEN AUSWIRKUNGEN VON INDUSTRIEUNFÄLLEN und der EU-Richtlinie 96/82/EG (SEVESO II) durch ein einheitliches Checklistensystem - UBA Dokumentationen (83/2015)“[87]

8.3.7 Zusammenfassung

Der Sicherheitsbericht ist das wesentliche Instrument, um darzulegen, dass die Betreiberpflichten gemäß § 3 der Störfall-Verordnung erfüllt sind.

Die Gefahrenanalysen der einzelnen Anlagen stellen den Kern des Sicherheitsberichts dar und sind entsprechend detailliert zu beschreiben.

Abbildung 62: Inhalt des Sicherheitsberichtes bezüglich der Detailliertheit



Quelle: Checklistensystem für Sicherheitsberichte – Anleitung zur Erstellung und Inspektion eines Sicherheitsberichts (SB) gemäß dem UNECE-ÜBEREINKOMMEN ÜBER DIE GRENZÜBERSCHREITENDEN AUSWIRKUNGEN VON INDUSTRIEUNFÄLLEN und der EU-Richtlinie 96/82/EG (SEVESO II) durch ein einheitliches Checklistensystem - UBA Dokumentationen (83/2015)

Die Ausführungen müssen vollständig, nachvollziehbar und richtig sein. Insbesondere müssen diese einer genaueren Überprüfung standhalten können (Beispielsweise Abgleich mit R&I-Schemata bzw. Verfahrensfließbildern, Ortsbegehungen). Bei den Ausführungen ist darauf zu achten, dass ein plausibler „roter Faden“ erkennbar ist bzw. die Ausführungen so detailliert sind, dass diese aus sich heraus verständlich sind. Je nach Komplexität kann der Sicherheitsbericht in mehrere Teile – einen allgemeinen und einen (oder mehrere) anlagenbezogene Teile – untergliedert werden.

Anhang II, Teil IV und V

Hier sind die Ergebnisse der Analysen zu beschreiben. Es wird nicht erwartet, dass im Detail jeder einzelne Diskussionspunkt im Sicherheitsbericht wiederzufinden ist, sondern eine

[86] https://www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de/download/136868/Sicherheitsbericht.docx

[87] https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/checklistensystem-fuer-sicherheitsberichtev

plausible, nachvollziehbare, richtige Darstellung der Ergebnisse der Analyse, die dann in die erforderlichen Schutz- und Notfallmaßnahmen übergehen (Teil V).

Ein Qualitätsmerkmal (bzw. Anforderung) hierbei ist die Herstellung einer Verbindung zwischen den ermittelten Gefahren und Risiken, den untersuchten Szenarien und der Notfallplanung. Die Szenario-Beschreibungen sollten nicht als eigenständige bzw. von der Gefahrenanalyse losgelöste Thematik angesehen werden, sondern als potentielle Folgerungen aus dem Wirksamwerden von Gefahrenquellen verstanden werden, für die dann unter Umständen Notfallplanungen erforderlich werden. Die Klassifizierung der Szenarien als „Dennoch-Szenario", „exzeptionelle Szenario" oder „vernünftigerweise auszuschließende Szenario" ist dabei von nachgelagerter Bedeutung.

Anhang III, Teil 1

Der Sicherheitsbericht sollte keine Detailbeschreibung der Inhalte des SMS enthalten, sondern seine Struktur, Funktionsweise, Prinzipien und Ausrichtung beschreiben. Das Konzept zur Verhinderung von Störfällen (§ 8 StörfallV) ist der Ausgangspunkt, bzw. das Fundament, auf dem das SMS aufgebaut ist.

Faktoren für ein erfolgreiches Sicherheitsmanagement sind laut Wood [2014]:

- Die Ausprägung bzw. Ausgestaltung des SMS sollte der Höhe des mit dem Anlagenbetriebs assoziierten Risikos entsprechen (Biogasanlage vs. Erdölraffinerie)
- Die Risikobeurteilung ist grundlegende Aufgabe des SMS und ein kontinuierlicher Prozess. Ziel: Angemessenes Steuern/Kontrollieren von tendenziell seltenen, aber sehr gefährlichen Ereignissen.
- Das Sicherheitsmanagement übernimmt die Verantwortung für Ressourcenplanung und -bereitstellung
- Die Risikobeurteilung beeinflusst maßgeblich Entscheidungen zu betrieblichen Verfahrensweisen und Prozeduren, zum Design, Training Personal, Instandhaltung, Notfallplanung.
- Angestellte und Auftragnehmer sind sich im Klaren über die mit ihren Aufgaben verbundenen Risiken und ihrer Rolle, diese zu kontrollieren.
- Die Risikobeurteilung für den Betriebsbereich ist vollumfänglich dokumentiert. Inklusive des Risikobeurteilungsprozesses, der resultierenden Ergebnisse und abgeleiteten Maßnahmen sowie der genutzten Eingangsdaten und Informationen.
- Systematische Auswahl Verfahren und Methoden zur Risikobeurteilung
- Ausbreitungsrechnungen werden durch kompetente Experten ausgeführt.
- Risiken, welche sich über die Grenzen des Anlagenbetriebs erstrecken, werden transparent an das übergeordnete Management und alle relevanten Stakeholder kommuniziert.

Anhang III, Teil 2b

Die Ausführungen sollten folgende Angaben zur Anwendung der Verfahren enthalten:

a) Welche Verfahren (auch mehrere)

b) Welcher Anwendungsfall

c) Welche Häufigkeit

d) Bei welchen sonstigen Veranlassung (z.B. meldepflichtiges Ereignis, neues Anlagenteil, neuer/geänderter Verfahrenstechnischer Prozess, geändertes Umfeld, …)

e) Mit welchen Personen (Qualifikation, Fachwissen, Rolle im Unternehmen usw.)

f) Wie wird dokumentiert

g) Wie werden Ergebnisse weiterverwendet

8.4 Softwareprogramme

Im Rahmen des UNECE-Forschungsprojektes „Risk Assessment Methodologies for Chemical Installations“ (siehe auch Kap. 7) wurde eine umfangreiche Übersicht zu aktuell[88] verfügbaren Softwareprogrammen zur Risikobeurteilung von Störfällen erarbeitet. Die Ergebnisse sind im Report Part 2 „Risk assessment for industrial accident prevention: Selected case studies and available software tools“ nach Themenfeldern sortiert aufgeführt[89]:

- Softwaretools für Gefahrenanalyse
- Softwaretools für FMEA/FMECA/FTA/ETA
- Softwaretools für QRA-Analysen
- Softwaretools für Ausbreitungsrechnungen

Dabei wurden die Softwaretools in Abhängigkeit des Themenfeldes anhand mehrerer Kriterien charakterisiert.

Aus Sicht der Forschungsnehmenden stellt die Übersicht viele wesentliche Informationen zusammen, die es Betreibern erlaubt, sich einen ersten Eindruck vom Softwareangebot zu verschaffen bzw. eine erste Vorauswahl im Rahmen eines Softwarebeschaffungsprozesses zu treffen. Nachfolgend wird daher lediglich wiedergegeben, welche Tools betrachtet worden sind und welche Kriterien herangezogen worden sind. Für die jeweils konkret getroffenen Aussagen wird auf den UNECE-Bericht verwiesen.

8.4.1 Softwaretool für Gefahrenanalyse

Folgende Softwaretools wurden betrachtet:

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

Die Tools wurden anhand folgender Kriterien charakterisiert:

- Zweck
- Verwendung/Einsatz

[88] Aktuell mit Stand Ende 2022

[89] Im UNECE-Forschungsbericht wird darauf hingewiesen, dass die Auflistung a) nicht vollständig ist und b) das Ziel verfolgt, auf die Vielzahl an Aufgabenstellungen und Angeboten aufmerksam zu machen

- Vorteile
- Limitierungen
- Verfügbarkeit (Lizensierungen)

Seitens UNECE wird darauf hingewiesen, dass für die Gefahrenanalyse häufig unternehmensinterne Lösungen auf Basis von word, excel etc. Anwendung finden.

8.4.2 Softwaretools für FMEA/FMECA/FTA/ETA

Folgende Softwaretools wurden betrachtet:

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

Die Tools wurden anhand folgender Kriterien charakterisiert:

- Zweck
- Verwendung/Einsatz
- Vorteile
- Berücksichtigung standortspezifischer Bedingungen möglich: Ja/nein
- Limitierungen
- Verfügbarkeit (Lizensierungen)

Weitere, im Vergleich der UNECE nicht aufgenommene Softwareprogramme sind:

- BowtieXP von CGE Risk Management Solutions

8.4.3 Softwaretools für QRA-Analysen

Folgende Softwaretools wurden betrachtet:

- ARIPAR von JRC
- FLACS-RISKCURVES von TNO (Owner: GexCon)
- QRATool von BakerRisk
- RAPID-N von JRC
- Safeti von DNV
- SHEPHERD von Shell (Owner: GexCon)

Die Tools wurden anhand folgender Kriterien charakterisiert:

- Beschreibung

- Zweck
- Verwendung/Einsatz
- Berücksichtigung von Gefahrguttransporten
- Vorteile
- Schnelle Resultate: Ja/Nein
- Gefahrenzonen können auf Karten geplottet werden: Ja/nein
- Sensitivitätsstudien: Ja/nein
- Verifikation und Validation öffentlich zugänglich: Ja/Nein
- Berücksichtigung standortspezifischer Bedingungen möglich: Ja/nein
- Limitierungen
- Modelliert Auswirkungen für Umgebung: Ja/Nein
- Verfügbarkeit (Lizensierungen)

8.4.4 Softwaretools für Ausbreitungsrechnungen

Folgende Softwaretools wurden betrachtet:

- ADAM von JRC
- ALOHA von EPA
- BREEZE von Trinity Consultants
- CANARY von Quest Consultants
- DEGADIS von EPA
- exploCFD von Advanced Analysis Australia
- FLACS-CFD von GexCon
- FLACS-EFFECTS TNO (Owner: GexCon)
- Fluidyn von Fluidyn
- FRED von Shell (Owner: GexCon)
- KFX von DNV
- MET von ISi Technologie GmbH
- Phast von DNV
- SAFER one von SAFER SYSTEMS
- SafeSite 3G von BakerRISK

Die Tools wurden anhand folgender Kriterien charakterisiert:

- Beschreibung
- Verwendung/Einsatz
- Quellterme: Ja/Nein
- Physikalische Effekte: Ja/Nein
- Vulnerabilität: Ja/Nein
- Vorteile
- Limitierungen
- Verfügbarkeit (Lizensierungen)

Im LANUV NRW Leitfaden „Der Sicherheitsbericht nach Störfall-Verordnung“ wird auf das kostenfreie Programm STOER 94 verwiesen. Mit diesem Programm können Berechnungen gemäß VDI 3783 Blatt 1 (enthält eine Berechnungsmethode zur prognostischen Abschätzung störfallbedingter Freisetzungen von dichteneutralen und leichten Gasen) und perspektivisch Blatt 2 (enthält eine Berechnungsmethode zum Ausbreitungsverhalten von schweren Gasen, deren Dichte größer ist als die umgebende Atmosphäre) richtlinienkonform durchgeführt werden.

