

# Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Gefährliche Stoffeigenschaften</b>	<b>1</b>
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 Explosionsgrenze 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	17
	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
	<b>Literatur zu Kapitel 1</b>	30
<b>2.</b>	<b>Exotherme und druckaufbauende Reaktionen</b>	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 Kühlausfall	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
	<b>Literatur zu Kapitel 2</b>	50
<b>3.</b>	<b>Sichere Auslegung und Betrieb von Anlagen</b>	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 benötigt wird	60
	Beispiel 3.7: Schonendes Anfahren einer Anlage	63
	Beispiel 3.8: Thermoschockbelastung einer Speisewasserleitung	65
	Beispiel 3.9: Wasserhammer	69
	Beispiel 3.10: Vermeidung von Leckagen an Lagerbehältern für Bitumen	72
3.4	Selbsterhitzung und Selbstentzündung	77
	Beispiel 3.11: Selbsterhitzung einer Stoffschüttung	77
3.5	Statische Elektrizität als Zündquelle	80
	Beispiel 3.12: Ermittlung von Durchbruchfeldstärke und zulässiger Spannung	80
	Beispiel 3.13: Bei elektrischer Entladung frei werdende Energie	81
	Beispiel 3.14: Zündung von Benzin, das beim Tanken ausläuft	82
3.6	Elektrostatische Aufladung	82
	Beispiel 3.15: Berechnung des zeitlichen Verlaufs der elektrostatischen Ladung in einem Behälter für Kraftstoff	85
	Beispiel 3.16: Verminderung der Zündgefahren durch Verringerung der Füllgeschwindigkeit bei der Befüllung eines Behälters	88
	Beispiel 3.17: Füllung eines Fasses mit Schüttgut	89
	<b>Literatur zu Kapitel 3</b>	90
4.	<b>Arbeitsschutz</b>	91
	Beispiel 4.1: Absturz von einem Gerüst	91
	Beispiel 4.2: Verletzung durch elektrischen Schlag	93
	Beispiel 4.3: Treppensturz	94
	Beispiel 4.4: Reparatur an einer Biogasanlage	95
	Beispiel 4.5: Ausbreitung von Fluorwasserstoff (HF) nach der Freisetzung	96
	<b>Literatur zu Kapitel 4</b>	100

<b>5.</b>	<b>PLT-Einrichtungen</b>	103
	Beispiel 5.1: Regelverhalten eines P und PI-Reglers	104
	<b>Literatur zu Kapitel 5</b>	110
<b>6.</b>	<b>Absicherung von Apparaten</b>	111
6.1	Dimensionierung von Sicherheitseinrichtungen	111
	Beispiel 6.1: Dimensionierung von Sicherheitsventil und Berstscheibe bei der Druckentlastung für Flüssigkeiten	119
	Beispiel 6.2: Dimensionierung von Sicherheitsventil und Berstscheibe bei der Druckentlastung für ein Gas (kritisches Ausströmen)	122
	Beispiel 6.3: Dimensionierung von Sicherheitsventil und Berstscheibe bei der Druckentlastung für ein Gas (unterkritisches Ausströmen)	123
	Beispiel 6.4: Dimensionierung eines Sicherheitsventils bei der Druckentlastung durch Zweiphasenströmung (kritisches Ausströmen)	123
	Beispiel 6.5: Dimensionierung eines Sicherheitsventils bei der Druckentlastung durch Zweiphasenströmung (unterkritisches Ausströmen)	125
	Beispiel 6.6: Dimensionierung eines Sicherheitsventils bei der Druckentlastung durch Zweiphasenströmung (unterkühlte Flüssigkeit)	125
	Beispiel 6.7: Dimensionierung eines Sicherheitsventils bei der Druckentlastung durch Zweiphasenströmung (Wasser und Luft)	127
	Beispiel 6.8: Fehldimensionierung eines Sicherheitsventils	128
6.2	Druckveränderungen in Umschließungen	129
	Beispiel 6.9: Druckentlastung eines gasgefüllten Behälters bei Brand	129
	Beispiel 6.10: Druckveränderungen in einem Behälter infolge Temperaturveränderungen	132
	Beispiel 6.11: Druckerhöhung in einem eingeschlossenen Flüssigkeitsvolumen infolge Temperaturerhöhung	133
	<b>Literatur zu Kapitel 6</b>	137
<b>7.</b>	<b>Ereignisablaufanalysen</b>	139
	Beispiel 7.1: Ereignisablaufanalyse für eine Freisetzung von Flüssiggas	139
	Beispiel 7.2 Ereignisablaufdiagramm für das Durchgehen einer exothermen Reaktion	141

