



EUROPA-FACHBUCHREIHE
für Chemieberufe

Berechnungen zur Chemietechnik

Eckhard Ignatowitz, Gerhard Fastert, Holger Rapp

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsseldorfer Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

Europa-Nr. 71378

Autoren:

Dr.-Ing. Eckhard Ignatowitz, StR a. D. Waldbronn
Gew.-Lehrer Gerhard Fastert †, OStR Stade
Dipl.-Ing., Dipl.-Wirt.-Ing. Holger Rapp Waldbronn

Lektorat:

Dr.-Ing. Eckhard Ignatowitz

Bildentwürfe: Die Autoren

Bildbearbeitung: Zeichenbüro des Verlags Europa-Lehrmittel, Ostfildern

Foto des Buchtitelbildes: Mit freundlicher Genehmigung der Lanxess AG, Köln

1. Auflage 2014, korrigierter Nachdruck 2023

Druck 5 4

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Korrektur von Druckfehlern identisch sind.

ISBN 978-3-8085-7137-8

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2014 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
www.europa-lehrmittel.de

Satz: Satz+Layout Werkstatt Kluth GmbH, 50374 Erftstadt

Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald

Druck: Plump Druck und Medien GmbH, 53619 Rheinbreitbach

Vorwort

Das Buch **Berechnungen zur Chemietechnik** ist ein Lehr-, Lern- und Übungsbuch für die schulische und betriebliche Ausbildung im Fachgebiet Chemietechnik.

Es ergänzt und festigt das Wissen im Fachgebiet Chemietechnik durch rechnerisches Erfassen und Beherrschen der Anlagenkomponenten, der physikalischen Vorgänge in den Rohrleitungen und Apparaten, der Grundoperationen und Verfahren der Chemietechnik, der chemischen Reaktionstechnik sowie der Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik.

Dadurch wird eine vertiefte und breit fundierte Kompetenz in der Chemietechnik erreicht.

Die Kapitel des Buches **Berechnungen zur Chemietechnik** sind:

- | | |
|---|--|
| 1 Rechnen und Datenauswertung in der Chemietechnik | 8 Berechnungen zu thermischen Trennverfahren |
| 2 Berechnungen zu Anlagenkomponenten | 9 Berechnungen zu physikalisch-chemischen Trennverfahren |
| 3 Berechnungen zur Messtechnik | 10 Berechnungen zur Regelungstechnik |
| 4 Datenauswertung und Berechnungen zur Qualitätssicherung | 11 Lösen von Aufgaben zur Steuerungstechnik |
| 5 Berechnungen zur Aufbereitungstechnik | 12 Berechnungen zur chemischen Reaktionstechnik |
| 6 Berechnungen zu mechanischen Trennprozessen | 13 Gemischte Aufgaben |
| 7 Berechnungen zur Heiz- und Kühltechnik | 14 Themenübergreifende Projektaufgaben |
| | 15 Anhang (mit Kopiervorlagen) |

Die Lerninhalte werden im Buch nach einem einheitlichen methodischen Konzept dargeboten:

Nach einer kurzen Einführung in das Fachgebiet werden die zur Berechnung erforderlichen Gleichungen entweder hergeleitet bzw. durch Analogieschlüsse ermittelt oder gegeben.

Danach folgen Aufgabenbeispiele aus der Praxis der Chemietechnik, an denen exemplarisch der Rechengang durchgeführt wird.

Es werden konsequent die Regeln des Runden sowie der signifikanten Ziffern angewandt.

Als Abschluss jedes Fachgebiets wird eine Vielzahl von Aufgaben gestellt, die ein eigenständiges Üben des Gelernten ermöglichen.

Die Berechnung, Datenauswertung und grafische Darstellung mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel 2010 wird eingeführt und erläutert sowie an ausgewählten Sachthemen durchgeführt.

Am Ende des Buches befinden sich eine umfangreiche Sammlung von gemischten Aufgaben zu allen Sachgebieten des Buches sowie themenübergreifende Projektaufgaben.

Die Aufgaben orientieren sich in der Art und dem Schwierigkeitsgrad an den Abschlussprüfungen. Es gibt sowohl einfache als auch komplexe Aufgaben.

Das Rechnen der gemischten Aufgaben und die Bearbeitung der themenübergreifenden Aufgaben kann zur Vorbereitung auf Abschlussprüfungen genutzt werden.

Ein Anhang mit Kopiervorlagen grafischer Papiere erleichtert das Erstellen von Diagrammen.

Das ausführliche Sachwortverzeichnis mit englischer Übersetzung ermöglicht die schnelle Themensuche und kann zusätzlich als Fachwörterlexikon genutzt werden.

Zum Buch **Berechnungen zur Chemietechnik** gibt es ein **Lösungsbuch, EUROPA-Nr. 71484**.

Dort sind alle Aufgaben durchgerechnet und die erforderlichen Grafiken erstellt.

Das Buch **Berechnungen zur Chemietechnik** baut auf den rechnerischen Grundlagen des chemischen Rechnens im Buch **Technische Mathematik für Chemieerberufe** auf. Zusammen erschließen die beiden Bücher die Fachgebiete des chemischen Rechnens und der Berechnungen zur Chemietechnik.

Die Autoren sind der Meinung, mit dem Buch **Berechnungen zur Chemietechnik** einen Beitrag zur Komplettierung des Bücherangebots zum Fachgebiet der Chemietechnik zu leisten.

Konstruktive Verbesserungsvorschläge und Fehlerkorrekturen werden vom Verlag und von den Autoren dankbar entgegengenommen und verwertet.

Inhaltsverzeichnis

1	Rechnen und Datenauswertung in der Chemietechnik	8	2.6	Lagereinrichtungen	49
1.1	Genauigkeit beim Rechnen	8	2.6.1	Volumen geometrischer Körper	49
1.1.1	Signifikante Ziffern	8	2.6.2	Volumen zusammengesetzter Körper	49
1.1.2	Runden	8	2.6.3	Berechnung der Masse eingelagerter Feststoffe und Flüssigkeiten	50
1.1.3	Anzahl der Nachkommastellen	9	2.6.4	Berechnung der Gasmenge in Tanks	50
1.1.4	Rechnen mit Messwerten mit angegebener Ungenauigkeit	10	2.7	Rührbehälter	52
1.2	Erstellen und Arbeiten mit Diagrammen	11	2.7.1	Inhalte von Rührbehältern	52
1.2.1	Erstellen von Diagrammen per Hand	11	2.7.2	Thermische Volumenausdehnung bei Behältern	52
1.2.2	Diagramme mit logarithmischer Teilung	11	2.8	Projektierung von Chemieapparaten	53
1.2.3	Diagramme mit doppelt-logarithmischer Teilung	12	2.9	Druckarten und Druckkräfte in Behältern	56
1.2.4	Erstellen von Ausgleichskurven	12	2.10	Elektromotoren	57
1.3	Prozessdatenauswertung mit dem PC	14	2.11	Getriebe	59
1.3.1	Datenauswertung mit einem Tabellenkalkulationsprogramm	14	2.12	Mechanische Belastung von Bauteilen und Apparaten	61
1.3.2	Grafische Darstellung von Prozessdaten mit Excel	16	2.12.1	Spannungen in Bauteilen	61
1.3.3	Regressionsanalyse von Messreihen mit Excel	19	2.12.2	Festigkeitskennwerte der Werkstoffe	62
1.3.4	Grafische Darstellung der Regressionsanalyse	21	2.12.3	Festigkeitskennwerte von Schrauben	63
1.3.5	Regressionsanalyse und Prüfen der Funktionsabhängigkeit	22	2.12.4	Zulässige Spannung in Bauteilen	63
			2.12.5	Auslegung von Bauteilen (Dimensionierung)	63
2	Berechnungen zu Anlagenkomponenten	24	3	Berechnungen zur Messtechnik	66
2.1	Rohrleitungen	24	3.1	Temperaturmessung	66
2.1.1	Stoffströme in Rohrleitungen	24	3.1.1	Widerstandsthermometer	66
2.1.2	Rohrabmessungen	25	3.1.2	Thermoelement-Thermometer	67
2.1.3	Nenndruck, Mindestwanddicke	26	3.2	Druckmessung	68
2.1.4	Masse von Stahlrohren	27	3.2.1	Definition, Einheiten, Umrechnung	68
2.1.5	Rohrausdehnung und Kompensatoren	28	3.2.2	Druckarten	68
2.1.6	Regelventile	29	3.2.3	Druckmessung in Behältern und Apparaten	68
2.1.7	Kondensatableiter	31	3.2.4	Druckmessung in strömenden Medien	69
2.1.8	Druck in Rohrleitungen	32	3.2.5	U-Rohr-Manometer	70
2.1.9	Strömungszustände in Rohrleitungen	33	3.2.6	Druckdifferenzmessung mit dem U-Rohr-Manometer	70
2.1.10	Druckverlust in Rohrleitungen	34	3.2.7	Federmanometer	71
2.2	Fördern von Flüssigkeiten mit Pumpen	36	3.2.8	Druckmessung mit DMS-Sensoren	71
2.2.1	Fördern mit Kreiselpumpen	36	3.3	Füllstandmessung	73
2.2.2	Kavitationsfreier Betrieb von Kreiselpumpen, NPSH-Wert	40	3.3.1	Volumen geometrischer Grundkörper von Behältern	73
2.2.3	Fördern mit Kreiskolbenpumpen und Drehkolbenpumpen	42	3.3.2	Füllstände und Füllvolumen in Behältern	73
2.3	Fördern von Flüssigkeiten mit Schwerkraft und Druck	43	3.3.3	Füllstandmessung bei Flüssigkeiten	75
2.3.1	Ausfluss aus Behältern unter Schwerkraft	43	3.3.4	Füllstandmessung bei Schüttgütern	76
2.3.2	Ausfluss aus Behältern mit Überdruck	44	3.4	Durchflussmessung und Mengenmessung	79
2.4	Verdichten und Fördern von Gasen	45	3.4.1	Quantitätsgrößen bei Durchflüssen	79
2.5	Fördern von Feststoffen	47	3.4.2	Durchflussmessung	79
			3.4.3	Mengenmessung bei strömenden Fluiden	81

4	Datenauswertung und Berechnungen zur Qualitätssicherung	84	5.3.2	Beschreibung eines Schüttguts	125
4.1	Statistische Kennwerte	84	5.4	Zerkleinern	127
4.1.1	Kennwerte zur mittleren Lage von Messwerten	84	5.4.1	Beschreibung der Zerkleinerung	127
4.1.2	Häufigkeitsverteilung von Messdaten	85	5.4.2	Leistungsbedarf einer Zerkleinerungsmaschine	128
4.1.3	Kennwerte zur Streuung von Messwerten	86	5.5	Rühren und Mischen im Rührbehälter	129
4.1.4	Standardabweichung und Häufigkeit der Messwerte	87	5.5.1	Rühren und Mischen	129
4.1.5	Auswertung mit dem Taschenrechner und dem Computer	88	5.5.2	Beschreibung des Mischvorgangs	129
4.2	Werkzeuge der Qualitätssicherung	89	5.5.3	Leistungsbedarf eines Rührers	130
4.2.1	Fehlersammelkarte und Datensammelkarte	89	5.5.4	Mischzeit	130
4.2.2	Histogramm (Säulendiagramm)	90	6	Berechnungen zu mechanischen Trennverfahren	132
4.2.3	Pareto-Diagramm, Pareto-Analyse	91	6.1	Kennzeichnung der Trennprozesse beim Klassieren und Sortieren	132
4.2.4	Korrelationsdiagramm	93	6.2	Klassieren mit Siebmaschinen	136
4.3	Qualitätssicherung mit Qualitätsregelkarten (QRK)	95	6.3	Dekantieren	137
4.3.1	Aufbau und Typen von Qualitätsregelkarten	95	6.4	Sedimentieren	138
4.3.2	Prozess-QRK mit festen Regelgrenzen	97	6.4.1	Vorgänge beim Sedimentieren	138
4.3.3	Erstellen und Führen von Qualitätsregelkarten	100	6.4.2	Absetzapparate	138
4.3.4	Erstellen von Qualitätsregelkarten mit Excel	102	6.5	Zentrifugieren mit Sedimentierzentrifugen	140
4.3.5	Prozess-QRK mit variablen Regelgrenzen	104	6.6	Staubabscheidung mit dem Zyklon	142
4.4	Prüfung der Prozessfähigkeit	106	6.6.1	Vorgänge im Zyklon	142
4.5	Typische Verläufe in Qualitätsregelkarten	109	6.6.2	Berechnungen beim Zyklon	142
5	Berechnungen zur Aufbereitungstechnik	112	6.6.3	Druckverlust, Abscheidegrad	143
5.1	Schüttgüter	112	6.7	Filtrieren	144
5.1.1	Porosität, Schüttdichte, Partikelgröße	112	6.7.1	Vorgänge beim Filtrieren	144
5.1.2	Oberflächen von Schüttgütern	113	6.7.2	Absatzweise Filtration	146
5.2	Bestimmung der Partikelgrößenverteilung von Schüttgütern	114	6.7.3	Kontinuierliche Filtration	146
5.2.1	Durchführung einer Siebanalyse	114	7	Berechnungen zur Heiz- und Kühlttechnik	148
5.2.2	Auswertung einer Siebanalyse	114	7.1	Wärmemengen	148
5.2.3	Grafische Darstellungen der Siebanalyse	115	7.2	Energieträger im Chemiebetrieb	148
5.2.4	Darstellung und Auswertung einer Siebanalyse im RRSB-Netz (DIN 66 145)	117	7.3	Wärmeübertragung in der Chemietechnik	149
5.2.5	Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Schüttgütern	119	7.3.1	Grundlagen der Wärmeübertragung	149
5.2.6	Auswertung einer Siebanalyse mit einem Tabellenkalkulationsprogramm (TKP)	120	7.3.2	Wärmeleitung	149
5.2.6.1	Datenauswertung der Siebanalyse mit dem TKP Excel	120	7.3.3	Wärmedurchgang	151
5.2.6.2	Grafische Darstellung der Siebanalyse mit dem TKP Excel	122	7.3.4	Berechnung von Wärmedurchgangszahlen k	152
5.3	Charakterisierung eines Schüttguts	124	7.3.5	Mittlere Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_m$ beim Wärmedurchgang	153
5.3.1	Verteilungsdiagramme	124	7.4	Wärmeübertragung mit Rohrbündelwärmetauschern	155
			7.5	Wärmeableitung in Kondensatoren	157
			7.5.1	Oberflächenkondensatoren	157
			7.5.2	Mischkondensatoren	157

7.6	Wärmeübertragung in Rührbehältern ..	158	9	Berechnungen zu physikalisch-chemischen Trennverfahren	194
7.6.1	Indirektes Heizen und Kühlen	158	9.1	Flüssig-Flüssig-Extraktion	194
7.6.2	Direkte Heizung und direkte Kühlung in Rührbehältern	159	9.1.1	Absatzweise einfache Extraktion	194
8	Berechnungen zu thermischen Trennverfahren	160	9.1.2	Absatzweise mehrfache Extraktion	196
8.1	Industrielles Trocknen	160	9.1.3	Kontinuierliche Gegenstromextraktion .	197
8.1.1	Massebilanzen beim Trocknen	160	9.2	Absorption	202
8.1.2	Trocknungsmittel Luft	161	9.2.1	Berechnung der absorbierten Stoffmenge	203
8.1.3	Luftbedarf beim Trocknen	162	9.2.2	Gegenstrom-Absorption in Kolonnen ..	204
8.1.4	<i>h</i> - <i>X</i> -Diagramm	163	10	Berechnungen zur Regelungstechnik ..	206
8.1.5	Wärmebedarf beim Trocknen	163	10.1	Elemente des Regelkreises	206
8.2	Eindampfen von Lösungen	166	10.1.1	Regelstrecke und Regeleinrichtung	207
8.2.1	Siedepunkterhöhung bei Lösungen	166	10.1.2	Regler	207
8.2.2	Kontinuierliche Eindampfung	166	10.1.3	Messumformer	208
8.2.3	Absatzweise Eindampfung	168	10.2	Zwischenwerte des Einheitssignals ...	208
8.3	Kristallisieren aus Lösungen	169	10.3	Zeitverhalten von Regelstrecken	210
8.4	Destillation	171	10.3.1	Statisches Verhalten	210
8.4.1	Physikalische Grundlagen der Destillation	171	10.3.2	Dynamisches Verhalten	210
8.4.1.1	Dampfdruck von Flüssigkeiten	171	10.3.3	Proportionale Regelstrecken	211
8.4.1.2	Siedeverhalten homogener Flüssigkeitsgemische	171	10.3.4	Regelstrecken mit Totzeit	212
8.4.1.3	Siedediagramm	174	10.3.5	Regelstrecken mit einem Speicher	212
8.4.1.4	Gleichgewichtsdiagramm	174	10.3.6	Regelstrecken mit mehreren Speichern	213
8.4.1.5	Destillationsverhalten verschiedener Flüssigkeitsgemische	175	10.3.7	Integrale Regelstrecken	214
8.4.1.6	Relative Flüchtigkeit (Trennfaktor)	175	10.4	Reglertypen	216
8.4.2	Absatzweise einfache Destillation	177	10.4.1	Proportionalregler	216
8.5	Wasserdampfdestillation	179	10.4.2	Integralregler	218
8.5.1	Physikalisches Prinzip der Wasserdampfdestillation	179	10.4.3	Differentialregler	218
8.5.2	Erforderliche Dampfmenge	180	10.4.4	Proportional-Integral-Regler	219
8.6	Rektifikation	181	10.4.5	Proportional-Differential-Regler (PD-Regler)	220
8.6.1	Kontinuierliche Rektifikation in Kolonnen mit Austauschböden	181	10.4.6	Proportional-Integral-Differential-Regler (PID-Regler)	220
8.6.2	Stoffbilanz in der Kolonne	181	10.5	Regelkreisverhalten und Regleranpassung	222
8.6.3	Rücklaufverhältnis	182	10.5.1	Regelkreisverhalten	222
8.6.4	Bestimmung der Trennstufen einer Rektifikationskolonne	182	10.5.2	Anpassung des Reglers an die Regelstrecke	223
8.6.5	Rektifikationskolonne mit mittigem Zulauf	184	11	Lösen von Aufgaben aus der Steuerungstechnik	225
8.6.6	Rektifikation mit Füllkörper- und Packungskolonnen	187	11.1	Logische Grundverknüpfungen	225
8.6.7	Kolonnendurchmesser und Kolonnenhöhe	188	11.2	Zusammengesetzte logische Verknüpfungen	228
8.6.8	Rektifikation azeotroper Gemische	190	11.2.1	Verknüpfungen mit Eingangsnegation .	228
8.6.8.1	Zweidruck-Rektifikation	191	11.2.2	Verknüpfungen mit Ausgangsnegation	229
8.6.8.2	Extraktiv-Rektifikation	192	11.2.3	Realisierung zusammengesetzter logischer Verknüpfungen	230
			11.3	Rechenregeln der Schaltalgebra	233

