



EUROPA-FACHBUCHREIHE
für Chemieberufe

Berechnungen zur Chemietechnik

Eckhard Ignatowitz, Gerhard Fastert, Holger Rapp

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsselberger 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 Reaktions-technik |
| 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 Rundens 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 Chemieberufe** 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 | Röhren und Mischen im Rührbehälter .. | 129 |
| 4.1.4 | Standardabweichung und Häufigkeit der Messwerte | 87 | 5.5.1 | Röhren 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 | | | |
| 4.2.3 | Pareto-Diagramm, Pareto-Analyse | 91 | | | |
| 4.2.4 | Korrelationsdiagramm | 93 | | | |
| 4.3 | Qualitätssicherung mit Qualitätsregelkarten (QRK) | 95 | 6 | Berechnungen zu mechanischen Trennverfahren | 132 |
| 4.3.1 | Aufbau und Typen von Qualitätsregelkarten | 95 | 6.1 | Kennzeichnung der Trennprozesse beim Klassieren und Sortieren | 132 |
| 4.3.2 | Prozess-QRK mit festen Regelgrenzen .. | 97 | 6.2 | Klassieren mit Siebmaschinen | 136 |
| 4.3.3 | Erstellen und Führen von Qualitätsregelkarten | 100 | 6.3 | Dekantieren | 137 |
| 4.3.4 | Erstellen von Qualitätsregelkarten mit Excel | 102 | 6.4 | Sedimentieren | 138 |
| 4.3.5 | Prozess-QRK mit variablen Regelgrenzen | 104 | 6.4.1 | Vorgänge beim Sedimentieren | 138 |
| 4.4 | Prüfung der Prozessfähigkeit | 106 | 6.4.2 | Absetzapparate | 138 |
| 4.5 | Typische Verläufe in Qualitätsregelkarten | 109 | 6.5 | Zentrifugieren mit Sedimentierzentrifugen | 140 |
| | | | 6.6 | Staubabscheidung mit dem Zyklon .. | 142 |
| | | | 6.6.1 | Vorgänge im Zyklon | 142 |
| | | | 6.6.2 | Berechnungen beim Zyklon | 142 |
| | | | 6.6.3 | Druckverlust, Abscheidegrad | 143 |
| | | | 6.7 | Filtrieren | 144 |
| | | | 6.7.1 | Vorgänge beim Filtrieren | 144 |
| | | | 6.7.2 | Absatzweise Filtration | 146 |
| | | | 6.7.3 | Kontinuierliche Filtration | 146 |
| 5 | Berechnungen zur Aufbereitungstechnik | 112 | | | |
| 5.1 | Schüttgüter | 112 | 7 | Berechnungen zur Heiz- und Kühltechnik | 148 |
| 5.1.1 | Porosität, Schüttdichte, Partikelgröße .. | 112 | 7.1 | Wärmemengen | 148 |
| 5.1.2 | Oberflächen von Schüttgütern | 113 | 7.2 | Energieträger im Chemiebetrieb | 148 |
| 5.2 | Bestimmung der Partikelgrößenverteilung von Schüttgütern | 114 | 7.3 | Wärmeübertragung in der Chemietechnik | 149 |
| 5.2.1 | Durchführung einer Siebanalyse | 114 | 7.3.1 | Grundlagen der Wärmeübertragung .. | 149 |
| 5.2.2 | Auswertung einer Siebanalyse | 114 | 7.3.2 | Wärmeleitung | 149 |
| 5.2.3 | Grafische Darstellungen der Siebanalyse | 115 | 7.3.3 | Wärmedurchgang | 151 |
| 5.2.4 | Darstellung und Auswertung einer Siebanalyse im RRSB-Netz (DIN 66 145) .. | 117 | 7.3.4 | Berechnung von Wärmedurchgangszahlen k | 152 |
| 5.2.5 | Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Schüttgütern | 119 | 7.3.5 | Mittlere Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_m$ beim Wärmedurchgang | 153 |
| 5.2.6 | Auswertung einer Siebanalyse mit einem Tabellenkalkulationsprogramm (TKP) | 120 | 7.4 | Wärmeübertragung mit Rohrbündelwärmetauschern | 155 |
| 5.2.6.1 | Datenauswertung der Siebanalyse mit dem TKP Excel | 120 | 7.5 | Wärmeleitung in Kondensatoren .. | 157 |
| 5.2.6.2 | Grafische Darstellung der Siebanalyse mit dem TKP Excel | 122 | 7.5.1 | Oberflächenkondensatoren | 157 |
| 5.3 | Charakterisierung eines Schüttguts .. | 124 | 7.5.2 | Mischkondensatoren | 157 |
| 5.3.1 | Verteilungsdiagramme | 124 | | | |