8.5 Ausbildungs- und Qualifizierungsangebote

Über eine aufgabengerechte Ausbildung und Qualifizierung der eigenen Mitarbeitenden sollte sich möglichst frühzeitig Gedanken gemacht werden und nicht erst, wenn sich die unmittelbare Notwendigkeit für eine z.B. systematische Sicherheitsbetrachtung im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens oder eines anderen behördlichen Verfahrens ergibt. Hinzu kommt, dass Schulungen häufig nur das Grundlagenwissen inkl. Methodenvermittlung und Beispielrechnungen vermitteln können, was aber noch keine Experten macht. Hierzu ist ein umfangreicherer Wissenstransfer mittels Training und Fachaustausch notwendig. Teilweise bieten die schulenden Einrichtungen weiterführende „Training on the Job“-Ausbildungen an, um diese Lücke weitestgehend zu schließen.

Zu den Themen Anlagensicherheit und StörfallV können diverse Ausbildungs – und Qualifizierungsangebote wahrgenommen werden. Die nachfolgende Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Mit der Nennung /Nichtnennung einzelner Institute oder Angebote ist keine Wertung ebendieser verbunden. Vielmehr soll die Liste illustrieren, dass a) zu einer Vielzahl an Themen Weiterbildungsangebote bestehen und b) für die Schulungsnehmenden bei den meisten Themen eine Auswahlmöglichkeit zwischen mehreren Institutionen/Angebote bestehen.

Die Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie bietet ein weites Spektrum an Ausbildungsmöglichkeiten an. Zu den Themen Anlagensicherheit, Explosions- und Brandschutz, Gefahrstoffe werden zum Beispiel folgende Seminare angeboten[90]:

- PAAG/HAZOP I - Eine Methode zur Sicherheitsbetrachtung an verfahrenstechnischen Anlagen – Basisseminar

[90] https://seminare.bgrci.de/de/

- PAAG/HAZOP II - Eine Methode zur Sicherheitsbetrachtung an verfahrenstechnischen Anlagen – Aufbauseminar
- Risikobeurteilung in der Anlagensicherheit (beinhaltet die Vorstellung der Methoden LOPA, FMEA, ZHA)
- Brand- und Explosionsgefahren
- Explosionsschutz – Technische Grundlagen
- Tätigkeiten mit Gefahrstoffen
- Lagerung von Gefahrstoffen

Der Verein Deutscher Ingenieure bietet u.a. folgende Seminare an[91]:

- Einführung in die Störfallverordnung
- HAZOP (PAAG) und LOPA - Methoden der Gefährdungs- und Risikoanalyse
- Methoden der Sicherheitsanalyse für verfahrenstechnische Anlagen (insbesondere HAZOP, FMEA, ETA, LOPA, FTA, menschlicher Faktoren)
- Explosionsschutz: Die Umsetzung der ATEX- Richtlinie 2014/34/EU
- Lagerung von Gefahrstoffen

Der TÜV Rheinland bietet u.a. folgende Seminare an[92]:

- Explosionsschutz Grundlagen - Unterweisung im Explosionsschutz

Das Center of Safety Excellence (CSE) bietet u.a. folgende Seminare an [93]:

- Management: Rechtliche Grundlagen Prozess- und Anlagensicherheit (inkl. Erstellung Sicherheitsbericht)
- Sicherheitskonzepte: Risikomanagement und HAZOP (nebst HAZOP auch QRA und LOPA)
- Sicherheitskonzepte: Anlagensicherheitskonzept und Sicherheitsmanagement
- Sicherheitskonzepte: Alarm- und Gefahrenabwehrplanung (AGAP)
- Verschiedene Seminare zu den Themenfeldern „Auslegung“ und „Gefährliche Stoffe“

Das Bildungszentrum für die Ver- und Entsorgungswirtschaft (BEW) bietet u.a. folgendes Seminar an[94]:

- Der Sicherheitsbericht nach Störfallverordnung

Weitere Anbieter von Schulungsmaßnahmen im Raum Deutschland sind zum Beispiel

[91] https://www.vdi-wissensforum.de/weiterbildung-prozessindustrie/

[92] https://akademie.tuv.com/themen/technik/maschinen-anlagensicherheitv

[93] https://cse-engineering.de/academy/v

[94] https://www.bew.de/veranstaltung/immissionsschutz/stoerfallvorsorge-stoerfallmanagement/der-sicherheitsbericht-nach-stoerfallverordnung.htmlv

- TÜV Süd[95]
- TÜV Nord[96]
- Technische Akademie Wuppertal[97]
- DECHEMA Forschungsinstitut[98]
- Haus der Technik[99]
- Sächsische Bildungsgesellschaft für Umweltschutz und Chemieberufe Dresden[100]
- Verband für Anlagentechnik und IndustrieService e.V.[101]
- DEKRA[102]

9 Quellenverzeichnis

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/

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“,

[95] https://www.tuvsud.com/de-de/store/akademie/seminare-management/nachhaltigkeit/umwelt-und-klimaschutz/2113002v

[96] https://www.tuev-nord.de/de/weiterbildung/seminare/stoerfallbeauftragter-nach-58a-bimschg-a/v

[97] https://www.taw.de/prozess-und-verfahrenstechnik/hazop-lopa-fuer-anwender-prozesssicherheit-und-risikomanagementv

[98] https://dechema-dfi.de/Sicherheitstechnik2017.htmlv

[99] https://www.hdt.de/prozess-und-anlagensicherheit-h050118180

[100] https://www.sbg-dresden.de/images/Bildungsangebote/Weiterbildung/Produktblaetter/Produktions-_und_Prozesstechnik/PB_Prozesstechnik_PAAG.pdfv

[101] https://www.vais.de/fileadmin/files/veranstaltungen/vais-seminare/VAIS-Web_2021-11-09_HAZOP-LOPA_AW.pdfv

[102] https://dekra-testing-and-certification.de/images/download/seminare2021/exschutz/asb10_2021.pdfv

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

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/BAnz_AT_21_01_2019_B4.pdf&cid=20556

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/BAnz%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/BAnz%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

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

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

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

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

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

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

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, Luxemburg. 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, Luxemburg. 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

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

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

Schalau, 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

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

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

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 (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/gefahrenschutz/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/gefahrenschutz/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)

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)

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)

A Praxisuntersuchungen – Praxis der Anwendung bei Betriebsbereichen – Blankefragenbögen

A.1 Fragenbogen für Betreiber

Fragenblock I – Angaben zum Betriebsbereich

No.	Frage	Hinweis	Antwort
1.	Name und Anschrift des Betreibers (sowie des Betriebs-bereiches bei Abweichung)	-	
2.	Ansprechpartner beim Betreiber	- i.d.R. HSE/EHS-Bereich, wenn vorhanden: Störfallbeauftragter	
3.	Übersicht Anlagen und Tätigkeiten im Betriebsbereich, bei denen die Gefahr eines Störfalls bestehen kann	- Nr. nach Anhang I zur 4.BImSchV - bitte entsprechende Teile des Sicherheitsberichtes (Informationen gemäß StörfallV, Anhang II, Teil II.2 und II.4 sowie Teil III.1) zur Verfügung stellen[103] - Ggf. Beilage eines Lageplanes.	
4.	Angabe Mitarbeiteranzahl im Betriebsbereich	Ungefähre Angabe ausreichend	
5.	Übersicht Produkte und Kapazitäten	- bitte entsprechende Teile des Sicherheitsberichtes (Anhang II, Teil III.1) zur Verfügung stellen	
6.	Übersicht angewendeter produktionstechnischer Verfahren	- bitte entsprechende Teile des Sicherheitsberichtes (Anhang II, Teil III.2) zur Verfügung stellen	

[103] Auch weitere Fragen können mit der Bereitstellung entsprechender Teile des Sicherheitsberichtes und/oder dem Konzept zur Verhinderung von Störfällen beantwortet werden. In Summe sind das die Informationen gemäß StörfallV

- Anhang II Teil II Punkte 2 und 4,
- Anhang II Teil III,
- Anhang II Teil IV Punkte 1 und 2 (ggf. auch Punkte 3 und 4),
- Anhang II Teil V Punkt 1,
- Anhang III, Punkt 2b.

