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	42
2.3	Entzündbare Flüssigkeiten	43
2.3.1	Flammpunkt	43
2.3.2	Brennpunkt	44
2.4	Stäube	45
2.4.1	Selbstentzündung	45
2.4.2	Glimmtemperatur	46
2.4.3	Explosionsgrenzen	46
2.4.4	Mindestzündenergie	47
2.4.5	Sauerstoffgrenzkonzentration	48
2.4.6	Maximaler Explosionsdruck und maximaler zeitlicher Druckanstieg	48
2.5	Sprengstoffe	51
2.5.1	Brisanz	52
2.5.2	Ladedichte	52
2.5.3	Sauerstoffwert	52
2.5.4	Spitzendruck	52
2.5.5	Explosionsenergie	53
2.6	Toxische Stoffe	59
2.6.1	Begrenzung der Langzeitexposition	59
2.6.2	Begrenzung der Kurzzeitexposition	61
	Literatur	66

3	Exotherme und druckaufbauende Reaktionen	71
3.1	Formalkinetische Beschreibung chemischer Reaktionen	71
3.2	Reaktormodelle	72
3.2.1	Absatzweise betriebener Rührkesselreaktor („Batch“-Reaktor)	73
3.2.2	Kontinuierlich betriebener Rührkesselreaktor	82
3.2.3	Idealer Strömungsrohrreaktor	85
3.3	Autokatalytische Reaktionen	87
3.4	Polymerisation	91
3.5	Extreme Prozessbedingungen	92
3.5.1	Hohe Drücke	92
3.5.2	Niedrige Drücke	93
3.5.3	Hohe Temperaturen	93
3.5.4	Niedrige Temperaturen	94
3.6	Endotherme Prozesse	97
	Literatur	98
4	Sichere Auslegung und Betrieb von Anlagen	99
4.1	Vorgehensweise zur Gewährleistung der Sicherheit bei Planung, Bau und Betrieb von Anlagen	100
4.1.1	Verfahrensgestaltung	100
4.1.2	Planung, Errichtung und Inbetriebnahme von Anlagen	101
4.1.3	Betrieb	102
4.1.4	Sicherheitsmanagement	103
4.1.5	Qualitätssicherung	103
4.1.6	Alarm- und Gefahrenabwehrpläne, Information der Öffentlichkeit	104
4.2	Prinzipien der Anlagensicherheit und grundlegende Konzepte	105
4.2.1	Inhärente Sicherheitsmaßnahmen	110
4.2.2	Passive Sicherheitsmaßnahmen	115
4.2.3	Aktive Sicherheitsmaßnahmen	118
4.2.4	Organisatorische Maßnahmen	121
4.2.5	Auslegung sicherheitstechnischer Einrichtungen	122
4.3	Umgebungsbedingte Gefahrenquellen	142
4.3.1	Erdbeben	143
4.4	Abstände zwischen Aggregaten und Teilanlagen	149
4.5	Brand- und Explosionsschutz	150
4.5.1	Zündquellen	152
4.5.2	Maßnahmen zum Schutz vor Bränden und Explosionen	179
	Literatur	196

5	Arbeitsschutz und persönliche Schutzausrüstung	199
5.1	Sichere Auslegung und Beschaffung sicherer Apparate und Arbeitsmittel	201
5.2	Apparate, Maschinen und Werkzeuge	201
5.3	Gefährdungsbeurteilung	203
5.4	Persönliche Schutzausrüstung	207
5.5	Sichere Handhabung von Chemikalien	208
5.5.1	Befüllen, Ablassen und Transportieren von Gefahrstoffen	209
5.5.2	Probeentnahme	209
5.5.3	Reinigen von Behältern und anderen Apparaten	211
5.6	Arbeiten bei besonderen Gefahren – Arbeitsfreigabe	212
	Literatur	216
6	Absicherung von Prozessanlagen durch PLT-Einrichtungen	219
6.1	Reglercharakteristika und R&I-Fließschema	220
6.2	Prozessleitsysteme	227
6.3	Integration programmierbarer elektronischer Systeme in das Sicherheitskonzept	230
	Literatur	240
7	Absicherung von Apparaten (end-of-the-pipe technology)	243
7.1	Sicherheitsventile	244
7.2	Berstsicherung	245
7.3	Kombination von Sicherheitsventil und Berstsicherung	246
7.4	Dimensionierung von Entlastungseinrichtungen	247
7.4.1	Energiebilanz für den stationären Fließprozess	247
7.4.2	Flüssigkeiten	248
7.4.3	Gase oder Dämpfe	250
7.4.4	Zweiphasenströmung	255
7.4.5	Abzuführender Massenstrom	261
7.4.6	Entlastungs- und Rückhaltesysteme	267
7.5	Konstruktiver Explosionsschutz	276
7.5.1	Deflagrations- und detonationssichere Flammensperren für Gase	277
7.5.2	Einsatz von Flammendurchschlagsicherungen in der Praxis	281
7.5.3	Sicherheitskonzept	284
7.5.4	Flammensperren für Stäube	285
	Literatur	286