| | | | |
|--|------------|---|------------|
| 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 $h\text{-}X$ -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 Gleichgewichtsdigramm | 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 |

| | | | |
|--|------------|---|------------|
| 11.4 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 |
| 12.2 Kenngrößen der Reaktionsabläufe in Reaktoren | 242 | | |
| 12.2.1 Umsatz | 242 | 14 Themenübergreifende Projektaufgaben | 270 |
| 12.2.2 Ausbeute (Bildungsgrad) | 243 | Projektaufgabe 1 | 270 |
| 12.2.3 Selektivität | 244 | Projektaufgabe 2 | 272 |
| 12.2.4 Verweilzeit | 244 | | |
| 12.2.5 Produktionsleistung | 244 | | |
| 12.3 Zeitlicher Ablauf chemischer Reaktionen | 246 | | |
| 12.4 Beeinflussung der Reaktionsge- schwindigkeit | 247 | 15 Anhang | 276 |
| 12.5 Chemisches Reaktionsgleichgewicht, Massenwirkungsgesetz | 249 | Griechisches Alphabet | 276 |
| 12.6 Reaktionsenthalpie | 250 | Physikalische Konstanten | 276 |
| 12.7 Betriebsweisen und Reaktortypen in der chemischen Produktion | 252 | Hinweis zu den Normen | 276 |
| 12.7.1 Chargenbetrieb im Rührkesselreaktor . | 252 | Kopiervorlagen | 277 |
| 12.7.2 Fließbetrieb im Rohrreaktor | 253 | 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 Absorption, Sprungantwort (Regelungstechnik) | |
| 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 | Sachwortverzeichnis mit englischer Übersetzung | 290 |
| 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, Formeln, Daten, Überprüfen, Ansicht, Add-Ins*. 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.