No.	Frage	Hinweis	Antwort
7.	Benennung „vorhandener“ gefährlicher Stoffe und Stoffmengen	- entsprechend der Klassifizierung nach Anhang I zur StörfallV - bitte entsprechende Teile des Sicherheitsberichtes (Anhang II, Teil III.3) zur Verfügung stellen	AO-Anlage: Wasserstoffperoxid >=50%, Lösemittel Solvent Naphtha, Arbeitslösung, Wasserstoff, Erdgas, Kohlenmonoxid, Ammoniumnitrat, Salpetersäure (Stoffmengen siehe Hauptband Sicherheitsbericht, Kap. III, 3)

Tabelle 80: Fragenblock II

Welche der nachfolgend aufgeführten Verfahren, Methoden und Modelle sind Ihnen bekannt? Welche davon finden bei Ihnen im Rahmen der GA&RB – ggf. in einer modifizierten Variante – Anwendung?		
Verfahren, Methode, Modell	Status (bitte entsprechenden Status aus Liste auswählen)	Kommentar
HAZOP / PAAG – Hazard and Operability / Prognose, Auffinden der Ursachen, Abschätzen der Auswirkungen, Gegenmaßnahmen	Wählen Sie ein Element aus. Auswahlmöglichkeiten: Nicht bekannt, bekannt, wird angewendet, wird in modifizierter Form angewendet	
Zurich Hazard Analysis	Wählen Sie ein Element aus.	
Verfahren in den Niederlanden / Flandern (u.a. VROM: „Guidelines for quantitative risk assessment (Purple book)“)	Wählen Sie ein Element aus.	
LOPA – Layer of Protection Analysis	Wählen Sie ein Element aus.	
ROGA – Risikoorientierte Gefahrenanalyse	Wählen Sie ein Element aus.	
Fehlzustandsbaumanalyse	Wählen Sie ein Element aus.	
Ereignisbaumanalyse	Wählen Sie ein Element aus.	

Welche der nachfolgend aufgeführten Verfahren, Methoden und Modelle sind Ihnen bekannt? Welche davon finden bei Ihnen im Rahmen der GA&RB – ggf. in einer modifizierten Variante – Anwendung?		
FME(C)A – Fehlzustandsart- und Auswirkungsanalyse	Wählen Sie ein Element aus.	
Risikograph nach VDI 2180 (TRGS 725, bezieht sich auf SIL für Ex-Schutz)	Wählen Sie ein Element aus.	
BASF-HAZOP	Wählen Sie ein Element aus.	
HAZAN – Hazard Analysis	Wählen Sie ein Element aus.	
Checklistenverfahren	Wählen Sie ein Element aus.	
JRC: Accident Damage Analysis Module (ADAM)	Wählen Sie ein Element aus.	
JRC: Rapid N	Wählen Sie ein Element aus.	
Ermittlung und Berechnung von Störfallablaufszenarien gemäß TÜV Berlin[104]	Wählen Sie ein Element aus.	
Auswirkungsbetrachtungen gemäß DECHEMA[105]	Wählen Sie ein Element aus.	
Operating & Support Hazard Analysis (O&SHA)	Wählen Sie ein Element aus.	
Mond Fire, Explosion and Toxicity Index	Wählen Sie ein Element aus.	
Dow Fire & Explosion Index	Wählen Sie ein Element aus.	
Process Safety Quick Check (PSQC)	Wählen Sie ein Element aus.	
ARAMIS - Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the framework of SEVESO II Directive	Wählen Sie ein Element aus.	
Ergänzungen	Wählen Sie ein Element aus.	
Bitte den entsprechenden Teil des Sicherheitsberichtes (gemäß StörfallV Anhang III, 2b) zur Verfügung stellen		

[104] Forschungsbericht UBA-FB 000039/1 "Ermittlung und Berechnung von Störfallablaufszenarien nach Maßgabe der 3. Störfallverwaltungsvorschrift – Band 1"

[105] DECHEMA Statuspapier „Auswirkungsbetrachtungen bei störungsbedingten Stoff- und Energiefreisetzungen in der Prozessindustrie"

Tabelle 81: Fragenblock II – Fortsetzung

No.	Frage	Hinweis	Antwort
Antworten nach Möglichkeit bitte je angewendetem Verfahren (resp. Methode, Modell) angeben.			
9.	Wenn das angewandte Verfahren eine Modifikation darstellen sollte: Welche Modifikationen wurden aus welchen Gründen vorgenommen? Sind die erhofften Verbesserungen eingetreten?	-	
10.	Gibt es über die Erfüllung der Anforderungen der BImSchG hinaus konkretisierte Ziele bei der Anwendung des Verfahrens? Wenn ja, welche?	Beispiele: - Übererfüllung von Betreiberpflichten - Verminderung von Beinaheunfällen - Erreichung/ Unterschreitung von Schwellen für tolerierte Risiken -Synergieeffekte mit „benachbarten“ Instrumenten (z.B. Gefährdungsbeurteilung nach Gefahrstoffverordnung) -Bereichsübergreifende Kommunikation fördern -Betriebsinterner Wissenstransfer	
11.	Gibt es eine interne Überprüfung der Ergebnisse der Anwendung des Verfahrens, z.B. bevor diese den Behörden übermittelt werden („critical review“)? Wenn ja, in welcher Form erfolgt diese?		
12.	Wurden in der Vergangenheit gänzlich andere Verfahren zur GA&RB angewandt? Wenn ja welche? Wenn ja: Aus welchem Grund wurden diese Verfahren abgelöst?		
13.	Gibt es interne Vorgaben, die den Einsatz bestimmter Verfahren bestimmen? Wenn ja, welche?		
14.	Gibt es externe Vorgaben, die den Einsatz bestimmter		

No.	Frage	Hinweis	Antwort
	Verfahren bestimmen? Wenn ja, welche?		
15.	Kommen bei der Auswahl der Verfahren definierte Kriterien zur Beurteilung der Eignung zur Anwendung?		
16.	Wird bei der Analyse von eingetretenen Ereignissen geprüft, ob methodische Schwächen der Verfahren oder Defizite bei ihrer Anwendung eine der Ursachen waren?		

Tabelle 82: Fragenblock III

No.	Frage	Hinweis	Antwort
Antworten nach Möglichkeit bitte je angewendetem Verfahren (resp. Methode, Modell) angeben.			
17.	- Welche für die Anwendung des Verfahrens relevante Vorschriften und/oder Regeln, - welche verfahrensbeschreibende Anwendungsleitfäden (und Fachliteratur) sind Ihnen bekannt und werden von Ihnen angewendet bzw. berücksichtigt?	Beispiel: „Das PAAG- / HAZOP-Verfahren und weitere praxisbewährte Methoden“, ISSA 2020	
18.	Werden Bewertungskataloge und/oder Checklisten (nach Normen, Literatur oder nach eigenen Kriterien, ...) verwendet? Wenn ja, welche?	Gemeint sind zum Beispiel FMEA-Bewertungstabellen, Risikomatrizen, Definitionen von Risikoklassen etc. (siehe auch "Das PAAG-/ HAZOP-Verfahren und weitere praxisbewährte Methoden")	
19.	Wird die Anwendung der Methode (des Verfahrens, des Modells) durch geeignete Software erleichtert? Ist diese kostenpflichtig oder frei verfügbar (open source)?		
20.	Holen Sie sich externe Unterstützung bei der Anwendung der Verfahren? Wenn ja, welche?	Beispiele: Moderator bei Teamarbeit, Experten für Einzelfragen bei Teamarbeit, Helpdesk	

No.	Frage	Hinweis	Antwort
		bei von Organisationen unterstützten Verfahren	
21.	Welche Weiterbildungen in Bezug auf die Verfahren, Methoden und Modelle zur Durchführung der GA&RB, sind für die Beschäftigten zugänglich? Um welche Beschäftigte (Angabe Aufgabenbereich) handelt es sich dabei?		

Tabelle 83: Fragenblock IV

No.	Frage	Hinweis	Antwort
Antworten nach Möglichkeit bitte je angewendetem Verfahren (resp. Methode, Modell) angeben.			
22.	Werden bei Ihnen bereits probabilistische Verfahren angewendet?	Angabe von Eintrittswahrscheinlichkeiten für Ereignisse	
Folgende Fragen sind nur zu beantworten, wenn Frage 22 mit „nein“ beantwortet wurde			
23.	Besteht bei Ihnen ein grundsätzliches Interesse an der Erprobung probabilistischer Verfahren?		
24.	Welches Verfahren wäre für Sie von besonderem Interesse?		
25.	Welche Hürden sehen Sie bei der Durchführung probabilistischer Verfahren?		
Folgende Fragen sind nur zu beantworten, wenn Frage 22 mit „ja“ beantwortet wurde			
26.	Welche Verfahren werden von Ihnen angewendet?		
27.	Zu welchem Zweck, mit welcher Zielstellung wenden Sie die Verfahren an?	Beispiele: -Vergleich Designalternativen -Weiterentwicklung Sicherheitskonzepte -Prüfung der identifizierten Szenarien -Gefahrenabwehrplanung	
28.	Erfolgt die Betrachtung der Eintrittswahrscheinlichkeiten und Schadensausmaße qualitativ, semiquantitativ oder quantitativ?	Qualitativ: Angaben wie selten, häufig, wenig, viel, ..ohne diese mit konkreten Zahlenwerten verknüpft zu haben. Semiquantitativ:	

No.	Frage	Hinweis	Antwort
		Qualitative Angaben, denen ein Intervall möglicher Werte zugeordnet wurde (z.B. selten = Häufigkeit alle 2-5 Jahre) Quantitativ: Angabe konkreter Zahlenwerte	
29.	Welche Daten, welche Datenbanken werden dabei herangezogen?		
30.	Inwiefern werden menschlichen Faktoren berücksichtigt? Werden diese quantifiziert?		
31.	Werden die Daten auf Eignung im spezifischen Anwendungskontext geprüft?	Unter anderem folgende Aspekte können die Eignung bedingen: Alter Datenquelle, Vergleichbarkeit Anwendungs- (Technologie-)bereiche, Vergleichbarkeit berücksichtigter Fehlerquellen	

Tabelle 84: Fragenblock V

No.	Frage	Hinweis	Antwort
32.	Hatten Sie Schwierigkeiten, die Anforderungen der StörfallV mit den bei Ihnen angewendeten Verfahren umzusetzen? Wenn ja, welche Schwierigkeiten sind aufgetreten und wie wurden diese gelöst?		
33.	Davon abgesehen: Wo sehen Sie den schwierigsten Teil des Prozesses der GA&RB?		
34.	Welche zusätzlichen Hilfsmittel und/oder Hilfestellungen würden Ihrer Meinung nach die Anwendung der Verfahren für Sie (aber auch für andere Anwender) erleichtern?		
35.	Bei teamorientierten Ansätzen: Welche Teamzusammensetzung (in	- Gibt es dazu Vorschriften, z. B. betriebs-/konzern-intern?	

