

K. Hungerbühler, J. Ranke, T. Mettier

Chemische Produkte und Prozesse

Grundkonzepte zum
umweltorientierten Design

Mit 77 Abbildungen und 53 Tabellen



Springer

Inhalt

1 Einführung und Überblick	1
1.1 Die Herausforderung von Wettbewerb, Ökologie und Sicherheit für die chemische Industrie.....	1
1.2 Grundkonzept der integrierten Entwicklung.....	2
1.3 Lernziele.....	3
1.4 Inhaltsübersicht.....	5
Teil A: Orientierungsteil	7
2 Technik und Verantwortung	9
2.1 Naturwissenschaft und Technik als Basis der industriellen Entwicklung.....	9
2.2 Technikfolgen.....	10
2.2.1 Ambivalenz des technischen Fortschritts.....	10
2.2.2 Der Begriff des Risikos.....	12
2.2.3 Abschätzung von Technikfolgen.....	14
2.3 Das Prinzip Verantwortung.....	15
2.4 Das Prinzip der Nachhaltigkeit.....	16
2.4.1 Der Begriff der Nachhaltigkeit.....	16
2.4.2 Nachhaltigkeit und ökologische Wirtschaft.....	18
2.4.3 Die Umsetzung von Nachhaltigkeit.....	20
2.4.3.1 Verschiedene Ebenen der Umsetzung.....	20
2.4.3.2 Operationalisierung von Nachhaltigkeit.....	21
2.5 Folgerungen für die industrielle Chemie.....	22
Literatur zu Kapitel 2.....	25
3 Gesetzgebung für Sicherheit und Umweltschutz	27
3.1 Vorbemerkung.....	27
3.2 Maß- und Normenfindung.....	27
3.2.1 Gesetzgebung als Reaktion auf gesellschaftlich relevante Ereignisse.....	28
3.2.2 Gesetzgebung als vorausschauendes Ausrichten auf Schutzziele.....	30

3.3 Das geltende Recht im Überblick.....	32
3.3.1 Der verfassungsrechtliche Rahmen.....	33
3.3.1.1 Der EU-Vertrag.....	33
3.3.1.2 Die Bundesrepublik Deutschland.....	35
3.3.2 Das stoffbezogene Recht.....	35
3.3.3 Das anlagenbezogene Recht.....	37
3.3.4 Das Recht bezüglich Arbeitsschutz.....	38
3.3.5 Integrierende Ansätze.....	39
3.3.6 Das Haftungsrecht.....	39
3.3.6.1 Produkthaftung.....	
3.3.6.2 Umwelthaftung für Anlagen.....	41
3.3.7 Das Strafrecht.....	41
3.4 Unternehmerische Pflichten und Ausblick.....	41
Literatur zu Kapitel 3.....	42
4 Sicherheit und Umweltschutz aus unternehmerischer Sicht.....	45
4.1 Chemie: hohe Wertschöpfung und breites Gefahrenspektrum.....	45
4.2 Entwicklung von Sicherheit und Umweltschutz.....	46
4.2.1 Historische Entwicklung.....	46
4.2.2 Neuer Ansatz zur Produkt- und Prozessentwicklung.....	47
4.3 Das Responsible-Care-Programm der chemischen Industrie.....	48
4.4 Sicherheit und Umweltschutz als Teil der Unternehmensstrategie.....	49
4.4.1 Sicherheit und Umweltschutz: reaktives und proaktives Verhalten ...	50
4.4.2 Integriertes Managementsystem für S&U.....	50
4.5 Chemische Produkte und Prozesse: integrierte Entwicklung.....	53
4.5.1 Leitgrößen der integrierten Entwicklung.....	54
4.5.1.1 Ökoeffizienz.....	54
4.5.1.2 Inhärente Sicherheit.....	54
4.5.1.3 Gesellschaftliche Akzeptanz.....	54
4.5.2 Umsetzungsinstrumente der integrierten Entwicklung.....	55
4.5.2.1 Ökobilanz.....	56
4.5.2.2 Risikoanalyse.....	57
4.5.2.3 Nutzen-Risiko-Dialog.....	57
4.6 Schlussfolgerung.....	57
Literatur zu Kapitel 4.....	60
TeilB: Fachteil.....	61
5 Ökologische und ökonomische Bilanzierung.....	63
5.1 Die Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA).....	63
5.1.1 Schritt I: Ziel- und Rahmendefinition.....	65
5.1.2 Schritt II: Sachbilanz (Life Cycle Inventory, LCI).....	66

