

# 1. Einleitung



[http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/Seminare/einleitung\\_tac.pdf](http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/Seminare/einleitung_tac.pdf)

Caroline Röhr, Burkhard Butschke

Vorlesung: Technische Anorganische Chemie, WS 24/25

- ① 1.1. Bedeutung anorganisch-chemischer Stoffe
  
- ② 1.2. Generelles zur Projektierung chemischer Anlagen  
Wirtschaftliche, technische und chemische Aspekte  
Rohstoffe: Vorkommen, Förderung und Aufarbeitung  
Stofftrennung  
Stoffumwandlungen
  
- ③ 1.3. Inhalt (Prozess/Stoff-Auswahl)
  
- ④ 1.4. Literatur

- ① 1.1. Bedeutung anorganisch-chemischer Stoffe
  
- ② 1.2. Generelles zur Projektierung chemischer Anlagen  
Wirtschaftliche, technische und chemische Aspekte  
Rohstoffe: Vorkommen, Förderung und Aufarbeitung  
Stofftrennung  
Stoffumwandlungen
  
- ③ 1.3. Inhalt (Prozess/Stoff-Auswahl)
  
- ④ 1.4. Literatur

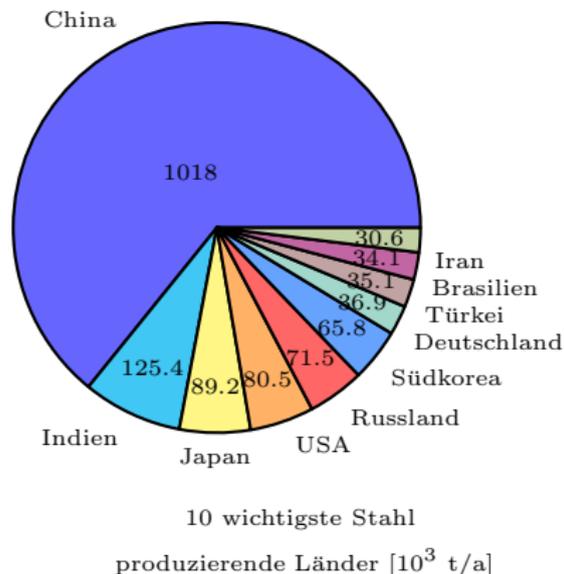
# Anorganisch-chemische Produkte I

- ▶ typische Massengüter als Fertigprodukte (z.B. Dünger, Glas, Baustoffe, Stahl)
- ▶ Zwischenprodukte mit hoher Einsatzbreite (z.B. Chlor, Säuren, div. Metalle)
- ▶ z.T. extrem hohe Tonagen (in  $10^3$  t/a) (klassische chemische Industrie)

	Welt (2023)	Deutschland VCI (2023)	weitere Einzelangaben
Chlor ( $\text{Cl}_2$ )	65 000	2 351	7 289 Europa, 2023
Ammoniak ( $\text{NH}_3$ )	146 000	1 719	
NaCl	270 000	17 500	
NaOH	50 000	2 490	
Soda	52 000	2 125	
HCl	20 000	1 527	
$\text{H}_2\text{SO}_4$ ( $\text{SO}_3$ )	231 000	2 831	19 000 China, 2023
Essigsäure ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )	12 100	29	
N-Düngemittel	90 800	5 216	
P-Düngemittel ( $\text{P}_2\text{O}_5$ )	43 000		
Kalisalze ( $\text{K}_2\text{O}$ )	29 100	2 962	
$\text{Al}_2\text{O}_3$		727	
$\text{TiO}_2$	6 560	245	

- ▶ noch höhere Tonagen (in  $10^3$  t/a) jenseits der klassischen chemischen Industrie

	Welt (2023)	Deutschland VCI (2023)
H <sub>2</sub> [Mio. m <sup>3</sup> ]	50 000	3 036
O <sub>2</sub> [Mio. m <sup>3</sup> ]		5 389
N <sub>2</sub> [Mio. m <sup>3</sup> ]		6 922
Stahl (roh)	1 892 562	35 400
Al (primär)	70 000	1 066
Glas	107 000	1 981
Zement	4 100 000	30 000