No.	Frage	Hinweis	Antwort
	Qualität und Quantität) sehen Sie als optimal an?		
36.	Wie stark ist Ihrer Meinung nach die Abhängigkeit der Analyseergebnisse vom jeweiligen Analyseteam? Welche Freiheitsgrade, subjektive Einschätzungen und Bewertungen führen bei der Erstellung der GA&RB zu Variationen in den Analyseergebnissen?	Abweichungen können z.B. durch freie Einstellungsmöglichkeiten von Parametern bei der Benutzung von Computerprogrammen entstehen	
37.	Schätzen Sie das Verfahren/die Methode/das Modell als sehr aufwendig ein? Wie lässt sich der Aufwand minimieren?		
38.	Welchen Mehrwert sehen Sie – abgesehen von der Erfüllung der rechtlichen Vorhaben der StörfallV - im Zusammenhang mit der Durchführung der GA&RB?		
39.	Sehen Sie Synergien zu weiteren sicherheitsanalytischen Verfahren wie beispielsweise der Risikobeurteilung nach Maschinenrichtlinie? Wenn ja, beeinflusst das die Verfahrensauswahl?		
40.	Gibt es weitere – neben den von uns festgelegten – Kategorien, nach denen die Verfahren bewertet werden sollten? Wenn ja, welche sind das und wie sieht die konkrete Bewertung aus?		
41.	Ist erkennbar, dass die Auswahl des angewendeten Verfahrens einen Einfluss auf die Störungsanfälligkeit der Anlagen hat? (die Verfahren also unterschiedlich gut die Störungen vorbeugen)?	Beispiel: Verfahren x: bessere Reduktion, Verfahren y: schlechtere Reduktion	
42.	Bei welchen Verfahren ist die interne und externe		

No.	Frage	Hinweis	Antwort
	Kommunikation der Ergebnisse der Anwendung der Verfahren erfolgreicher?		
43.	Bei welchen Verfahren ist die interne und externe Umsetzung der Ergebnisse der Anwendung der Verfahren erfolgreicher?		

Tabelle 85: Fragenblock VI

No.	Frage	Hinweis	Antwort
Verknüpfung zur 9. BImSchV (Verordnung über das Genehmigungsverfahren)			
44.	Beeinflussen die rechtlichen Forderungen nach Inhalten der immissionsschutzrechtlichen Antragsunterlagen (9.BImSchV) die Auswahl oder Anwendung von Verfahren?		
45.	Beeinflussen Forderungen der immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsbehörden Auswahl oder Anwendung der Verfahren?		
46.	Ist die Art des angewandten Verfahrens in Erörterungsterminen ein Thema?		
47.	Werden von Genehmigungsbehörden probabilistische Aussagen für den Nachweis der Einhaltung von Betreiberpflichten akzeptiert?		
48.	Werden von Einwendern probabilistische Aussagen für den Nachweis der Einhaltung von Betreiberpflichten akzeptiert?		
Vollzug der Störfall-Verordnung			
49.	Werden bei der Beurteilung, was gemäß § 3 Abs.1 Art und Ausmaß der möglichen		

No.	Frage	Hinweis	Antwort
	Gefahren ist, gegen die Vorkehrungen zur Störfallverhinderung zu treffen sind, probabilistische Aussagen akzeptiert?		
50.	Werden bei der Beurteilung, was gemäß § 3 Abs.2 vernünftigerweise auszuschließende Gefahrenquellen sind probabilistische Aussagen akzeptiert?		
51.	Werden bei der Überwachung nach § 16 StörfallV probabilistische Aussagen zum Nachweis der Einhaltung von Betreiberpflichten akzeptiert?		

A.2 Fragenbogen für Behörden

Tabelle 86: Fragenblock I – Angaben zur Behörde

No.	Frage	Hinweis	Antwort
1.	Name und Anschrift der Behörde	-	
2.	Ansprechpartner bei der Behörde		
3.	Übersicht Zuständigkeitsgebiet	Bundesland, Bezirk, Landkreis, …	
4.	ungefähre Anzahl der Betriebsbereiche im Zuständigkeitsgebiet	untere Klasse / obere Klasse (ungefähre Angabe ausreichend)	
5.	Welche mit der Störfallverhinderung und -auswirkungsbegrenzung verbundenen Aufgaben übernimmt Ihre Behörde?	Anzeige- und Genehmigungsverfahren, Inspektionen/Vor-Ort-Besichtigungen, Mitarbeit Gremien, Schulungen, …	

Tabelle 87: Fragenblock II

Siehe Fragenblock II im Fragenbogen für die Betreiber. Es wurden dieselben Verfahren, Methoden und Modelle abgefragt. Zusätzlich wurden die Behörden jedoch um eine Angabe der

häufigsten Betriebsbereiche (gemäß 4.BImSchV) und eines Rankings, welche Verfahren am häufigsten zur Anwendung kommen, gebeten.

Tabelle 88: Fragenblock II – Fortsetzung

No.	Frage	Hinweis	Antwort
Antworten nach Möglichkeit bitte je angewendetem Verfahren (resp. Methode, Modell) angeben.			
7.	Wenn Ihnen bekannt ist, dass Betreiber Verfahren modifiziert haben: Welche Modifikationen wurden aus welchen Gründen vorgenommen? Sind die dadurch erhofften Verbesserungen eingetreten?		
8.	Ist Ihnen bekannt, ob Betreiber über die Erfüllung der Anforderungen des BImSchG (und insbesondere der StörfallV) hinausgehende konkretisierte Ziele bei der Anwendung des Verfahrens haben? Wenn ja, welche?	Beispiele: - Übererfüllung von Betreiberpflichten - Verminderung von Beinaheunfällen - Erreichung/ Unterschreitung von Schwellen für tolerierte Risiken -Synergieeffekte mit „benachbarten“ Instrumenten (z.B. Gefährdungsbeurteilung nach Gefahrstoffverordnung) -Bereichsübergreifende Kommunikation fördern -Betriebsinterner Wissenstransfer	
9.	Werden Verfahren im Rahmen der Aktualisierung (sofern diese erfolgt) genutzt und angepasst?		
10.	Wurden in Ihrem Zuständigkeitsgebiet in der Vergangenheit gänzlich andere Verfahren zur GA&RB angewandt? Wenn ja welche? Aus welchem Grund wurden diese Verfahren abgelöst?		
11.	Gibt es bei den Betreibern (die Anlagen betreibende Unternehmen oder Konzerne) interne Vorgaben, die den Einsatz bestimmter Verfahren bestimmen? Wenn ja, welche?		

No.	Frage	Hinweis	Antwort
12.	Formuliert Ihre Behörde Vorgaben, die den Einsatz bestimmter Verfahren bestimmen? Wenn ja, welche?		
13.	Wird bei der Analyse von eingetretenen Ereignissen geprüft, ob methodische Schwächen der Verfahren oder Defizite bei ihrer Anwendung eine der Ursachen waren?		

Tabelle 89: Fragenblock III

No.	Frage	Hinweis	Antwort
Antworten nach Möglichkeit bitte je angewendetem Verfahren (resp. Methode, Modell) angeben.			
14.	- Welche für die Anwendung des Verfahrens relevante Vorschriften und/oder Regeln, - welche verfahrensbeschreibende Anwendungsleitfäden (und Fachliteratur) sind Ihnen bekannt und werden von Ihnen vorgeschlagen/ bzw. deren Anwendung gefordert?	Beispiel: „Das PAAG- / HAZOP-Verfahren und weitere praxisbewährte Methoden“, ISSA 2020	
15.	Werden Bewertungskataloge und/oder Checklisten (nach Normen, Literatur oder nach eigenen Kriterien, ...) verwendet? Wenn ja, welche?	Gemeint sind zum Beispiel FMEA-Bewertungstabellen, Risikomatrizen, Definitionen von Risikoklassen etc. (siehe auch "Das PAAG-/ HAZOP-Verfahren und weitere praxisbewährte Methoden")	
16.	Wird die Anwendung der Methode (des Verfahrens, des Modells) durch geeignete Software erleichtert? Ist diese kostenpflichtig oder frei verfügbar (open source)?		
17.	Holen sich die Betreiber externe Unterstützung bei der Anwendung der Verfahren? Wenn ja, welche?	Beispiele: Moderator bei Teamarbeit, Experten für Einzelfragen bei Teamarbeit, Helpdesk	

No.	Frage	Hinweis	Antwort
		bei von Organisationen unterstützten Verfahren	
18.	Welche Weiterbildungen in Bezug auf die Verfahren, Methoden und Modelle zur Durchführung der GA&RB, sind für die Beschäftigten der Betriebsbereiche zugänglich? Um welche Beschäftigte (Angabe Aufgabenbereich) handelt es sich dabei?		

Tabelle 90: Fragenblock IV

No.	Frage	Hinweis	Antwort
19.	Werden bei den Betreibern in Ihrem Zuständigkeitsgebiet probabilistische Verfahren angewendet? Wenn ja, um welche Verfahren handelt es sich?	Mit Angabe von Eintrittswahrscheinlichkeiten für Ereignisse	
20.	Zu welchem Zweck, mit welcher Zielstellung wenden die Betreiber die von ihnen gewählten Verfahren (s.o.) Ihrer Einschätzung nach an?	Beispiele: -Vergleich Designalternativen -Weiterentwicklung Sicherheitskonzepte -Prüfung der identifizierten Szenarien -Gefahrenabwehrplanung	
21.	Werden die probabilistischen Verfahren zusätzlich zu einem anderen Verfahren eingesetzt? Wenn ja, zusätzlich zu welchem?	z.B. zusätzlich zu einer Untersuchung mit dem PAAG-Verfahren	
22.	Bei „quantitativen Verfahren“: Welche Daten, welche Datenbanken werden dabei herangezogen?		
23.	Inwiefern werden menschlichen Faktoren berücksichtigt? Werden diese quantifiziert?		
24.	Werden die Daten auf Eignung im spezifischen	Unter anderem folgende Aspekte können die Eignung bedingen: Alter Datenquelle,	

No.	Frage	Hinweis	Antwort
	Anwendungskontext geprüft?	Vergleichbarkeit Anwendungs- (Technologie-)bereiche, Vergleichbarkeit berücksichtigter Fehlerquellen	
25.	Welche Hürden sehen Sie bei der Durchführung probabilistischer Verfahren?		