11.4 Speicher-Funktionsbausteine	236	13.4 Aufgaben zu Kapitel 4 Datenauswertung und Berechnungen zur Qualitätssicherung	262
11.4.1 Signalspeicherung durch Selbsthaltungsschaltung	236	13.5 Aufgaben zu Kapitel 5 Aufbereitungstechnik	262
11.4.2 Signalspeicherung durch Kippglieder ..	236	13.6 Aufgaben zu Kapitel 6 Mechanische Trennverfahren	263
11.4.3 Anwendungen von Flipflop-Schaltungen in der Chemietechnik	237	13.7 Aufgaben zu Kapitel 7 Heiz- und Kühltechnik	264
12 Berechnungen zur chemischen Reaktionstechnik	240	13.8 Aufgaben zu Kapitel 8 T hermische Trennverfahren	265
12.1 Umgesetzte Stoffmengen in Reaktoren	240	13.9 Aufgaben zu Kapitel 9 Physikalisch-chemische Trennverfahren	266
12.1.1 Quantitätsgrößen und Durchsatzgrößen	240	13.10 Aufgaben zu Kapitel 10 Regelungstechnik	267
12.1.2 Umgesetzte Stoffmengen bei vollständiger Reaktion mit reinen Stoffen	240	13.11 Aufgaben zu Kapitel 11 Steuerungstechnik	268
12.1.3 Umgesetzte Stoffmengen bei Reaktion mit verdünnten bzw. unreinen Stoffen	241	13.12 Aufgaben zu Kapitel 12. Chemische Reaktionstechnik	269
12.1.4 Umgesetzte Stoffmengen bei unvollständigen Reaktionen	241		
12.2 Kenngrößen der Reaktionsabläufe in Reaktoren	242	14 Themenübergreifende Projektaufgaben	270
12.2.1 Umsatz	242	Projektaufgabe 1	270
12.2.2 Ausbeute (Bildungsgrad)	243	Projektaufgabe 2	272
12.2.3 Selektivität	244		
12.2.4 Verweilzeit	244	15 Anhang	276
12.2.5 Produktionsleistung	244	Griechisches Alphabet	276
12.3 Zeitlicher Ablauf chemischer Reaktionen	246	Physikalische Konstanten	276
12.4 Beeinflussung der Reaktionsge- schwindigkeit	247	Hinweis zu den Normen	276
12.5 Chemisches Reaktionsgleichgewicht, Massenwirkungsgesetz	249	Kopiervorlagen	277
12.6 Reaktionsenthalpie	250	Millimeter-Papier, Einfach-Loga- rithmisches Papier, Doppelt-Lo- garithmisches Papier, Qualitätsregelkarte, Vordruck Siebanalyse, Verteilungs-Diagramme, RRSB-Netz für die Siebanalyse, h-X-Diagramm für Trocknungsluft, Gleichgewichtsdiagramm Rektifikation, Beladungsdiagramm Extraktion, Beladungsdiagramm Adsorption, Sprungantwort (Regelungstechnik)	
12.7 Betriebsweisen und Reaktortypen in der chemischen Produktion	252		
12.7.1 Chargenbetrieb im Rührkesselreaktor	252	Sachwortverzeichnis mit englischer Übersetzung	290
12.7.2 Fließbetrieb im Rohrreaktor	253		
12.7.3 Fließbetrieb im kontinuierlich betriebenen Rührkessel	254		
12.7.4 Kontinuierlich betriebene Rührkesselkaskade	255		
12.7.5 Reaktor mit Kreislaufführung	256		
13 Gemischte Aufgaben zur Prüfungsvorbereitung	258		
13.1 Aufgaben zu Kapitel 1 Rechnen und Datenauswertung in der Chemietechnik	258		
13.2 Aufgaben zu Kapitel 2 Anlagenkomponenten	259		
13.3 Aufgaben zu Kapitel 3 Messtechnik in Chemieanlagen	261		

1.3 Prozessdatenauswertung mit dem PC

Anstatt mit Schreiber, Taschenrechner und Papier können die Berechnungen und grafischen Darstellungen zur Chemietechnik auch mit einem Tabellenkalkulationsprogramm (engl. spread sheet) auf einem Computer durchgeführt werden.

Dazu benötigt man einen Personalcomputer (PC) oder einen Laptop mit einem Tabellenkalkulationsprogramm (kurz TKP). Es gehört zur Standardsoftware-Ausstattung eines PCs.

1.3.1 Datenauswertung mit einem Tabellenkalkulationsprogramm

Die nachfolgenden Auswertungen wurden mit dem Tabellenkalkulationsprogramm **Microsoft Excel 2010** durchgeführt. Nach Aufrufen des TKPs Excel 2010 erscheint das in **Bild 1** gezeigte Monitorbild.

Am Kopf des Bildschirmfensters befinden sich die Titelleiste und das Menüband mit den Registerkarten. In der **Titelleiste** stehen der Dateiname und ganz rechts drei Schaltflächen für die Bildschirmdarstellung. Im **Menüband** stehen zuoberst die Registerkarten: *Datei, Start, Einfügen, Seitenlayout* usw. Darunter befindet sich eine Vielzahl von Symbolen (engl. icons) bzw. Befehlen.

Bei aufgerufener Registerkarte **Start** hat das Menüband das in Bild 1 gezeigte Aussehen. Es ist in Befehlsgruppen unterteilt, die am unteren Rand des Menübands genannt sind: *Zwischenablage, Schriftart, Ausrichtung* usw.

In jeder Befehlsgruppe werden die einzelnen Befehle durch Schaltflächen (icons) aktiviert, z. B. das Mittigsetzen von Text in der Befehlsgruppe *Ausrichtung* durch das Symbol .

Die Registerkarte wird durch Anklicken gewechselt.

In der **Bearbeitungsleiste** steht im ersten Feld die aktive Zelle, in Bild 1 ist es die Zelle A1.

Im zweiten, langgezogenen Feld erfolgt die Eingabe der Daten, der Texte und der Berechnungsformeln, die in die aktive Zelle geschrieben werden sollen.

Das Tabellenkalkulationsprogramm erzeugt auf dem Bildschirm ein **elektronisches Arbeitsblatt** (Bild 1). Es ist in Form eines Rechenblatts aufgebaut, das in Spalten und Zeilen geordnet ist.

Am oberen Rand des Arbeitsblatts sind die **Spalten** mit fortlaufenden Buchstaben (A, B, C, ...) bezeichnet. Am linken Rand werden die **Zeilen** des Arbeitsblatts mit Ziffern nach unten gezählt (1, 2, 3, ...).

Jedes Feld des Arbeitsblatts, auch **Zelle** genannt, ist durch einen Spaltenbuchstaben und eine Zeilennummer festgelegt. Das Feld in der linken oberen Ecke des Arbeitsblatts heißt z. B. A1. In jedes Feld können Daten, Text oder Berechnungsformeln geschrieben werden.

Die Arbeit mit einem Tabellenkalkulationsprogramm wird am Beispiel auf der folgenden Seite erläutert.

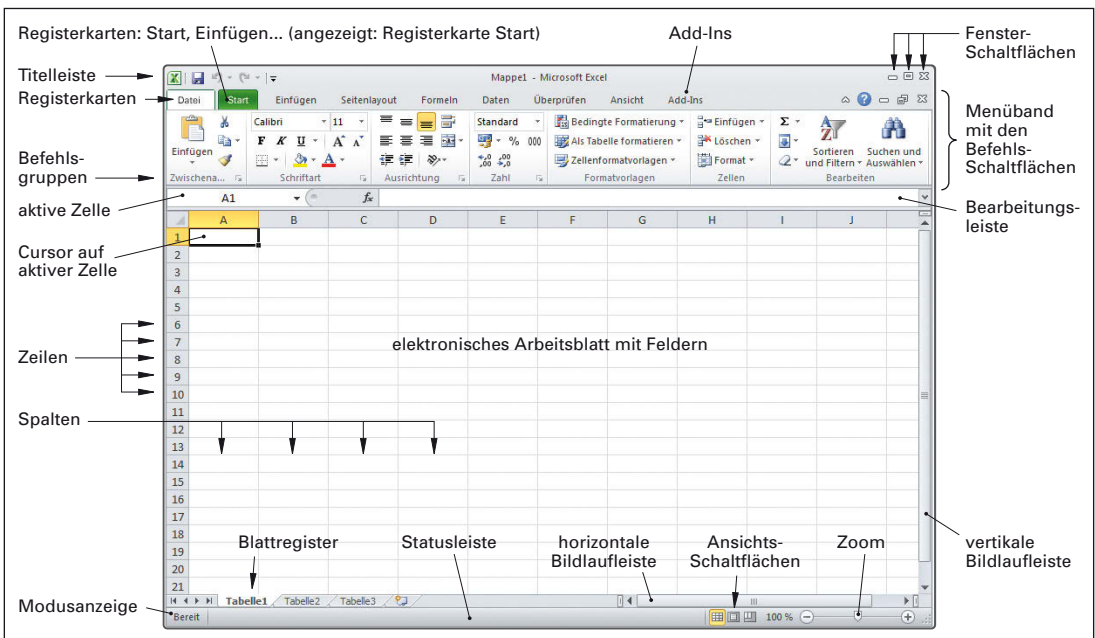
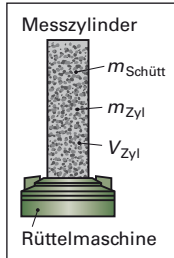


Bild 1: Monitorbild des Tabellenkalkulationsprogramms Microsoft Excel 2010

Beispiel: Auswertung einer Schüttdichte-Bestimmung mit einem Tabellenkalkulationsprogramm

Aus verschiedenen Granulatsäcken einer Charge werden 5 Proben an POM-Granulat entnommen. Mit einer Vorrichtung zur Bestimmung der Schütt- und Rütteldichte nach DIN EN 1237 (nebenstehendes **Bild** und Seite 112) und einer Waage werden die Schüttmasse $m_{\text{Schütt}}$ und die Rüttelmasse $m_{\text{Rüttel}}$ im Messzylinder ermittelt (**Tabelle 1**). Die Berechnungsgleichungen lauten:



$$\rho_{\text{Schütt}} = \frac{m_{\text{Schütt}} - m_{\text{Zyl}}}{V_{\text{Zyl}}}; \quad \rho_{\text{Rüttel}} = \frac{m_{\text{Rüttel}} - m_{\text{Zyl}}}{V_{\text{Zyl}}}$$

Tabelle 1: Messwerte zur Bestimmung der Schütt- und Rütteldichte von POM-Granulat

Messreihe	$m_{\text{Schütt}}$ in kg	$m_{\text{Rüttel}}$ in kg
1	1,1837	1,2653
2	1,1724	1,2479
3	1,1808	1,2520
4	1,1799	1,2682
5	1,1827	1,2603
$m_{\text{Zyl}} = 0,2712 \text{ kg};$		$V_{\text{Zyl}} = 1,0000 \text{ L}$

Es sollen die jeweiligen Dichten der Proben und die mittlere Schütt- bzw. Rütteldichte berechnet werden.

Lösung: Nach dem Starten des Excel-Programms werden im Arbeitsblatt folgende Aktionen durchgeführt:

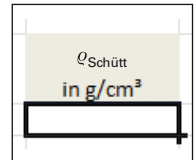
- Eingabe des Titels und der Spaltenüberschriften in das Arbeitsblatt (**Bild 1**, Zeilen 1 und 2).
- Eingabe der Daten in die **Eingabefelder**: Die Nummer der Messreihe (A3 bis A7), die Masse der Schüttung (B3 bis B7) und die Masse der Rüttelschüttung (C3 bis C7), die Masse und das Volumen des Zylinders (B8, B9).
- Ausgabefelder** für die errechneten Einzeldichten sind die Felder D3 bis D7 sowie E3 bis E7. In jedes Feld ist die Berechnungsformel für die Schütt- bzw. Rütteldichte einzutragen. Sie lautet z. B. für die Zelle D3: **= (B3-B\$8)/\$E\$8**
Hinweis: Die Zeichen =, /, +, -, entsprechen den gleichlautenden mathematischen Zeichen.
Das Zeichen * bedeutet Multiplizieren.

	A	B	C	D	E
1	Schütt- und Rütteldichte von POM-Granulat				
2	Messreihe	$m_{\text{Schütt}}$ in kg	$m_{\text{Rüttel}}$ in kg	$\rho_{\text{Schütt}}$ in g/cm³	$\rho_{\text{Rüttel}}$ in g/cm³
3	1	1,1873	1,2653	0,9161	0,9941
4	2	1,1724	1,2479	0,9012	0,9767
5	3	1,1808	1,252	0,9096	0,9808
6	4	1,1799	1,2682	0,9087	0,997
7	5	1,1827	1,2603	0,9115	0,9891
8	m_{Zyl} in kg	0,2712			
9	V_{Zyl} in L	1,0000			
10	Mittlere Dichten			0,90942	0,98754

Bild 1: Excel-Tabelle des Beispiels mit Auswertung

- Übertragen der Formel auf die anderen Ergebnisfelder D4 bis D7 bzw. E4 bis E7:
 - Linker Mausklick auf das Feld D3 mit der zu kopierenden Formel.
 - Nach Verfahren des Mauszeigers auf die rechte untere Zellenecke erscheint ein Kreuz (siehe rechts).
 - Durch linken Mausklick auf das Kreuz und Ziehen mit gehaltener Maustaste nach unten in die nächste Zelle wird die Formel in diese Zelle kopiert. Diese Methode ist auch auf horizontal benachbarte Zellen anwendbar.
- In Feld D10 bzw. E10 werden die Mittelwerte von $\rho_{\text{Schütt}}$ und $\rho_{\text{Rüttel}}$ berechnet. Es ist der arithmetische Mittelwert der Einzelergebnisse in D3 bis D7 bzw. in E3 bis E7:

$$\bar{\rho}_{\text{Schütt}} = \frac{\rho_{\text{Schütt},1} + \rho_{\text{Schütt},2} + \dots}{5}$$
 In Zelle D10 wird eingetragen: **=SUMME(D3:D7)/5** bzw. in Zelle E10: **=SUMME(E3:E7)/5**
Hinweis: Das Zeichen : steht für „bis“.
- Für die Berechnung des arithmetischen Mittelwerts bietet Excel auch eine eigene Funktion bei den statistischen Berechnungen an: Nach linkem Mausklick auf Zelle D3 und **Einfügen/Funktion/Statistik/Mittelwert** wird ein Fenster eingeblendet, das zur Eingabe der Zelladressen für die Mittelwertberechnung auffordert: D3:D7 bzw. E3:E7. Nach Bestätigung mit Ende ist der Formeleintrag abgeschlossen. Er lautet in D10: **=MITTELWERT(D3:D7)** bzw. in E10: **=MITTELWERT(E3:E7)**
- Die Zahl der Dezimalstellen des Ergebnisses muss noch festgelegt werden: Dies geschieht durch rechten Mausklick auf das Ergebnisfeld und den Befehl: **Zellen formatieren/Kategorie Zahl/Dezimalzahlen 3/OK**. Alternativ: Ein linker Mausklick auf eines der nebenstehenden Symbole in der Registerkarte **Start** – **Zahl** fügt in der aktiven Zelle eine Dezimalstelle hinzu (linkes Symbol) oder verringert um eine Dezimalstelle (rechtes Symbol).
- Die Tabelle und die Texte können auf vielfältige Weise formatiert (gestaltet) werden:
 Registerkarte Start – Schriftart
 - Die Texte können z. B. bei **Schriftart** fett (**F**) oder kursiv (**K**) oder bei **Ausrichtung** zentriert () gedruckt werden.
 - Die Tabelle kann bei **Formatvorlagen** mit Linien und Rahmen versehen werden.
- Die Tabelle kann schließlich mit **Datei/Speichern unter** gespeichert oder mit **Datei/Drucken** ausgedruckt werden.



2.2 Fördern von Flüssigkeiten mit Pumpen

2.2.1 Fördern mit Kreiselpumpen

Eine Kreiselpumpe besteht aus der eigentlichen Pumpe sowie einem Elektromotor als Antrieb (**Bild 1**).

Förderstrom, Förderhöhe und Wirkungsgrad einer Pumpe

Der Förderstrom $\dot{V}$ (engl. volume flow), auch F oder Q genannt, ist der von einer Pumpe geförderte Volumenstrom $\dot{V} = V/t$.