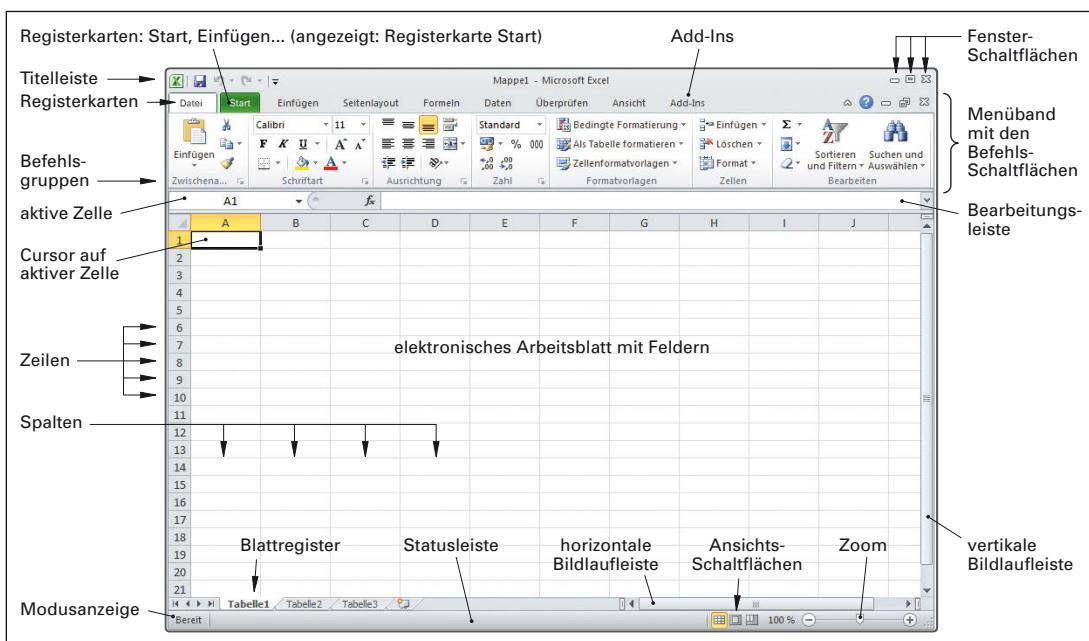


Bild 1: Monitorbild des Tabellenkalkulationsprogramms Microsoft Excel 2010

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:

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

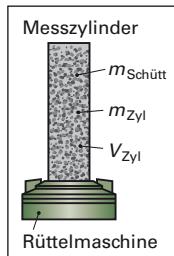


Tabelle 1: Messwerte zur Bestimmung der Schütt- und Rütteldichte von POM-Granulat

| 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 |

$$m_{\text{Zyl}} = 0,2712 \text{ kg}; \quad V_{\text{Zyl}} = 1,0000 \text{ L}$$

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).
Hinweis: Die Zeichen $=$, $/$, $+$, $-$, entsprechen den gleichlautenden mathematischen Zeichen.
Das Zeichen $*$ bedeutet Multiplizieren.
- 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$8)/$E8

Hinweis: Die Zeichen $=$, $/$, $+$, $-$, entsprechen den gleichlautenden mathematischen Zeichen.

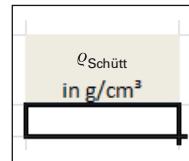
Das Zeichen $*$ bedeutet Multiplizieren.

- 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 $\varrho_{\text{Schütt}}$ und $\varrho_{\text{Rüttel}}$ berechnet.
Es ist der arithmetische Mittelwert der Einzelergebnisse in D3 bis D7 bzw. in E3 bis E7:
$$\bar{\varrho}_{\text{Schütt}} = \frac{\varrho_{\text{Schütt},1} + \varrho_{\text{Schütt},2} + \dots}{5}$$

In Zelle D10 wird eingetragen: $=\text{SUMME}(D3:D7)/5$ bzw. in Zelle E10: $=\text{SUMME}(E3:E7)/5$
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: $=\text{MITTELWERT}(D3:D7)$ bzw. in E10: $=\text{MITTELWERT}(E3:E7)$
- 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.

| Schütt- und Rütteldichte von POM-Granulat | | | | |
|---|---------------------------|---------------------------|---|---|
| Messreihe | $m_{\text{Schütt}}$ in kg | $m_{\text{Rüttel}}$ in kg | $\varrho_{\text{Schütt}}$ in g/cm^3 | $\varrho_{\text{Rüttel}}$ in g/cm^3 |
| 1 | 1,1873 | 1,2653 | 0,9161 | 0,9941 |
| 2 | 1,1724 | 1,2479 | 0,9012 | 0,9767 |
| 3 | 1,1808 | 1,252 | 0,9096 | 0,9808 |
| 4 | 1,1799 | 1,2682 | 0,9087 | 0,997 |
| 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



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 Förder 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_Q , 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 .