Beispiel 7.3 Erstellung und probabilistische Bewertung eines Ereignisablaufdiagramms	142
Beispiel 7.4 Szenario für den Feuerwehreinsatz bei einem Wohnhausbrand	149
<b>Literatur zu Kapitel 7</b>	152
<b>8. Fehlerbaum- und Markovanalysen</b>	153
Beispiel 8.1: Fehlerbaum für ein System zur Kühlung eines Reaktors mit exothermer Reaktion	153
Beispiel 8.2: Ermittlung der Ausfallrate von Gasbehältern	157
Beispiel 8.3 Ausfallrate von Mehrwegeventilen	158
Beispiel 8.4 Wiederkehrende Prüfung	158
Beispiel 8.5: Nichtverfügbarkeit einer Notkühlpumpe	160
Beispiel 8.6: Versagenswahrscheinlichkeit auf Anforderung für ein Reaktionsstoppersystem	166
Beispiel 8.7 Fehlerbaumanalyse für die Schnellabschaltung einer Anlage zur Herstellung von Nitroglykol	169
Beispiel 8.8: CO <sub>2</sub> Abtrennung in einer Rectisol-Anlage	176
Beispiel 8.9: Verfügbarkeit eines Kraftwerks	178
<b>Literatur zu Kapitel 8</b>	186
<b>9. Störfallfolgen</b>	187
Beispiel 9.1 Festlegung von Leckgrößen	188
9.1 Ausströmvorgänge	190
9.1.1 Flüssigkeiten	190
Beispiel 9.2: Ausströmen von Benzin aus einem zylindrischen Behälter	190
Beispiel 9.3: Ausströmen von Benzin aus einem kugelförmigen Behälter	193
Beispiel 9.4: Ausströmen aus einem Rohrleitungsleck	196
Beispiel 9.5: Leck in einer Naphthaleitung	200
9.1.2 Gase	202
Beispiel 9.6: Ausströmen von Ethylen aus einem Behälter	202
Beispiel 9.7 Ausströmen von Isobutylen aus einem Behälter	204

9.1.3	Zweiphasengemische	206
	Beispiel 9.8: Ermittlung der Dampfqualität bei druckverflüssigtem Propylen	209
	Beispiel 9.9: Ermittlung des mittleren und lokalen Volumenanteils von Dampf	212
9.2	Freistrahle	215
9.2.1	Flüssigkeiten	216
	Beispiel 9.10: Flüssigkeitsfreistrahle aus einem Behälterleck	216
9.2.2	Gase	219
	Beispiel 9.11: Senkrechter Freistrahle von Ethylen aus einem Behälterleck	219
9.3	Entspannungsverdampfung und Zweiphasenströmung	223
	Beispiel 9.12 Entspannungsverdampfung von Propan	224
	Beispiel 9.13: Horizontaler Freistrahle nach dem Modell von Fauske	225
9.4	Lachenbildung und Verdunsten oder Verdampfen von Lachen	230
	Beispiel 9.14: Verdunsten einer Benzinlache	233
	Beispiel 9.15: Freisetzung von Salzsäure bei der Verpumpung von HCL in einen Lagertank	234
	Beispiel 9.16: Freisetzung von Flusssäure in eine Wasservorlage	236
	Beispiel 9.17: Freisetzung und Verdunsten von Phenylisocyanat	239
	Beispiel 9.18: Verdampfen von kaltgelagertem Chlor aus einer Lache	241
9.5	Atmosphärische Ausbreitung	245
9.5.1	Modellierung	246
	Beispiel 9.19: Zeitlich konstante Emissionen von Stickstoff	251
9.5.2	Auswirkungen der atmosphärischen Ausbreitung	252
	Beispiel 9.20: Auswirkungen einer schlagartigen Freisetzung von Kohlenmonoxid	252
	Beispiel 9.21 Entzündbarer Anteil einer Methanwolke	253
	Beispiel 9.22: Gesundheitliche Auswirkung einer Chlorexposition	255
9.6	Brände und Explosionen	256
9.6.1	Lachenbrände	256
	Beispiel 9.23: Brand in einer Abfüllstelle für Benzin	261