Die **Förderhöhe H einer Pumpe** ist die auf die Förderflüssigkeit übertragene mechanische Energie W_O , bezogen auf die Gewichtskraft F_G der geförderten Flüssigkeit (Bild 1).

In der Gleichung ist: $F_G = \rho \cdot g \cdot V$

Durch Einsetzen von F_G und Dividieren im Nenner und Zähler durch die Zeiteinheit t erhält man für die **Förderhöhe H** eine Beziehung, die die auf den geförderten Volumenstrom $\dot{V}$ übertragene Leistung P_U enthält (siehe rechts).

Die aus der Größengleichung abgeleitete Einheit der Förderhöhe H ist Meter (m).

Durch Umstellen der Förderhöhengleichung nach P_U erhält man eine Formel für die **Förderleistung** der Pumpe.

Der **Wirkungsgrad einer Pumpe η** ist das Verhältnis der auf den Förderstrom übertragenen Leistung P_U zur von der Pumpenwelle eingebrachten Motorleistung P_M (Bild 1).

Die Motorleistung beträgt rund 90% der aus dem Leitungsnetz entnommenen elektrischen Leistung P_E .

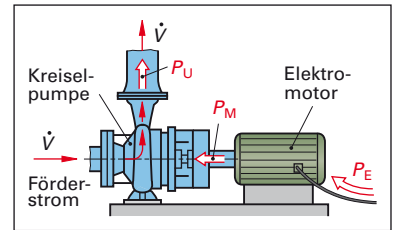


Bild 1: Pumpenanlage

Förderhöhe einer Pumpe

$$H = \frac{W_O}{F_G} = \frac{W_O/t}{\rho \cdot g \cdot V/t} = \frac{P_U}{\rho \cdot g \cdot \dot{V}}$$

Förderleistung einer Pumpe

$$P_U = \rho \cdot g \cdot \dot{V} \cdot H$$

Wirkungsgrad einer Pumpe

$$\eta = \frac{P_U}{P_M}; \quad \text{mit } P_M \approx 0,90 \cdot P_E$$

Beispiel: Wie groß ist die Förderhöhe einer Kreiselpumpe, bei der auf einen geförderten Volumenstrom von 32 m³/h eine Leistung von 4,2 kW übertragen wird? Die Dichte der Flüssigkeit beträgt $\rho = 1,145 \text{ g/cm}^3$.

Lösung:
$$H = \frac{P_U}{\rho \cdot g \cdot \dot{V}} = \frac{4,2 \text{ kW}}{1,145 \text{ g/cm}^3 \cdot 9,81 \text{ N/kg} \cdot 32 \text{ m}^3/\text{h}} = \frac{4,2 \cdot 10^3 \cdot \text{N} \cdot \text{m/s}}{1145 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ N/kg} \cdot 32 \text{ m}^3/\text{h}} = 42,066 \text{ m} \approx \mathbf{42 \text{ m}}$$

Förderhöhe einer Anlage

Die Gesamtförderhöhe einer Anlage H_A setzt sich aus drei Anteilen zusammen (**Bild 2**).

H_{geo} ist die geodätische Förderhöhe, d.h. die Höhe, um die die Flüssigkeit angehoben wird. Sie ist:

$$H_{\text{geo}} = z_1 + z_2$$

ΣH_j sind die Druckhöhenverluste durch den Strömungswiderstand in den Rohrleitungen und Armaturen in der Anlage.

ΔH_p ist die Druckdifferenz zwischen saugseitigem (E) und druckseitigem (A) Behälter.

ΣH_j und ΔH_p berechnen Sie mit den nebenstehenden Gleichungen.

Damit die Pumpe ihre Förderaufgabe erfüllen kann, muss die Förderhöhe H der Pumpe größer sein als die Förderhöhe H_A der Anlage.

Förderhöhe einer Anlage

$$H_A = H_{\text{geo}} + \Sigma H_j + \Delta H_p$$

Druckhöhenverlust

$$\Sigma H_j = \frac{\Delta p_{\text{Verlust}}}{\rho \cdot g}$$

Druckdifferenz

$$\Delta H_p = \frac{p_A - p_E}{\rho \cdot g}$$

Förderbedingung

$$H > H_A$$

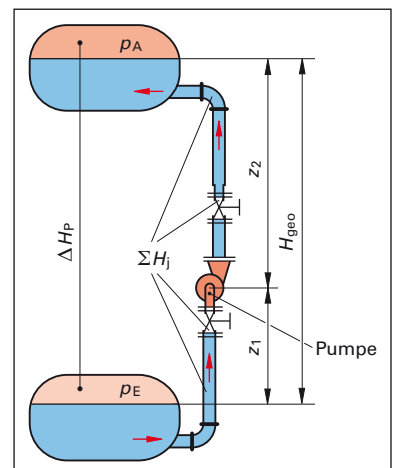


Bild 2: Förderhöhe einer Anlage

Beispiel: Natronlauge mit einer Dichte von $1,219 \text{ kg/dm}^3$ wird von einem tief liegenden Druckbehälter ($p_E = 2,20 \text{ bar}$) in einen $7,42 \text{ m}$ höheren Druckbehälter ($p_A = 4,85 \text{ bar}$) gepumpt. Die Druckhöhenverluste der Rohrleitung betragen insgesamt $\Delta p_V = 0,990 \text{ bar}$. Wie groß ist die Gesamtförderhöhe der Anlage?

Lösung: $H_A = H_{\text{geo}} + \Sigma H_j + \Delta H_p$; $\Delta p_V = 0,990 \text{ bar}$; mit $1 \text{ bar} = 10 \text{ N/cm}^2$ folgt: $\Delta p_V = 0,990 \text{ bar} = 9,90 \text{ N/cm}^2 = 990 \text{ N/dm}^2$

$$\Delta H_j = \frac{\Delta p_V}{\rho \cdot g} = \frac{990 \text{ N/dm}^2}{1,219 \text{ kg/dm}^3 \cdot 9,81 \text{ N/kg}} = 82,787 \text{ dm} \approx 8,28 \text{ m}$$

$$\Delta H_p = \frac{p_A - p_E}{\rho \cdot g} = \frac{4,85 \text{ bar} - 2,20 \text{ bar}}{1219 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ N/kg}} = 0,2216 \frac{10^5 \text{ N/m}^2}{\text{kg/m}^3 \cdot \text{N/kg}} \approx 0,2216 \cdot 102 \text{ m} \approx 22,16 \text{ m}$$

$\Rightarrow H_A = 7,42 \text{ m} + 8,28 \text{ m} + 22,16 \text{ m} = 37,9 \text{ m}$

Pumpenkennlinie, Anlagenkennlinie

Als Pumpenkennlinie bezeichnet man die Kurven, die den Zusammenhang zwischen der Förderhöhe H und dem Fördervolumenstrom $\dot{V}$ der Pumpe beschreiben (Bild 1).

Sie gibt an, welchen Volumenstrom $\dot{V}$ eine Pumpe bei verschiedenen anstehenden Gegendrücken (Förderhöhe H_A der Anlage) fördern kann.

Eine **Anpassung der Kennlinie** einer Pumpe an die Betriebsanforderungen einer Anlage ist auf verschiedene Arten möglich:

- Die Drehfrequenz des Pumpenmotors kann herabgesetzt werden, z. B. durch elektronische Regelung oder durch Polumschaltung.
- Der Laufraddurchmesser der Pumpe kann durch Abdrehen oder durch Auswechseln des Laufrads vermindert werden. Häufig werden Pumpen vom Hersteller mit einem Satz verschieden großer Laufräder angeboten.

Beide Maßnahmen führen zu abgesenkten Pumpenkennlinien mit vermindertem Fördervolumen $\dot{V}$ und verminderter Förderhöhe H (Bild 1).

Die **Anlagenkennlinie** beschreibt die Förderhöhe H_A der Anlage (Seite 36 unten), d. h. den zu überwindenden Gegen-Förderdruck (Druckverlust), in Abhängigkeit vom Volumenstrom $\dot{V}$ (schwarze Linien in Bild 2).

Betriebspunkt einer Kreiselpumpe

Der Betriebspunkt einer Pumpe stellt sich dort ein, wo sich die Pumpenkennlinie und die Anlagenkennlinie schneiden (Bild 2).

Eine Änderung des Betriebspunkts ist entweder durch Änderung der Anlagenkennlinie (Drosselung des Druckschiebers: ② $\rightarrow$ ①) oder durch Änderung der Pumpenkennlinie (z. B. durch Drehfrequenzreduzierung oder Verminderung des Laufraddurchmessers: I $\rightarrow$ II $\rightarrow$ III) möglich.

Beispiel 1: In einer Chemieanlage (Bild 2) mit der Anlagenkennlinie ① wird Benzol mittels einer Kreiselpumpe gemäß der Pumpenkennlinie ① gefördert. Bei welchem Betriebspunkt arbeitet die Pumpe?

Lösung: In Bild 2 kann beim Schnittpunkt der Anlagenkennlinie ① mit der Pumpenkennlinie ① der Betriebspunkt ermittelt werden: $H \approx 28 \text{ m}$; $\dot{V} \approx 70 \text{ m}^3/\text{h}$.

Beispiel 2: Der Förderstrom der Chemieanlage von Beispiel 1 soll von $70 \text{ m}^3/\text{h}$ auf $50 \text{ m}^3/\text{h}$ vermindert werden. Die Drosselung wird durch Zustellen des Druckschiebers vorgenommen. Welche Förderhöhe hat die Pumpe?

Lösung: Aus Bild 2: Die Anlagenkennlinie verschiebt sich durch Zustellen des Schiebers zu einem steileren Verlauf, bis sie die Pumpenkennlinie ① bei $\dot{V} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ schneidet. Die Förderhöhe beträgt $H \approx 31 \text{ m}$.

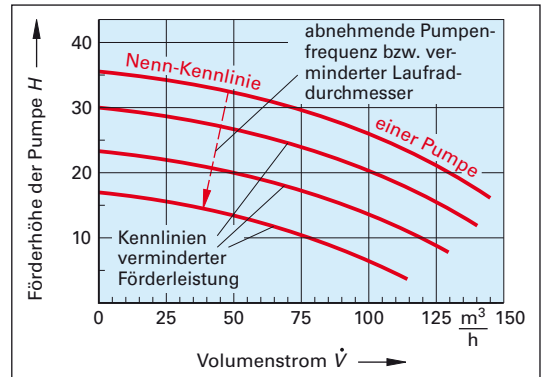


Bild 1: Pumpenkennlinien-Diagramm

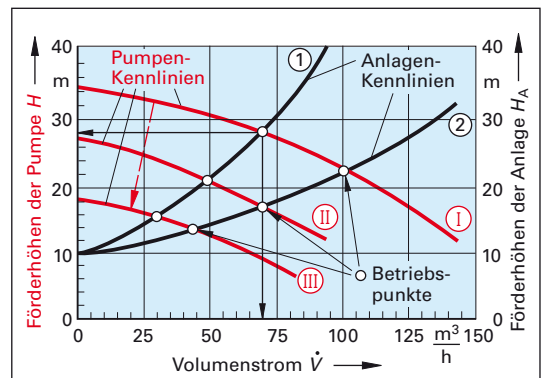


Bild 2: Pumpenkennlinien, Anlagenkennlinien, Betriebspunkte

Beispiel 3: In einer Chemieanlage befindet sich eine Kreiselpumpe mit der in Bild 1 gezeigten Kennlinie für den Laufraddurchmesser 139 mm. Für die Pumpe stehen Laufräder mit folgenden Durchmessern bereit: 134 mm, 129 mm, 124 mm, 119 mm, 113 mm, 108 mm.

Die Pumpe läuft im Nennbetrieb mit einem Volumenstrom von $11,7 \text{ m}^3/\text{h}$ und einer Förderhöhe von $6,00 \text{ m}$.

Aufgrund einer Produktionsumstellung ist ein Volumenstrom von $8,5 \text{ m}^3/\text{h}$ erforderlich; die Förderhöhe der Anlage (Druckverlust) beträgt dann $4,8 \text{ m}$.

- Zeichnen Sie den Betriebspunkt bei Nennbetrieb in das Kennliniendiagramm ein.
- Welcher Laufraddurchmesser ist nach der Produktionsumstellung zu wählen?

Lösung: a) Siehe Diagramm: $\dot{V} = 11,7 \text{ m}^3/\text{h}$; $H = 6,00 \text{ m}$

- Der neue Betriebspunkt liegt zwischen der 120-mm- und der 124-mm-Kennlinie. Es ist der Laufraddurchmesser 124 mm zu wählen. Die Feinregelung erfolgt durch Drosselung der Anlagen-Förderhöhe H_A .

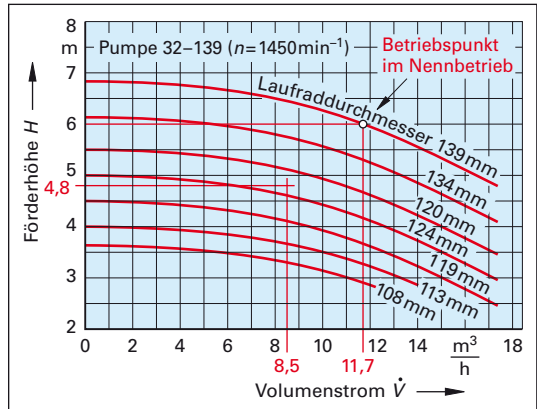


Bild 1: Pumpenkennlinien der Pumpe 32-139 mit Laufrädern unterschiedlicher Durchmesser

Kennfeldraster von Kreiselpumpen-Baureihen

Eine Kreiselpumpe einer Baugröße ist nur zum Fördern eines begrenzten Bereichs des Förderstroms $\dot{V}$ und der Förderhöhe H geeignet. Diesen Förderbereich der Kreiselpumpe nennt man Kennfeld der Pumpe. Es ist eine umrissene Fläche im $H/\dot{V}$ -Diagramm (**Bild 2**).

Um einen großen Förderbereich abzudecken, gibt es bei Chemie-Normpumpen Pumpenbaureihen mit abgestuften Baugrößen.

Die Kennfelder der Pumpen einer Pumpenbaureihe sind in einem **Kennfeldraster** zusammengefasst. Aus diesem Kennfeld kann die für eine Förderaufgabe geeignete Pumpe ausgewählt werden.

Beispiel: Förderaufgabe $\dot{V} = 80 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 45 \text{ m}$

Lösung: Bild 2 $\Rightarrow$ geeigneter Pumpentyp: 125-400

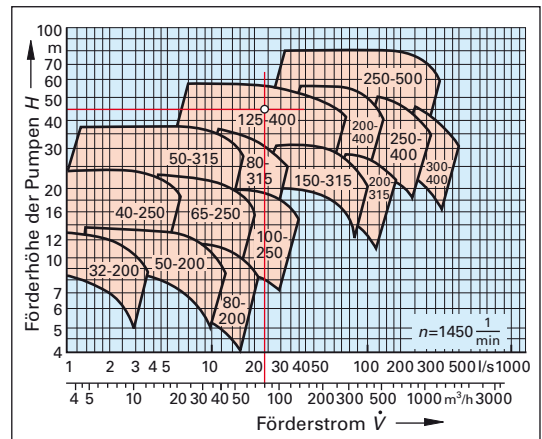


Bild 2: Kennfeldraster einer Chemiepumpen-Baureihe eines Pumpenherstellers

Anmerkung: Die erste Ziffer des Pumpentyps gibt die Nennweite des Pumpen-Druckstutzens, die zweite Ziffer den Laufrad-Durchmesser in mm an.

Aufgaben zu 2.2.1 Fördern mit Kreiselpumpen

- Eine Pumpe in einer Schwefelsäureanlage mit einer Förderhöhe $H = 64 \text{ m}$ erzeugt einen Förderstrom von $48 \text{ m}^3/\text{h}$. Das geförderte Absorberwasser hat eine Dichte von $0,98 \text{ kg/dm}^3$. Wie groß ist die auf den Förderstrom übertragene Leistung in Kilowatt?
- In einem Kalibergwerk werden stündlich 250 m^3 Sole mit einer Dichte von 1201 kg/m^3 von der Bergwerkssole in 465 m Tiefe in ein Sammelbecken über Tage gepumpt. Der Elektromotor der Pumpe nimmt $26,4 \text{ kW}$ Leistung auf, sein Leistungszuschlag beträgt 28% , der Wirkungsgrad der Pumpe ist 82% .
 - Welche Leistung wird auf die Sole übertragen?
 - Wie groß ist die Förderhöhe der Pumpe?
- Im geschlossenen Kühlkreislauf einer Chemieanlage beträgt der Druckhöhenverlust durch den Strömungswiderstand des Kühlkreislaufs $23,75 \text{ m}$. Wie groß ist die Förderhöhe der Anlage?

4.3.3 Erstellen und Führen von Qualitätsregelkarten

Medianwert-Qualitätsregelkarten ($\tilde{x}$ -QRK) und Spannweiten-Qualitätsregelkarten (R -QRK) erfordern nur wenig Rechenaufwand und sind deshalb auch unmittelbar am Arbeitsplatz vom Mitarbeiter durch Eintrag in einen QRK-Vordruck (Bild 1, Seite 95) zu führen.

Dagegen ist der Rechenaufwand bei Mittelwert-QRK ($\bar{x}$ -QRK) und Standardabweichungs-QRK (s -QRK) hoch. Das gilt vor allem für große Stichproben, für die die $\bar{x}$ - s -QRK besonders gut geeignet ist.

$\bar{x}$ - s -QRK können per Hand mit dem Taschenrechner erstellt werden. Bevorzugt werden sie jedoch rechnerunterstützt mit einem Tabellenkalkulationsprogramm geführt (Seite 102).

Die nachfolgende Übersicht in **Bild 1** zeigt an einem Beispiel das Ablaufschema zur Erstellung einer Prozess-Qualitätsregelkarte mit festgelegten Regelgrenzen aus statistischen Kennwerten.

