

## 3.2. Soda (reziproke Umsetzung, Hochtemperaturöfen)

### 3. Salze



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

Caroline Röhr, Burkhard Butschke

Vorlesung: Technische Anorganische Chemie, WS 24/25

## ① Einleitung ✓

## ② Gase

- Edelgase,  $N_2$ ,  $O_2$  (Luftzerlegung, Rektifikation) ✓
- 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 (technische 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 Einleitung
- ② Allgemeines zu reziproken Umsetzungen
- ③ Reaktionsschritte des SOLVAY-Prozesses (PC)
- ④ Verfahrenstechnisches
- ⑤ Produkte, Produktion
- ⑥ Zusammenfassung und Literatur

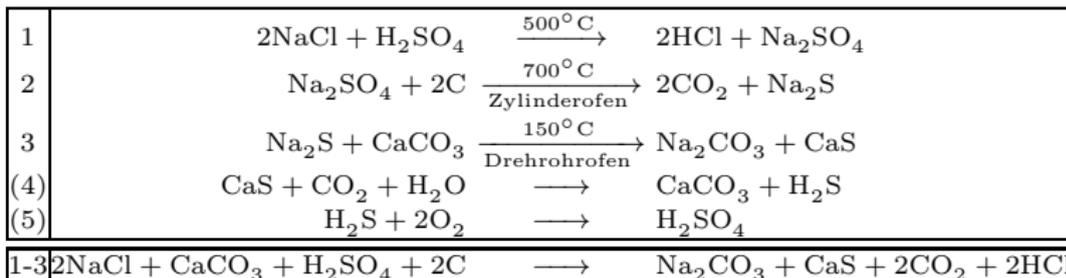
- ① **Einleitung**
- ② Allgemeines zu reziproken Umsetzungen
- ③ Reaktionsschritte des SOLVAY-Prozesses (PC)
- ④ Verfahrenstechnisches
- ⑤ Produkte, Produktion
- ⑥ Zusammenfassung und Literatur

- ▶ Soda bereits im frühen Altertum bekannt (Glasherstellung!)
  - pflanzlicher (Pflanzenaschen) oder
  - mineralischen Ursprung (Natronseen in Ägypten: Wadi Natrun)
- ▶ bereits ab 1820: synthetische Soda, historisch interessant für Entwicklung der chemischen Technologie ↓
- ▶ heute ausschliesslich SOLVAY-Prozess (+ natürliche Quellen)
- ▶ Produktion (2023):  $52 \cdot 10^6$  t/a (D:  $2.125 \cdot 10^6$  t/a)
- ▶ Verwendung
  - Glasherstellung
  - zahlreiche weitere Salze, z.B. Li-Aufbereitung/ $\text{Li}_2\text{CO}_3$  (Li-Ionen-Akkus)
  - Reinigungszwecke, Färben und Bleichen von Wäsche
  - Medizin, Nahrungsmittel etc.
- ▶ neuere Entwicklungen
  - Nutzung natürlicher Recourcen
  - Verringerung durch Brennstoff C beim Kalkbrennen auftretenden  $\text{CO}_2$ -Emissionen
- ▶ im Labor/Technikums-stadium
  - CODA: 'Carbon-negative sODA ash': NaOH elektrochemisch; Einleiten von antropogenem  $\text{CO}_2$
  - **geplante Anlage**
  - 'Green-Soda Process, 'bipolare Elektrodialyse' (**noch im Laborstadium**)

# Übersicht Verfahren I: LE-BLANC-Verfahren

- ▶ erste technisch realisierte Synthese, aus Glaubersalz
- ▶ **NICOLAS LE-BLANC** ⇒
  - 1775 Preis der Akademie der Wissenschaften (wegen politischer Wirren nicht ausgezahlt)
  - 1806 Selbstmord im Armenhaus
  - 1820 erste LEBLANC-Fabriken
    - von 1820 - 1880 technisch wichtiges Verfahren
  - 1920 vom SOLVAY-Verfahren verdrängt

## ▶ Verfahrensprinzip



## ▶ Nachteile

- Festphasenreaktionen bei hohen  $T \mapsto E$ -aufwändig
- Zwangsanfall von HCl und CaS



NICOLAS LEBLANC  
(1742-1806)