9.6.2	Gase	266
	Beispiel 9.24: Feuerball nach einer Freisetzung von Propan	266
9.6.3	Strahlfeuer	268
	Beispiel 9.25: Strahlfeuer von Ethylen	269
9.6.4	Explosionen	270
	Beispiel 9.26: Explosionswirkung von Hexogen	275
	Beispiel 9.27: Vergleich zweier Produktionsprozesse zur Herstellung von Nitroglykol (Inventarreduzierung)	276
	Beispiel 9.28: Explosionswirkung einer Wolke von Propan	278
9.7	BLEVE	279
	Beispiel 9.29: BLEVE bei Freisetzung druckverflüssigten Propans	281
9.8	Staubexplosion	286
	Beispiel 9.30: Staubexplosion	286
9.9	Trümmerwurf	288
	Beispiel 9.31: Trümmerflug nach Behälterzerplatzen	292
	<b>Literatur zu Kapitel 9</b>	297
<b>10.</b>	<b>Funktionale Sicherheit</b>	299
	Beispiel 10.1: Anforderung an die Nichtverfügbarkeit von sicherheitsbezogenen Systemen	300
	Beispiel 10.2: Ermittlung von SIL-Klassen für sicherheitsbezogene Systeme eines Benzinlagertanks	301
	<b>Literatur zu Kapitel 10</b>	308
<b>11.</b>	<b>Angemessene Sicherheitsabstände</b>	309
	Beispiel 11.1: Planung einer Anlage auf der grünen Wiese (Ermittlung ohne Detailkenntnisse)	309
	Beispiel 11.2: Ermittlung des angemessenen Sicherheitsabstands auf der Grundlage eines Lachenbrands von Benzin	310
	Beispiel 11.3: Freisetzung von Ammoniak aus dem überkritischen Zustand und anschließende atmosphärische Ausbreitung	313

<b>Beispiel 11.4: Angemessene Abstände für einen Betriebsbereich (Ermittlung mit Detailkenntnissen)</b>	<b>316</b>
<b>Beispiel 11.5: Angemessene Sicherheitsabstände bei der Freisetzung von Propan auf verschiedenartigen Terrains</b>	<b>325</b>
<b>Beispiel 11.6: Angemessener Sicherheitsabstand für einen geplanten Lagertank für druckverflüssigtes Propan</b>	<b>327</b>
<b>Beispiel 11.7: Freisetzung von Fluorwasserstoff in einer Lagerhalle</b>	<b>328</b>
<b>Beispiel 11.8: Freisetzung aus einem Gebinde mit Flusssäure</b>	<b>332</b>
<b>Beispiel 11.9: Mittlere und ortsbezogene Konzentration von HF in einer Halle nach Freisetzung von Flusssäure</b>	<b>336</b>
<b>Beispiel 11.10: Freisetzung von Dieselmotorkraftstoff mit nachfolgendem Lachenbrand</b>	<b>339</b>
<b>Beispiel 11.11: Kleinbrand eines Pflanzenschutzmittels</b>	<b>342</b>
<b>Literatur zu Kapitel 11</b>	<b>345</b>
<b>Sachverzeichnis</b>	<b>347</b>