8	Risiko	289
8.1	Risiko- und Sicherheitsanalysen im Überblick	289
8.2	Risikogrenzwerte	305
8.2.1	Individualrisiko	306
8.2.2	Kollektivrisiko	307
8.3	Darstellung von Risiken	309
	Literatur	311
9	Anlagentechnische Untersuchungen	313
9.1	Grundlagen	313
9.1.1	Ausfälle und Sicherheitsfaktoren	315
9.1.2	Eingangsinformationen und Analysemethoden	321
9.2	Mathematische Beschreibung von Komponenten technischer Systeme	359
9.2.1	Exponentialverteilung	363
9.2.2	Andere Verteilungstypen	364
9.2.3	Konstante Wahrscheinlichkeiten	365
9.3	Ermittlung von Zuverlässigkeitskenngrößen für technische Komponenten	366
9.3.1	Modellvorstellungen	366
9.3.2	Vertrauensbereiche	370
9.3.3	Bayes'sche Auswertung von Zuverlässigkeitskenngrößen	372
9.3.4	Behandlung von Unsicherheiten	377
9.3.5	Übertragbarkeit von Zuverlässigkeitskenngrößen	378
9.4	Boolesche Variable und ihre Anwendung in der Fehlerbaumanalyse	379
9.4.1	Reihenschaltung im Sinne der Zuverlässigkeit	381
9.4.2	Parallelschaltung im Sinne der Zuverlässigkeit	382
9.4.3	Systeme mit Negation	382
9.4.4	Auswahlsystem des Typs 2 von 3	383
9.4.5	Multilinearform der Strukturfunktion und Bestimmung von Zuverlässigkeitskenngrößen des Systems	385
9.5	Methoden zur Erhöhung von Überlebenswahrscheinlichkeit und Verfügbarkeit	390
9.5.1	Systeme mit Reserveelementen	391
9.5.2	Instandhaltungsmodelle	394
9.6	Abhängige Ausfälle	411
9.6.1	Ursachen	412
9.6.2	Gegenmaßnahmen	413
9.6.3	Sekundärausfälle	415

9.6.4	Kommandierte Ausfälle	416
9.6.5	Gemeinsam verursachte Ausfälle (GVA)	417
9.6.6	Schlussbemerkung	419
9.7	Personalhandlungen	421
9.7.1	Vorgehen bei der Analyse von Personalhandlungen	424
9.7.2	Wichtige Einflussfaktoren für die menschliche Zuverlässigkeit	426
9.8	Beispiele und Fallstudien für die Anwendung der Fehlerbaumanalyse	436
	Literatur	472
10	Störfallfolgen	475
10.1	Versagen der Stoffumschließung	479
10.1.1	Eintrittshäufigkeiten	479
10.1.2	Leckgrößen	482
10.1.3	Geometrie der Öffnung	483
10.2	Freisetzungen aus Leckagen	484
10.2.1	Ausströmen von Flüssigkeiten aus einem Behälter	485
10.2.2	Ausströmen von Flüssigkeiten aus einem Rohrleitungsleck	491
10.2.3	Ausströmen von Gasen oder Dämpfen aus einem Behälter	495
10.2.4	Ausströmen von Gasen oder Dämpfen aus einem Leitungsleck	496
10.2.5	Ausströmen eines Zweiphasengemisches aus einem Behälter	496
10.3	Freistrahle	507
10.3.1	Flüssigkeiten	507
10.3.2	Gase	509
10.3.3	Zweiphasenströmung und Entspannungsverdampfung	514
10.4	Lachenbildung und Verdampfung aus der Lache	520
10.5	Atmosphärische Ausbreitung	526
10.5.1	Luftgetragene Ausbreitung	527
10.5.2	Schwergasausbreitung	539
10.5.3	Auswirkungen der atmosphärischen Ausbreitung	543
10.6	Brände und Explosionen	546
10.6.1	Lachenbrände	546
10.6.2	Gase	553
10.6.3	Explosionen	566
10.7	BLEVE	585
10.8	Staubexplosion	594

10.9	Trümmerwurf	597
10.9.1	Flugbahnberechnung	597
10.9.2	Ermittlung der Koeffizienten der Flugbahngleichungen	599
10.10	Szenarien und ihre Wahrscheinlichkeitsbewertung	608
10.10.1	Sofortige Zündung	609
10.10.2	Verzögerte Zündung	609
10.10.3	Zündung innerhalb von Räumen oder im Freien	611
10.10.4	Explosion	611
	Literatur	622
11	Funktionale Sicherheit („Safety Integrity Levels SIL“)	627
	Literatur	646
12	Festlegung angemessener Abstände zwischen Industrie und Bebauung	647
12.1	Einleitung	647
12.2	Risikobasierte Vorgehensweise	648
12.2.1	Auslösende Ereignisse und Ereignisabläufe	650
12.2.2	Merkmale und Expositionsabläufe	653
12.2.3	Folgen von Stofffreisetzungen	653
12.2.4	Schaden und Risiko	655
12.3	Verarbeitung von Zufallsvariablen	656
12.4	Risikomaßstäbe und Abstände aufgrund von Risikouberlegungen	656
12.4.1	Risikomaßstäbe	656
12.4.2	Abstände	657
12.4.3	Beispiel für die Planung eines Areals	657
12.5	Deterministische Vorgehensweise in Deutschland nach den Leitfäden der Kommission für Anlagensicherheit (KAS)	660
12.5.1	Randbedingungen für die Berechnung der Szenarien bei der Einzelfallbetrachtung	662
12.5.2	Planungsfälle	670
12.5.3	Schlussbemerkung	688
	Literatur	688
	Anhang A: GHS – Global Harmonisiertes System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien	691
	Anhang B: Probit-Beziehungen, Referenz- und Grenzwerte	695
	Anhang C: Grundzüge der Wahrscheinlichkeitsrechnung	703
	Anhang D: Koeffizienten für die TNO Multienergy und die BST-Methode	717
	Stichwortverzeichnis	723