# Übersicht Verfahren II: SOLVAY-Verfahren

## ► Historisches

- 1811: Idee von **AUGUSTIN FRESNEL** (1788-1827)  
$$\text{NaCl} + \text{NH}_4\text{HCO}_3 \xrightarrow[\text{Umsetzung}]{\text{reziproke}} \text{NaHCO}_3 + \text{NH}_4\text{Cl}$$
- ab 1852: Kopplung mit  $\text{NH}_3$ -Kreislauf
- technische Realisation durch **ERNEST SOLVAY**  $\Rightarrow$
- 1865: erste Anlage
- aus SOLVAY-Produktion hervorgegangene Firmen:
  - Fa. Solvay (bis heute eigenständig)
  - England: ICI (bis 2007), jetzt Teil von AkzoNobel
  - Deutschland: BASF



ERNEST SOLVAY  
(1838-1922)

## ► Nachteile: *E*-aufwendig, Abfallproblematik $\text{CaCl}_2$

## ► Verfahrensprinzip:

1	$\text{NH}_3$ und $\text{CO}_2$ in	$2\text{NH}_3 + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{NH}_4\text{HCO}_3$
2	$\text{NaCl}$ -Lösung einleiten	$2\text{NH}_4\text{HCO}_3 + 2\text{NaCl} \longrightarrow 2\text{NaHCO}_3 \downarrow + 2\text{NH}_4\text{Cl}$
3	Calciniierung	$2\text{NaHCO}_3 \xrightarrow{150^\circ\text{C}} \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$
4	Calciniierung	$\text{CaCO}_3 \xrightarrow{1000^\circ\text{C}} \text{CaO} + \text{CO}_2$
5	$\text{NH}_3$ -Rückgewinnung	$2\text{NH}_4\text{Cl} + \text{CaO} \longrightarrow 2\text{NH}_3 + \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$
1-5	Gesamtreaktion	$2\text{NaCl} + \text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CaCl}_2$

## ▶ Verfahrensprinzip

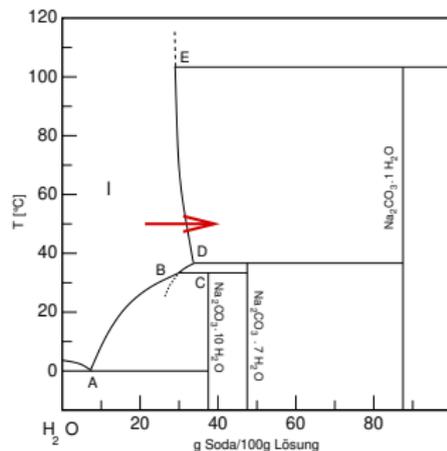
Einleiten von CO<sub>2</sub> in Natronlauge:



- ▶ bei NaOH-Überproduktion durch Chloralkalielektrolyse ( $\mapsto \text{NaOH} + \text{Cl}_2$ )
- ▶ umweltfreundliches Verfahren
- ▶ Standard für K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

# Übersicht Verfahren IV: Aufarbeitung von Natursoda

- ▶ seit 1985 ausschließliche Herstellungsmethode in den USA
- ▶ steigende Bedeutung auch in Europa
- ▶ Rohstoffe
  - mineralisch: Trona:  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (Vorräte:  $40 \cdot 10^9$  t, **Wyoming, USA**)
  - in Salzseen, z.B. in Kalifornien (Vorräte  $600 \cdot 10^6$  t), Kenia, südliche Sahara
- ▶ verschiedene Prozesse, z.B. 'Monohydrat'-Prozess
  - Untertage-Abbau von Trona
  - Calcinierung des Rohsalzes
  - Auflösen in Wasser
  - Abfiltrieren unlöslicher Anteile
  - Eindampfen des Filtrats
    - ↳  $T > 35$  °C: Kristallisation des Monohydrats ⇒
  - ggf. Entwässern des Monohydrates



Phasendiagramm  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ - $\text{H}_2\text{O}$

- ① Einleitung
- ② Allgemeines zu reziproken Umsetzungen
- ③ Reaktionsschritte des SOLVAY-Prozesses (PC)
- ④ Verfahrenstechnisches
- ⑤ Produkte, Produktion
- ⑥ Zusammenfassung und Literatur