## Besonderheiten Anorganika:

- ▶ viele Grund-Produkte mit sehr geringen Selbstkosten:
  - NaOH: 300-450 €/t ('caustic soda', 1.2024)
  - Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>: 300 €/t ('soda ash')
  - Stahl: 540 €/t (15.10.2024)
  - Cu: 8.800 €/t (4.2024)
  - Al: 2.400 €/t (11.10.2024)
  - Sn: 30.300 €/t (11.10.2024)
  - Poly-Si: 6.600 €/t (10.2024)
  - Zement-Klinker: 10-70 €/t (10.2024)
- ▶ Wertstoffgehalt des Rohstoffs bestimmt Preise (geringe Wertschöpfung)
- ▶ große Bedeutung von Feststoffen (Edukte und Produkte)
- ▶ extreme Reaktionsbedingungen ( $T$ ,  $p$ ,  $pH$ -Werte, Redox-Potentiale)  
↳ hohen Anforderungen an Werkstoffe
- ▶ größere Prozessvielfalt als bei Organika/Pharmazeutika etc.

## Chemische Industrie (inkl. Pharma)

- ▶ Jahresumsatz: 225.5 Milliarden Euro (2023)
  - Inland: 85.5 Milliarden (−16 % gegen Vorjahr)
  - Ausland 140.0 Milliarden (−12.2 % gegen Vorjahr)
- ▶ 479 542 Beschäftigte

## + weitere (AC-)Industrie-Bereiche

- ▶ Stahl: 50.6 Milliarden Euro (Umsatz 2023), 80 000 Beschäftigte
- ▶ Zement: 3.05 Milliarden Euro (Umsatz 2021), 8 000 Beschäftigte
- ▶ Glas: 12.28 Milliarden Euro (Umsatz 2023), 54 000 Beschäftigte

- ① 1.1. Bedeutung anorganisch-chemischer Stoffe
  
- ② 1.2. Generelles zur Projektierung chemischer Anlagen
  - Wirtschaftliche, technische und chemische Aspekte
  - Rohstoffe: Vorkommen, Förderung und Aufarbeitung
  - Stofftrennung
  - Stoffumwandlungen
  
- ③ 1.3. Inhalt (Prozess/Stoff-Auswahl)
  
- ④ 1.4. Literatur

- ① 1.1. Bedeutung anorganisch-chemischer Stoffe
  
- ② 1.2. Generelles zur Projektierung chemischer Anlagen  
Wirtschaftliche, technische und chemische Aspekte  
Rohstoffe: Vorkommen, Förderung und Aufarbeitung  
Stofftrennung  
Stoffumwandlungen
  
- ③ 1.3. Inhalt (Prozess/Stoff-Auswahl)
  
- ④ 1.4. Literatur

## ► Wirtschaftliches

- Kosten-Nutzen-Analyse, Gesamtkosten, Rentabilität
- Patentlage, Genehmigungen, Umweltauflagen, Nachhaltigkeit
- Verfügbarkeit der Rohstoffe und Betriebsmittel
- Marktlage, Absatz
- Anlagenstandort, Verkehrswege
- Personal

## ► Prozeßtechnisches für die Projektierung (Verfahrensauswahl, Kosten)

- Energie/Impuls/Stoff-Bilanzen (Kreisläufe!)
- Rohstoffe (Verfügbarkeit, Aufarbeitung)
- Betriebsmittel (Energie: Wärme, Kälte, Strom; Wasser; Gase)
- Umweltverträglichkeit (Emissionen, Wasser- und Luft-Reinhaltung, ...)