5.1.3 Schritt III: Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment, LCIA).....71

5.1.4 Auswertung.....82

5.2 Die Investitionsrechnung.....84

5.2.1 Der Net Present Value (NPV).....84

5.2.2 Sicherheit und Umweltschutz: Einfluss auf den Net Present Value...85

5.2.3 Optimierung der industriellen Wertschöpfungskette.....86

5.3 Ökoeffizienz.....87

Literatur zu Kapitel 5.....88

6 Risikoanalyse chemischer Produkte.....91

6.1 Problemstellung und Zielsetzung.....91

6.1.1 Problemstellung.....91

6.1.1.1 Systemorientierte chemische Produkte.....91

6.1.1.2 Die Frage nach der Sicherheit chemischer Produkte.....92

6.1.2 Zielsetzung der Produktrisikoaanalyse.....93

6.2 Grundkonzept der Produktrisikoaanalyse.....93

6.2.1 Die Produkthanmeldung.....94

6.2.2 Ablauf einer Produktrisikoaanalyse.....94

6.2.2.1 Die einzelnen Schritte einer Produktrisikoaanalyse.....95

6.2.3 Unsicheres Wissen in der Produktrisikoaanalyse.....97

6.3 Humantoxizität.....99

6.3.1 Ausgangslage.....99

6.3.2 Expositionsanalyse.....100

6.3.3 Wirkungsanalyse.....102

6.3.3.1 Bestimmung der Wirkungsschwelle: NEL_{IVIII} und AD1.....104

6.3.4 Risikobeschreibung und Risikobewertung.....106

6.3.5 Risikomanagement.....107

6.4 Umwelteffekte.....110

6.4.1 Problemstellung.....110

6.4.2 Stufen der Risikoanalyse.....110

6.4.3 Ausgangslage.....112

6.4.4 Expositionsanalyse.....113

6.4.4.1 Emmission und unmittelbare Verdünnung: der PEC_{ta}114

6.4.4.2 Verteilung und Umwandlung in der Umwelt: der $PEC_{r, global}$ und der PEC_{local}117

6.4.4.3 Mackay-Fugazitätsmodelle.....119

6.4.4.4 Stoffbewertung mit Hilfe von Persistenz und Reichweite.....120

6.4.5 Wirkungsanalyse.....121

6.4.5.1 Die Bestimmung von PNEC-Werten.....121

6.4.6 Risikobeschreibung und Risikobewertung.....123

6.4.7 Risikomanagement.....125

6.5 Physikalisch-chemische Eigenschaften.....127

6.5.1 Ausgangslage.....127

6.5.2	Stufen der Risikoanalyse im Hinblick auf Brand- und Explosions- gefahren.....	128
6.5.2.1	Sicherheitsdaten zur Gefahrenidentifikation.....	128
6.5.2.2	Expositionsszenarien, Risikobeschreibung und -bewertung.....	131
6.5.2.3	Risikomanagement.....	132
	Literatur zu Kapitel 6.....	137
7	Risikoanalyse chemischer Prozesse.....	139
7.1	Ausgangslage und Zielsetzung.....	139
7.2	Einsatz und Systematik der Risikoanalyse.....	142
7.2.1	Einsatz bei neuen und bestehenden Prozessen.....	142
7.2.2	Systematik.....	143
7.3	Die einzelnen Schritte der Prozessrisikoanalyse.....	144
7.3.1	Ermittlung der Basisdaten.....	144
7.3.2	Abgrenzung sicherer Prozessbedingungen.....	146
7.3.3	Systematische Gefahrensuche.....	147
7.3.4	Risikobeschreibung.....	151
7.3.4.1	Tragweite.....	152
7.3.4.2	Wahrscheinlichkeit.....	153