# Prinzip reziproker Umsetzungen



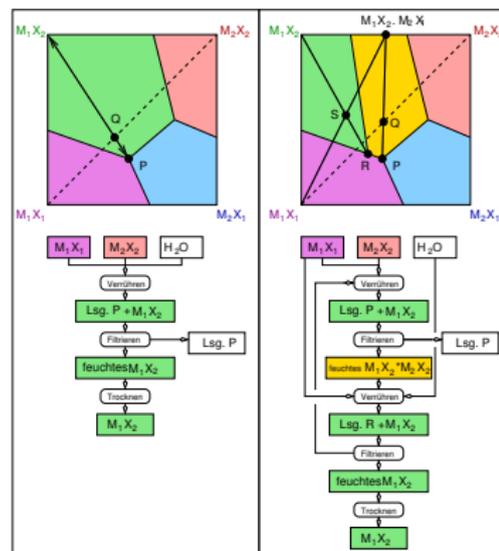
▶ Gleichgewichtsdiagramme/Phasenregel

- 4 Salze +  $H_2O$ , d.h.  $C = 5$ :  $F + P = C + 2 = 7$
- $p = \text{konst.}$ ,  $T = \text{konst.}$  (isotherm, isobar):  
 $F + P = 5$
- Höhenlinien = Isohydrolinien (gleicher Wassergehalt)
- Punkte = Verhältnis der Salze, z.B.  
P 3 Salze  $\mapsto$  2 Freiheiten ( $H_2O$ -Gehalt + Gesamtmenge der Salze)

- Ecken = reine Salze/Lösung reiner Salze (2 Phasen PD, da  $H_2O$ -Gehalt variabel)
- Linien = Mischungen zweier Salze +  $H_2O$  (3 Phasen PD)
- Eindampfen  $\mapsto$  Ausscheidung der 'Eck'salze
- Zusammensetzung der Lösung entsprechend Hebelgesetz

▶ ohne Mischkristallbildung (links)

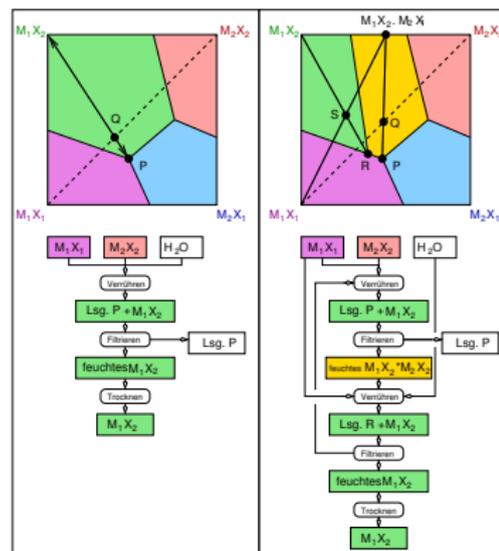
▶ mit Mischkristallbildung (rechts)



Phasendiagramm und Kristallisationsprinzipien für reziproke Umsetzungen

# Prinzip reziproker Umsetzungen

- ▶ Reaktion:  $M_1X_1 + M_2X_2 \longrightarrow M_1X_2 + M_2X_1$
- ▶ Gleichgewichtsdiagramme/Phasenregel
  - $p=\text{konst.}, T=\text{konst.}: F + P = 5$
- ▶ ohne Mischkristallbildung (links)
  - Mischung von  $M_1X_1 + M_2X_2$  mit Verhältnis Q
  - Unterschreiten der Hydrolinie (entweder da 'Berg' bei  $M_1X_2$  hoch ist bzw. durch Eindampfen)  $\mapsto M_1X_2 \downarrow + \text{Lsg. P}$
- ▶ mit Mischkristallbildung (rechts)
  - Mischung von  $M_1X_1 + M_2X_2$  mit Verhältnis Q
  - Doppelsalz kristallisiert  $\mapsto \text{Lsg. P}$
  - Doppelsalze mit  $M_1X_1$  versetzen  $\mapsto S$
  - beim Eindampfen Kristallisation von  $M_1X_2$