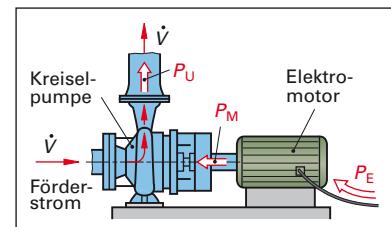


Bild 1: Pumpenanlage

Förderhöhe einer Pumpe

$$H = \frac{W_Q}{F_G}$$

Förderhöhe einer Pumpe

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

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 $32 \text{ m}^3/\text{h}$ eine Leistung von $4,2 \text{ kW}$ übertragen wird? Die Dichte der Flüssigkeit beträgt $\rho = 1,145 \text{ g/cm}^3$.

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

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

$$H > H_A$$

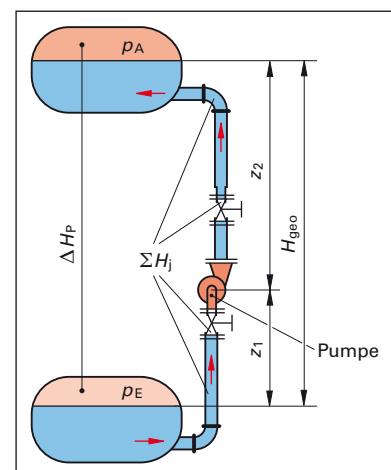


Bild 2: Förderhöhe einer Anlage

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: $H_A = H_{\text{geo}} + \sum H_j + \Delta H_p$; $\Delta p_V = 0,990 \text{ bar}$; 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 verminderter 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 Kreiselradpumpe

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 → ①) oder durch Änderung der Pumpenkennlinie (z.B. durch Drehfrequenzreduzierung oder Verminderung des Laufraddurchmessers: I → II → 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: $H \approx 28 \text{ m}$; $V \approx 70 \text{ m}^3/\text{h}$.

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 $H \approx 31 \text{ m}$.

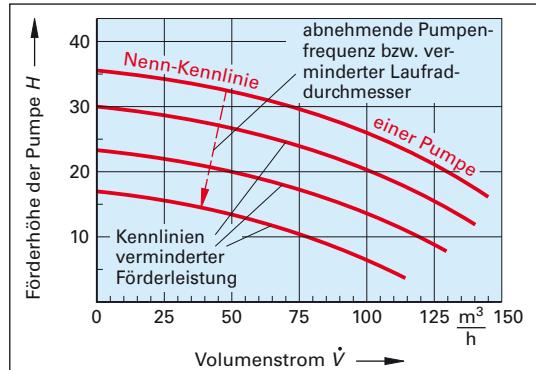


Bild 1: Pumpenkennlinien-Diagramm

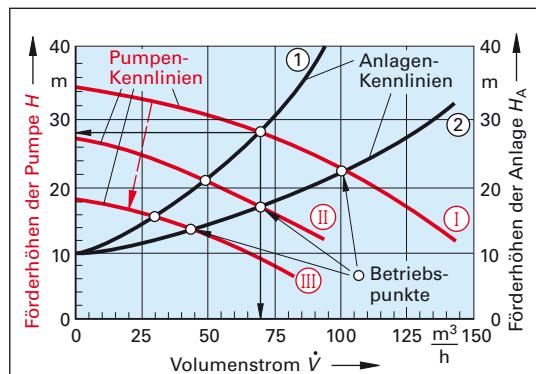


Bild 2: Pumpenkennlinien, Anlagenkennlinien, Betriebspunkte

Beispiel 3: In einer Chemieanlage befindet sich eine Kreiselradpumpe 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 m³/h und einer Förderhöhe von 6,00 m.

Aufgrund einer Produktionsumstellung ist ein Volumenstrom von 8,5 m³/h erforderlich; die Förderhöhe der Anlage (Druckverlust) beträgt dann 4,8 m.

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

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

b) 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 .