Tabelle 91: Fragenblock V

No.	Frage	Hinweis	Antwort
26.	Nach welchen Gesichtspunkten erfolgt Ihre Bewertung der dokumentierten GA&RB (Sicherheitsbericht, protokollierter Analysen, …)?		
27.	Haben die Betreiber Schwierigkeiten, die Anforderungen der StörfallV mit den bei Ihnen angewendeten Verfahren umzusetzen? Wenn ja, welche Schwierigkeiten sind aufgetreten und wie wurden diese gelöst?		
28.	Davon abgesehen: Wo sehen Sie für die Betreiber den schwierigsten Teil des Prozesses der GA&RB? (vgl. Abbildung in Anhang A)		
29.	Empfinden Sie die Ihnen vorgelegten Sicherheitsberichte/ dokumentierten GA&RB'en grundsätzlich als plausibel und nachvollziehbar? Wenn nicht, sehen Sie einen Zusammenhang zu den angewendeten Verfahren, Methoden und Modellen?		
30.	Haben sich Ihrer Einschätzung nach bestimmte Verfahren, Methoden und/oder Modelle bewährt/etabliert		

No.	Frage	Hinweis	Antwort
	(allgemein aber auch bezogen auf Anlagentypen)? Wenn ja, welche?		
31.	Welche zusätzlichen Hilfsmittel und/oder Hilfestellungen würden Ihrer Meinung nach die Prüfung der Dokumentation der durchgeführten GA&RB für Sie erleichtern?		
32.	Wie stark ist Ihrer Meinung nach die Abhängigkeit der Analyseergebnisse vom jeweiligen Analyseteam? Welche Freiheitsgrade, subjektive Einschätzungen und Bewertungen führen bei der Erstellung der GA&RB zu Variationen in den Analyseergebnissen?	Abweichungen können z.B. durch freie Einstellungsmöglichkeiten von Parametern bei der Benutzung von Computerprogrammen entstehen	
33.	Als wie aufwändig schätzen Sie die einzelnen Verfahren/die Methoden/die Modelle ein? Wie lässt sich der Aufwand minimieren?		
34.	Welchen Mehrwert sehen Sie – abgesehen von der Erfüllung der rechtlichen Vorhaben der StörfallV - im Zusammenhang mit der Durchführung der GA&RB?		
35.	Sehen Sie Synergien zu weiteren sicherheitsanalytischen Verfahren wie beispielsweise der Risikobeurteilung nach Maschinenrichtlinie? Wenn ja, beeinflusst das die Verfahrensauswahl?		
36.	Ist erkennbar, dass die Auswahl des angewendeten Verfahrens einen Einfluss auf die Störungsanfälligkeit der Anlagen hat? (sind die Verfahren also „unterschiedlich gut“ um Störungen vorbeugen)?	Beispiel: Verfahren x: bessere Reduktion, Verfahren y: schlechtere Reduktion	

No.	Frage	Hinweis	Antwort
37.	Bei welchen Verfahren ist die externe Kommunikation der Ergebnisse der Anwendung der Verfahren erfolgreicher?		
38.	Bei welchen Verfahren ist die interne und externe Umsetzung der Ergebnisse der Anwendung der Verfahren erfolgreicher?		
39.	Gibt es weitere – neben den von uns festgelegten – Kategorien (u.a. Vollständigkeit und Korrektheit der durchgeführten Analyse, Aufwand der Analyse, Verfügbarkeit von Hilfsmitteln, Kommunikation, Umsetzung Ergebnisse), nach denen die Verfahren bewertet werden sollten? Wenn ja, welche sind das und wie sieht die konkrete Bewertung aus?		

Tabelle 92: Fragenblock VI

Siehe Fragenblock VI im Fragenbogen für die Betreiber.

B Deterministische und probabilistische Verfahren

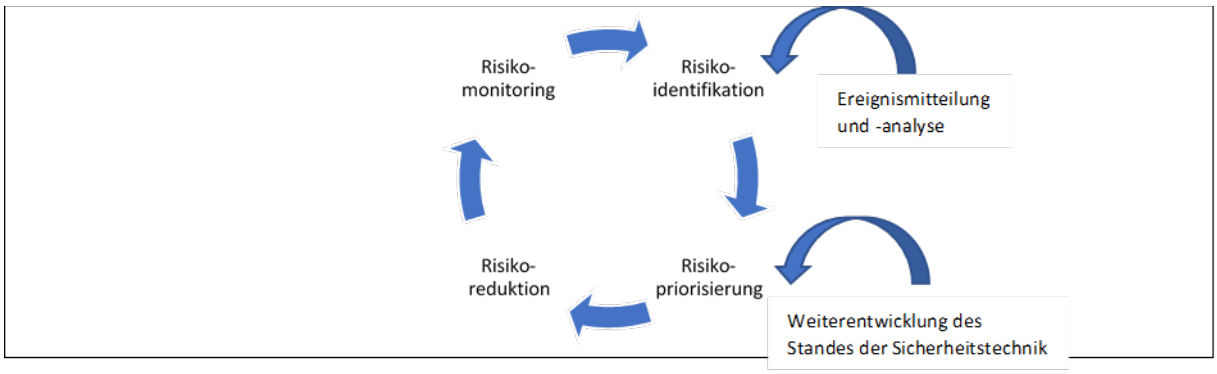
B.1 Zur Begriffsbestimmung von deterministischen und probabilistischen Verfahren

Es ist geübte Praxis, die Verfahren zur Gefahrenanalyse bis Störfallrisikobewertungen in deterministische und probabilistische Verfahren zu unterteilen. Womit eine Unterscheidung nach regelwerksbasiert und risikobasiert gemeint wird.

Im Kern ist diese Unterscheidung auf zwei unterschiedliche Konzepte der Risikobewertung zurückzuführen: Einerseits erscheint es naheliegend, eine Anlage als sicher einzustufen, wenn nachgewiesen wird, dass bei der Identifikation der relevanten Gefahrenquellen und der Behandlung der selbigen (d.h. dem Versehen mit entsprechenden Vorkehrungen und Maßnahmen) sämtliche relevanten Normen, Regeln, etc. berücksichtigt worden sind, sodass dem Stand der Sicherheitstechnik entsprochen wird und Störfälle damit als ausgeschlossen gelten können. Dieser Ansatz bietet sich insbesondere in Ländern mit einem ausgeprägten Regelwerk (wie es z.B. in Deutschland der Fall ist) an. Der zweite Ansatz besteht in der Berechnung konkreter Risikokennzahlen, welche der Bewertungsmaßstab dafür sind, ob das Risiko bereits ausreichend reduziert wurde.

Dem deterministischen Ansatz ist eine gewisse Dynamik eigen, welche eine mit der Zeit zunehmende Sicherheit der Anlagen gewährleistet. Das Konzept des Standes der Sicherheitstechnik verbunden mit dem risikounabhängigen Sicherheitsmanagementkreislauf als Optimierungsantrieb spielen hierbei eine zentrale Rolle:

Abbildung 63: 4-stufiger Sicherheitsmanagementkreislauf



Quelle: Eigendarstellung IZP

Probabilistische Verfahren werden in Deutschland als Ergänzung der deterministischen Verfahren angesehen.

Eine einheitliche Definition für probabilistische Verfahren hat sich bislang nicht etabliert. Im Kern geht es bei diesen Verfahren um die Zuweisung von konkreten Eintrittshäufigkeiten für unerwünschte Ereignisse und Szenarien. Als weitere, charakterisierende Merkmale werden unter anderem genannt:

- Ermittlung von Risikozahlen: Risiko=Ereignishäufigkeit*Ereignisschwere
- Ereigniszerlegung: Unerwünschte Ereignisse werden dabei als Zusammenwirken mehrerer ungünstiger Umstände (Komponentenausfälle, Fehlhandlungen, äußere Einwirkungen, etc.) beschrieben. Während für die Ereignisse selbst in der Regel kaum belastbare Statistiken vorliegen (da seltene Ereignisse), können für die einzelnen Bestandteile belastbarere

Aussagen zu Eintrittshäufigkeiten getroffen werden. Mittels FTA- und ETA-techniken können mit diesen Werten Eintrittshäufigkeiten für das Ereignis berechnet werden.

- Unterscheidung, ob lediglich sog. „Auslegungsstörfälle“ oder sämtliche Störfälle untersucht werden. Auslegungsstörfälle sind Ausfälle, die das gesamte Störfallspektrum abdecken und somit die schärfsten Anforderungen an die Sicherheitssysteme stellen. Die probabilistische Untersuchung der Auslegungsstörfälle kann unter anderem zu belastbareren Festlegungen entsprechender Vorkehrungen zur Vermeidung dieser Störfälle führen
- Bewertung des Risikos, das vom Betriebsbereich ausgeht. Dies geschieht theoretisch zum Beispiel anhand einer – vorab festzulegenden – Akzeptanzlinie in einem - wiederum vorab zu definierenden – Risikodiagrammes.

„Theoretische“ Definitionen (die realen Verfahren können sonstige Elemente beinhalten)

Der Determinismus (von lateinisch determinare ‚festlegen', ‚Grenzen setzen', ‚begrenzen') ist die Auffassung, dass alle – insbesondere auch zukünftige – Ereignisse durch Vorbedingungen eindeutig festgelegt sind.

Deterministik: Es ist vor der Durchführung eines Verfahrens bereits festgelegt, welche Vorkehrungen zur Störfallverhinderung und welche Maßnahmen zur Störfallauswirkungsbegrenzung aufgrund der Ergebnisse der einzelnen Verfahrensstufen erforderlich sind.

Eine probabilistische Aussage (auch: Wahrscheinlichkeitsaussage) sagt über einen Sachverhalt (etwa das Zustandekommen eines Ereignisses) aus, dass dieser zu einer bestimmten Wahrscheinlichkeit besteht.