Phasendiagramm und Kristallisationsprinzipien für reziproke Umsetzungen

# Verwendung reziproker Umsetzungen

Produkt	Herstellungsverfahren/Reaktion	Lösungsmittel
Soda (Teilrkt.)	$\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl} + \text{CO}_2 + \text{NH}_3 \rightleftharpoons \text{NaHCO}_3 + \text{NH}_4\text{Cl}$	$\text{H}_2\text{O}$
Natriumsulfat	$\text{MgSO}_4 + 2\text{NaCl} \rightleftharpoons \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{MgCl}_2$	$\text{H}_2\text{O}$
Ammoniumsulfat	$\text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_4 + 2\text{NH}_3 + \text{CO}_2 \rightleftharpoons (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + \text{CaCO}_3$	$\text{H}_2\text{O}$
Kaliumsulfat	$\text{MgSO}_4 + 2\text{KCl} \rightleftharpoons \text{K}_2\text{SO}_4 + \text{MgCl}_2$	$\text{H}_2\text{O}$
Kaliumnitrat	$\text{NaNO}_3 + \text{KCl} \rightleftharpoons \text{KNO}_3 + \text{NaCl}$	$\text{H}_2\text{O}$
Kaliumchlorat	$\text{NaClO}_3 + \text{KCl} \rightleftharpoons \text{KClO}_3 + \text{NaCl}$	$\text{H}_2\text{O}$
Kaliumsulfat	$\text{MgSO}_4 + 2\text{KCl} \rightleftharpoons \text{K}_2\text{SO}_4 + \text{MgCl}_2$	$\text{H}_2\text{O}/\text{CO}(\text{NH}_2)_2$
	$\text{MgSO}_4 + 2\text{KCl} \rightleftharpoons \text{K}_2\text{SO}_4 + \text{MgCl}_2$	$\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_3\text{OH}$
	$\text{Na}_2\text{SO}_4 + 2\text{KCl} \rightleftharpoons \text{K}_2\text{SO}_4 + 2\text{NaCl}$	$\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_3\text{OH}$
	$\text{CaSO}_4 + 2\text{KCl} \rightleftharpoons \text{K}_2\text{SO}_4 + \text{CaCl}_2$	$\text{H}_2\text{O}/\text{NH}_3$
Kaliumnitrat	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + 2\text{KCl} \rightleftharpoons 2\text{KNO}_3 + \text{CaCl}_2$	$\text{H}_2\text{O}/\text{CO}(\text{NH}_2)_2$

► Bedeutung von KCl (Kap. 3.1.)

► Apparate:

- kontinuierliche oder diskontinuierliche Rührwerksbehälter
- Filter (s.u.)

- ① Einleitung
- ② Allgemeines zu reziproken Umsetzungen
- ③ Reaktionsschritte des SOLVAY-Prozesses (PC)
- ④ Verfahrenstechnisches
- ⑤ Produkte, Produktion
- ⑥ Zusammenfassung und Literatur

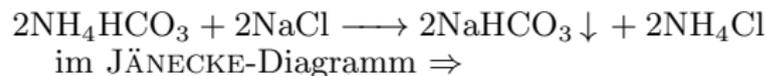
# Reziproke Umsetzung (Schritte ❶ und ❷)

## ❶ Herstellen der Ausgangslösung:

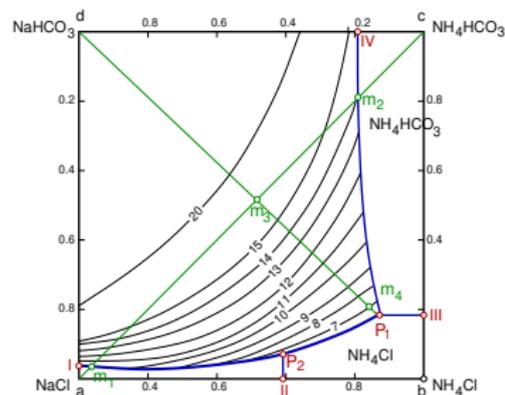


- Einleiten von  $\text{NH}_3 + \text{CO}_2$  in gesättigte NaCl-Lösung
- zuerst besser lösliches  $\text{NH}_3$ , dann  $\text{CO}_2$