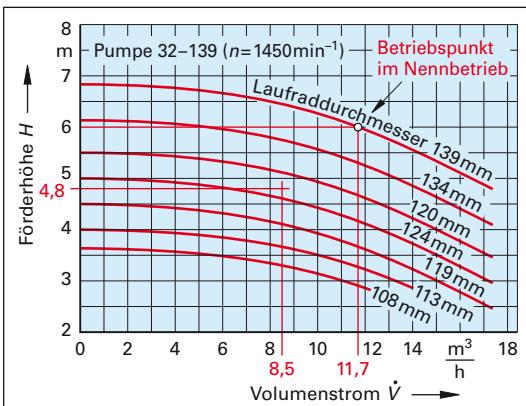


Bild 1: Pumpenkennlinien der Pumpe 32-139 mit Laufrädern unterschiedlicher Durchmesser

Kennfeldraster von Kreiselradpumpen-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. 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

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

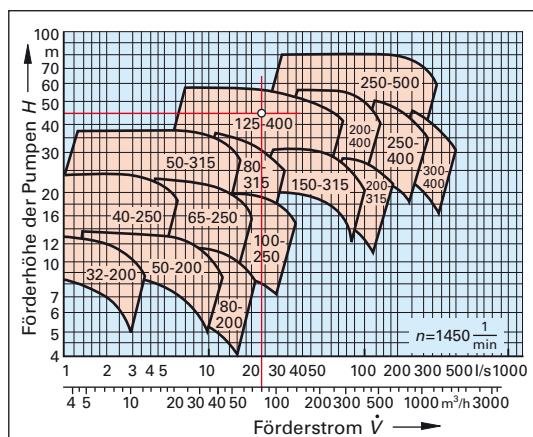


Bild 2: Kennfeldraster einer Chemiepumpen-Baureihe eines Pumpenherstellers

Aufgaben zu 2.2.1 Fördern mit Kreiselradpumpen

- 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? b) 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.
Hinweis: Verwenden Sie für die QRK einen Vordruck wie im Anhang des Buchs, Seite 271.
- 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.

