

Inhaltsverzeichnis

1.	Gefährliche Stoffeigenschaften	1
1.1	Entzündbarkeit	1
	Beispiel 1.1: Empirische Häufigkeiten für Brand und Explosion	1
1.2	Explosionsgrenzen	2
	Beispiel 1.2: Unsicherheit von Explosionsgrenzen am Beispiel von Ethylen	2
	Beispiel 1.3: Berechnung der unteren und oberen Explosionsgrenzen für Stadtgas	4
	Beispiel 1.4: Ermittlung der Mindestluftmenge zur Verdünnung von Propangas unter die untere Explosionsgrenze	5
	Beispiel 1.5: Explosionsvermeidung bei der Entfernung von Ethanolresten	6
1.3	Mindestzündenergie	9
	Beispiel 1.6: Zündung von Wasserstoff oder Methan	10
	Beispiel 1.7: Zündung von Ethanol und Benzol	10
	Beispiel 1.8: Bestimmung von zündwilligsten Konzentrationen	11
1.4	Adiabate Flammentemperatur	12
	Beispiel 1.9: Vergleich der adiabaten Flammentemperaturen von Wasserstoff und Methan	13
1.5	Explosionen	14
	Beispiel 1.10: Maximaler Druck bei einer Deflagration von Methan	16
	Beispiel 1.11: Maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit bei der Deflagration von Propan und Methan	17
	Beispiel 1.12: Staubexplosion	18
	Beispiel 1.13: Beurteilung der Möglichkeit des Übergangs von einer Deflagration zur Detonation (DDT „Deflagration-Detonation-Transition“)	19
1.6	Sprengstoffe	20
	Beispiel 1.14: Charakteristika einer Panzerabwehrrakete	22
	Beispiel 1.15: Charakteristika einer Bombe	24
	Beispiel 1.16: Entstehung gasförmiger Explosionsprodukte	26

1.7	Probitbeziehungen	26
	Beispiel 1.17: Berechnung von Todeswahrscheinlichkeiten und Unsicherheiten	27
	Beispiel 1.18: Auswirkungen der Freisetzung von Fluorwasserstoff	28
	Literatur zu Kapitel 1	30
2.	Exotherme und druckaufbauende Reaktionen	31
2.1	Adiabate Temperaturerhöhung	31
	Beispiel 2.1: Adiabate Temperaturerhöhung in einem chemischen Reaktor	31
	Beispiel 2.2: Endtemperatur bei adiabater Temperaturerhöhung	32
2.2	Zeitverhalten und Durchgehen von Reaktionen	32
	Beispiel 2.3: Ermittlung der Reaktionszeit einer Reaktion 2. Ordnung	32
	Beispiel 2.4: Zeitlicher Verlauf der Temperatur einer Reaktion bei Kühlungsausfall	34
	Beispiel 2.5: Teilversagen der Reaktorkühlung und Semenov Diagramm	37
	Beispiel 2.6: Zeit zum Erreichen der maximalen Reaktionsgeschwindigkeit (TMR _{ad})	42
2.3	Autokatalytische Reaktion	44
	Beispiel 2.7: Zeitverhalten einer autokatalytischen Reaktion	44
	Literatur zu Kapitel 2	50
3.	Sichere Auslegung und Betrieb von Anlagen	51
3.1	Inhärente Sicherheit	51
	Beispiel 3.1: Reduzierung des Prozessinventars bei der Herstellung von Nitroglykol	51
	Beispiel 3.2: Ersetzen von Blausäure bei der Herstellung von Acrylnitril	52
	Beispiel 3.3: Reduzierung der Masse eines umzuwandelnden Stoffes durch Verdünnung	54
3.2	Festigkeitsaspekte	55
	Beispiel 3.4: Wahrscheinlichkeitsinterpretation des Sicherheitsfaktors	55
	Beispiel 3.5: Einstufung eines Pufferbehälters nach der Richtlinie 2014/68/EU	59

3.3	Sicherer Betrieb	60
	Beispiel 3.6: Ermittlung der Zeit, die zum Notablassen eines Reaktors zur Verfügung steht	60
	Beispiel 3.7: Schonendes Anfahren einer Anlage	63
	Beispiel 3.8: Thermoschockbelastung einer Speisewasserleitung	65
	Beispiel 3.9: Wasserhammer	68
3.4	Selbsterhitzung und Selbstentzündung	72
	Beispiel 3.10: Selbsterhitzung einer Stoffschüttung	72
3.5	Statische Elektrizität als Zündquelle	75
	Beispiel 3.11: Ermittlung von Durchbruchfeldstärke und zulässiger Spannung	75
	Beispiel 3.12: Bei elektrischer Entladung frei werdende Energie	76
	Beispiel 3.13: Zündung von Benzin, das beim Tanken ausläuft	77
3.6	Elektrostatische Aufladung	77
	Beispiel 3.14: Berechnung des zeitlichen Verlaufs der elektrostatischen Ladung in einem Behälter für Kraftstoff	80
	Beispiel 3.15: Verminderung der Zündgefahren durch Verringerung der Füllgeschwindigkeit bei der Befüllung eines Behälters	83
	Beispiel 3.16: Füllung eines Fasses mit Schüttgut	84
	Literatur zu Kapitel 3	85
4.	Arbeitsschutz	87
	Beispiel 4.1: Absturz von einem Gerüst	87
	Beispiel 4.2: Verletzung durch elektrischen Schlag	89
	Beispiel 4.3: Treppensturz	90
	Beispiel 4.4: Reparatur an einer Biogasanlage	91
	Beispiel 4.5: Ausbreitung von Fluorwasserstoff (HF) nach der Freisetzung	92
	Literatur zu Kapitel 4	96
5.	PLT Einrichtungen	99
	Beispiel 5.1: Regelverhalten eines P und PI Reglers	100
	Literatur zu Kapitel 5	106