## ❷ eigentliche reziproke Umsetzung:

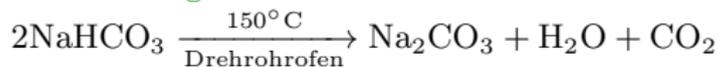


- isotherm,  $T = 30^\circ\text{C}$
- Mischung NaCl +  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  bei  $m_3$
- gesättigte Lsg:  $17.5 \text{ kmol}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kmol}_{\text{Salz}}$
- $\text{H}_2\text{O}$ -Gegehalt aber durch Reaktion erniedrigt:  
 $\text{NH}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{NH}_4\text{HCO}_3$
- $\mapsto$  Startlösung mit  $9.7 \text{ kmol}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kmol}_{\text{NaCl}}$   
nicht ganz gesättigt
  - $\mapsto$  ca.  $7 \text{ kmol}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kmol}_{\text{Salz}}$
  - $\mapsto \text{NaHCO}_3 \downarrow + \text{Lsg. } m_4$
- $m_3$  so, dass  $m_4$  nahe  $P_1 \mapsto$  sehr hoher  $\text{NaHCO}_3$  (fest)-Anteil, ohne dass  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  kristallisiert

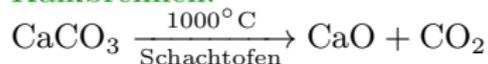


JÄNECKE-Diagramm

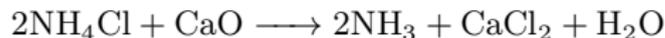
### 3 Calcinierung:



### 4 Kalkbrennen:



### 5 NH<sub>3</sub>-Rückgewinnung (Stripping):



- ① Einleitung
- ② Allgemeines zu reziproken Umsetzungen
- ③ Reaktionsschritte des SOLVAY-Prozesses (PC)
- ④ Verfahrenstechnisches**
- ⑤ Produkte, Produktion
- ⑥ Zusammenfassung und Literatur

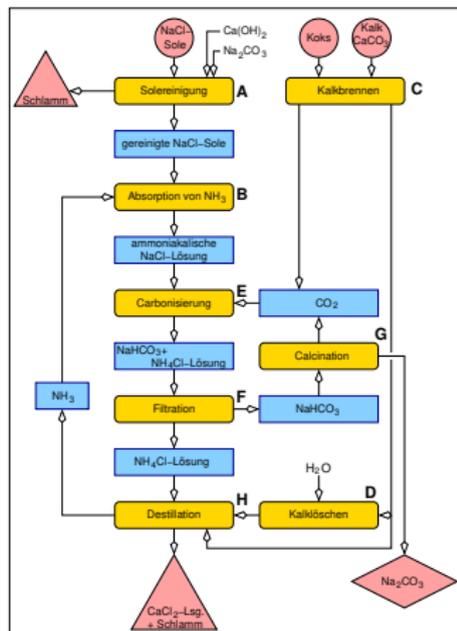
# Reaktionen und Prozess-Schritte: Übersicht

## ▶ Reaktionen

- 1  $2\text{NH}_3 + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{NH}_4\text{HCO}_3$
- 2  $2\text{NH}_4\text{HCO}_3 + 2\text{NaCl} \longrightarrow 2\text{NaHCO}_3 \downarrow + 2\text{NH}_4\text{Cl}$  (reziproke Umsetzung)
- 3  $2\text{NaHCO}_3 \xrightarrow{150^\circ\text{C}} \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$   
(Calcinierung)
- 4  $\text{CaCO}_3 \xrightarrow{1000^\circ\text{C}} \text{CaO} + \text{CO}_2$  (Kalkbrennen)
- 5  $2\text{NH}_4\text{Cl} + \text{CaO} \longrightarrow 2\text{NH}_3 + \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$   
(Ammoniak-Stripping)

## ▶ Prozess-Schritte und -Apparate

- A Solereinigung
- B Absorption von  $\text{NH}_3$  1
- C Kalkbrennen 4
- D Kalklöschen
- E Carbonisierung 2
- F Abtrennung von  $\text{NaHCO}_3$  2
- G Calcinierung von  $\text{NaHCO}_3$  3
- H Ammoniak-Stripping 5



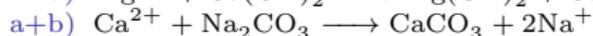
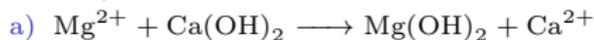
# A+B: Herstellung der ammoniakalischen NaCl-Lösung