Dabei wird in folgenden Schritten vorgegangen:

- ① Berechnen der Stichproben-Mittelwerte $\bar{x}$ (zu je 5 Einzelwerten) aus den Daten des Vorlaufs, Berechnen des Mittelwerts der Mittelwerte $\bar{\bar{x}}$, eintragen der Mittellinie in die QRK.
- ② Berechnen der Standardabweichungen s innerhalb der Einzel-Stichproben, Berechnen des Mittelwerts der Standardabweichungen $\bar{s}$.
- ③ Berechnen der oberen und unteren Warngrenze OWG/UWG und der oberen und unteren Eingriffsgrenze OEG/UEG.
- ④ Vorbereiten eines Vordrucks für eine $\bar{x}$ -Qualitätsregelkarte: Beschriften und Bemaßen der Achsen.
- ⑤ Eintragen der Mittellinie, der Warngrenzen OWG/UWG und der Eingriffsgrenzen OEG/UEG.
- ⑥ Berechnen der Mittelwerte der Stichproben-Messwerte aus dem laufenden Produktionsprozess.
- ⑦ Eintragen der $\bar{x}$ -Werte in die $\bar{x}$ -QRK und Verbinden der Punkte.

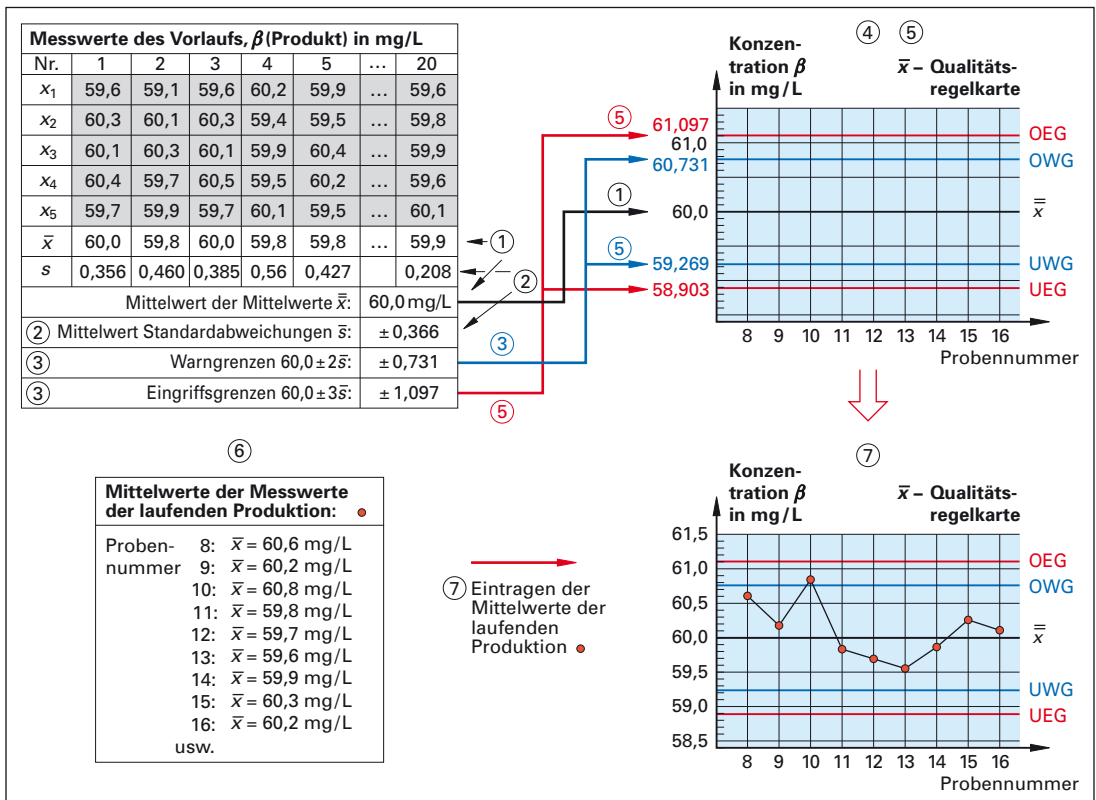


Bild 1: Ablaufschema zur Erstellung einer zweiseitigen Mittelwert-Qualitätsregelkarte ($\bar{x}$ -QRK)

Aufgaben zu 4.3.3 Erstellen und Führen von Qualitätsregelkarten

Hinweis: Verwenden Sie zum Zeichnen der QRK die Kopiervorlage von Seite 279.

1. In den abgefüllten 100-mL-Portionen einer pharmazeutischen Lösung wurde an gezogenen Proben chromatografisch der Amingehalt gemessen. Die Soll-Massenkonzentration an Amin soll 6,000 mg/L betragen, die Toleranz ist mit $\pm 7\%$ angegeben.

Die folgende Tabelle zeigt die Proben-Messwerte des Chromatografen in mg/L.

6,028	5,972	6,165	5,981	6,168	5,927	6,025	5,833	6,124	5,823
5,991	6,049	6,153	6,072	5,982	6,043	5,874	5,960	6,034	5,997

- a) Berechnen Sie den oberen und den unteren Toleranz-Grenzwert.
 - b) Berechnen Sie den Mittelwert und die Standardabweichung der Messwerte.
 - c) Berechnen Sie die Warn- und Eingriffsgrenzen für die QRK dieser Messreihe.
 - d) Stellen Sie die Messwerte in einer Urwert-QRK mit den Regelgrenzen dar.
2. Ein Dünger-Granulat durchläuft zum Trocknen einen Tunnel-Bandofen. Der Rest-Feuchtegehalt des Düngers soll 3,50% nicht überschreiten. Im 1-Stunden-Takt werden am Ofenausgang Stichproben aus 5 Einzelproben genommen und der Rest-Feuchtegehalt wird bestimmt. Die folgende Tabelle zeigt die Messwerte.

Zeit		8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00	1:00
Restfeuchte in %	x_1	2,71	2,83	2,74	2,62	2,72	2,88	2,71	2,70	2,80	2,49	2,84	2,50	2,83	2,54	2,44	2,79	2,49	2,76
	x_2	2,65	2,38	2,53	2,88	2,61	2,54	2,74	2,63	2,68	2,88	2,85	3,05	2,67	2,47	2,84	2,66	2,63	2,54
	x_3	2,64	2,79	2,52	2,91	2,89	2,71	2,72	2,78	2,63	3,04	2,70	2,59	2,74	2,67	2,53	2,60	2,70	2,54
	x_4	2,84	2,63	2,29	2,59	2,74	2,60	2,76	2,69	2,68	2,85	2,68	3,02	2,83	2,53	2,71	2,62	2,71	2,95
	x_5	2,69	2,54	2,84	3,02	2,86	2,77	2,77	2,83	2,87	3,11	2,89	2,71	2,57	2,61	2,70	2,32	2,82	2,72

- a) Berechnen Sie den Mittelwert und die Standardabweichung der Stichproben.
 - b) Berechnen Sie den Mittelwert der Mittelwerte und den Mittelwert der Standardabweichungen.
 - c) Berechnen Sie die Warn- und Eingriffsgrenzen für die QRK dieser Messreihe.
 - d) Erstellen Sie die Mittelwert-QRK und die Standardabweichungs-QRK der Restfeuchten.
3. Die Messdaten in der unten stehenden Tabelle wurden beim Vorlauf einer Abfüllmaschine M32A für die abgefüllte Masse eines Bindemittels ermittelt.

Stichprobe		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Messwerte in g	x_1	336	336	331	338	331	339	341	338	335	331	331	338	340	339	333
	x_2	341	337	340	338	331	335	336	342	338	333	331	342	335	341	332
	x_3	338	338	339	337	333	338	332	341	334	336	337	340	332	337	340
	x_4	337	334	336	339	332	333	331	338	331	339	332	335	333	337	339
	x_5	339	339	335	341	331	332	334	339	341	338	332	339	337	338	331

Die Toleranzgrenzen sind mit 336 g $\pm 3\%$ vorgegeben.

- a) Berechnen Sie aus den Messdaten die erforderlichen Größen für eine Mittelwert-QRK ($\bar{x}$ -QRK) sowie eine Standardabweichungs-QRK (s -QRK) mit den Eingriffs- und Warngrenzen.
- b) Zeichnen Sie eine Mittelwert-QRK und eine Standardabweichungs-QRK.
- c) Beurteilen Sie den Prozessverlauf bezüglich der statistischen Verteilung der Messwerte.

5.5 Rühren und Mischen im Rührbehälter

Das Rühren in einem Rührbehälter dient der Herstellung eines möglichst gleichverteilten Gemischs. Man unterscheidet homogene Gemische aus mehreren Flüssigkeiten und heterogene Gemische aus einer Flüssigkeit, in die feinkörnige Bestandteile eingemischt sind.

5.5.1 Rühren und Mischen

Durch Rühren wird in einem Behälter die für einen Prozess erforderliche Durchmischung (Homogenität) der flüssigen Ausgangsstoffe im gesamten Behältervolumen hergestellt.

Voraussetzung für einen einwandfreien Rührvorgang sind die Auswahl eines geeigneten Rührers sowie die passenden Maße (d_1 , d_2) von Rührer- und Behälterdurchmesser (**Bild 1**).

Zur Verbesserung des Mischvorgangs können gegebenenfalls Strombrecher vorhanden sein.

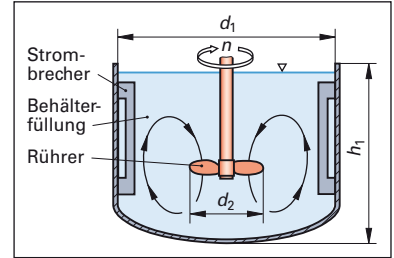


Bild 1: Rührbehälter und Rührer

Auswahl des Rührertyps

Es gibt einige Grundtypen von Rührern (**Bild 2**) und darüber hinaus eine Vielzahl davon abgeleiteter Bauformen.

Die verschiedenen Rührer eignen sich unterschiedlich gut für die verschiedenen Rührverfahren: Homogenisieren (Mischen von Flüssigkeiten), Auflösen eines Feststoffs in einer Flüssigkeit, Dispergieren (Vermischen von feinkörnigen Feststoffen in Flüssigkeiten) und Begasen.

Neben dem Rührverfahren richtet sich die Auswahl des Rührers vor allem nach der Viskosität der zu mischenden Flüssigkeiten.

Die Rührer für hochviskose (zähflüssige) Flüssigkeiten sind langsam drehend, die Rührer für niedrigviskose (leichtflüssige) Flüssigkeiten laufen bei hohen Drehzahlen.

Beispiel: Zur Herstellung eines Buntlacks in einem Rührkessel durch Dispergieren aus einem mittelviskosen Acrylharz und einem Farbpigmentpulver soll der geeignete Rührer ausgewählt werden.

Lösung: Für diese Rühraufgabe sind geeignet (Bild 2):

Schräglattrührer, Gegenstromrührer

Ankerrührer  Homogenisieren, Heizen hochviskoser Flüssigk.	Wendelrührer  Homogenisieren hochviskoser Flüssigkeiten
Schräglattrührer  Homogenisieren, Dispergieren niedrig bis mittelviskoser Flüssigkeiten	Gegenstromrührer  Homogenisieren mittelviskoser Flüssigkeiten
Scheibenrührer  Dispergieren Begasen niedrigviskoser Flüssigkeiten	Propellerrührer  Homogenisieren, Dispergieren niedrigviskoser Flüssigkeiten

Bild 2: Rührertypen und Anwendungen

5.5.2 Beschreibung des Mischvorgangs

Der Grad der Homogenität einer Mischung wird durch eine Kennzahl beschrieben, die man Mischgüte oder **Mischungsgrad M** nennt.

Der Mischungsgrad M ist definiert als Quotient aus der Änderung des Massenanteils an einer Referenzmessstelle $w_a - w(t)$ nach der Mischzeit t und der Massenanteiländerung $w_a - w_\infty$ nach unendlich langer Mischzeit. Man erhält ihn aus gezogenen Proben.

Mischungsgrad

$$M(t) = \frac{w_a - w(t)}{w_a - w_\infty}$$

Der Mischungsgrad beginnt beim Start des Mischvorgangs mit $M = 0$ und endet nach langer Mischzeit bei annähernd $M = 1,0$ (**Bild 3**).

Üblicherweise wird bei industriellen Mischvorgängen ein Mischungsgrad von $M = 0,95$ angestrebt. Die dazu benötigte Zeit wird als **Mischzeit t_{M95}** bezeichnet.

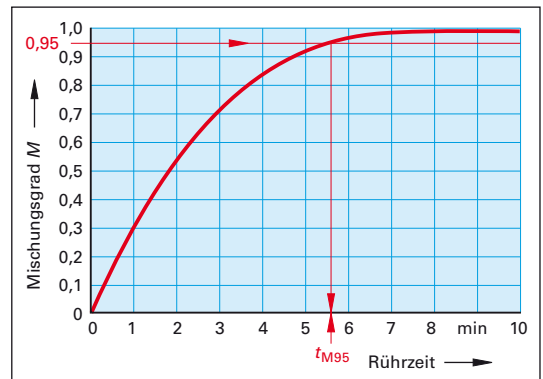


Bild 3: Mischungsgrad bei einem Rührvorgang

5.5.3 Leistungsbedarf eines Rührers

Der Leistungsbedarf eines Rührers berechnet sich nach der nebenstehenden

Leistungsgleichung der Rührtechnik.

Darin sind Ne die Newtonzahl, auch Leistungskennzahl genannt, ρ die Dichte der Flüssigkeit, n die Rührerdrehzahl und d_1 der Rührer-Außendurchmesser.

Die Leistungskennzahl Ne wurde für die verschiedenen Rührertypen experimentell ermittelt und kann aus Diagrammen entnommen werden (Bild 1).

- | | |
|------------------------|---------------------|
| ① Wendelrührer | ② Ankerrührer |
| ③ Scheibenrührer | ④ Schrägblattrührer |
| ⑤ MIG-Gegenstromrührer | ⑥ Propellerrührer |

Die Abszisse des Diagramms ist die Reynoldszahl Re der Rührerströmung.

Sie ist ein Maß für

Reynoldszahl

$$Re = \frac{n \cdot d_1^2}{\nu}$$

den Strömungszustand am Rührer.

Die Größe ν ist die kinematische Viskosität der Behälterfüllung. Sie ist über die Beziehung $\nu = \eta/\rho$ mit der dynamischen Viskosität η und der Dichte ρ verknüpft.

Im Bereich des laminaren Rührens ($Re < 50$) ist die Leistungskennzahl Ne direkt proportional der Reynoldszahl Re (Bild 1). Im turbulenten Strömungsbereich eines Rührers ($Re > 1000$) ist die Leistungskennzahl Ne konstant. Dazwischen liegt ein Übergangsbereich.

Die in den Berechnungsgleichungen enthaltenen Kennzahlen Ne und Re basieren auf experimentellen Messwerten (Bild 1 und Bild 2) und gelten für Rührbehälter, deren Füllhöhe h_1 so groß ist wie der Behälterdurchmesser d_1 (Bild 1, Seite 129).

Die Genauigkeit der experimentellen Daten in Bild 1 und damit die der Leistungsberechnung mit obiger Gleichung liegen im Bereich von 10%.

Leistungsbedarf
eines Rührers

$$P = Ne \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d_1^5$$

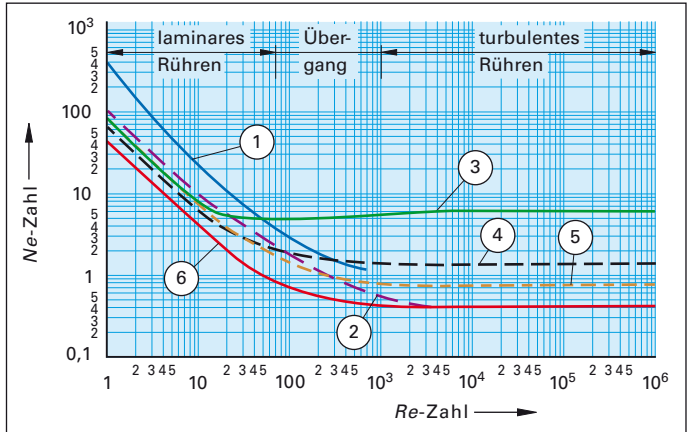


Bild 1: Leistungscharakteristik verschiedener Rührertypen

5.5.4 Mischzeit

Die Mischzeit t_{M95} zum Erreichen eines Mischungsgrades $M = 0,95$ (Bild 3, Seite 129) hängt im Wesentlichen vom Rührertyp, seinem Durchmesser und der Rührerdrehzahl sowie der Viskosität der zu mischen- den Flüssigkeit ab.

Diese Abhängigkeiten erfasst man in Technikumsversuchen mit den gängigen Rührertypen in einem **Mischzeitcharakteristik-Diagramm** (Bild 2). Darin ist die Mischzeitcharakteristik ($n \cdot t_{M95}$) über der Reynoldszahl Re aufgetragen. (Bedeutung der Nummern ① bis ⑥ siehe oben)

Zur Ermittlung der Mischzeit wird die Reynoldszahl Re des Mischvorgangs berechnet und aus dem Diagramm (Bild 2) der $(n \cdot t_{M95})$ -Wert ermittelt.

Mit nebenstehender Gleichung kann daraus die Mischzeit

Mischzeit

$$t_{M95} = \frac{(n \cdot t_{M95})}{n}$$

t_{M95} be-
rechnet
werden.