7.3.5	Risikobewertung und Maßnahmenplanung.....	154
7.3.5.1	Risikobewertung.....	154
7.3.5.2	Maßnahmen.....	154
7.3.6	Bewertung des Restrisikos.....	156
7.4	Kosteneffizienz von Sicherheitsmaßnahmen.....	157
	Literatur zu Kapitel 7.....	159
8	Risikoanalyse biotechnologischer Prozesse.....	161
8.1	Ausgangslage und Zielsetzung.....	161
8.1.1	Ausgangslage.....	161
8.1.2	Problemstellung.....	163
8.1.3	Zielsetzung.....	164
8.2	Systematik der Risikoanalyse von geschlossenen biologischen Systemen.....	164
8.3	Die einzelnen Schritte der Risikoanalyse.....	166
8.3.1	Datenbasis.....	166
8.3.2	Wirkungscharakterisierung der Mikroorganismen.....	166
8.3.2.1	Pathogenität beim Menschen.....	166
8.3.2.2	Umweltbeeinträchtigungen.....	167
8.3.2.3	Einteilung in Gefährdungsgruppen.....	167
8.3.3	Charakterisierung des Expositionsrisikos.....	169
8.3.3.1	Störanfälligkeit des technischen Prozesses.....	169
8.3.3.2	Freisetzung und Ausbreitung von Mikroorganismen.....	170
8.3.4	Risikobeschreibung und -bewertung.....	171
8.3.5	Risikomanagement und Umgang mit dem Restrisiko.....	171
	Literatur zu Kapitel 8.....	173

9 Thermische Prozeßsicherheit.....	175
9.1 Einführung.....	175
9.1.1 Problemstellung.....	175
9.1.2 Zielsetzung.....	175
9.1.3 Ablaufstruktur.....	176
9.2 Die Wärmebilanz.....	176
9.3 Das Runaway-Szenario als Basis für die Beurteilung thermischer Prozessrisiken.....	181
9.4 Das thermische Gefahrenpotential.....	182
9.4.1 Die Reaktionswärme.....	182
9.4.2 Der adiabate Temperaturanstieg.....	183
9.5 Wärmeproduktion und Eintrittswahrscheinlichkeit einer thermischen Zersetzung.....	185
9.5.1 Die Dynamik der Zersetzungsreaktion.....	185
9.5.2 Die Ausgangstemperatur T_0 der Zersetzungsreaktion.....	188
9.6 Kritikalitätsklassen von Reaktionen.....	190
Literatur zu Kapitel 9.....	191
10 Nutzen-Risiko-Dialog mit der Gesellschaft.....	193
10.1 Ausgangslage und Zielsetzung.....	193
10.1.1 Ausgangslage.....	193
10.1.2 Zielsetzung.....	195
10.2 Unterschiedliche Sichtweisen.....	196
10.3 Das Stufenmodell des Nutzen-Risiko-Dialogs.....	197
10.4 Spezifische Szenarien: Normalfall - Konfliktfall - Störfall.....	199
10.4.1 Normalfall.....	199
10.4.2 Konfliktfall.....	200
10.4.3 Störfall.....	202
Literatur zu Kapitel 10.....	204
Teil C: Umsetzungsteil.....	205
> 11 Integrierte Entwicklung chemischer Prozesse.....	207
11.1 Problemstellung und Zielsetzung.....	207
11.2 Zeitlicher Ablauf und Kommunikation.....	210
11.3 Stufen der integrierten Prozessentwicklung.....	211
11.4 Inhärente Prozeßsicherheit.....	215
11.4.1 Energiepotential.....	215
11.4.2 Stoffpotential.....	215
11.4.3 Fehlertoleranz von Prozessen.....	216
11.5 Ökologische Effizienz.....	217
11.5.1 Stoffeffizienz.....	219