6.	Absicherung von Apparaten	107
6.1	Dimensionierung von Sicherheitseinrichtungen	107
	Beispiel 6.1: Dimensionierung von Sicherheitsventil und Berstscheibe bei der Druckentlastung für Flüssigkeiten	115
	Beispiel 6.2: Dimensionierung von Sicherheitsventil und Berstscheibe bei der Druckentlastung für ein Gas (kritisches Ausströmen)	118
	Beispiel 6.3: Dimensionierung von Sicherheitsventil und Berstscheibe bei der Druckentlastung für ein Gas (unterkritisches Ausströmen)	119
	Beispiel 6.4: Dimensionierung eines Sicherheitsventils bei der Druckentlastung durch Zweiphasenströmung (kritisches Ausströmen)	119
	Beispiel 6.5: Dimensionierung eines Sicherheitsventils bei der Druckentlastung durch Zweiphasenströmung (unterkritisches Ausströmen)	121
	Beispiel 6.6: Dimensionierung eines Sicherheitsventils bei der Druckentlastung durch Zweiphasenströmung (unterkühlte Flüssigkeit)	121
	Beispiel 6.7: Dimensionierung eines Sicherheitsventils bei der Druckentlastung durch Zweiphasenströmung (Wasser und Luft)	123
	Beispiel 6.8: Fehldimensionierung eines Sicherheitsventils	123
6.2	Druckveränderungen in Umschließungen	124
	Beispiel 6.9: Druckentlastung eines gasgefüllten Behälters bei Brand	124
	Beispiel 6.10: Druckveränderungen in einem Behälter infolge Temperaturveränderungen	127
	Beispiel 6.11: Druckerhöhung in einem eingeschlossenen Flüssigkeitsvolumen infolge Temperaturerhöhung	129
	Literatur zu Kapitel 6	133
7.	Ereignisablaufanalysen	135
	Beispiel 7.1: Ereignisablaufanalyse für eine Freisetzung von Flüssiggas	135
	Beispiel 7.2 Ereignisablaufdiagramm für das Durchgehen einer exothermen Reaktion	137
	Beispiel 7.3 Erstellung und probabilistische Bewertung eines Ereignisablaufdiagramms	138
	Beispiel 7.4 Szenario für den Feuerwehreinsatz bei einem Wohnhausbrand	145
	Literatur zu Kapitel 7	147

8.	Fehlerbaum- und Markovanalysen	149
	Beispiel 8.1: Fehlerbaum für ein System zur Kühlung eines Reaktors mit exothermer Reaktion	149
	Beispiel 8.2: Ermittlung der Ausfallrate von Gasbehältern	152
	Beispiel 8.3 Ausfallrate von Mehrwegeventilen	154
	Beispiel 8.4 Wiederkehrende Prüfung	154
	Beispiel 8.5: Nichtverfügbarkeit einer Notkühlpumpe	156
	Beispiel 8.6: Versagenswahrscheinlichkeit auf Anforderung für ein Reaktionsstoppersystem	162
	Beispiel 8.7 Fehlerbaumanalyse für die Schnellabschaltung einer Anlage zur Herstellung von Nitroglykol	165
	Beispiel 8.8: CO ₂ Abtrennung in einer Rectisol-Anlage	170
	Beispiel 8.9: Verfügbarkeit eines Kraftwerks	174
	Literatur zu Kapitel 8	182
9.	Störfallfolgen	183
	Beispiel 9.1 Festlegung von Leckgrößen	184
9.1	Ausströmvorgänge	186
9.1.1	Flüssigkeiten	186
	Beispiel 9.2: Ausströmen von Benzin aus einem zylindrischen Behälter	186
	Beispiel 9.3: Ausströmen von Benzin aus einem kugelförmigen Behälter	189
	Beispiel 9.4: Ausströmen aus einem Rohrleitungsleck	192
	Beispiel 9.5: Leck in einer Naphthaleitung	196
9.1.2	Gase	198
	Beispiel 9.6: Ausströmen von Ethylen aus einem Behälter	198
	Beispiel 9.7 Ausströmen von Isobutylen aus einem Behälter	200
9.1.3	Zweiphasengemisch	201
	Beispiel 9.8: Ermittlung der Dampfqualität bei druckverflüssigtem Propylen	204
	Beispiel 9.9: Ermittlung des mittleren und lokalen Volumenanteils von Dampf	209
9.2	Freistrahle	211

