
Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
1.1 Einleitung	1
Literatur	9
2 Gefährliche Stoffeigenschaften	11
2.1 Entzündbarkeit	11
2.1.1 Kenngrößen für entzündbare Gase und Dämpfe	13
2.2 Chemisch instabile Stoffe – Zersetzung und Polymerisation	39
2.3 Entzündbare Flüssigkeiten	41
2.3.1 Flammpunkt	41
2.3.2 Brennpunkt	42
2.4 Stäube	42
2.4.1 Selbstentzündung	43
2.4.2 Glimmtemperatur	43
2.4.3 Explosionsgrenzen	43
2.4.4 Mindestzündenergie	44
2.4.5 Sauerstoffgrenzkonzentration	45
2.4.6 Maximaler Explosionsdruck und maximaler zeitlicher Druckanstieg	45
2.5 Sprengstoffe	47
2.5.1 Brisanz	48
2.5.2 Ladedichte	49
2.5.3 Sauerstoffwert	49
2.5.4 Spitzendruck	49
2.5.5 Explosionsenergie	50
2.6 Toxische Stoffe	55
2.6.1 Begrenzung der Langzeitexposition	55
2.6.2 Begrenzung der Kurzzeitexposition	56
Literatur	61

3	Exotherme und druckaufbauende Reaktionen	65
3.1	Formalkinetische Beschreibung chemischer Reaktionen	65
3.2	Reaktormodelle	66
3.2.1	Absatzweise betriebener Rührkesselreaktor („Batch“-Reaktor)	67
3.2.2	Kontinuierlich betriebener Rührkesselreaktor	76
3.2.3	Idealer Strömungsrohrreaktor	78
3.3	Autokatalytische Reaktionen	80
3.4	Polymerisation	85
3.5	Extreme Prozessbedingungen	85
3.5.1	Hohe Drücke	85
3.5.2	Niedrige Drücke	86
3.5.3	Hohe Temperaturen	87
3.5.4	Niedrige Temperaturen	87
3.6	Endotherme Prozesse	91
	Literatur	91
4	Sichere Auslegung und Betrieb von Anlagen	93
4.1	Vorgehensweise zur Gewährleistung der Sicherheit bei Planung, Bau und Betrieb von Anlagen	94
4.1.1	Verfahrensgestaltung	94
4.1.2	Planung, Errichtung und Inbetriebnahme von Anlagen	94
4.1.3	Betrieb	96
4.1.4	Sicherheitsmanagement	96
4.1.5	Qualitätssicherung	97
4.1.6	Alarm- und Gefahrenabwehrpläne, Information der Öffentlichkeit	98
4.2	Prinzipien der Anlagensicherheit und grundlegende Konzepte	98
4.2.1	Inhärente Sicherheitsmaßnahmen	104
4.2.2	Passive Sicherheitsmaßnahmen	108
4.2.3	Aktive Sicherheitsmaßnahmen	111
4.2.4	Organisatorische Maßnahmen	115
4.2.5	Auslegung sicherheitstechnischer Einrichtungen	115
4.3	Umgebungsbedingte Gefahrenquellen	135
4.3.1	Erdbeben	136
4.4	Abstände zwischen Aggregaten und Teilanlagen	142
4.5	Brand- und Explosionsschutz	143
4.5.1	Zündquellen	145
4.5.2	Maßnahmen zum Schutz vor Bränden und Explosionen	167
	Literatur	181
5	Arbeitsschutz und persönliche Schutzausrüstung	185
5.1	Sichere Auslegung und Beschaffung sicherer Apparate und Arbeitsmittel	186

5.2	Apparate, Maschinen und Werkzeuge	187
5.3	Gefährdungsbeurteilung	188
5.4	Persönliche Schutzausrüstung	193
5.5	Sichere Handhabung von Chemikalien	193
5.5.1	Befüllen, Ablassen und Transportieren von Gefahrstoffen	193
5.5.2	Probeentnahme	195
5.5.3	Reinigen von Behältern und anderen Apparaten	196
5.6	Arbeiten bei besonderen Gefahren – Arbeitsfreigabe	198
	Literatur	202
6	Absicherung von Prozessanlagen durch PLT-Einrichtungen	203
6.1	Reglercharakteristika und R&I-Fließschema	204
6.2	Prozessleitsysteme	211
6.3	Integration programmierbarer elektronischer Systeme in das Sicherheitskonzept	214
	Literatur	223
7	Absicherung von Apparaten (end-of-the-pipe technology)	225
7.1	Sicherheitsventile	226
7.2	Berstsicherung	227
7.3	Kombination von Sicherheitsventil und Berstsicherung	228
7.4	Dimensionierung von Entlastungseinrichtungen	229
7.4.1	Energiebilanz für den stationären Fließprozess	229
7.4.2	Flüssigkeiten	230
7.4.3	Gase oder Dämpfe	232
7.4.4	Zweiphasenströmung	237
7.4.5	Abzuführender Massenstrom	243
7.4.6	Entlastungs- und Rückhaltesysteme	248
7.5	Konstruktiver Explosionsschutz	250
7.5.1	Deflagrations- und detonationssichere Flammensperren für Gase	252
7.5.2	Einsatz von Flammendurchschlagsicherungen in der Praxis	258
7.5.3	Sicherheitskonzept	259
7.5.4	Flammensperren für Stäube	260
	Literatur	260
8	Risiko	263
8.1	Risiko- und Sicherheitsanalysen im Überblick	263
8.2	Risikogrenzwerte	270
8.2.1	Individualrisiko	271
8.2.2	Kollektivrisiko	272
8.3	Darstellung von Risiken	275
	Literatur	275