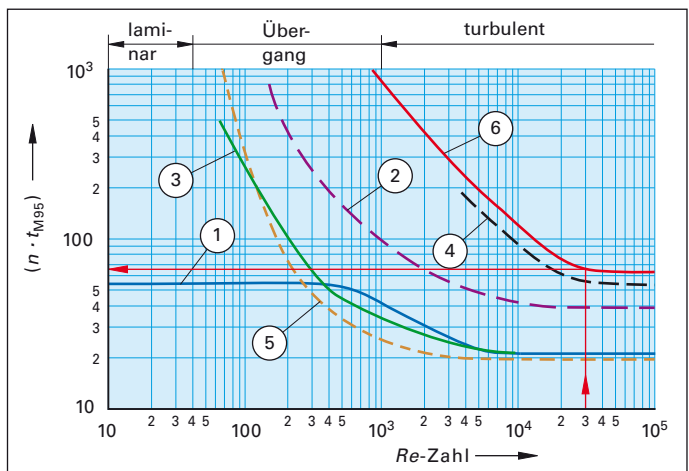


Bild 2: Mischzeitcharakteristik-Diagramm

Beispiel: Für einen Rührvorgang mit einem Propellerrührer soll bei einer Reynoldszahl $Re = 30000$ und einer Rührerdrehzahl von $1,3 \text{ s}^{-1}$ die Mischzeit bestimmt werden.

Lösung: Aus dem Mischzeitcharakteristik-Diagramm (Bild 2, Seite 130) wird für den Propellerrührer ⑥ abgelesen: $(n \cdot t_{M95}) \approx 75$; $\Rightarrow t_{M95} = \frac{(n \cdot t_{M95})}{n} \approx \frac{75}{1,3 \text{ s}^{-1}} \approx 58 \text{ s}$

Aufgaben zu 5.5 Rühren und Mischen im Rührkessel

1. In einem Rührkessel wird ein Alkydharz-Ansatz mit einem Ausgangsmassenanteil von $w_a(\text{AH}) = 65,0\%$ mit Verdünner gemischt. Nach 2,8 Minuten Mischzeit beträgt der Massenanteil an einer Referenz-Messstelle $w_{(2,8\text{min})}(\text{AH}) = 73,6\%$. Der rechnerische Massenanteil nach sehr langer Mischzeit beträgt $w_{\infty}(\text{AH}) = 74,0\%$.

Wie groß ist der Mischungsgrad nach 2,8 Minuten?

2. Für eine Rühraufgabe wurden in Technikumsversuchen für den Mischungsgrad M die folgenden Zeit-Werte ermittelt.

M	0,07	0,20	0,37	0,58	0,63	0,83	0,91	0,94	0,97	0,98	0,99
t_M in min	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5

Wie groß ist die t_{M95} -Mischzeit?

3. Es soll in einem Rührbehälter ein Glycerin-Wasser-Gemisch angerührt (homogenisiert) werden. Im Rührbehälter rotiert ein MIG-Gegenstromrührer mit einem Durchmesser von 68 cm mit 82 Umdrehungen pro Minute.

Das Glycerin-Wasser-Gemisch hat eine dynamische Viskosität von $6,0 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

- Ist die Rührerströmung bei diesen Bedingungen laminar oder turbulent?
- Welchen Leistungsbedarf hat der Rührer bei diesem Mischvorgang?
- Wie lange muss gemischt werden, bis ein Mischungsgrad von 0,95 erreicht ist?

4. In einem Rührbehälter mit einem Propellerrührer von 72 cm Außendurchmesser soll eine Glycol-Wasser-Mischung mit einem Massenanteil von 70,0% angerührt werden. Die dynamische Viskosität der Mischung beträgt $6,5 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; die Dichte von Wasser ist 1000 kg/m^3 , die Dichte von Glycol 1113 kg/m^3 . Der Rührvorgang soll im turbulenten Strömungsbereich stattfinden.

- Welche Dichte hat die Glycol-Wasser-Mischung?
- Mit welcher Drehzahl muss der Propellerrührer laufen, damit eine Rührzeit von 1 Minute ausreicht?

5. Bei einer Misch- und Aufwärm Aufgabe in einem durch Heizmittel erwärmten Fermenterkessel rührt ein Wendelrührer mit einem Außendurchmesser von 180 cm die Behälterfüllung mit einer dynamischen Viskosität von $\eta = 832 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ und der Flüssigkeitsdichte $\rho_{\text{Fl}} = 972 \text{ kg/m}^3$.

- Bis zu welcher Drehzahl darf der Rührer betrieben werden, wenn wegen der Scherempfindlichkeit des Mikroorganismen-Ansatzes nur eine laminare Rührerströmung herrschen darf?
- Welche Mischzeit ist dabei zu erwarten?
- Welche Leistung muss der Antriebsmotor des Wendelrührers mindestens bereitstellen?

6. Ein Schrägblattrührer homogenisiert in einem Rührbehälter einen Mischansatz für eine Kunststoff-Ausgangskomponente. Die dynamische Viskosität des Ansatzes beträgt $100 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, die Dichte 1100 kg/m^3 , jeweils bei $21,0^\circ \text{C}$. Der Rührer hat einen Durchmesser von 62 cm und rotiert mit einer Drehzahl von $3,8 \text{ 1/s}$.

- Welcher Strömungszustand herrscht am Rührer?
- Wie lange dauert die Mischzeit?
- Welche Leistung muss der Antriebsmotor des Rührers haben?

7.4 Wärmeübertragung mit Rohrbündelwärmetauschern

Wärmetauscher sind die bevorzugten Apparate zur Übertragung von Wärmeenergie von einem Fluid auf ein anderes (**Bild 1**). Ihre Berechnung erfolgt mit den Gleichungen für den Wärmedurchgang (Seite 151 und 153) und die übertragenen Wärmemengen.

Die pro Zeiteinheit in einem Wärmetauscher zwischen den Fluiden übertragene Wärmemenge berechnet man mit nebenstehender Gleichung.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta\vartheta$$

Wird das Fluid dabei verdampft, dann ist zusätzlich die Verdampfungswärme aufzubringen.

$$\dot{Q}_{\text{Verd}} = \dot{m} \cdot r$$

Der durch Wärmedurchgang übertragene Wärmestrom $\dot{Q}$ berechnet sich mit der Gleichung:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_m$$

Die Wärmedurchgangszahl k wird berechnet oder Tabellen entnommen (Seite 152).

Die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_m$ bestimmt man mit der Gleichung:

$$\Delta\vartheta_m = \frac{\Delta\vartheta_{\text{groß}} - \Delta\vartheta_{\text{klein}}}{\ln(\Delta\vartheta_{\text{groß}}/\Delta\vartheta_{\text{klein}})}$$

Die Wärmeaustauschfläche A bei einem Rohrbündelwärmetauscher (**Bild 1**) wird aus der Anzahl n der Rohre, der Rohrlänge l und dem mittleren Rohrdurchmesser d_m berechnet.

Wärmeaustauschfläche

$$A = n \cdot d_m \cdot \pi \cdot l; \quad d_m = \frac{d_a + d_i}{2}$$

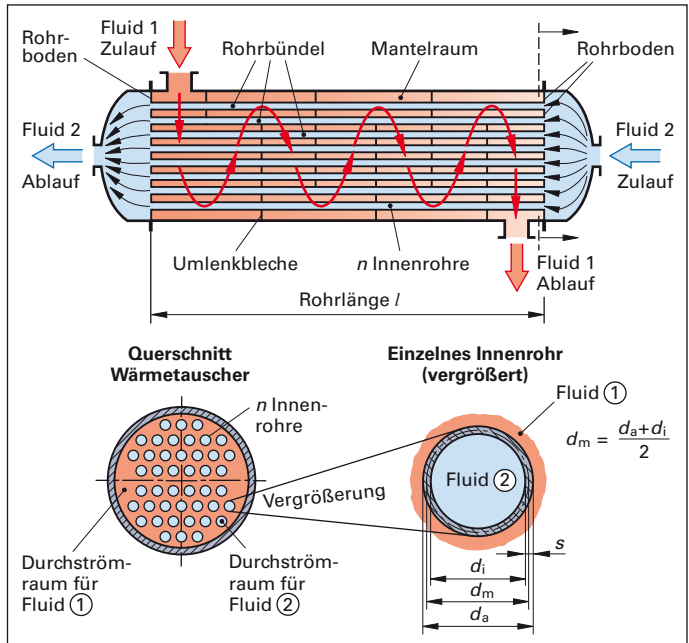


Bild 1: Aufbau eines Rohrbündelwärmetauschers

Beispiel: Ein Rohrbündelwärmetauscher (Bild 1) hat 185 Rohre von je 2,00 m Länge. Die Rohre haben einen Innendurchmesser von 22,3 mm und eine Wandstärke von 2,00 mm.

- Welche Wärmeübertragungsfläche hat der Rohrbündelwärmetauscher?
- Wie groß ist die Wärmeaustauschleistung des im Kreuzgleichstrom betriebenen Wärmetauschers, wenn 30,0 t/h Cyclohexanol mit einer spezifischen Wärmekapazität von $c = 2,12 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ von 96 °C auf 46 °C abgekühlt werden?
- Welche mittlere Temperaturdifferenz und welche Wärmedurchgangszahl in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ hat der im Kreuzgegenstrom betriebene Wärmetauscher bei einer Kühlwassereintrittstemperatur von 8 °C und einer Austrittstemperatur von 41 °C?

Hinweis: Erstellen Sie zuerst ein Temperaturverlaufdiagramm (analog zu Bild 2, Seite 153).

Lösung: a) $A = n \cdot d_m \cdot \pi \cdot l = 185 \cdot \frac{d_a + d_i}{2} \cdot \pi \cdot l$
 $= 185 \cdot \frac{26,3 \text{ mm} + 22,3 \text{ mm}}{2} \cdot \pi \cdot 2,00 \text{ m}$
 $= 185 \cdot 0,243 \text{ m} \cdot \pi \cdot 2,00 \text{ m} \approx 28,2 \text{ m}^2$

b) $\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta\vartheta = 30,0 \frac{\text{t}}{\text{h}} \cdot 2,12 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 50 \text{ K} = 3,18 \cdot 10^6 \text{ kJ/h}$

- c) Mit den gegebenen Ein- und Austrittstemperaturen lässt sich das Temperaturverlaufdiagramm zeichnen (**Bild 2**).

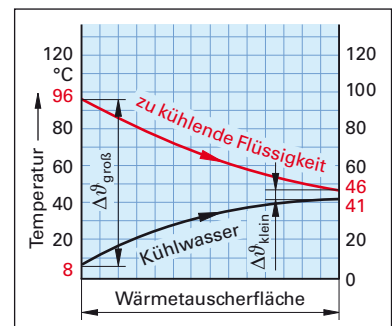


Bild 2: Temperaturverlauf im Wärmetauscher (Beispiel)

Daraus kann abgelesen werden:

$$\Delta \vartheta_{\text{groß}} = 96^\circ\text{C} - 8^\circ\text{C} = 88^\circ\text{C}; \quad \Delta \vartheta_{\text{klein}} = 46^\circ\text{C} - 41^\circ\text{C} = 5^\circ\text{C}$$

Mittlere logarithmische Temperaturdifferenz:

$$\Rightarrow \Delta \vartheta_m = \frac{\Delta \vartheta_{\text{groß}} - \Delta \vartheta_{\text{klein}}}{\ln(\Delta \vartheta_{\text{groß}} / \Delta \vartheta_{\text{klein}})} = \frac{88^\circ\text{C} - 5^\circ\text{C}}{\ln \frac{88^\circ\text{C}}{5^\circ\text{C}}} = \frac{83^\circ\text{C}}{\ln 17,6} \approx 28,94^\circ\text{C}$$

Wärmedurchgangszahl: aus $\dot{Q} = k \cdot A \cdot \vartheta_m$ folgt mit $1 \text{ kJ} = 0,278 \cdot 10^{-3} \text{ kWh}$

$$k = \frac{\dot{Q}}{A \cdot \Delta \vartheta_m} = \frac{3,18 \cdot 10^6 \text{ kJ/h}}{28,2 \text{ m}^2 \cdot 28,94 \text{ K}} \approx \frac{3,18 \cdot 10^6 \cdot 0,278 \cdot 10^{-3} \text{ kWh/h}}{28,2 \text{ m}^2 \cdot 28,94 \text{ K}} \approx 1,08 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Aufgaben zu 7.4 Wärmeübertragung mit Rohrbündelwärmetauschern

- Ein Rohrbündelwärmetauscher wird abwechselnd im Gleichstrom sowie im Gegenstrom betrieben.
 - Im Gleichstrombetrieb wird der wärmere Stoff von 138°C auf 39°C abgekühlt und das Kühlwasser von 14°C auf 28°C erwärmt. Zeichnen Sie das Temperaturverlaufdiagramm und berechnen Sie die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz.
 - Mit welcher mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz muss im Gegenstrombetrieb gerechnet werden, wenn das mit 14°C zuströmende Kühlwasser im Wärmetauscher auf 92°C erwärmt wird?
 - Welcher Wärmestrom wird im Gegenstrombetrieb übertragen, wenn die Wärmedurchgangszahl $185 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ und die Wärmetauscherfläche $22,5 \text{ m}^2$ betragen?
- Wie viele Rohre muss ein Rohrbündelwärmetauscher haben, wenn der Wärmestrom 142 kJ pro Sekunde betragen soll? Der Wärmedurchgangswert wurde zu $220 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ und die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz zu $38,3 \text{ K}$ ermittelt. Die $1,85 \text{ m}$ langen Rohre des Wärmetauschers haben einen Außendurchmesser von $28,0 \text{ mm}$ und einen Innendurchmesser von $23,0 \text{ mm}$.
- In einem Haarnadelwärmetauscher werden stündlich $7,45 \text{ t}$ Nitrobenzol von $14,5^\circ\text{C}$ auf $68,2^\circ\text{C}$ erwärmt. Die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz beträgt $33,7 \text{ K}$ und die Wärmedurchgangszahl $k = 680 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Welche Austauschfläche muss der Wärmetauscher haben, damit er diese Aufgabe leisten kann? $c(\text{Nitrobenzol}) = 1,51 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- Die Wärmeenergie einer heißen, aus einem Reaktor abgeführten Reaktionsmasse wird in einem Wärmetauscher zur Vorwärmung frischer Reaktionsmischung verwendet. Die heiße Reaktionsmasse kühlt sich im Wärmetauscher von 294°C auf 187°C ab, während die frische Reaktionsmischung von 22°C auf 175°C erwärmt wird. Die Wärmedurchgangszahl beträgt in beiden Fällen $k = 390 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Die heiße Reaktionsmasse hat eine spezifische Wärmekapazität von $c = 1,46 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; der Reaktionsmassenstrom ist 1470 kg/h . Die Wärmeverluste des Wärmetauschers an die Umgebung sollen unberücksichtigt bleiben.
 - Welche Austauschfläche muss der Wärmeaustauscher im Gleichstrombetrieb haben?
 - Welche Austauschfläche benötigt der Wärmeaustauscher im Gegenstrombetrieb bei gleichen Einlauf- und Ausgangstemperaturen?
- Ein Rohrbündelwärmetauscher in einer Rektifikationsanlage ist nach langjährigem Betrieb durch Korrosion zerstört und muss ersetzt werden. Die abzuführende Wärmemenge beträgt $500 \cdot 10^3 \text{ kJ/h}$. Vom alten Wärmeaustauscher sind die folgenden Daten bekannt: $k = 590 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $\Delta \vartheta_m = 52 \text{ K}$. Die Austauscher-Rohrlänge soll $1,82 \text{ m}$ betragen, der Rohrrinnendurchmesser $d_i = 32 \text{ mm}$, die Rohrwanddicke 3 mm .
 - Wie groß muss die Wärmeaustauscherfläche insgesamt sein?
 - Wie viele Austauscherrohre muss der Wärmeaustauscher haben?

8.4.2 Absatzweise einfache Destillation

Im Chemiebetrieb wird die absatzweise einfache Destillation meist in einer Blasenverdampfer-Destillationsanlage durchgeführt (**Bild 1**).

Sie besteht aus der dampfbeheizten Destillationsblase, einem Kondensator zum Kondensieren des abgeleiteten Gemischdampfs, Produktkühlern für die Destillate und den Rückstand sowie Destillat-Auffanggefäßen (Vorlagen).

Bei der absatzweisen einfachen Destillation (engl. simple batch distillation) wird das Flüssigkeitsgemisch in die Destillationsblase gefüllt, zum Sieden gebracht und teilweise verdampft.

Mit diesem Verfahren werden Flüssigkeitsgemische getrennt, deren Siedetemperaturen weit auseinander liegen, meist mindestens 50 °C.

Die Destillation kann bei Normaldruck (rund 1013 mbar) oder bei temperaturempfindlichen Stoffen unter vermindertem Druck als Vakuumdestillation durchgeführt werden.

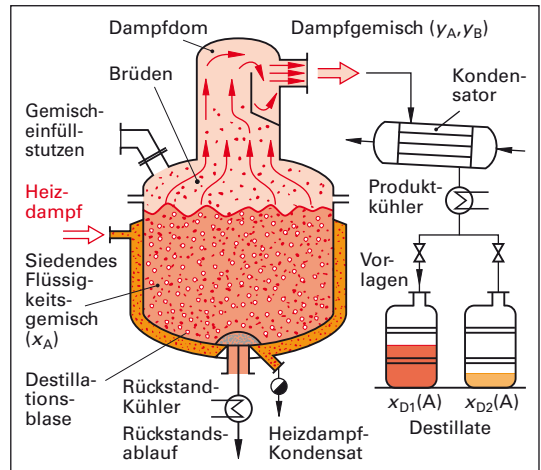


Bild 1: Blasenverdampfer-Destillationsanlage zur absatzweisen einfachen Destillation

Destillationsvorgang im Gleichgewichtsdiagramm

Das bei der absatzweisen einfachen Destillation zu einem bestimmten Zeitpunkt gewonnene Destillat ist der kondensierte Dampf mit dessen Zusammensetzung.