## ► Technische/chemische Teilschritte

- ① Rohstoff-Förderung, Transport, Vorbereitung und Lagerung
- ② ggf. Stofftrennungen vorab ✘
- ③ Stoffumwandlungen (chem. Reaktionstechnik) ✘
  - Energie/Impuls/Stoff-Bilanzen
  - Reaktoren: Bedingungen ( $T$ ,  $P$ , Atmosphäre,  $pH$ , Katalysatoren, Materialien etc.)
- ④ ggf. weitere nachgeschaltete Stofftrennungen ✘
- ⑤ Lagerung, Transport und Weiterverwertung des Endproduktes

- ① 1.1. Bedeutung anorganisch-chemischer Stoffe
  
- ② 1.2. Generelles zur Projektierung chemischer Anlagen
  - Wirtschaftliche, technische und chemische Aspekte
  - Rohstoffe: Vorkommen, Förderung und Aufarbeitung
  - Stofftrennung
  - Stoffumwandlungen
  
- ③ 1.3. Inhalt (Prozess/Stoff-Auswahl)
  
- ④ 1.4. Literatur

Rohstoffe sind ....

- ▶ **OC** ... praktisch nur **Erdöl** (l), Nachwachsende Rohstoffe
  - einfache und einheitliche Vorbereitung/Aufarbeitung (Rektifikation)
- ▶ **AC** ... i.A. **Feststoffe** (s)
  - bergmännischer Abbau
    - Übertage
    - Untertage
  - seltener speziellere Abbau/Förder-Verfahren
    - Aussolung (für lösliche Stoffe wie z.B. NaCl, KCl)
    - Schmelze (z.B. Schwefel nach FRASCH-Verfahren)
  - erfordern häufig spezielle Vorbereitung/Aufarbeitung ↓

## ① Zerkleinern

- **Ziele:**
  - Erzeugen günstiger Korngrößenverteilungen (auch für Handel)
  - Oberflächenvergrößerungen (für Weiterverarbeitung)
  - Aufschluß der Wertstoffe
- **Apparate:** Brech- und Mahlanlagen ( $Z^*$ )  $\Rightarrow$  ISO-10628-Symbole
  - Backen-, Walzen-, Kegel-Brecher usw.  
(s. z.B. [Web-Seite Fa. McLanahan](#))
  - Prall-, Kugel-, Schlüssel-Mühle usw.  
(z.B. Kugelmühle: [Prospekt Hersteller](#) und [im Einsatz](#))

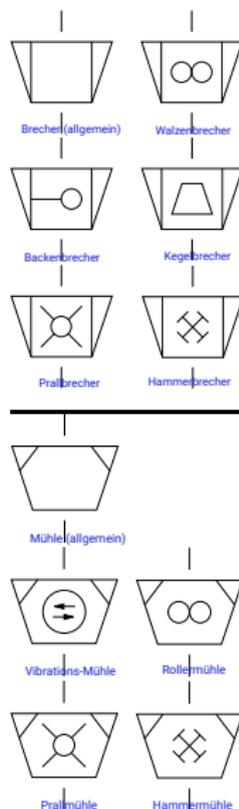
## ② Agglomeration (Kornvergrößerung)

- **Ziele:** Optimierung Schüttdichte, Fließeigenschaften, ...
- **Verfahren:**
  - Pelletieren
  - Brikettieren und Tablettieren (Preßagglomeration)
  - Sintern

## ③ Klassierung (Auftrennung in Korngrößenbereiche)

- **Verfahren:**
  - Siebklassierung: Roste und Siebe ( $F^*$ )
  - Stromklassierung: Schwerkraft- oder Zentrifugalklassierung (nass), Windsichtung