## ► Startlösung

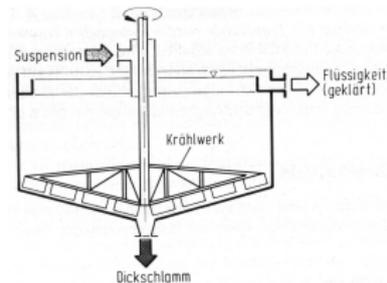
- gesättigte NaCl-Lösung (310 g/l)
- aus untertägiger Solung oder
- durch Auflösung von Festsalz

## A Solereinigung

- Entfernung von  $Mg^{2+}$  und  $Ca^{2+}$
- Zugabe von  $Ca(OH)_2$  (gel. Kalk, a) und  $Na_2CO_3$  (Soda, b)



- sonst: Verkrustung durch Carbonate, Hydrogencarbonate, 'Tripelsalz'  
 $NaCl \cdot MgCO_3 \cdot Na_2CO_3$  (sehr hart!)
- Filteranlagen und Absitzbecken  $\leftrightarrow$  Schlamm z.B. Kläreindicker:  $\Rightarrow$



## B Sättigung der Sole mit $NH_3$

- $NH_3$ , aus Stripping zurückgewonnen
- exotherm
- im Gegenstrom, meist in Glockenbodenkolonnen (vgl. Luftzerlegung)

# C+D: Kalkbrennen und -löschen

## ► Rohstoff Kalk

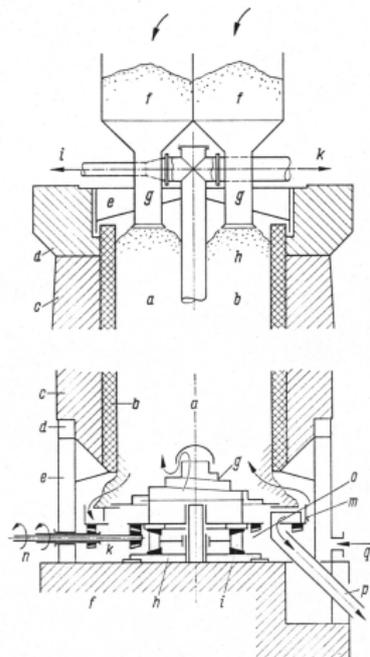
- $\text{CaCO}_3$  liefert  $\text{Ca(OH)}_2$  (für  $\text{NH}_3$ -Rückgewinnung) +  $\text{CO}_2$  ④
- hohe Reinheit erforderlich

## C Kalkbrennen

- $T = 1050 - 1100 \text{ }^\circ\text{C}$
- Apparate: vertikale Schachtöfen  $\Rightarrow$
- Betrieb:
  - oben: Aufgabe von Kalk ( $> 4\text{cm}$ ) + Koks (andere Brennstoffe möglich)
  - von unten: Luft im Gegenstrom
  - oben: Austritt von  $\text{CO}_2$ , Kühlung mit Wasser, Kompression
  - unten: Austrag von Branntkalk ( $\text{CaO}$ )
- Verbrauch: ca. 1.1 t Kalk und 120 kg C pro 1 t Soda

## D Kalklöschen

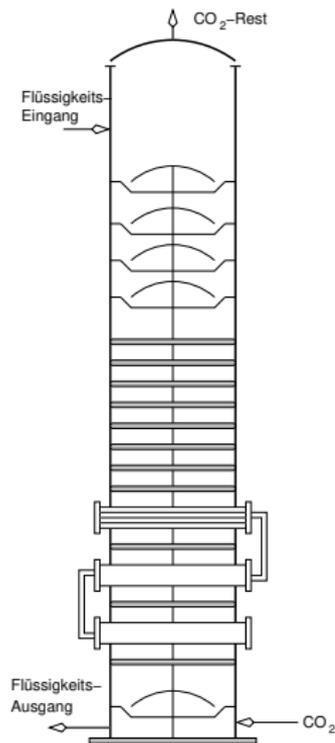
- in horizontalen Drehtrommeln
- +  $\text{H}_2\text{O} \mapsto$  Kalkbrei/Kalkmilch, gerade noch pumpbar