Die Vorgänge kann man im Gleichgewichtsdiagramm verfolgen (**Bild 2**).

Das Ausgangsgemisch hat z. B. die Zusammensetzung $x_A(A) = 0,50$ und wird zum Sieden gebracht. Am Anfang der Destillierzeit enthält das Destillat vor allem Leichtersiedendes (z. B. $y_A(A) = 0,93$), das in der ersten Vorlage aufgefangen wird. Im Laufe der Destillierzeit verdampft aus dem Ausgangsgemisch immer mehr Leichtersiedendes, sodass in der Blase der Stoffmengenanteil an Schwerersiedendem stetig ansteigt. Gegen Ende der Destillierzeit enthält die Blase fast nur noch Schwerersiedendes und wenig Leichtersiedendes (z. B. $x_E(A) = 0,05$). Der Dampf, der dann aus der Blase aufsteigt, enthält ebenfalls geringere Anteile an Leichtersiedendem (z. B. $y_E(A) = 0,60$). Er wird in die zweite Vorlage geleitet und bei der nächsten Destillation dem Ausgangsgemisch zugegeben.

Nach hinreichend langer Destillationszeit ist das Leichtersiedende weitgehend aus dem Anfangsgemisch verdampft. Der Rückstand besteht dann überwiegend aus der höher siedenden Komponente.

Die absatzweise einfache Destillation wird häufig so lange durchgeführt, bis der Gehalt an Leichtersiedendem in der Destillationsblase auf den gewünschten Gehalt gesunken ist oder bis in der Vorlage ein Destillat mit der geforderten, mittleren Zusammensetzung erreicht ist.

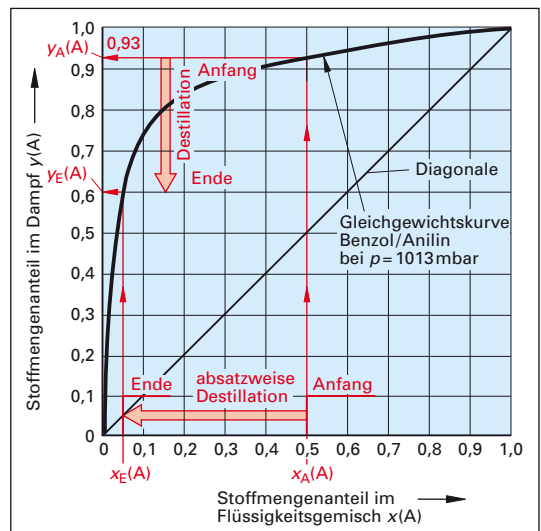


Bild 2: Absatzweise einfache Destillation im Gleichgewichtsdiagramm (Benzol/Anilin)

Beispiel: Ein Benzol-Anilin-Gemisch (Bild 2) mit $x_A(B) = 0,30$ Benzol soll destilliert werden, bis der Benzolgehalt in der Destillationsblase auf $x_E(B) = 0,02$ gesunken ist.

Wie hoch ist der Benzolgehalt im aufsteigenden Dampf am Anfang und am Ende der Destillationszeit.

Lösung: Aus Bild 2 wird abgelesen: $x_A(\text{Benzol}) = 0,30 \rightarrow y_A(\text{Benzol}) = 0,89$
 $x_E(\text{Benzol}) = 0,02 \rightarrow y_E(\text{Benzol}) = 0,30$

Stoffmengen und Zusammensetzungen

Das Ausgangsgemisch mit der Stoffmenge n_A hat den Stoffmengenanteil $x_A(A)$ (**Bild 1**). Die erzeugte Stoffmenge an Destillat n_D , die Stoffmenge an Destillationsrückstand n_E (Blasenrückstand) und die Zusammensetzungen des Destillats $x_D(A)$ sowie des Destillationsrückstands $x_E(A)$ werden aus einer Gesamt-Stoffbilanz hergeleitet: $n_A - n_E = n_D$.

Für ein ideales Zweikomponentengemisch mit der relativen Flüchtigkeit α erhält man aus der Stoffbilanz die nachfolgende Gleichung.

Bilanzgleichung der absatzweisen Destillation

$$\frac{n_E}{n_A} = \frac{x_A(A)}{x_E(A)} \cdot \left[\frac{x_E(A)}{x_A(A)} \cdot \frac{(1 - x_A(A))}{(1 - x_E(A))} \right]^{\frac{\alpha}{\alpha - 1}}$$

Falls die relative Flüchtigkeit α nicht bekannt ist, kann sie für ideale Gemische aus einem Wertepaar der Gleichgewichtskurve bestimmt werden.

Relative
Flüchtigkeit

$$\alpha = \frac{y_1(1 - x_1)}{x_1(1 - y_1)}$$

Aus einer Stoffbilanz für die leichter flüchtige Komponente (A) erhält man eine Gleichung für die mittlere Zusammensetzung des Destillats $\bar{x}_D(A)$.

Die aufgeführten Gleichungen gelten für Stoffmengen n (in mol) und Molanteile x (Einheit 1). Analoge Gleichungen gelten auch für Massen m (in kg) und Massenanteile w (Einheit 1). Dazu ersetzt man die Stoffmengen n durch die Massen m und die Molanteile x durch die Massenanteile w .

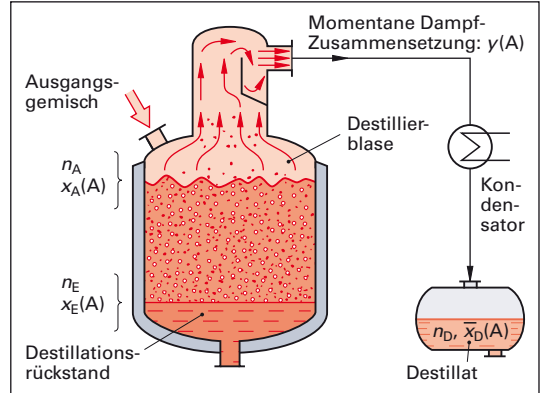


Bild 1: Stoffmengen und Zusammensetzungen bei der absatzweisen einfachen Destillation

Mittlere Zusammensetzung des Destillats

$$\bar{x}_D(A) = \frac{n_A \cdot x_A(A) - n_E \cdot x_E(A)}{n_A - n_E}$$

Beispiel: Es sollen 1800 kg eines Benzol-Anilin-Gemischs mit der Ausgangszusammensetzung $x_A(\text{Benzol}) = 0,30$ in einer absatzweisen Destillationsanlage destilliert werden, bis der Benzolgehalt im Blasenrückstand auf $x_E(\text{Benzol}) = 0,02$ gesunken ist. $\alpha(\text{Benzol/Anilin}) = 33,5$. Welche Stoffmenge und welche Zusammensetzung hat das gewonnene Destillat?

Lösung: $n_E = n_A \cdot \frac{x_A(B)}{x_E(B)} \cdot \left[\frac{x_E(B)}{x_A(B)} \cdot \frac{(1 - x_A(B))}{(1 - x_E(B))} \right]^{\frac{\alpha}{\alpha - 1}}$

$$\text{Mit } n_A = \frac{m_A}{M(A)} = \frac{m_A}{[x_A(B) \cdot M(B) + x_A(A) \cdot M(A)]} = \frac{1800 \text{ kg}}{[0,30 \cdot 78,11 + 0,70 \cdot 93,13] \text{ kg/kmol}} \approx 20,31 \text{ kmol}$$

folgt für die Destillat-Stoffmenge

$$n_E = 20,31 \text{ kmol} \cdot \frac{0,30}{0,02} \cdot \left[\frac{0,02}{0,30} \cdot \frac{(1 - 0,30)}{(1 - 0,02)} \right]^{\frac{33,5}{33,5 - 1}} = 304,65 \text{ kmol} \cdot 0,04762^{1,0308} \approx 13,21 \text{ kmol}$$

und die mittlere Destillat-Zusammensetzung

$$\bar{x}_D(B) = \frac{n_A \cdot x_A(B) - n_E \cdot x_E(B)}{n_A - n_E} = \frac{20,31 \text{ kmol} \cdot 0,30 - 13,21 \text{ kmol} \cdot 0,02}{(20,31 - 13,21) \text{ kmol}} \approx 0,821$$

Aufgaben zu 8.4.2 Absatzweise einfache Destillation

Eine Charge eines Toluol-Phenol-Flüssigkeitsgemischs von 840 kg und einem Toluol-Anfangsstoffmengenanteil von 0,22 wird einer absatzweisen einfachen Destillation unterworfen, bis es auf die Endzusammensetzung des Destillationsrückstands in der Blase von 0,05 Molanteil abdestilliert ist.

Stoffdaten: $M(\text{Toluol}) = 92,14 \text{ kg(kmol)}$; $M(\text{Phenol}) = 94,11 \text{ kg(kmol)}$

- Finden Sie die Gleichgewichtskurve des Gemischs in einem Tabellenbuch und zeichnen Sie sie.
- Ermitteln Sie aus dem GG-Diagramm die Stoffmengenanteile an Toluol und Phenol im Dampf beim Beginn der Destillation.
- Bestimmen Sie den mittleren Trennfaktor des Gemischs bei $x(T)$ ist 0,1 und 0,2 Molanteilen.
- Welche Stoffmenge bzw. Masse hat der Destillationsrückstand am Ende der Destillation?
- Wie groß sind die mittlere Zusammensetzung und die Masse des Destillats?

8.6.6 Rektifikation mit Füllkörper- und Packungskolonnen

Rektifikationskolonnen können anstelle eingebauter Austauschböden (Bild 1, Seite 181) auch eine regellose Füllkörperschüttung oder eine geordnete Blechfalzpackung enthalten (**Bild 1**).

Diese Rektifikationskolonnen werden wegen ihres geringen Druckwiderstands überwiegend für Rektifikationen unter vermindertem Druck eingesetzt (Vakuumrektifikation).

In diesen Kolonnen (**Bild 2**) schaffen die Füllkörper bzw. die Packungen eine sehr große Austauschfläche. Die Flüssigkeit benetzt die Füllkörper- bzw. Packungsoberfläche und fließt und tropft auf ihnen abwärts (Bild 1). Der im Gegenstrom durch die Zwischenräume aufsteigende Dampf überstreicht und zerreißt diesen Flüssigkeitsfilm. Durch die vielen Umlenkungen und die große Kontaktfläche von Dampf und Flüssigkeit kommt es ähnlich wie bei den Austauschböden zu einem intensiven Stoff- und Wärmeaustausch der Flüssigkeits- mit der Dampfphase.

Im nach oben steigenden Dampf reichert sich der Leichtersieder an, in der nach unten abfließenden Flüssigkeit nimmt der Schwerversieder zu. Am Kopf der Kolonne erhält man überwiegend Leichtersieder, im Sumpf überwiegt der Schwerversieder.

Die **Trennwirkung** einer Füllkörperschüttung bzw. Packung ist von der Art der Füllkörper bzw. der Packung abhängig.

Als Maßzahl für die Trennwirkung von Füllungen verwendet man die **Höhe** einer Schüttung bzw. Packung, die einer theoretischen Trennstufe entspricht. Diese Kenngröße wird **HETP** genannt (von engl. height equivalent of a theoretical plate; auf Deutsch: Höhenäquivalent eines theoretischen Bodens).

HETP ist die Füllkörperhöhe bzw. Packungshöhe mit der Trennwirkung einer theoretischen Trennstufe.

Von den Herstellern werden für die Füllkörper bzw. die Packungen die angegeben (**Tabelle 1**). Diese HETP-Werte gelten bei optimalen Austauschbedingungen in der Kolonne.

Zur Beschreibung der Trennwirkung wird auch die **Wertungszahl** n_{th} verwendet. Sie ist der Kehrwert von HETP und gibt die Anzahl der Trennstufen pro Meter Füllkörperschüttung bzw. Packungshöhe an.

Die für eine Rektifikation erforderliche **Höhe H_F** an Füllkörpern bzw. Packung wird mit nebenstehender Größengleichung berechnet. Zur Bedeutung von $(n_{th} - 1)$ siehe Seite 184, oben.

η_F ist der Packungs- bzw. Schüttungswirkungsgrad.

Wertungszahl

$$n_{th} = \frac{1}{HETP}$$

Erforderliche Höhe der Füllkörper oder Packung

$$H_F = \frac{(n_{th} - 1)}{\eta_F} \cdot HETP$$

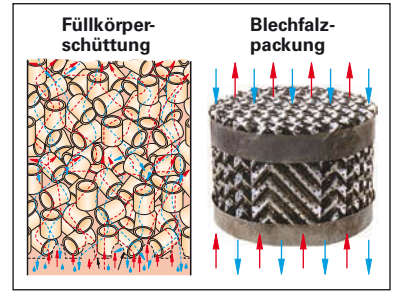


Bild 1: Kolonnenfüllungen

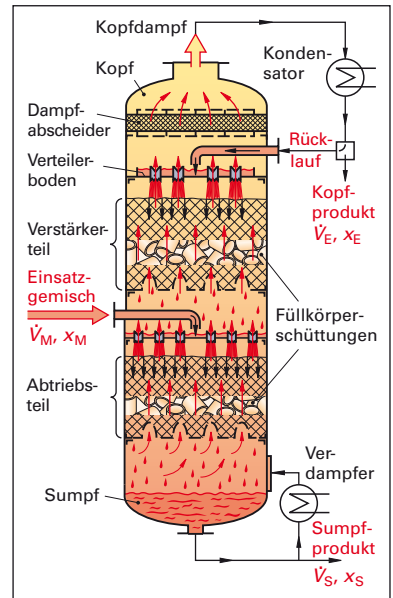


Bild 2: Rektifikationskolonne mit Füllkörperschüttung und mittigem Zulauf

Tabelle 1: HETP-Werte

Füllkörperschüttungen Kolonnenpackungen	HETP in cm
Pallring® 80 × 80 × 15	68
Pallring® 50 × 50 × 10	45
Pallring® 35 × 35 × 0,8	37
Sulzer-Packungen®	8 ... 30
Montz-Packungen®	15 ... 70

Beispiel: Für die Trennung eines Benzol-Toluol-Gemischs gemäß dem Beispiel auf Seite 185 wurden 12 theoretische Trennstufen ermittelt. Die Trennung soll in einer Füllkörperkolonne, HETP-Wert der Füllkörperschüttung = 37 cm, Wirkungsgrad $\eta_F = 0,85$, durchgeführt werden. Wie groß ist die erforderliche Füllkörperschüttungshöhe?

Lösung: $H_F = \frac{n_{th} - 1}{\eta_F} \cdot HETP = \frac{(12 - 1)}{0,85} \cdot 37 \text{ cm} \approx 479 \text{ cm} \approx 4,97 \text{ m}$

Aufgaben zu 8.6.6 Rektifikation mit Füllkörper- und Packungskolonnen

1. Ein Methanol-Ethanol-Gemisch mit dem Stoffmengenanteil x_M (Methanol) = 0,080 wird in einer Füllkörperkolonne mit einer Pallring-Schüttung ($35 \times 35 \times 0,8$) rektifiziert. Das Kopfprodukt soll bei einem Rücklaufverhältnis $v = 3 \cdot v_{\min}$ auf x_E (Methanol) = 0,96% angereichert werden. Die Gleichgewichtskurve des Methanol-Ethanol-Gemischs hat folgende Wertepaare:

$x(\text{Methanol})$	0	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,95	1
$y(\text{Methanol})$	0	0,08	0,15	0,29	0,41	0,54	0,64	0,73	0,80	0,87	0,93	0,97	1

- Erstellen Sie das Gleichgewichtsdiagramm.
 - Berechnen Sie das Mindest-Rücklaufverhältnis und das reale Rücklaufverhältnis.
 - Bestimmen Sie die Arbeitsgerade und zeichnen Sie sie in das Gleichgewichtsdiagramm ein.
 - Bestimmen Sie die Anzahl der erforderlichen theoretischen Trennstufen.
 - Wie groß ist der HETP-Wert der Pallring-Schüttung? Berechnen Sie damit die erforderliche Höhe der Füllkörperschüttung in der Kolonne, wenn der Wirkungsgrad der Schüttung 0,69 beträgt.
2. In einem Betrieb soll ein Gemisch aus Cyclohexan und Trichlormethan mit einer Ausgangsgemisch-Zusammensetzung von $x(\text{Cyclohexan}) = 0,26$ getrennt werden. Die Gleichgewichtskurve des Gemischs ist durch die Wertepaare in der Tabelle gegeben.

$x(\text{Cyclohexan})$	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,95
$y(\text{Cyclohexan})$	0,10	0,19	0,34	0,45	0,53	0,62	0,70	0,78	0,85	0,93	0,96

Die Kolonnenkopf-Zusammensetzung soll $x(\text{Cyclohexan}) = 0,94$, die des Sumpfablaufs $x(\text{Cyclohexan}) = 0,08$ betragen. Die Rektifikation wird bei einem Rücklaufverhältnis von $v = 1,7 v_{\min}$ durchgeführt. Es steht im Betrieb eine Rektifikationskolonne mit einer Kolonnenpackung von 3,40 m Höhe zur Verfügung. Die Kolonnenpackung hat einen HETP von 16 cm; der Betriebswirkungsgrad ist 75%. Kann mit dieser Rektifikationskolonne und den gewählten Betriebsbedingungen die Trennaufgabe erreicht werden?