11.5.2	Energieeffizienz.....	221
11.5.3	Minimierung von Abfall und Emissionen.....	223
11.6	Ökonomische Effizienz.....	225
11.6.1	Investitionskosten.....	225
11.6.2	Betriebskosten.....	225
	Literatur zu Kapitel 11.....	226
12	Integrierte Entwicklung chemischer Produkte.....	229
12.1	Problemstellung und Zielsetzung.....	229
12.2	Produktewerdegang.....	232
12.3	Zielgrößen und Beurteilungskriterien beim Produktedesign.....	234
	Literatur zu Kapitel 12.....	237
13	Fallstudien.....	239
13.1	Motivation.....	239
13.2	Vorgehen.....	239
13.2.1	Wahl der Fallstudien.....	239
13.2.2	Zeitlicher Ablauf.....	240
13.2.3	Lernziele für Studierende.....	241
13.2.4	Datenbasis.....	242
13.3	Fallstudie Chemische Kleiderreinigung.....	242
13.3.1	Vorstudie.....	242
13.3.2	Detailstudie Ökobilanz.....	245
13.3.2.1	Zieldefinition.....	245
13.3.2.2	Sachbilanz und Bewertung.....	245
13.3.2.3	Interpretation und Methodenkritik.....	248
13.3.3	Detailstudie Risikoanalyse.....	250
13.3.3.1	Ausgangslage und Datenbasis.....	250
13.3.3.2	Expositionsanalysen.....	252
13.3.3.3	Wirkungsanalyse.....	254
13.3.3.4	Risikobeschreibung.....	254
13.3.3.5	Risikobewertung.....	255
13.3.3.6	Risikomanagement.....	256
13.3.4	Chlorchemie und Gesellschaft.....	257
13.3.4.1	Vorgehen.....	257
13.3.4.2	Resultate.....	257
13.3.4.3	Interpretation und Methodenkritik.....	259
13.4	Integrierende Beurteilung der Detailstudien und Diskussion.....	259
	Literatur zu Kapitel 13.....	260

Anhang	263
A1 Kurzchronik von Chemieunfällen	265
A2 Anhang zum geltenden Recht der Schweiz	267
A2.1 Luftreinhaltung.....	267
A2.2 Gewässerschutz.....	269
A2.3 Abfälle.....	271
A3 Anhang zum geltenden Recht in Deutschland	273
A3.1 Herstellungs- und Verwendungsverbote nach § 15 Gefahrstoff- verordnung (D).....	273
A3.2 Gefahrenbezeichnungen, R- und S-Sätze nach Anhang I der Gefahrstoffverordnung (D).....	274
A3.3 Beispiel eines Sicherheitsdatenblattes nach Gefahrstoff- verordnung (D).....	277
A4 Grunddaten zur Ökobilanzierung	281
A5 Grundlagen für Expositionsanalysen	283
A5.1 Gleichgewichtsverteilung von Stoffen in der Umwelt.....	283
A5.1.1 Luft*-* Wasser.....	283
A5.1.2 Wasser o Feststoff (Grundwasserleiter, Sediment oder suspendierter Feststoff).....	284
A5.1.3 Wasser <->Biota.....	284
A5.2 Stoffumwandlungen in der Umwelt.....	285
A5.2.1 Biologischer Abbau (Wasser/Boden/Sediment).....	285
A5.2.2 Hydrolyse (Wasser/Boden/Sediment).....	285
A5.2.3 Photolyse (Atmosphäre/Wasser).....	285
A5.2.4 Abiotische Reduktion (Boden/Sediment).....	286
A5.2.5 Bemerkungen.....	286
A5.3 Ausbreitung von Stoffen in der Umwelt.....	286
A5.3.1 Atmosphärische Ausbreitung von Stoffen und Mikroorganismen.....	286
A5.3.2 Schwergasausbreitung.....	287
A5.3.3 Gasausbreitung durch turbulente Diffusion.....	289
A5.3.4 Schutzwirkung von Gebäuden.....	291
A5.3.5 Weitere Ausbreitungsmodelle.....	291
A5.4 Expositionswege für den Menschen.....	292
A5.4.1 Inhalationsexposition.....	292
A5.4.2 Dermale Exposition.....	292

A5.4.3 Orale Exposition.....	292
A5.5 Abschätzung der Exposition bei Pestiziden.....	293
A6 Störfallanalysen: Fehlerbaum, Ereignisbaum, Risikodiagramm.....	295
A7 Kalorimetrische Charakterisierung von Zersetzungsreaktionen.....	299
A7.1 Methodenübersicht.....	299
A7.2 Mikrokolorimetrie am Beispiel der DSC.....	300
A8 Informationsquellen.....	302
Literatur zum Anhang.....	304
Glossar.....	305
Stichwortverzeichnis.....	313