# E: Carbonisierung der ammoniakalischen NaCl-Lösung

## E Carbonisierung der ammoniakalischen NaCl-Lösung

- exothermer Prozess: ②
$$\text{NaCl} + \text{NH}_4\text{HCO}_3 \longrightarrow \text{NaHCO}_3 + \text{NH}_4\text{Cl}$$
- Apparate: Fällturm, SOLVAY-Kolonne, Carbonisierungskolonne
  - bis 30 m hoch, 3 m breit
  - Passetten-Einbauten mit zentraler Öffnung
  - Erwärmung bis ca. 60 °C
  - Verkrustungsprobleme (Kolonnen-Paare ermöglichen Zwischenreinigung)
- Betrieb:
  - von oben: Durchleiten der Lösung
  - von unten: ca. 3 at CO<sub>2</sub> (von Kalkbrennen und Calciniierung)
  - unten: Wärmetauscher als Kühlelemente (Suspension unten:  $T = 20 - 30 \text{ }^\circ\text{C}$ )



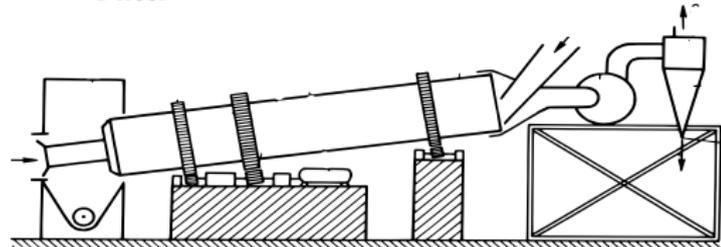
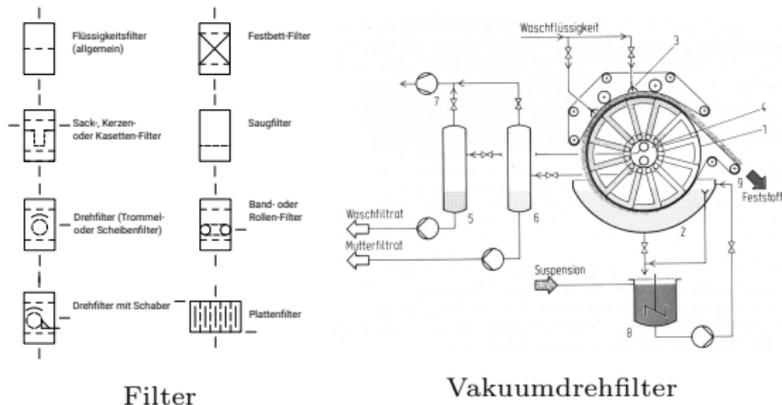
# F + G: Abtrennung und Calcinierung von $\text{NaHCO}_3$

## F Abtrennung von $\text{NaHCO}_3$

- auskristallisiertes  $\text{NaHCO}_3$  (Bicarbonat)  $\rightarrow$  Abtrennen durch Filtration
- Apparate:
  - kontinuierliche Vakuumdrehfilter  $\Rightarrow$
  - diskontinuierlich: Plattenfilter
- typische Produktzusammensetzung:
  - 75 %  $\text{NaHCO}_3$
  - 7 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$
  - 3.5 %  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$
  - Rest:  $\text{H}_2\text{O}$

## G Calcinierung von $\text{NaHCO}_3$ ③

- Drehrohrofen  $\Rightarrow$
- 180 bis 200 °C
- von innen (Heißdampf, in Rohren geführt) oder von außen beheizt

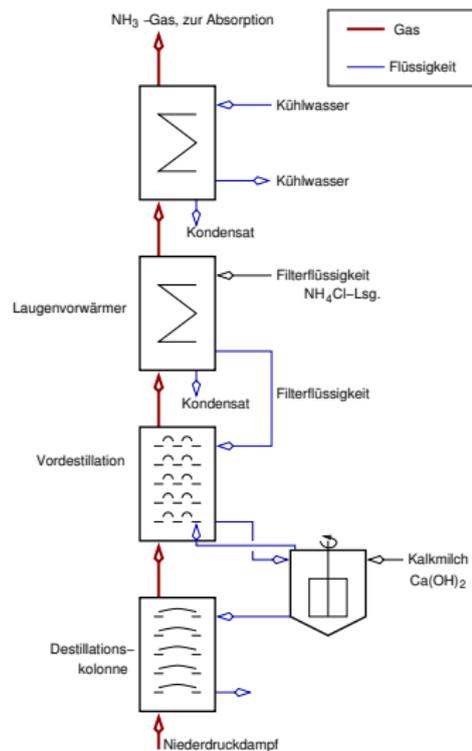


Drehrohrofen (schematisch)

