

1. Einleitung



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

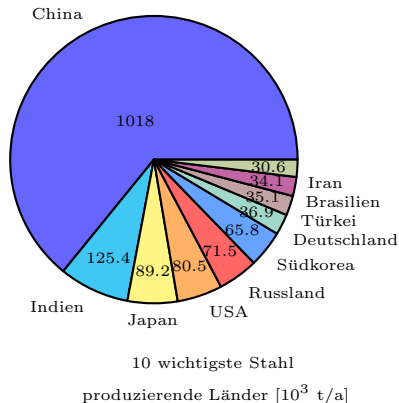
Anorganisch-chemische Produkte I

- ▶ 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 (Cl_2)	65 000	2 351	7 289 Europa, 2023
Ammoniak (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	
H_2SO_4 (SO_3)	231 000	2 831	19 000 China, 2023
Essigsäure (CH_3COOH)	12 100	29	
N-Düngemittel	90 800	5 216	
P-Düngemittel (P_2O_5)	43 000		
Kalisalze (K_2O)	29 100	2 962	
Al_2O_3		727	
TiO_2	6 560	245	

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

	Welt (2023)	Deutschland VCI (2023)
H ₂ [Mio. m ³]	50 000	3 036
O ₂ [Mio. m ³]		5 389
N ₂ [Mio. m ³]		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)
 - Na₂CO₃: 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](#))

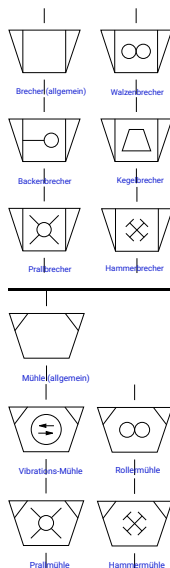
② Agglomeration (Kornvergrößerung)

- **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^*)

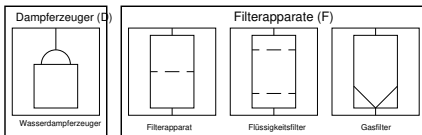
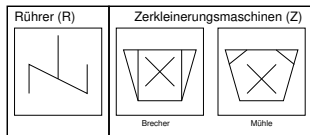
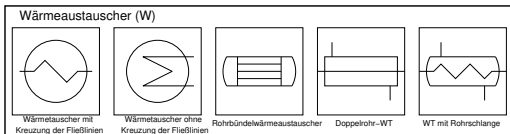
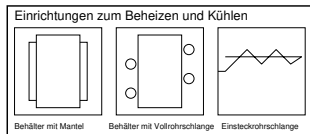
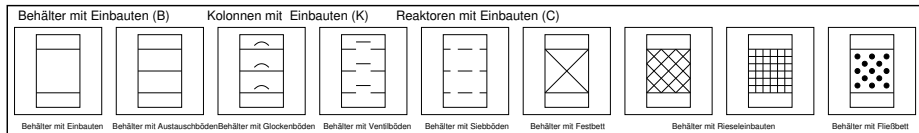
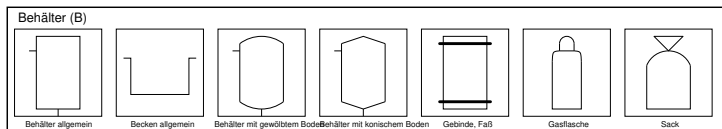


*: Kennbuchstabe (KBS) nach DIN 28004; rechts: P&ID Symbole nach EN ISO 10628

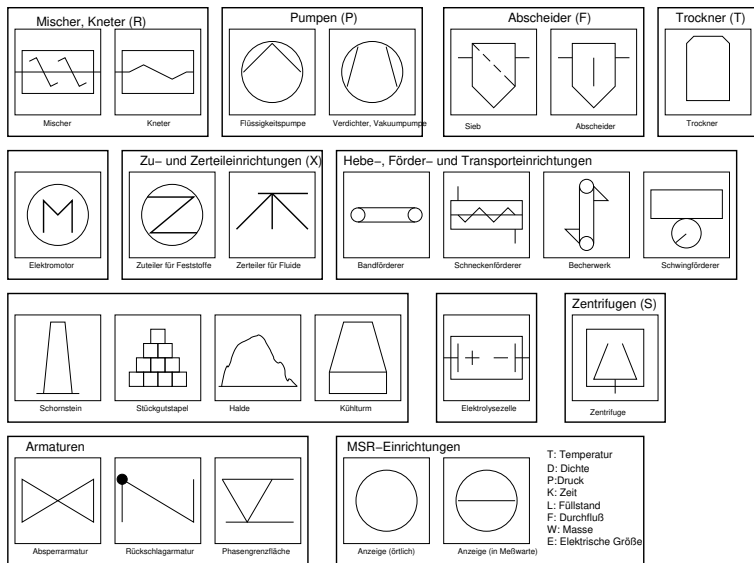
Kennbuchstaben für Apparaturen u. Armaturen (DIN 28004)

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

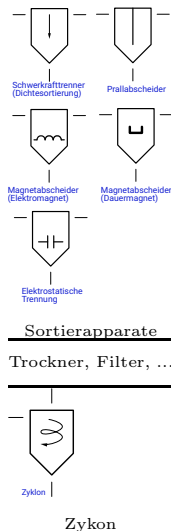
- Dichtesortierung
- Flotation
- Sortierung im Magnetfeld
- Sortierung im elektrischen Feld

▶ 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].