9	Anlagentechnische Untersuchungen	279
9.1	Grundlagen	279
9.1.1	Ausfälle und Sicherheitsfaktoren	282
9.1.2	Eingangsinformationen und Analysemethoden	286
9.2	Mathematische Beschreibung von Komponenten technischer Systeme	322
9.2.1	Exponentialverteilung	326
9.2.2	Andere Verteilungstypen	328
9.2.3	Konstante Wahrscheinlichkeiten	328
9.3	Ermittlung von Zuverlässigkeitskenngrößen für technische Komponenten	329
9.3.1	Modellvorstellungen	330
9.3.2	Vertrauensbereiche	333
9.3.3	Bayes'sche Auswertung von Zuverlässigkeitskenngrößen	336
9.3.4	Behandlung von Unsicherheiten	340
9.3.5	Übertragbarkeit von Zuverlässigkeitskenngrößen	341
9.4	Boolesche Variable und ihre Anwendung in der Fehlerbaumanalyse	342
9.4.1	Reihenschaltung im Sinne der Zuverlässigkeit	344
9.4.2	Parallelschaltung im Sinne der Zuverlässigkeit	344
9.4.3	Systeme mit Negation	345
9.4.4	Auswahlsystem des Typs 2 von 3	346
9.4.5	Multilinearform der Strukturfunktion und Bestimmung von Zuverlässigkeitskenngrößen des Systems	347
9.5	Methoden zur Erhöhung von Überlebenswahrscheinlichkeit und Verfügbarkeit	352
9.5.1	Systeme mit Reserveelementen	353
9.5.2	Instandhaltungsmodelle	357
9.6	Abhängige Ausfälle	373
9.6.1	Ursachen	374
9.6.2	Gegenmaßnahmen	375
9.6.3	Sekundärausfälle	378
9.6.4	Kommandierte Ausfälle	378
9.6.5	Gemeinsam verursachte Ausfälle (GVA)	379
9.6.6	Schlussbemerkung	381
9.7	Personalhandlungen	383
9.7.1	Vorgehen bei der Analyse von Personalhandlungen	385
9.7.2	Wichtige Einflussfaktoren für die menschliche Zuverlässigkeit	387
	Literatur	433
10	Störfallfolgen	437
10.1	Versagen der Stoffumschließung	441
10.1.1	Eintrittshäufigkeiten	441
10.1.2	Leckgrößen	444
10.1.3	Geometrie der Öffnung	445

10.2	Freisetzungen aus Leckagen	445
10.2.1	Ausströmen von Flüssigkeiten aus einem Behälter	447
10.2.2	Ausströmen von Flüssigkeiten aus einem Rohrleitungsleck	450
10.2.3	Ausströmen von Gasen oder Dämpfen aus einem Behälter	453
10.2.4	Ausströmen von Gasen oder Dämpfen aus einem Leitungsleck	456
10.2.5	Ausströmen eines Zweiphasengemisches aus einem Behälter	456
10.3	Freistrahle	466
10.3.1	Flüssigkeiten	466
10.3.2	Gase	469
10.3.3	Zweiphasenströmung und Entspannungsverdampfung	473
10.4	Lachenbildung und Verdampfung aus der Lache	478
10.5	Atmosphärische Ausbreitung	484
10.5.1	Luftgetragene Ausbreitung	485
10.5.2	Schwergasausbreitung	497
10.5.3	Auswirkungen der atmosphärischen Ausbreitung	501
10.6	Brände und Explosionen	504
10.6.1	Lachenbrände	504
10.6.2	Gase	512
10.6.3	Explosionen	524
10.7	BLEVE	543
10.8	Staubexplosion	551
10.9	Trümmerwurf	553
10.9.1	Flugbahnberechnung	554
10.9.2	Ermittlung der Koeffizienten der Flugbahngleichungen	556
10.10	Szenarien und ihre Wahrscheinlichkeitsbewertung	565
10.10.1	Sofortige Zündung	565
10.10.2	Verzögerte Zündung	566
10.10.3	Zündung innerhalb von Räumen oder im Freien	566
10.10.4	Explosion	568
	Literatur	578
11	Funktionale Sicherheit („Safety Integrity Levels SIL“)	583
	Literatur	601
12	Festlegung angemessener Abstände zwischen Industrie und Bebauung	603
12.1	Einleitung	603
12.2	Risikobasierte Vorgehensweise	604
12.2.1	Auslösende Ereignisse und Ereignisabläufe	605
12.2.2	Merkmale und Expositionsabläufe	608
12.2.3	Folgen von Stofffreisetzungen	609
12.2.4	Schaden und Risiko	611

12.3	Verarbeitung von Zufallsvariablen	611
12.4	Risikomaßstäbe und Abstände aufgrund von Risikoüberlegungen.....	612
12.4.1	Risikomaßstäbe	612
12.4.2	Abstände	612
12.4.3	Beispiel für die Planung eines Areals	615
	Literatur.....	616
Anhang A: GHS – Global Harmonisiertes System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien		619
Anhang B: Probit-Beziehungen, Referenz- und Grenzwerte		623
Anhang C: Grundzüge der Wahrscheinlichkeitsrechnung		631
Anhang D: Koeffizienten für die TNO Multi-energy und die BST-Methode.....		645
Sachverzeichnis		651