Probabilistik: Anwendung eines Verfahrens auf der Basis von Wahrscheinlichkeitsaussagen über a) das Eintreten von Störfällen b) die Fehlfunktion von Teilen in Ereignisabläufen (technisch/menschlich) und Bestimmung der Erforderlichkeit weiterer Maßnahmen.

Bezüglich der Anwendung probabilistischer Ansätze zieht der Leitfaden KAS-55 das Fazit, dass in Deutschland überwiegend deterministische Methoden mit qualitativen bzw. semi-quantitativen Wahrscheinlichkeitsschätzungen zum Einsatz kommen, d.h. die Angabe der Wahrscheinlichkeit erfolgt i. d. R. qualitativ im Sinne von „sehr gering“, „gering“ oder „hoch (s. a. (Leitfaden KAS-55, Abschnitt 6.1)). Weiterhin wird in dem Leitfaden ausgeführt: „Der deterministische Ansatz hat sich in diesem Zusammenhang als sinnvoll erwiesen und bewährt. Die Berechnung eines Risikos sowie die Festlegung eines Restrisikos sind nicht Bestandteil der derzeitigen Verwaltungspraxis und werden weder von den Seveso- Richtlinien noch von der Störfall-Verordnung verlangt. Diesem Sachverhalt wird auch in dem Leitfaden zur Erstellung eines Sicherheitsberichts der EU-Kommission Rechnung getragen.“

B.2 Gründe für die Anwendung probabilistischer Verfahren

Auf Grund des nicht unerheblichen zusätzlichen Aufwandes, der mit der Anwendung probabilistischer Verfahren einhergeht, müssen diese verwertbare Informationsgewinne im Vergleich zu deterministisch geprägten Vorgehensweisen generieren. Mehrwerte können sich wie folgt ergeben:

- Die quantitative Untersuchung der einzelnen Störfallabläufe dient als Grundlage für eine zusätzliche Überprüfung der sicherheitstechnischen Auslegung bzw. des Sicherheitskonzepts der Anlage auf Schwachstellen bzw. auf ihre Angemessenheit und

somit der Optimierung von Investitionsentscheidungen (dies betrifft Anlagenauslegung und Betriebsweise, zum Beispiel Auswahl zwischen Designalternativen während Planungszustand, oder auch die Festlegung von Inspektionsintervallen) (vgl. SFK-GS-41, Kap. 4.3)

- Insbesondere kann die Angemessenheit von Anlagenauslegung und Betriebsweise durch die Ermittlung derjenigen Ereignisabläufe, die entscheidend zum Risiko beitragen, überprüft werden. (vgl. SFK-GS-41, Kap. 4.3)
- Quantitative Analyseergebnisse können dazu dienen, den hohen Standard in der Anlagensicherheit in Deutschland auf internationaler Ebene klarer und somit vergleichbarer darzustellen (vgl. SFK-GS-41, Kap. 0). Insbesondere liefert die explizite Betrachtung der Eintrittshäufigkeiten von Dennoch-Störfällen einen Beitrag zur Quantifizierung des vertretbaren Risikos (vgl. SFK-GS-41, Kap. 4.3)

B.3 Unsicherheiten im Zusammenhang mit Risikoberechnungen

Berechnete Risikozahlen sind im Allgemeinen aus diversen Gründen mit Unsicherheiten behaftet, und daher nur bedingt dazu geeignet, als Absolutwerte interpretiert zu werden.

Grundsätzlich lassen sich folgende Arten von Unsicherheiten feststellen:

a) Unvollständige Identifizierung der zutreffenden Gefahrenquellen und -ursachen führt zu einer Unterschätzung des realen Risikos

b) Arbeit mit Erwartungswerten bzw. Mittelwerten (und der Unterschlagung von Variabilitäten in Eintrittshäufigkeit und Ausmaß).

c) Zuweisung von nichtzutreffenden Ereigniseintrittshäufigkeiten für bestimmte Gefahrenquellen oder nichtzutreffenden Versagenswahrscheinlichkeiten von Vorkehrungen und Maßnahmen

Unsicherheiten resultieren z.B. aus der Arbeit mit Zuverlässigkeitsdatenbanken:

- Zuverlässigkeitswerte (z.B. Ausfallraten) in den Datenbanken sind in der Regel Schätzungen aus mehr oder wenig begrenzten Stichprobenumfängen. Teilweise werden in den Datenbanken Konfidenzintervalle für die geschätzten Ausfallraten angegeben, welche die Unsicherheit der Schätzung quantifizieren.
- Ausfallraten aus der Datenbank sind Referenzausfallraten, die mit sog. „Stressfaktoren“ auf den eigenen Anwendungskontext (Umgebungsbedingungen, Betriebliche Belastung, etc.) angepasst werden müssen. Hierfür stellen die Standards Umrechnungsformeln zur Verfügung
- Weiterhin ist häufig unklar, welche Ausfallursachen in die Statistiken eingegangen sind. Wurden Komponentenausfälle aufgrund Instandhaltungsfehler, externer Einflüsse, oder aufgrund Installationsfehler (…) herausgefiltert? Und: Welches Ausfallursachen sind für die vorliegende, zu analysierende Komponente relevant?
- Statistiken zu Ausfallraten bilden indirekt den technologischen Stand ab. Je älter die Statistik bzw. das herangezogene Handbuch, umso höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Statistik nicht mehr repräsentativ ist.

C Grundszenarien des Verfahrens „Szenarienanalyse - HAZOP-Master“

Grundszenario	Störfall	Szenarienarten (nach StörfallV)
Schwächung der dichten Umschließung/ Wandstärkenabtrag	Wandversagen	Stofffrei-setzungen
starke Korrosion/Lochfraß		
Gefügeschwächung		
zu hohe Starttemperatur	Überhitzung der Wandung	
unerwarteter Wärmeeintrag		
unerwartete wärmebildende Prozesse		
fehlende Kühlung		
zu niedrige Umgebungstemperatur	Unterkühlung der Wandung	
unerwarteter Kälteeintrag		
unerwartete kältebildende Prozesse		
fehlende Heizung		
zu hoher Startdruck	Überdrücken der Wandung	
unerwarteter Druckeintrag		
unerwartete druckbildende Prozesse		
fehlendes Entspannen		
Druckspitzen		
zu geringer Startdruck	Unterdruck/ Einziehen der Wandung	
unerwarteter Unterdruckeintrag		
unerwartete unterdruckbildende Prozesse		
fehlender Druckausgleich		
Überlastung durch unerwartete Zusatzkräfte	Überlastung durch Zusatzkräfte	
(mechanische) Zerstörung von innen	Zerstörung der Wandung	
(mechanische) Zerstörung von außen		
Zerstörung durch außerbetriebliche Einflüsse		
Freisetzung aus ständig offenen Verbindungen ins Freie	Stofffreisetzung/ Öffnungsvorgänge	
Freisetzung bei temporären betrieblichen Öffnungsvorgängen		
Freisetzung bei prozessbedingtem Ein-/ Ausbau		
Freisetzung bei temporären betrieblichen Anschlussvorgängen		

Grundszenario	Störfall	Szenarienarten (nach StörfallV)
Freisetzung bei außerbetrieblichen Öffnungsvorgängen		
Versagen von Rückhalteeinrichtungen	Stofffreisetzung/ fehlendes Zurückhalten	
Stoffaustritt über Druckentlastungseinrichtungen		
zu hohes Gesamtpotential	durchgehende Batch-Reaktion	Batch-Reactional
zu hohe Reaktantenkonzentration		
unerwartete Reaktionsbeschleunigung		
erhöhte Reaktionsfähigkeit der Reaktanten		
fehlende Dämpfung/Inhibierung		
zu hohe Starttemperatur		
unerwarteter zusätzlicher Wärmeeintrag		
fehlende Kühlung		
zu hoher Prozessdruck bei Gasreaktionen (siehe auch erhöhte Temperatur)		
zu niedriger Prozessdruck bei gasbildenden Reaktionen		
fehlende Homogenität		
unerwartete zusätzliche Wärmebildung		
unerwarteter Reaktionsverlauf		
zu hohe Starttemperatur	Überhitzen Dosier-Reaktion	Dosier-Reaktion
Wärmebildung übersteigt Kühlleistung		
unerwarteter zusätzlicher Wärmeeintrag		
fehlende Kühlung		
zu geringe Umsetzungsrate/ Wärmeproduktion	Dosier-Reaktion - Akkumulation mit Durchgehen nach Wieder-Anspringen	
Zugaberate übersteigt Umsetzungsrate		
zu geringe Reaktantenkonzentration		
unerwartete Reaktionshemmung		
reduzierte Reaktionsfähigkeit der Reaktanten		
fehlende Reaktionsbeschleunigung		
zu geringe Prozesstemperatur		
fehlende Homogenität		
unerwarteter Reaktionsverlauf		
zu hohe Starttemperatur		Konti-Reaktion

Grundszenario	Störfall	Szenarienarten (nach StörfallV)
Wärmebildung übersteigt Kühlleistung	Überhitzen Konti-Reaktion	
unerwarteter zusätzlicher Wärmeeintrag		
fehlende Kühlung		
zu geringe Umsetzungsrate/ Wärmeproduktion	unvollständige Reaktion mit Austrag	
zu geringe Reaktionszeit		
zu geringe Reaktantenkonzentration		
unerwartete Reaktionshemmung		
fehlende Reaktionsbeschleunigung		
zu geringe Prozesstemperatur		
fehlende Homogenität		
unerwartet starker Druckaufbau durch gebildete Gase	Überdrücken bei gasbildender Reaktion	besondere Reaktion
blockierte Druckentlastung		
unerwartete Mischreaktion/Stoffvermischung	unerwartete Reaktion	
unerwarteter Start einer Eigen-/Poly-Reaktion		
unerwarteter Start Sekundär-/Zersetzungsreaktion		
Wassereintrag bei wasserreaktiven Stoffen		
unbekannte gefährliche Stoff-/Reaktionseigenschaften		
Ex-Atmosphäre durch unerwartet vorhandenen Brennstoff	Explosion	Explosion
Ex-Atmosphäre durch unerwartet vorhandenes Oxidationsmittel		
Explosionen durch unerwartetes Erreichen des Ex-Bereichs		
erhöhte Ex-Gefahr durch Ausdehnung von Ex-Zonen		
Explosionen durch unerwartete Zündung		
erhöhter Ausgangsdruck/unerwartet starke Explosionswirkung		
Versagen technischer Explosionsschutzes		
Explosion wegen gefährlicherer Fremdstoffe		
Brand durch heiße Anlagenteile	Brand	Brand
Brand durch Heißarbeiten		
Brand durch Selbstentzündung/ pyrophore Stoffe		