9.2.1	Flüssigkeiten	212
	Beispiel 9.10: Flüssigkeitsfreistrah aus einem Behälterleck	212
9.2.2	Gase	215
	Beispiel 9.11: Senkrechter Freistrah von Ethylen aus einem Behälterleck	215
9.3	Entspannungsverdampfung und Zweiphasenströmung	219
	Beispiel 9.12 Entspannungsverdampfung von Propan	221
	Beispiel 9.13: Horizontaler Freistrah nach dem Modell von Fauske	222
9.4	Lachenbildung und Verdunstung aus der Lache	227
	Beispiel 9.14: Verdunsten einer Benzinlache	229
	Beispiel 9.15: Freisetzung von Salzsäure bei der Verpumpung von HCL in einen Lagertank	230
	Beispiel 9.16: Freisetzung von Flusssäure in eine Wasservorlage	232
	Beispiel 9.17: Freisetzung und Verdunsten von Phenylisocyanat	235
	Beispiel 9.18: Verdunsten von kaltgelagertem Chlor aus einer Lache	238
9.5	Atmosphärische Ausbreitung	241
9.5.1	Modellierung	242
	Beispiel 9.19: Zeitlich konstante Emissionen von Stickstoff	247
9.5.2	Auswirkungen der atmosphärischen Ausbreitung	248
	Beispiel 9.20: Auswirkungen einer schlagartigen Freisetzung von Kohlenmonoxid	248
	Beispiel 9.21 Entzündbarer Anteil einer Methanwolke	249
	Beispiel 9.22: Gesundheitliche Auswirkung einer Chlorexposition	251
9.6	Brände und Explosionen	252
9.6.1	Lachenbrände	252
	Beispiel 9.23: Brand in einer Abfüllstelle für Benzin	257
9.6.2	Gase	261
	Beispiel 9.24: Feuerball nach einer Freisetzung von Propan	262
9.6.3	Strahlfeuer	264
	Beispiel 9.25: Strahlfeuer von Ethylen	264
9.6.4	Explosionen	266
	Beispiel 9.26: Explosionswirkung von Hexogen	271

Beispiel 9.27: Vergleich zweier Produktionsprozesse zur Herstellung von Nitroglykol (Inventarreduzierung)	272
Beispiel 9.28: Explosionswirkung einer Wolke von Propan	274
9.7 BLEVE	275
Beispiel 9.29: BLEVE bei Freisetzung druckverflüssigten Propan	277
9.8 Staubexplosion	282
Beispiel 9.30: Staubexplosion	282
9.9 Trümmerwurf	284
Beispiel 9.31: Trümmerflug nach Behälterzerplatzen	288
Literatur zu Kapitel 9	293
10. Funktionale Sicherheit	295
Beispiel 10.1: Anforderung an die Nichtverfügbarkeit von sicherheitsbezogenen Systemen	296
Beispiel 10.2: Ermittlung von SIL-Klassen für sicherheitsbezogene Systeme eines Benzinlagertanks	297
Literatur zu Kapitel 10	303
11. Angemessene Sicherheitsabstände	305
Beispiel 11.1: Planung einer Anlage auf der grünen Wiese (Ermittlung ohne Detailkenntnisse)	305
Beispiel 11.2: Ermittlung des angemessenen Sicherheitsabstands auf der Grundlage eines Lachenbrands von Benzin	306
Beispiel 11.3: Freisetzung von Ammoniak aus dem überkritischen Zustand und anschließende atmosphärische Ausbreitung	309
Beispiel 11.4: Angemessene Abstände für einen Betriebsbereich (Ermittlung mit Detailkenntnissen)	312
Beispiel 11.5: Angemessene Sicherheitsabstände bei der Freisetzung von Propan auf verschiedenartigen Terrains	321
Beispiel 11.6: Angemessener Sicherheitsabstand für einen geplanten Lagertank für druckverflüssigtes Propan	323
Beispiel 11.7: Freisetzung von Fluorwasserstoff in einer Lagerhalle	324
Beispiel 11.8: Freisetzung aus einem Gebinde mit Flusssäure	327

Beispiel 11.9: Mittlere und ortsbezogene Konzentration von HF in einer Halle nach Freisetzung von Flusssäure	332
Beispiel 11.10: Freisetzung von Dieseldieselkraftstoff mit nachfolgendem Lachenbrand	334
Beispiel 11.11: Kleinbrand eines Pflanzenschutzmittels	337
Literatur zu Kapitel 11	340
Stichwortverzeichnis	343