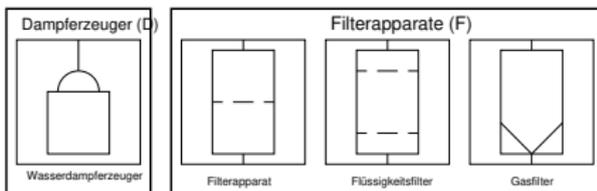
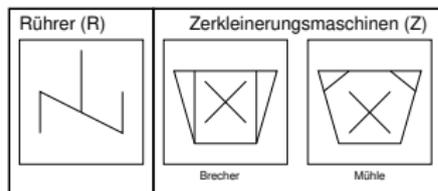
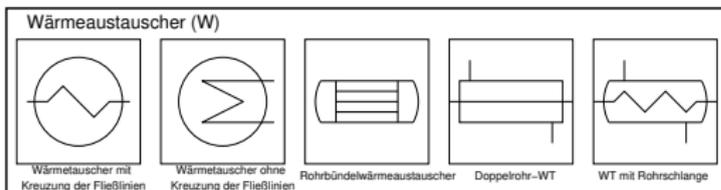
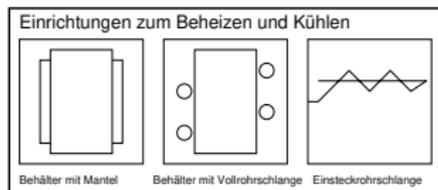
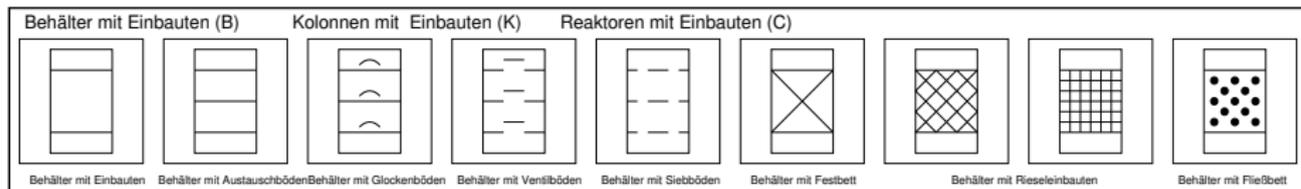
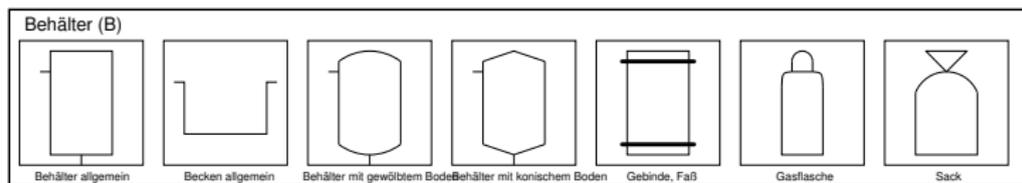
## ④ Förderung und Lagerung von Feststoffen ( $B, H^*$ )



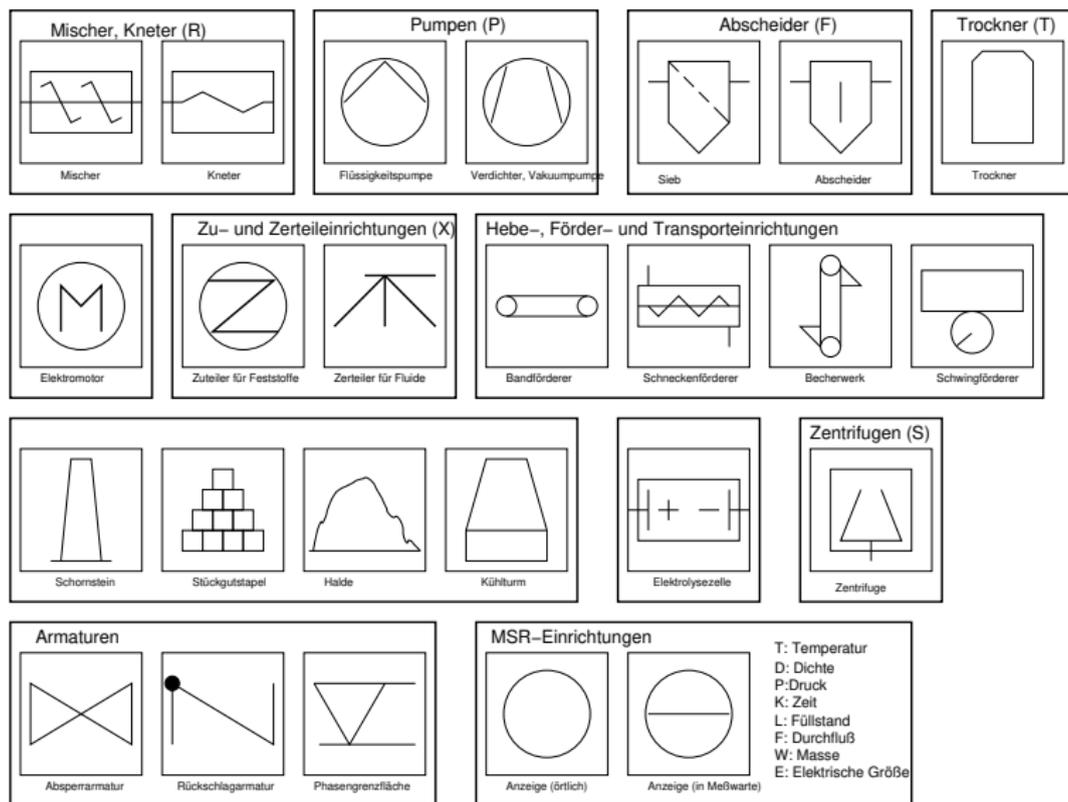
# Kennbuchstaben für Apparaturen u. Armaturen (DIN 28004)