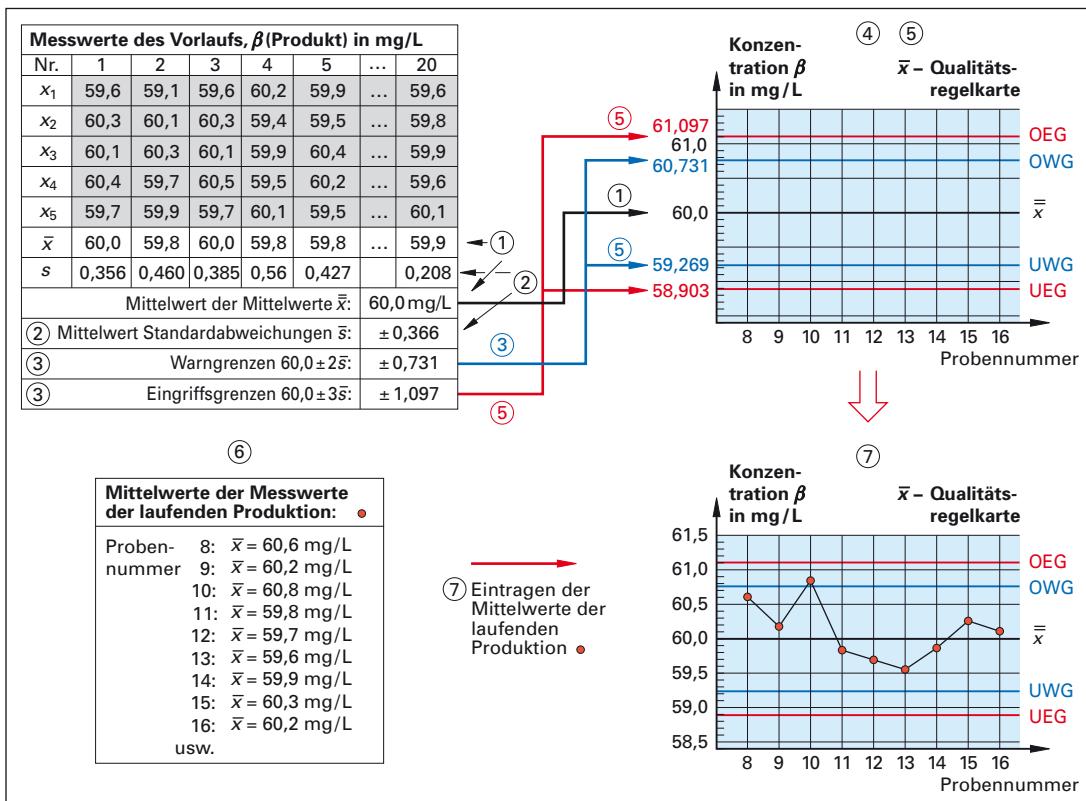


Bild 1: Ablaufschema zur Erstellung einer zweiseitigen Mittelwert-Qualitätsregelkarte (\bar{x} -QRK)

Aufgaben zu 4.3.3 Erstellen und Führen von Qualitätsregelkarten

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

- 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 |

- Berechnen Sie den oberen und den unteren Toleranz-Grenzwert.
 - Berechnen Sie den Mittelwert und die Standardabweichung der Messwerte.
 - Berechnen Sie die Warn- und Eingriffsgrenzen für die QRK dieser Messreihe.
 - Stellen Sie die Messwerte in einer Urwert-QRK mit den Regelgrenzen dar.
- 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 |

- Berechnen Sie den Mittelwert und die Standardabweichung der Stichproben.
 - Berechnen Sie den Mittelwert der Mittelwerte und den Mittelwert der Standardabweichungen.
 - Berechnen Sie die Warn- und Eingriffsgrenzen für die QRK dieser Messreihe.
 - Erstellen Sie die Mittelwert-QRK und die Standardabweichungs-QRK der Restfeuchten.
- 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.

- Berechnen Sie aus den Messdaten die erforderlichen Größen für eine Mittelwert-QRK (\bar{x} -QRK) sowie eine Standardabweichung-QRK (s -QRK) mit den Eingriffs- und Warngrenzen.
- Zeichnen Sie eine Mittelwert-QRK und eine Standardabweichungs-QRK.
- 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.

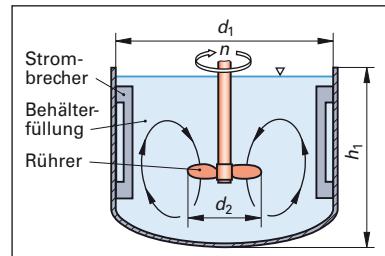


Bild 1: Rührbehälter und Rührer

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):

Schrägblattrührer, Gegenstromrührer

| | |
|---|---|
| Ankerrührer | Wendelrührer |
| Homogenisieren, Heizen hochviskoser Flüssigk. | Homogenisieren hochviskoser Flüssigk. |
| Schrägblattrührer | Gegenstromrührer |
| Homogenisieren, Dispergieren niedrig bis mittelviskoser Flüssigk. | Homogenisieren mittelviskoser Flüssigk. |
| Scheibenrührer | Propellerrührer |
| Dispergieren Begasen niedrigviskoser Flüssigk. | Homogenisieren, Dispergieren niedrigviskoser Flüssigk. |

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

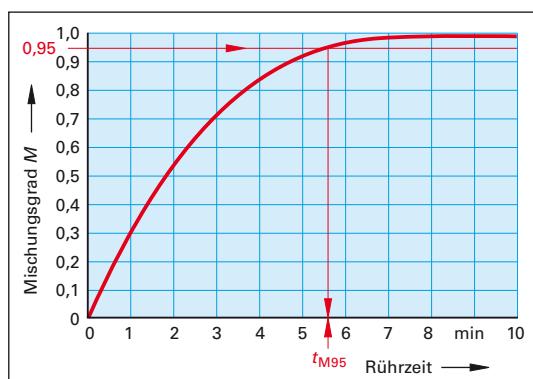


Bild 3: Mischungsgrad bei einem Rührvorgang

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.