Grundszenario	Störfall	Szenarienarten (nach StörfallV)
Brand durch Selbsterhitzung		
Brand durch oxidierende Stoffe		
Entzündung freigesetzter brennbarer Stoffe		
Brände von Metallwerkstoffen (`Chlor-Eisenbrand´, `Fluorfeuer´)		
Explosionen mit Folgebrand		
Brand durch Blitzschlag		
unerwarteter Austrag gefährlicher Stoffe/Energien	Verschleppung	Verschleppung
unerwartete gefährliche Eigenschaften auszutragender Stoffe		

D Checkliste „Wesentliche prozessspezifische Überprüfungspunkte zu systematischen Sicherheitsbetrachtungen bei Mehrzweckanlagen“ der Firma Compliance Management Kappelmaier

D.1 Punkte die für alle Apparate/Behälter gelten

Bereich	Lfd. Nr.	Themenbereich	Zu klärende Fragestellungen
1. Allgemeine Themen	1.01	Strom-/Energieausfall	Kann Strom-/Energieausfall direkt zu einem Störfallereignis führen? Wenn ja: Festlegen spezieller Maßnahmen
	1.02	Eignung der PLT-Ausstattungen	Prozessabhängige Bewertung der PLT-Prozesseinrichtungen der vorgesehenen Apparate/Aggregate
	1.03	Eignung von PLT-Schutzeinrichtungen	Prozessabhängige Bewertung der SIL-Einstufung von PLT-Schutzeinrichtungen
	1.04	Eignung der Druckentlastungs-einrichtungen	Prozessabhängige Bewertung der Auslegung von Si-Ventilen/Berstscheiben
	1.05	Einsatz von Stoffen mit neuen Gefahrenaspekten (z.B. Brennbarkeit, Toxizität)	Prozessabhängige Bewertung der Notwendigkeit angepasster Sicherheitsmaßnahmen
	1.06	Sicherheitsmaßnahmen einzelner Einheiten	Prozessabhängige Bewertung der Notwendigkeit besonderer Notfallmaßnahmen für einzelne Units (z.B. NOTAUS, Notkühlungen, Notentleerungen, Stoppersysteme für chemische Reaktionen)
	1.07	Befüllmöglichkeiten von Behältern	Einbindung von zusätzlich nötigen temporären Einfüllmöglichkeiten in das Absicherungskonzept gegen Überfüllen
	1.08	Eignung vorgesehener Behälter/ Apparate/Aggregate - Beständigkeit	Prozessabhängige Überprüfung der Beständigkeit/Eignung (z.B. Korrosion, Drücke, Temperaturen, Abrasion, Kavitation) von Apparaten, Aggregaten und deren Dichtungen einschließlich solcher in Entsorgungseinrichtungen
	1.09	Verschleppung besonders toxischer, brennbarer, heißer, umweltgefährdender oder reaktiver Stoffe	Prozessabhängige Bewertung der Gefahr ihres Verschleppens in andere Systeme
	1.10	Schaumbildung	Prozessabhängige Überprüfung der Gefahren der Störung von PLT-Einrichtungen durch Schaumbildung
	1.11	Belagbildung	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren von Belagbildung insbesondere für PLT- und Druckentlastungs-Einrichtungen

Bereich	Lfd. Nr.	Themenbereich	Zu klärende Fragestellungen
2. Stoff-freisetzungen	2.01	Einsatz besonders korrosiver Stoffe	Prozessabhängige Bewertung der Gefahr des Verschleppens hochkorrosiver Stoffe in ungeeignete Systeme mit Leckage und Freisetzung dort
	2.02	Einsatz wässriger Mischungen	Prozessabhängige Festlegung von Maßnahmen gegen Aufgefrieren von Leitungen insbesondere bei der Verwendung von Prozesskälte
	2.03	Eingesperrte Volumina kalter Flüssigkeiten	Prozessabhängige Bewertung der Gefahr des Einsperrens kalter Flüssigkeit mit Erwärmung und Aufplatzen
	2.04	Druckspitzen	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren gefährlicher Druckspitzen (z.B. Druckstoß, Dampfschlag)
	2.05	Einsatz besonders umweltgefährdender Stoffe	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren bei Freisetzungen, insbesondere über unbefestigtem Grund
	2.06	Einsatz besonders toxischer Stoffe	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren für die Mitarbeiter und Nachbarschaft bei Freisetzungen
	2.07	Einsatz von am Geruch nicht erkennbaren toxischen Stoffe	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren für die Mitarbeiter bei Freisetzungen Evtl. Festlegen zusätzlicher Sicherheitsmaßnahmen
	2.08	Eignung von Auffangflächen	Prozessabhängige Überprüfung der Eignung der vorhandenen Auffang-/Rückhalteflächen bezüglich neuer Stoffe
	2.09	Eignung von Aufnahmemittel für Leckmengen	Prozessabhängige Überprüfung der Eignung der im Anlagenbereich vorhandenen Aufnahmemittel für Leckmengen; evtl. Bereitstellung geeigneter Mittel;
3. Ex-Schutz	3.01	Erstmaliger Einsatz entzündbarer Stoffe	Prozessabhängige Überprüfung der Eignung der Einrichtungen bezüglich Ex-Schutz
	3.02	Einsatz entzündbarer Stoffe allgemein	Sicherstellen der Einbindung aller betroffenen Einrichtungen in die betrieblichen Ex-Schutz-/Inertisierungsmaßnahmen
	3.03	Einsatz entzündbarer Reinigungs-/ Waschmedien	Prozessabhängige Festlegung spezieller Ex-Schutz-/Inertisierungsmaßnahmen, insbesondere bei Verwendung von z.B. Reinigungsdüsen mit der Gefahr erhöhter elektrostatischer Aufladung
	3.04	Schaumbildung mit Lufteintrag in inertisierten Systemen	Prozessabhängige Überprüfung der Gefahren der Aufhebung der Inertisierung durch Lufteinschluss im Schaum

Bereich	Lfd. Nr.	Themenbereich	Zu klärende Fragestellungen
	3.05	Lufteinschlüssen in Feststoffen beim Eintrag in inertisierte Systeme	Prozessabhängige Überprüfung der Gefahren der Aufhebung der Inertisierung durch Lufteinschluss in Feststoffen
	3.06	Eintrag/Bildung von Stoffen mit sehr niedriger Mindestzündenergie	Prozessabhängige Überprüfung der Gefahren von Bildung/Eintrag von Stoffe mit geringer Mindestzündenergie (z.B. H2)
	3.07	Einsatz/Bildung von Stoffen mit niedrigerem Flammpunkt	Prozessabhängige Überprüfung der Gefahren von Bildung/Eintrag von Stoffen mit niedrigerem Flammpunkt
	3.08	Einsatz/Bildung von Stoffen mit niedriger UEG/höherer OEG	Prozessabhängige Überprüfung der Gefahren von Bildung/Eintrag von Stoffen mit vergrößertem Ex-Bereich
	3.09	Einsatz/Bildung von Stoffen mit niedriger Sauerstoffgrenz-konzentration	Prozessabhängige Überprüfung der Gefahren von Bildung/Eintrag von Stoffen mit niedriger Sauerstoffgrenzkonzentration (z.B. H2)
	3.10	Einsatz/Bildung von Stoffen mit niedrigen Zündtemperaturen	Prozessabhängige Überprüfung der Gefahren von Bildung/Eintrag von Stoffe mit niedrigen Zündtemperaturen (z.B. < 200°C)
	3.11	Einsatz von Flüssigkeiten mit geringer elektrischer Leitfähigkeit	Prozessabhängige Überprüfung der Gefahren einer höheren elektrostatischen Aufladbarkeit
	3.12	Vorhandensein von Feststoffen mit geringerer Korngröße	Prozessabhängige Überprüfung der Gefahren einer leichteren Zündfähigkeit/reduzierten Mindestzündenergie
	3.13	Einsatz von Feststoffen mit höherer Korngröße	Prozessabhängige Überprüfung der Gefahren einer höheren elektrostatischen Aufladbarkeit
	3.14	Einsatz von Feststoffen, die noch feucht von brennbaren Lösemitteln sind	Prozessabhängige Überprüfung der Ex-Gefahren zu stark lösemittelhaltiger Feststoffe
4. Brand-schutz	4.01	Eignung von Feuerlöschern/Löschmitteln	Prozessabhängige Überprüfung der Eignung der im Anlagenbereich vorhandenen Feuerlöscher; evtl. Austausch in Abstimmung mit Brandschutzexperten;
	4.02	Einsatz/Entstehung selbstentzündlicher (pyrophorer) Stoffe	Prozessabhängige Überprüfung der Gefahren von Bildung/Eintrag selbstentzündlicher Stoffe
	4.03	Einsatz/Entstehung selbsterhitzungsfähiger Stoffe	Prozessabhängige Überprüfung der Gefahren von Bildung/Eintrag selbsterhitzungsfähiger Stoffe
	4.04	Einsatz/Entstehung von Stoffen mit leichterer Entflammbarkeit	Prozessabhängige Überprüfung der Gefahren von Bildung/Eintrag von Stoffen mit niedrigerer Glimm-/Zündtemperatur