8.6.7 Kolonnendurchmesser und Kolonnenhöhe

Die erforderliche Querschnittsfläche und damit den Durchmesser einer Kolonne kann man aus dem Dampf-Massenstrom $\dot{m}_D$ in der Kolonne berechnen (**Bild 1**):

$$\dot{m}_D = \dot{V}_D \cdot \rho_D = A \cdot w_D \cdot \rho_D = \pi/4 \cdot d_K^2 \cdot w_D \cdot \rho_D$$

Hierin sind: $\dot{V}_D$ der Volumenstrom und ρ_D die Dichte des Dampfes; w_D ist die auf die leere Kolonne bezogene Dampfgeschwindigkeit (Leerrohrgeschwindigkeit) und d_K der innere Kolonnendurchmesser.

Die Dichte ρ_D des Dampfes kann man aus der allgemeinen Gasgleichung berechnen (siehe rechts).

Darin ist p der Druck, T die Temperatur in K, R die universelle Gaskonstante ($R = 8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$) und $\bar{M}_D$ die mittlere molare Masse des Dampfes. Sie wird aus dem Stoffmengenanteil des Leichtersieders im Dampf $y(A)$ und den molaren Massen der Komponenten berechnet: $\bar{M}_D = y(A) \cdot M(A) + (1 - y(A)) \cdot M(B)$

Löst man die obige Gleichung nach d_K auf, dann erhält man den erforderlichen Kolonnendurchmesser mit nebenstehender Gleichung.

Zur Auslegung einer Rektifikationskolonne benötigt man einen technologisch sinnvollen Wert der Dampfgeschwindigkeit w_D . Man erhält ihn aus empirischen Untersuchungen an konkreten Rektifikationskolonnen (siehe nächste Seite).

Dampfdichte

$$\rho_D = \frac{p \cdot \bar{M}_D}{R \cdot T}$$

Kolonnendurchmesser

$$d_K = 2 \cdot \sqrt{\frac{\dot{m}_D}{\pi \cdot w_D \cdot \rho_D}}$$

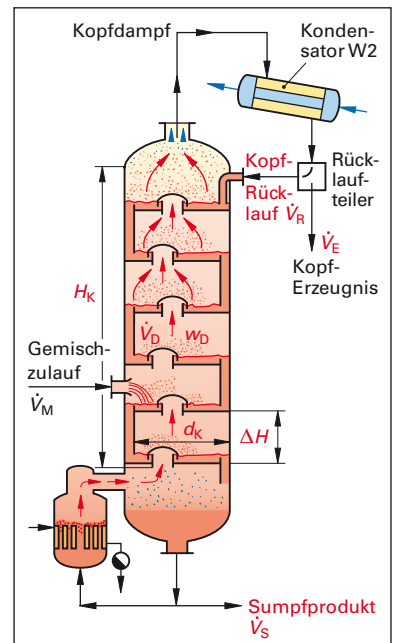


Bild 1: Stoffströme und Abmessungen einer Bodenkolonne

10.1.3 Messumformer

Messumformer, auch Messwertumformer oder Transmitter genannt (engl. transducer), wandeln ein Messgerätesignal in ein standardisiertes elektrisches Einheitssignal E um (Bild 1, Seite 207). Es wird dem Regler als Rückführungssignal zugeführt.

Als Einheitssignal dient ein elektrischer Strom von 4 mA bis 20 mA.

Dadurch können die verschiedenen Messgeräte mit ihren unterschiedlichen Messsignalen an **einen** Standardregler angeschlossen werden. Der Messumformer wird in Zeichnungen mit einem Symbol dargestellt, in das das Messsignal (z. B. eine Temperatur ϑ) und das Einheitssignal E eingetragen sind (**Bild 1**).

Beispiel (Bild 1): Der Messbereich (MB) eines Widerstandsthermometers beträgt 0 bis 120 °C; der Einheitssignalebereich liegt zwischen 4 mA und 20 mA. Bei einer Temperatur von $\vartheta = 0$ °C beträgt das elektrische Einheitssignal $E = 4$ mA; bei 120 °C beträgt es $E = 20$ mA.

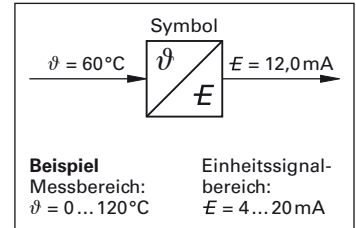


Bild 1: Darstellung eines Messumformers (Beispiel)

Elektrisches Einheitssignal

$E = 4 \text{ mA} \dots 20 \text{ mA}$

Bei den nur noch wenig eingesetzten pneumatischen Reglern wird ein **pneumatisches Einheitssignal** von $E = 0,2$ bar bis 1,0 bar verwendet. Die Berechnungen erfolgen analog wie bei dem elektrischen Einheitssignal. Hier wird darauf nicht näher eingegangen.

Aufgaben zu 10.1 Elemente des Regelkreises

1. Bei einer Rektifikationskolonne wird die Zulauftemperatur des Ausgangsgemischs gemessen, geregelt und angezeigt. Es soll mit einer Temperatur von 78,0 °C von einem dampfbeheizten Wärmetauscher eingespeist werden. Durch eine Störung ist die Einspeisetemperatur um 5,2 °C abgefallen. Der Regler erzeugt zum Ausgleich der Regelabweichung ein Einheitssignal von 6,2 mA, das zu einer Ventilhub-Vergrößerung von 1,8 mm führt.
 - a) Zeichnen Sie den Regelkreis der Temperaturregelung in Blockdarstellung.
 - b) Wie groß ist der Istwert der Temperatur?
 - c) Geben Sie die EMSR-Stelle normgerecht an.
2. Eine Membrankolbenpumpe läuft im Nennbetrieb mit einer Nenndrehzahl von 72,5 min⁻¹. Sie speist ein Flüssigkeitsgemisch in eine Durchflussstrecke. Die Drehzahl wird durch einen Frequenzumrichter des Pumpenmotors geregelt. Durch eine Erhöhung der Viskosität des Flüssigkeitsgemischs sinkt die Drehzahl der Pumpe um 7%.
 - a) Wie groß ist der Istwert der Pumpendrehzahl?
 - b) Wie groß ist die Regeldifferenz?

10.2 Zwischenwerte des Einheitssignals

Die Zwischenwerte der Messsignalwerte können mit Schlussrechnung oder einer Bestimmungsgleichung in Einheitssignalwerte umgerechnet werden. Außerdem können Zwischenwerte durch grafische Interpolation ermittelt werden. An einem Beispiel werden die drei Bestimmungsmethoden erläutert.

Beispiel: Der Messumformer eines magnetisch induktiven Durchflussmessers (MID) mit einem Messbereich von MB = 0 L/h bis 500 L/h formt das Messsignal in ein elektrisches Einheitssignal von $E = 4$ mA bis 20 mA um.

Welches Einheitssignal gibt der Messumformer bei einem Volumenstrom von $\dot{V} = 350$ L/h ab?

Einheitssignalwert-Berechnung mit Schlussrechnung

Bei einem Volumenstrom $\dot{V} = 0$ L/h beträgt das Einheitssignal $E = 4$ mA; bei $\dot{V} = 500$ L/h hat es einen Wert von $E = 20$ mA.

Der Messbereich beträgt $\Delta MB = MB_o - MB_u = 500 \text{ L/h} - 0 \text{ L/h} = 500 \text{ L/h}$;

Der Einheitssignalebereich ist $\Delta E = E_o - E_u = 20 \text{ mA} - 4 \text{ mA} = 16 \text{ mA}$.

Die Änderung des Einheitssignals ΔE bei einer Volumenstromänderung von 1 L/h beträgt:

$$\frac{\Delta E}{\Delta MB} = \frac{16 \text{ mA}}{500 \text{ L/h}} = 0,032 \frac{\text{mA}}{\text{L/h}}$$

Bei einem Volumenstrom von 350 L/h

ändert sich das Einheitssignal damit um:

$$350 \text{ L/h} \cdot 0,032 \frac{\text{mA}}{\text{L/h}} = 11,2 \text{ mA}$$

Zu diesem Wert kommt der untere Wert des Einheitssignalsbereichs von 4 mA, so dass sich das Einheitssignal bei einem Volumenstrom von $\dot{V} = 350 \text{ L/h}$ berechnet zu: $E = 11,2 \text{ mA} + 4,0 \text{ mA} = 15,2 \text{ mA}$

Einheitssignalwert-Berechnung mit Bestimmungsgleichung

Die Schlussrechnung für die Berechnung von Zwischenwerten für den Einheitssignalwert lässt sich mit der nebenstehenden Bestimmungsgleichung ausdrücken.

Es sind: E_x Größe des Einheitssignals beim Messwert x

ΔE Differenz zwischen dem oberen (E_o) und dem unteren Größenwert (E_u) des Einheitssignalsbereichs: $\Delta E = E_o - E_u = 20 \text{ mA} - 4 \text{ mA} = 16 \text{ mA}$

ΔMB Differenz zwischen dem oberen Größenwert (MB_o) und dem unteren Größenwert (MB_u) des Messbereichs MB

x Größenwert der Messgröße

Einheitssignal-Zwischenwerte

$$E_x = \frac{\Delta E}{\Delta MB} \cdot (x - MB_u) + E_u$$

Für das Beispiel des Messumformers von Seite 208 unten folgt für einen Volumenstrom von $\dot{V} = 350 \text{ L/h}$:

$$E_{\dot{V}} = \frac{E_o - E_u}{MB_o - MB_u} \cdot (\dot{V} - MB_u + E_u) = \frac{20 \text{ mA} - 4 \text{ mA}}{500 \text{ L/h} - 0 \text{ L/h}} \cdot (350 \text{ L/h} - 0 \text{ L/h}) + 4,0 \text{ mA} = 15,2 \text{ mA}$$

Einheitssignalwert-Ermittlung durch grafische Interpolation

In einem $E/\dot{V}$ -Diagramm wird der Einheitssignalsbereich auf der Ordinate und der Messbereich des Messgeräts auf der Abszisse aufgetragen (**Bild 1**). Wegen des proportionalen Zusammenhangs von Einheitssignal und Messwertsignal liegen die Zwischenwerte auf einer Geraden zwischen dem Anfangspunkt (E_u/MB_u) und dem Endpunkt (E_o/MB_o) des Diagramms.

Für den Volumenstrom $\dot{V} = 350 \text{ L/h}$ von obigem Beispiel erhält man durch senkrechtes Hochgehen bis zur Geraden und Ablesen auf der E -Achse einen Einheitssignalwert von $E \approx 15,2 \text{ mA}$.

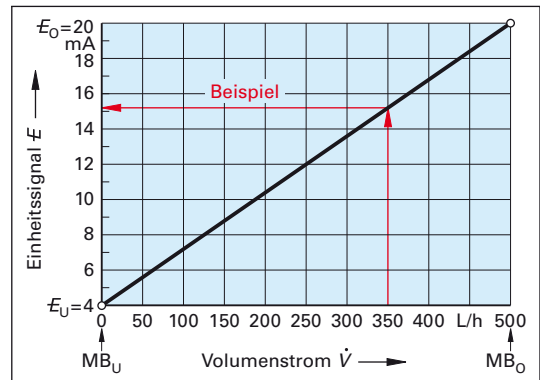


Bild 1: Bestimmungs-Diagramm für Zwischenwerte des Einheitssignals (Beispiel)

Aufgaben zu 10.2 Zwischenwerte des Einheitssignals

- Bei einer geregelten Chemanlage misst ein Durchflussmesser in einer Rohrleitung den Volumenstrom im Messbereich von 50 L/h bis 1500 L/h. Das Messsignal wird in einem Messumformer in das elektrische Einheitssignal von 4 mA bis 20 mA umgewandelt. Welches Einheitssignal (in mA) liefert der Messumformer bei einem Volumenstrom 740 L/h? Berechnen Sie das Einheitssignal a) mit Schlussrechnung und b) mit der Bestimmungsgleichung.
- Die MSR-Einrichtungen einer Chemanlage arbeiten im Einheitssignalsbereich von 4 bis 20 mA. Der Regler für eine Messstelle QIR gibt als Stellgröße einen Einheitssignal-Strom von $I_E = 10,5 \text{ mA}$ aus. Das zugehörige Regelventil ist ein Öffnungsventil und hat einen Gesamthub von $h = 12 \text{ mm}$. Berechnen Sie den Hub in mm, der sich beim genannten Ausgangssignal des Reglers einstellt. Berechnen Sie a) mithilfe der Bestimmungsgleichung und b) durch grafische Interpolation.
- Das im nebenstehenden **Bild 2** gezeigte pneumatische Stellventil in einem Temperaturregelkreis wird von einem Regler mit Einheitssignalsbereich von 4 mA bis 20 mA gesteuert. Sie verstellen den Ventilhub im Bereich von 0% bis 100%.

- Benennen Sie die mit Nummern gekennzeichneten Elemente des Regelkreises.
- Zu wie viel Prozent öffnet der Ventilkegel bei einem Stellsignal von 9,2 mA?
- Welches Einheitssignal ist für einen Ventilhub von 85% des Gesamthubs erforderlich?

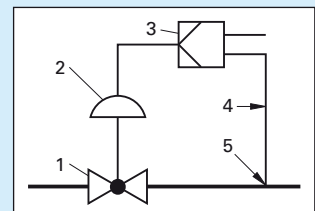


Bild 2: Aufgabe 3

Beispiel einer UND-Verknüpfung in der Chemietechnik:

Eine Presse hat zwei Schalter S0 und S1, die über eine UND-Verknüpfung mit dem Pressenantrieb verbunden sind.

Der Pressenantrieb wird nur dann in Betrieb gesetzt ($A1 = 1$), wenn mit der linken Hand ein Sicherheitsschalter S0 ($E0 = 1$) **und gleichzeitig** mit der rechten Hand ein Pressenschalter S1 betätigt wird ($E1 = 1$).

Bei Loslassen eines der beiden Schalter wird die Presse abgeschaltet. Dadurch kann keine Hand in die niedergehende Presse geraten.

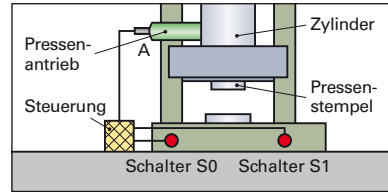


Bild 1: Bedienung einer Presse

In der Technik werden die logischen Verknüpfungen mit elektronischen Bauelementen in Form von Bausteinen realisiert (Bild 4, Seite 230). Man bezeichnet deshalb eine UND-Verknüpfung auch als UND-Baustein oder als UND-Glied.

ODER-Verknüpfung

Eine ODER-Verknüpfung hat am Ausgang A1 dann den 1-Zustand, wenn entweder an mindestens einem der Eingänge der 1-Zustand anliegt, oder wenn beide Eingangssignale 1 sind.

Die ODER-Verknüpfung hat die Funktion einer elektrischen Parallelschaltung.

Bild 2 zeigt das Schaltzeichen, die Schalttable mit den möglichen Signalzuständen, die Funktionsgleichung sowie den Stromlaufplan einer ODER-Verknüpfung.

Die Funktionsgleichung lautet: $A1 = E0 \vee E1$

Gelesen: A1 gleich E0 oder E1

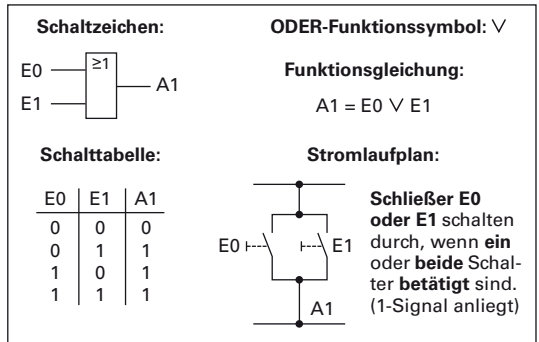


Bild 2: ODER-Verknüpfung

Beispiel einer ODER-Verknüpfung in der Chemietechnik:

Eine Kreislpumpe hat zwei Schaltstellen, die mit einer ODER-Verknüpfung verschaltet sind (**Bild 3**).

Die Pumpe kann wahlweise entweder durch einen Schalter S0 an der Pumpe ($E0 = 1$) **oder** durch einen Schalter S1 in der Messwarte ($E1 = 1$) gestartet werden ($A1 = 1$). Auch die gleichzeitige Betätigung der Schalter S0 und S1 führt zum Laufen der Pumpe.

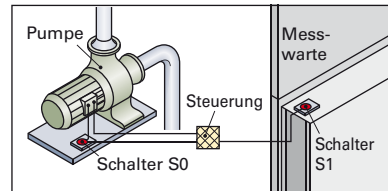


Bild 3: Schaltung einer Pumpe

Exklusiv-ODER-Verknüpfung (kurz: XOR-Verknüpfung)

Bei einer Exklusiv-ODER-Verknüpfung (auch Antivalenz genannt) hat der Ausgang A1 dann den 1-Zustand, wenn die Eingänge E0 und E1 unterschiedliche Signalwerte haben.

Bild 4 zeigt das Schaltzeichen, die Schalttable mit den möglichen Signalzuständen, die Funktionsgleichung sowie den Stromlaufplan der XOR-Verknüpfung. Die Funktionsgleichung lautet:

$$A1 = (E0 \wedge \overline{E1}) \vee (\overline{E0} \wedge E1)$$

Gelesen: A1 gleich E0 und nicht E1 oder nicht E0 und E1.

Beispiel XOR-Verknüpfung aus der Chemietechnik:

Ein Sammelbecken wird über zwei Rohrleitungen mit Kreislumpen entleert. Dabei soll nur jeweils eine Pumpe in Betrieb sein ($E0 = 1$ oder $E1 = 1$).