Apparate, Maschinen und Geräte		Armaturen	
KBS	Benennung	KBS	Benennung
A	Apparate, Maschinen, soweit nicht in eine der nachstehenden Gruppen einzuordnen	A	Ableiter (Kondensatableiter)
B	Behälter, Tank, Bunker, Silo	F	Filter, Sieb, Schmutzfänger
C	Chemischer Reaktor	G	Schauglas
D	Dampferzeuger, Gasgenerator, Ofen	H	Hahn
F	Filterapparat, Flüssigkeitsfilter, Gasfilter, Siebapparat, Siebmaschine, Abscheider	K	Klappe
G	Getriebe	R	Rückschlagarmatur
H	Hebe-, Förder-, Transporteinrichtung	S	Schieber
K	Kolonne	V	Ventil
M	Elektromotor	X	Sonstige Armatur
P	Pumpe	Y	Armatur mit Sicherheitsfunktion
R	Rührwerk, Rührbehälter mit Rührer, Mischer, Knetter		
S	Schleudermaschine, Zentrifuge		
T	Trockner		
V	Verdichter, Vakuumpumpe, Ventilator		
W	Wärmeaustauscher		
X	Zuteil-, Zerteileinrichtung, sonstige Geräte		
Y	Antriebsmaschine außer Elektromotor		
Z	Zerkleinerungsmaschine		

# Normsymbole in Verfahrensfliessbildern (1) (EN ISO 10628)



# Normsymbole in Verfahrensfießbildern (2) (EN ISO 10628)



- ① 1.1. Bedeutung anorganisch-chemischer Stoffe
  
- ② 1.2. Generelles zur Projektierung chemischer Anlagen
  - Wirtschaftliche, technische und chemische Aspekte
  - Rohstoffe: Vorkommen, Förderung und Aufarbeitung
  - Stofftrennung**
  - Stoffumwandlungen
  
- ③ 1.3. Inhalt (Prozess/Stoff-Auswahl)
  
- ④ 1.4. Literatur

# I. Mechanische Stofftrennungen (s-s, s-l, s-g)

## ▶ Trennung nach Aggregatzuständen (ohne Stoffumwandlungen)

### ▶ s-s: Sortierverfahren

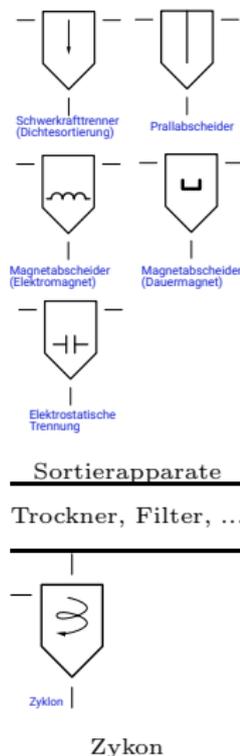
- Dichtesortierung
- Flotation
- Sortierung im Magnetfeld
- Sortierung im elektrischen Feld