Bereich	Lfd. Nr.	Themenbereich	Zu klärende Fragestellungen
5. Reaktionen/ Exothermie	5.01	Durchführung von Reaktionen mit erhöhter Exothermie allgemein	Prozessabhängige Überprüfung der Eignung der vorhandenen Schutz-, Notfall- und Begrenzungsmaßnahmen
	5.02	Rohstoffqualität und -identität	Prozessabhängige Festlegung von Zeitpunkt, Umfang und Tiefe der Qualitäts- und Identitätskontrollen
	5.03	Wasserreaktive Stoffe mit/ohne Bildung gefährlicher Stoffe	Prozessabhängige Überprüfung der Gefahren des Einsatzes wasserreaktiver Stoffe evtl. Festlegen von Maßnahmen zur Verhinderung eines Wassereintrags;
	5.04	Nebenreaktion mit verwendeten Werkstoffen	Prozessabhängige Überprüfung der Gefahren der Querbeeinflussung (chemische Reaktionen) von Werkstoffen und Einsatzstoffen evtl. Festlegen von Maßnahmen zur Verhinderung der Nutzung falscher Apparate und Ersatzteile;
	5.05	Starttemperatur/-druck	Prozessabhängige Überprüfung der Gefahren der Abweichung vom zulässigen Druck-/Temperaturfenster beim Prozessstart
	5.06	Prozesstemperatur/-druck	Prozessabhängiges Festlegen druck-/temperaturbezogener Maßnahmen: *Abschaltwerte für Sicherheitstemperaturbegrenzer (z.B. an einer Heizung) *Verriegelung z.B. der Vorlagen bei erhöhten Werten von Start-/Prozesstemperatur-/druck, *Festlegen produktspezifischer Schaltwerte von Temperatur-/Druckabsicherungen *Temperatur-/Druckgrenzen sicherheitsgerichteter Schaltungen (SIL) zur Aktivierung vorgesehener Notfallmaßnahmen
	5.07	Mengenkritische Reaktionen	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren des Durchgehens der Reaktion bei Überschuss/ zu geringer/fehlender Menge einer Reaktionskomponente
	5.08	verdünnungskritische Reaktionen	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren des Durchgehens der Reaktion bei fehlender Verdünnung/zu hoher Konzentration
	5.09	Reaktionen, bei denen die Vorlagereihenfolge wichtig ist	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren des Vorlegens/Dosierens in falscher Reihenfolge
	5.10	Katalysierte Reaktionen	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren falscher/fehlender Katalysatormengen
	5.11	Einsatz von Inhibitoren/ inhibierten Einsatzstoffen	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren falscher/fehlender Inhibitormengen
	5.12	Unerwartete katalytische Einflüsse	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren unerwarteter katalytischer Einflüsse (z.B.

Bereich	Lfd. Nr.	Themenbereich	Zu klärende Fragestellungen
			Produktverunreinigungen, Reinigungsmittel, Korrosionsprodukte/Rost, Werkstoffe)
	5.13	Feststoff-Reaktionen	Prozessabhängige Bewertung des Einflusses der Korngröße und der Feststofflöslichkeit
	5.14	Gasreaktionen	Prozessabhängige Bewertung des Einflusses des Prozessdrucks auf die Reaktionsgeschwindigkeit
	5.15	Gefährliche Inhomogenität	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren von Rührerausfall, Rührerbruch und erhöhter Viskosität
	5.16	pH-Wert-sensible Reaktionen	Prozessabhängige Bewertung des Einflusses des pH-Werts;
	5.17	Unvollständiger Reaktionsablauf	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren falscher Reaktionszeiten insbesondere bezüglich des Austrags nicht abreagierter Produkte
	5.18	Gasbildung	* Prozessabhängige Bewertung der Gefahren von Gasstau (insbesondere Verstopfungen/Belagbildung bei der Gasabführung) * Prozessabhängige Bewertung der Eignung/Auslegung der Druckentlastungseinrichtungen (Sicherheitsventile/Berstscheiben)
	5.19	Eigenreaktive Stoffe	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren ungeplanter Eigenreaktionen (z.B. Poly-Reaktionen)
	5.20	Gefährliche Nebenreaktionen	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren gefährlicher Nebenreaktionen (z.B. thermische Instabilität/Selbstzerfall)
	5.21	Einfluss gefährlicher Stoffkombinationen	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren der Vermischung mit prozessfremden Stoffen (insb. bezüglich vorhandener kritischer Stoffe im Anlagenbereich und vorhandener Betriebsmedien) z.B. in Form einer Wechselwirkungsmatrix
	5.22	Einfluss gefährlicher Stoff-/ Werkstoffkombinationen	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren des Zusammenkommens von Prozessstoffen mit reaktionsrelevanten Werkstoffen (insbesondere Buntmetalle)
	5.23	Reaktionen im Abgassystem	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren ungeplanter Reaktionen von Abgasen verschiedener Behälter/Prozesse im Abgassystem
	5.24	Reaktionen ohne inhärente Sicherheit (z.B. Siedebarriere)	Prozessabhängige Bewertung der Notwendigkeit zusätzlicher Schutzmaßnahmen

Bereich	Lfd. Nr.	Themenbereich	Zu klärende Fragestellungen
			zur Ereignisabwendung: *Einsatz von Notstrom *Druck- und Temperaturgrenzwerte zur sicherheitsgerichteten Abschaltung *Notfallmaßnahmen bei beginnendem Run-Away (z.B. Notkühlen/-entspannen/-ablassen/-fluten/-stoppen) *Nachweis Auslegung des Si-Ventils bzw. der Berstscheibe auch für durchgehende Reaktionen *Räumung des betroffenen Betriebsbereichs, *sofortige zusätzliche Alarmierung von Nachbarbetrieben
	5.25	Dosiergeregelte Reaktionen/Akkumulation	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren der Akkumulation durch Nicht-Anspringen/Einschlafen Reaktion
	5.26	Dosiergeregelte Reaktionen/ Dosiergeschwindigkeit	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren einer zu hohen/zu geringen Dosiergeschwindigkeit
	5.27	Endotherme Reaktionen	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren einer Verschiebung der Reaktion in den exothermen Bereich

D.2 Punkte für spezielle Apparate/Behälter/Prozesse

Bereich	Lfd. Nr.	Themenbereich	Zu klärende Fragestellungen
6. Spezielle Punkte	6.01	Prozesse mit erhöhten Abwasser-temperaturen	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren erhöhter Abwassertemperaturen insbesondere in Bezug auf die Abwasserreinigungsanlagen
	6.02	Anfallen reaktiver Abwässer/Abfälle/Abgase	Prozessabhängige Bewertung der Notwendigkeit eines besonderen Entsorgungsprozesses;
	6.03	drucklose Apparate - Überdrücken mit Medien	Prozessabhängige Festlegung des max. Druckwerts, bei dessen Überschreiten Mediensysteme geschlossen werden.
	6.04	Trocknungs-vorgänge	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren von erhöhter/reduzierter Trocknungstemperatur und -dauer
	6.05	Wärmekammern und Gebindeläger	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren *des Ausgasens aus dem Lagergut (Druckaufbau) insbesondere in geschlossenen Gebinden

Bereich	Lfd. Nr.	Themenbereich	Zu klärende Fragestellungen
			*einsetzender Eigenreaktionen *Gefahr thermischer Instabilität
	6.06	Parallelproduktion	Prozessabhängige Bewertung der Gefahren *von stofflichen Quervermischungen z.B. anhand einer Wechselwirkungsmatrix beider Prozesse *ungeplanter Reaktionen von Abgasen/Abfällen/Abgasen verschiedener Behälter/Prozesse im jeweiligen Entsorgungssystem *Datenverwechslungen zwischen den Prozessen, insbesondere bei gemeinsam genutztem PLS

E Fragenkatalog des Wacker-Verfahrens der Firma Compliance Management Kappelmaier

Fragenkatalog
1. Versagen von Anlagenteilen 1.1 Ausfall aktiver Aggregate (z. B. Pumpen, Rührwerke, Verdichter, Kneter, Zentrifugen) 1.2 Bruch von Einbauteilen (z. B. Rührer, Statikmischer, Filter, Propellerschaufeln, Antriebswellen, Kolonnenböden) 1.3 Blockierter Durchfluss (z. B. Verstopfung, blockierte Ventile, verklebte Ventile, vergessene Steckscheiben, blockierte Explosionsdruckentlastungen) 1.4 Ausfall von PLT-Einrichtungen (z. B. Überfüllsicherungen, Druck-/Temperaturbegrenzer, Durchflussmesser, Regler, Analysegeräte, Explosionsunterdrückung) 1.5 Aktivierung wirksamer Zünd-quellen in Ex-Zone 0/1 bzw. 20/21 (z. B. heißgelaufene Teile, mechanische Funken, elektrische Funken, statische Elektrizität) 1.6 Versagen innerer Trennwände (z. B. Kühlschlangen, Heizmantel, Mehrkammertankabtrennungen) 1.7 Versagen Durchfluss verhindernder Maßnahmen (z. B. Rückschlagventile, Absperrventile, Flammendurchschlagsicherungen, Zerfallssperren) 1.8 Versagen der äußeren Umschließung (z. B. Behälterwandung, Rohrleitungen, Flanschverbindungungen, Wellendichtungen, Druckentlastungseinrichtungen, Absperreinrichtungen)
2. Energieausfall 2.1 Elektrische Energie für Antriebe/Heizung 2.2 Elektrische Energie für PLT 2.3 Steuerluft 2.4 Druckluft 2.5 Kühlwasser 2.6 Kühlsolekreislauf 2.7 Kälteanlagen 2.8 Dampf 2.9 Heizkreislauf 2.10 Inertgas (u. a. Stickstoff)
3. Menschliche Fehlhandlungen 3.1 Unterlassen notwendiger Handgriffe (z. B. nicht abschalten, nicht zudosieren, nicht umschalten) 3.2 Ausführen unzulässiger Handlungen (z. B. absperren, Heizung starten, Anlageteile öffnen, überbrücken, mechanisch beschädigen) 3.3 Falsches Ausführen von Eingriffen (z. B. falscher Ort, Zeitpunkt, Handgriff, Stoff, Ablauf, falsche Verbindung, Zeitspanne) 3.4 Wartungs-/Reparaturfehler (z. B. falsches Einbauteil, unvollständige Montage, vergessene Hilfsmittel, übersehener Fehler)
4. unerwünschte Stoffpaarungen

Fragenkatalog
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)