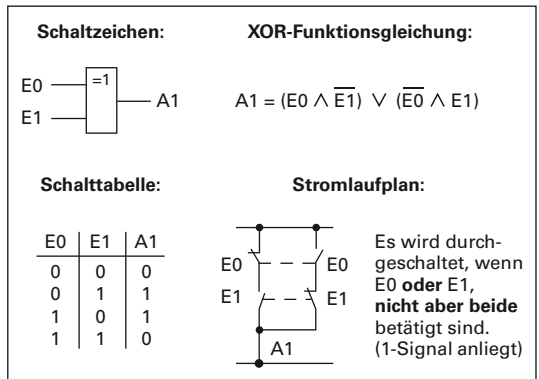


Bild 4: Exklusiv-ODER-Verknüpfung (XOR)

NICHT-Funktion

Die NICHT-Funktion bewirkt eine Signalumkehr: Der Ausgang A1 hat dann das Signal 1, wenn das Eingangssignal E0 = 0 ist und umgekehrt.

Die NICHT-Funktion wird deshalb auch Negation oder Inverter genannt.

Bild 1 zeigt das Schaltzeichen, die Schalttafel mit den möglichen Signalzuständen, die Funktionsgleichung sowie den Stromlaufplan der NICHT-Funktion.

Die Negation wird am Ausgang des Logiksymbols durch einen kleinen Kreis, in der Funktionsgleichung durch einen Überstrich gekennzeichnet (z. B. $\overline{E0}$). Die Funktionsgleichung lautet: $A1 = \overline{E0}$
Gelesen: A1 ist **nicht** gleich E0.

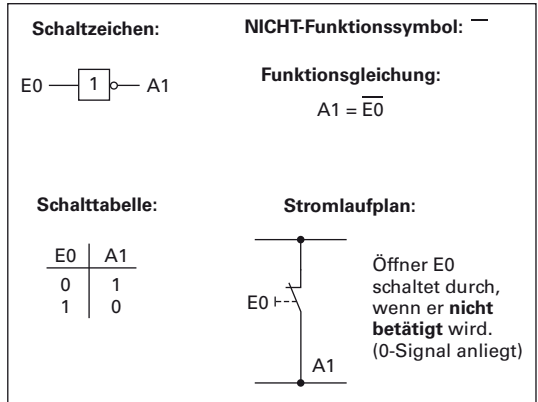


Bild 1: NICHT-Funktion (Negation)

Beispiel einer NICHT-Funktion in der Chemietechnik:

Eine Filterpresse hat einen NOT-AUS-Schalter E0 (**Bild 2**). Er ist mit dem Antrieb der Filterpresse über eine NICHT-Funktion geschaltet. Bei Drücken des NOT-AUS-Schalters ($E0 = 1$) wird der Antrieb unterbrochen ($A1 = 0$). Wird der Schalter nach Öffnen einer Schlässelfer gedrückt ($E0 = 0$), läuft der Antrieb wieder an ($A1 = 1$).

NOT-AUS-Schalter sollen in Notsituationen durch Schnellabschaltung von Maschinen Schäden an Mensch und Maschine verhindern.

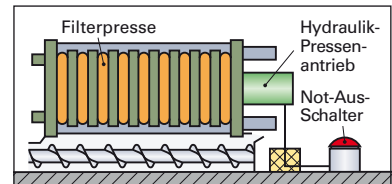


Bild 2: Not-Abschaltung Filterpresse

Aufgaben zu 10.1 Logische Grundverknüpfungen

- Ein Förderband soll wahlweise durch je einen Tastschalter an den beiden Enden des Förderbandes ($E1 = 1$, $E2 = 1$) und vom Leitstand aus ($E3 = 1$) eingeschaltet werden können ($A1 = 1$) (**Bild 3**).

- Stellen Sie die geeignete Verknüpfung dieser Schaltung mit einem Schaltzeichen dar.
- Erstellen Sie die Schalttafel der Verknüpfung.

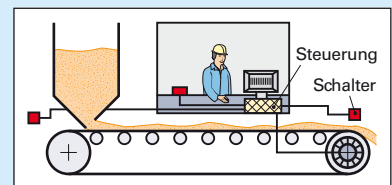


Bild 3: Schaltung eines Förderbandes (Aufgabe 1)

- An einem Rührkessel soll eine Blinkleuchte eingeschaltet werden ($A1 = 1$), wenn die Stromversorgung für den Rührer ausfällt ($E1 = 0$) (**Bild 4**).

- Welche Verknüpfung leistet diese Schaltaufgabe?
- Geben Sie das Schaltzeichen an.
- Nennen Sie die Funktionsgleichung.

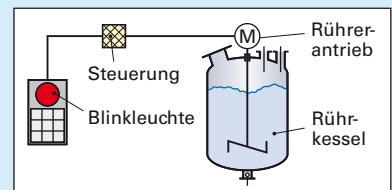


Bild 4: Schaltung einer Blinkleuchte (Aufgabe 2)

- Eine Zentrifuge (**Bild 5**) ist durch zwei Schalter gegen nicht sachgemäßen Betrieb geschützt: Der Verschlussdeckel der Zentrifuge drückt beim Schließen einen Schalter nieder ($E1 = 1$) und gibt ihn beim Öffnen wieder frei. Ein Widerstandsschalter in der Zentrifuge ist bei leerer Zentrifuge geschlossen ($E2 = 1$) und im gefüllten Zustand offen.

Der Antriebsmotor der Zentrifuge soll nur anlaufen ($A1 = 1$), wenn der EIN-Tastschalter gedrückt wird sowie gleichzeitig Deckelschalter und Füllstandsschalter geschlossen sind.

- Wie müssen die Schalter verknüpft werden?
- Geben Sie das Schaltzeichen an.
- Erstellen Sie die Schalttafel der Verknüpfung.

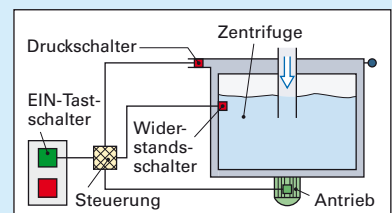


Bild 5: Schaltung einer Zentrifuge (Aufgabe 3)

12 Berechnungen zur chemischen Reaktionstechnik

Das apparative Kernstück eines chemischen Herstellungsprozesses ist der Reaktor (**Bild 1**). Dort werden die Ausgangsstoffe (Edukte) zu den Produkten umgesetzt.

Die chemische Reaktionstechnik befasst sich mit den umgesetzten Stoffmengen, den Bedingungen und der Effektivität bei der Ausführung der chemischen Reaktionen in der Produktion sowie den Betriebsweisen der Reaktoren.

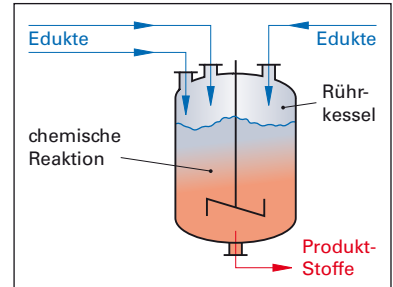


Bild 1: Rührkessel-Reaktor

12.1 Umgesetzte Stoffmengen in Reaktoren

Basis der chemischen Umsetzungen in einem Reaktor sind die Stoffmengen bzw. Massen oder Volumina der bei der chemischen Reaktion benötigten und erzeugten Stoffe.

12.1.1 Quantitätsgrößen und Durchsatzgrößen

Beim Chargenbetrieb in einem Reaktionskessel sind die kennzeichnenden Quantitätsgrößen das Volumen V , die Masse m und die Stoffmenge n .

Beim Fließbetrieb in einem Rohrreaktor sind die Durchsatzgrößen Volumenstrom $\dot{V}$, Massenstrom $\dot{m}$ und Stoffmengenstrom $\dot{n}$ die relevanten Quantitätsgrößen (siehe rechts).

Durchsatzgrößen

Volumenstrom	Massenstrom	Stoffmengenstrom
$\dot{V} = \frac{V}{t}$	$\dot{m} = \frac{m}{t}$	$\dot{n} = \frac{n}{t}$
mit $m = \rho \cdot V$; $m = n \cdot M$		

Beispiel: In einer Rohrleitung fließt ein Volumenstrom $\dot{V}$ von 1240 L/h verdünnter Schwefelsäure mit einem Volumenanteil von 12,5%. Wie groß sind der Volumenstrom, der Massenstrom und der Stoffmengenstrom an reiner Schwefelsäure in der Rohrleitung?

Stoffdaten: $\rho(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1,840 \text{ kg/m}^3$; $M(\text{H}_2\text{SO}_4) = 98,08 \text{ kg/kmol}$

Lösung: $\dot{V}(\text{H}_2\text{SO}_4) = \varphi(\text{H}_2\text{SO}_4) \cdot \dot{V}_{\text{ges}} = 12,5\% \cdot 1240 \text{ L/h} = 155 \text{ L/h} = \mathbf{0,155 \text{ m}^3/\text{h}}$;

$\dot{m}(\text{H}_2\text{SO}_4) = \rho(\text{H}_2\text{SO}_4) \cdot \dot{V}(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1840 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,155 \text{ m}^3/\text{h} \approx \mathbf{285 \text{ kg/h}}$;

$\dot{n}(\text{H}_2\text{SO}_4) = \frac{\dot{m}(\text{H}_2\text{SO}_4)}{M(\text{H}_2\text{SO}_4)} = \frac{285 \text{ kg/h}}{98,08 \text{ kg/kmol}} \approx \mathbf{2,91 \text{ kmol/h}}$

12.1.2 Umgesetzte Stoffmengen bei vollständiger Reaktion mit reinen Stoffen

Basis zur Berechnung der Stoffmengen bzw. Massen bei einer chemischen Reaktion ist die stöchiometrische Reaktionsgleichung. Sie lautet in allgemeiner Form z. B.: $\nu_A \cdot A + \nu_B \cdot B \rightarrow \nu_C \cdot C + \nu_D \cdot D$

Es sind: Indices: A und B Ausgangsstoffe (Edukte); C und D Reaktionsstoffe (Produkte);

$\nu_A, \nu_B, \nu_C, \nu_D$ sind die stöchiometrischen Faktoren.

Bei einer vollständig, man sagt auch **quantitativ verlaufenden Reaktion** gemäß der stöchiometrischen Reaktionsgleichung werden die umgesetzten Massen bzw. Stoffmengen mit der nebenstehenden Gleichung berechnet.

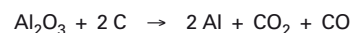
Diese **Stoffumsatzgleichung** gilt für jeweils zwei an der Reaktion beteiligte Stoffe X_1 und X_2 .

Es sind: m Masse; n Stoffmenge; M Molare Masse

Stoffumsatzgleichung

$$\frac{m(X_1)}{n(X_1) \cdot M(X_1)} = \frac{m(X_2)}{n(X_2) \cdot M(X_2)}$$

Beispiel: Die stöchiometrische Reaktionsgleichung für die Aluminiumherstellung durch Schmelzfluss-Elektrolyse lautet:



Welche Masse an Kohlenstoff wird für die Herstellung von 1 kg Aluminium benötigt, wenn die Reaktion gemäß der stöchiometrischen Reaktionsgleichung verläuft? Stoffdaten: $M(\text{C}) = 12,01 \text{ kg/kmol}$; $M(\text{Al}) = 26,98 \text{ kg/kmol}$

Lösung: Mit der nach $m(\text{C})$ umgestellten Stoffumsatzgleichung erhält man:

$$m(\text{C}) = n(\text{C}) \cdot M(\text{C}) = \frac{m(\text{Al})}{n(\text{Al}) \cdot M(\text{Al})} = 2 \cdot 12,01 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{2 \cdot 26,98 \text{ kg/kmol}} \approx \mathbf{0,4451 \text{ kg}}$$

Bei kontinuierlich durchgeführten Prozessen wird eine analoge Stoffumsatzgleichung mit Massenströmen $\dot{m}(X)$ und Stoffmengenströmen $\dot{n}(X)$ verwendet.

12.1.3 Umgesetzte Stoffmengen bei Reaktion mit verdünnten bzw. unreinen Stoffen

Bei chemischen Reaktionen mit verdünnten, unreinen oder gemischten Stoffen gilt ebenso die Stoffumsatzgleichung. Durch Multiplizieren der Masse des eingesetzten Realstoffs mit dem Massenanteil $w(X)$ erhält man die Stoffmenge des Wertstoffs (siehe rechts).

Stoffumsatzgleichung bei verdünnten bzw. verunreinigten Stoffen

$$\frac{w(X_1) \cdot m(X_1)}{n(X_1) \cdot M(X_1)} = \frac{m(X_2)}{n(X_2) \cdot M(X_2)}$$

Beispiel: Schwefelsäure wird z. B. aus SO_2 hergestellt. Zur Gewinnung des SO_2 wird das Mineral Pyrit mit einem Massenanteil $w(\text{FeS}_2)$ von rund 30 % durch Abrosten bei rund 450 °C nach der folgenden stöchiometrischen Reaktionsgleichung erzeugt: $4 \text{FeS}_2 + 11 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{Fe}_2\text{O}_3 + 8 \text{SO}_2$

Welche Masse an SO_2 kann aus 1 Tonne Pyrit mit dem Massenanteil $w(\text{FeS}_2) = 28,4\%$ gewonnen werden?

Stoffdaten: $M(\text{FeS}_2) = 119,97 \text{ kg/kmol}$; $M(\text{SO}_2) = 64,06 \text{ kg/kmol}$

Lösung: Stoffumsatzgleichung: $\frac{w(\text{FeS}_2) \cdot m(\text{Pyrit})}{n(\text{FeS}_2) \cdot M(\text{FeS}_2)} = \frac{m(\text{SO}_2)}{n(\text{SO}_2) \cdot M(\text{SO}_2)}$

$$\Rightarrow m(\text{SO}_2) = n(\text{SO}_2) \cdot M(\text{SO}_2) \cdot \frac{w(\text{FeS}_2) \cdot m(\text{Pyrit})}{n(\text{FeS}_2) \cdot M(\text{FeS}_2)} = 8 \cdot 64,06 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \cdot \frac{0,284 \cdot 1000 \text{ kg}}{4 \cdot 119,97 \text{ kg/kmol}} \approx \mathbf{303,3 \text{ kg}}$$

12.1.4 Umgesetzte Stoffmengen bei unvollständigen Reaktionen

Häufig werden bei Reaktionen die eingesetzten Stoffe **nicht vollständig** (man sagt **nicht quantitativ**) entsprechend der stöchiometrischen Gleichung umgesetzt.

Als Maß für das Nicht-Erreichen der umgesetzten Stoffmenge bei nicht quantitativer Umsetzung verwendet man den Begriff **Wirkungsgrad** oder **Ausbeute**.

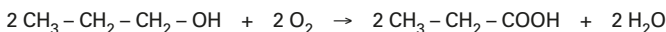
Man berechnet den Wirkungsgrad $\eta(X)$ als Quotient aus der tatsächlich gebildeten Produkt-Stoffmenge $n_p(X)$ und der maximal möglichen Produkt-Stoffmenge $n_{\max}(X)$ bei stöchiometrischer Umsetzung (siehe rechts).

Bei kontinuierlich durchgeführten Prozessen (Fließbetrieb) wird der Wirkungsgrad mit analogen Gleichungen aus den Stoffströmen $\dot{m}$ bzw. $\dot{n}$ berechnet.

Wirkungsgrad (Ausbeute)

$$\eta(X) = \frac{m_p(X)}{m_{\max}(X)} = \frac{n_p(X)}{n_{\max}(X)}$$

Beispiel: Die katalytische Oxidation von Propanol zu Propansäure verläuft nach der Reaktionsgleichung:



Welchen Wirkungsgrad (welche Ausbeute) hat der Prozess, wenn zur Herstellung von 1200 kg Propansäure 1572 kg Propanol eingesetzt werden müssen?

Stoffdaten: $M(\text{Propanol}) = 60,10 \text{ kg/kmol}$; $M(\text{Propansäure}) = 74,08 \text{ kg/kmol}$

Lösung: $\eta(X) = \frac{m_p(X)}{m_{\max}(X)} = \frac{m_p(\text{Propansäure})}{m_{\max}(\text{Propansäure})} = \frac{m_p(\text{PS})}{m_{\max}(\text{PS})}$

Berechnung von $m_{\max}(\text{PS})$: $\frac{m(\text{PS})}{n(\text{PS}) \cdot M(\text{PS})} = \frac{m(\text{P-ol})}{n(\text{P-ol}) \cdot M(\text{P-ol})} \Rightarrow m_{\max}(\text{PS}) = n(\text{PS}) \cdot M(\text{PS}) \cdot \frac{m(\text{P-ol})}{n(\text{P-ol}) \cdot M(\text{P-ol})}$

$$m_{\max}(\text{PS}) = 2 \cdot 74,08 \text{ kg/kmol} \cdot \frac{1572 \text{ kg}}{2 \cdot 60,10 \text{ kg/kmol}} \approx \mathbf{1938 \text{ kg}}$$

Berechnung des Wirkungsgrads: $\eta(\text{Propansäure}) = \frac{1200 \text{ kg}}{1938 \text{ kg}} \approx 0,6192 \approx \mathbf{61,92\%}$

Bei einem mehrstufigen chemischen Prozess errechnet sich der Gesamtwirkungsgrad η_{ges} (Gesamtausbeute) aus den Wirkungsgraden der einzelnen Prozessstufen η_1, η_2, η_3 .

Gesamtwirkungsgrad

$$\eta_{\text{ges}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \dots$$

Beispiel: Die Synthese zur Herstellung von Acetylsalicylsäure (kurz ASS) aus Benzol verläuft über vier Teilreaktionen mit Wirkungsgraden von 74 %, 81 %, 69 % und 89 %. Wie groß ist der Wirkungsgrad des Gesamt-Syntheseprozesses?

Lösung: $\eta_{\text{ges}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 = 0,74 \cdot 0,81 \cdot 0,69 \cdot 0,89 \approx 0,37 \approx \mathbf{37\%}$