### ▶ s-l: Sedimentation (ohne Löse/Kristallisations-Prozesse)

- Filtration (F\*)
- Zentrifugen (Hydrozyklone)
- Trocknen (T\*)

### ▶ s-g: Entstaubung

- Zyklone (F\*)



## II. Thermische Stofftrennung

- ▶ Trennungen mit Phasenumwandlungen  $\mapsto$  Mischphasenthermodynamik
- ▶ **l/g-l/g-Trennungen**  
[Verarbeitung von Gasen/Flüssigkeiten (OC, Pharma) ]
  - Rektifikation (A: Rektifikations-Kolonnen, ( $K^*$ ))
  - l-l-Extraktion (A: Kolonnen oder Mischer/Scheider-Batterien)
  - auch Kombinationen wie Extraktiv-Rektifikation etc.
- ▶ **s-l-Trennungen** (Lösen/Fällen)  
[wässrige Systeme: Salze; Schmelzen]
  - (fraktionierte/klassierende) Kristallisation
- ▶ **speziellere Verfahren**  
[i.A. nur kleine Tonagen, da kontinuierlicher Betrieb schwierig]
  - Ionenaustausch (ggf. gekoppelt mit Komplexbildung)
  - Trennung mit Membranen
  - Adsorption, Chromatographie

- ① 1.1. Bedeutung anorganisch-chemischer Stoffe
  
- ② 1.2. Generelles zur Projektierung chemischer Anlagen
  - Wirtschaftliche, technische und chemische Aspekte
  - Rohstoffe: Vorkommen, Förderung und Aufarbeitung
  - Stofftrennung
  - Stoffumwandlungen**
  
- ③ 1.3. Inhalt (Prozess/Stoff-Auswahl)
  
- ④ 1.4. Literatur

## ① Gasreaktionen

- meist als Druckreaktionen
- häufig mit heterogenen Katalysatoren
- **Reaktortyp:** Strömungsrohr (C\*)

## ② Reaktionen in flüssiger (i.A. wässriger) Phase

- Fällungen, reziproke Umsetzungen
- Neutralisationen
- Redoxreaktionen
- homogen-katalysierte Reaktionen
- **Reaktortyp:** meist Rührkessel(kaskade) (R\*)

## ③ Hochtemperaturreaktionen (Spezialität der AC)

- ... in Öfen (z.B. Drehrohrofen für Zement; Hochofen bei Fe/Stahl) (D\*)
- ... in Flammen (Pyritrösten, 'Carbon-Black'-Herstellung usw.)

## ④ Elektrochemische Prozesse (Elektrolysen) (Redox!)

- Schmelzfluss-Elektrolysen (Gewinnung unedler Metalle, z.B. Al, Na, ..)
- wässrige Elektrolysen
  - zur Metallgewinnung (z.B. Zn) oder Feinreinigung (Cu, Edelmetalle)
  - Nichtmetall(Verbindungen) mit hohen/niedrigen Oxidationsstufen (z.B. Chlor-Alkalielektrolyse)

---

\*: Kennbuchstabe

- ① 1.1. Bedeutung anorganisch-chemischer Stoffe
  
- ② 1.2. Generelles zur Projektierung chemischer Anlagen  
Wirtschaftliche, technische und chemische Aspekte  
Rohstoffe: Vorkommen, Förderung und Aufarbeitung  
Stofftrennung  
Stoffumwandlungen
  
- ③ 1.3. Inhalt (Prozess/Stoff-Auswahl)
  
- ④ 1.4. Literatur

## 1.3. Inhalt, Prozess/Stoff-Auswahl (für Vorlesung)

### ① Einleitung ✓

### ② Gase

- Edelgase,  $N_2$ ,  $O_2$  (Luftzerlegung, Trennverfahren, ohne Stoffumw.) ⇨
- Ammoniak (inkl. Wasserstoff; Gasreaktion) ⇨

### ③ Salze

- $KCl$  (Feststoffprozessierung ohne Stoffumwandlung) ⇨
- $Na_2CO_3$  (reziproke Umsetzung) ⇨
- Phosphate (Neutralisations- und Verdrängungsreaktionen)
- Chlorate und Perchlorate (elektrochemische Oxidation)

### ④ Säuren

- Schwefelsäure (über Gasreaktionen)
- Essigsäure (homogene Katalyse) ⇨
- Phosphorsäure (durch Verdrängungsreaktionen)
- Salpetersäure

### ⑤ Basen

- Chloralkali-Elektrolyse ⇨

### ⑥ Metalle

- Eisen, Stahl ⇨
- Kupfer ⇨
- Aluminium

### ⑦ Weitere Anorganische Grund- und Wertstoffe

- Zementklinker, Gläser, Düngemittel, Hochtemperaturwerkstoffe, Explosivstoffe, Halbleiter (Si), Pigmente (Carbon-Black,  $TiO_2$ ), ...

- ① 1.1. Bedeutung anorganisch-chemischer Stoffe
  
- ② 1.2. Generelles zur Projektierung chemischer Anlagen  
Wirtschaftliche, technische und chemische Aspekte  
Rohstoffe: Vorkommen, Förderung und Aufarbeitung  
Stofftrennung  
Stoffumwandlungen
  
- ③ 1.3. Inhalt (Prozess/Stoff-Auswahl)
  
- ④ 1.4. Literatur

- ▶ **Web-Links auf ruby**
- ▶ **Nachschlagewerke** (fortlaufend aktualisiert, leider kein Zugang in FR)
  - „Ullmann“: *Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley-VCH [6. Auflage, Bände 1-40 (2002)].
  - „Winnacker-Küchler“: *Chemische Technik*, Wiley-VCH [TC 3/1: 5. Auflage 2005, Bd. I - III, VIa,b (Metallurgie), VII]
  - „Kirk-Othmer“: *Encyclopedia of Chemical Technology*, Wiley-VCH [HB 10/14a]
- ▶ **Anorganische Verfahren** (nach Stoffklassen, ältere Auflagen s. [Bibl.])
  - K. H. Büchel, H.-H. Moretto, P. Woditsch: *Industrial Inorganic Chemistry*, Wiley VCH (2000).
  - M. Bertau, A. Müller, P. Fröhlich, M. Katzberg: *Industrielle Anorganische Chemie*, Wiley VCH, (2013). [AC 570/6a]
  - M. A. Benvenuto: *Industrial Inorganic Chemistry*, deGruyter (2015).
  - H.-H. Emmons et. al. *Grundlagen der Technischen Anorganischen Chemie*, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig (1983). [AC 570/7]
  - weitere Literatur bei den einzelnen Verfahren

### ► Prozeßkunde, Reaktionstechnik (E-Books zugänglich)

- G. Emig, E. Klemm, H. Freund: *Chemische Reaktionstechnik*, Springer Vieweg (2024).
- M. Baerns, A. Behr, A. Brehm, J. Gmehling, H. Hofmann, U. Onken, A. Renken: *Technische Chemie*, Wiley-VCH, Weinheim (2023).
- R. Güttel, Th. Turek, *Chemische Reaktionstechnik*, Springer Spektrum (2021).
- A. Behr, D. W. Agar, J. Jörissen, A. J. Vorholt: *Einführung in die Technische Chemie*, Springer Spektrum, Heidelberg (2016).
- U. Onken, A. Behr: *Chemische Prozeßkunde*, Thieme (1996). [TC 2/3] (Kap. 10, 11, und 12)

### ► Thermische Trennverfahren, Kristallisation

- B. Lohrengel: *Thermische Trennverfahren: Trennung von Gas-, Dampf- und Flüssigkeitsgemischen*, deGruyter Studium (2023).
- V. Gnielinski, A. Mersmann, F. Thurner: *Verdampfung, Kristallisation, Trocknung*, Springer Fachmedien (2013).
- P. Grassmann, F. Widmer, H. Sinn: *Einführung in die thermische Verfahrenstechnik* deGruyter (1997) [TC 300/4].