# H: Rückgewinnung von $\text{NH}_3$ (Stripping)

## H Rückgewinnung von $\text{NH}_3$ (Stripping) ⑤

- Zersetzung von  $\text{NH}_4\text{Cl}$  mit Kalkmilch
- mehrstufiger Prozess (sog. Stripping)
  - ① Laugenvorwärmung
  - ② Vordestillation (Entfernung von  $\text{CO}_2$ )
  - ③ carbonatfreie Lauge mit Kalkmilch versetzen
  - ④ entbundener  $\text{NH}_3$  wird mit Dampf angetrieben (Destillation)
- Apparate: Destillieren mit Einbauen, Verkrustungsgefahr!



- ① Einleitung
- ② Allgemeines zu reziproken Umsetzungen
- ③ Reaktionsschritte des SOLVAY-Prozesses (PC)
- ④ Verfahrenstechnisches
- ⑤ Produkte, Produktion**
- ⑥ Zusammenfassung und Literatur

## ▶ Rohstoff- und Energiebilanz (pro t Soda)

- ca. 1500 kg NaCl
- ca. 1100-1250 kg Kalkstein  $\text{CaCO}_3$
- 1 - 1.5 kg Ammoniak-Verlust
- ca. 120 kg Koks (für Calcinierbetrieb)
- ca. 1200 kg Dampf (für  $\text{NH}_3$ -Stripping)

## ▶ Abprodukte

- $\text{CaCl}_2$  (unverkäuflich, Abwasserproblem)

## ▶ Preis

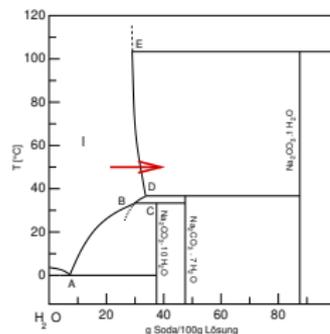
- 2024: 270 - 360 US\$/t

## ▶ Produktion

- 2014:  $42 \cdot 10^6$  t/a; davon 35 % Natursoda (1994)
- 2023:  $52 \cdot 10^6$  t/a (D:  $2.125 \cdot 10^6$  t/a)
- Hauptproduzent USA (ca. 40 % der Weltproduktion)

## ▶ Produkte (s. Phasendiagramm)

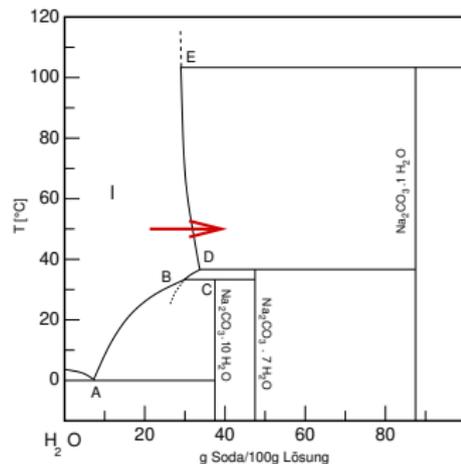
- wasserfreies  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 'leichte' Soda
- Monohydrat  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , 'schwere' Soda
- Kristallsoda  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$



PD  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ - $\text{H}_2\text{O}$

## ► Produkte (s. Phasendiagramm $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$ )

- wasserfreies  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 'leichte' Soda
  - Schüttgewicht:  $0.6\text{-}0.7 \text{ t/m}^3$
  - häufig unverwünscht wegen schlechter Wärmeleitfähigkeit  $\rightarrow$  ungeeignet für Schmelzprozesse
  - hygroskopisch ( $\downarrow$ )
- Monohydrat  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , 'schwere' Soda
  - Schüttgewicht:  $1.05 \text{ t/m}^3$
  - Kristallisation aus gesättigten Lsg. bei  $T > 35^\circ\text{C}$
  - Herstellung durch 'Anwässerung' und anschließende Trocknung
- Kristallsoda  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 
  - verwittert zum Monohydrat
  - gut wasserlöslich  $\rightarrow$  ursprünglich für Haushalt und Wäscherei
  - heute kaum noch verwendet/hergestellt



Phasendiagramm  $\text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O}$

- ▶ sehr vielseitige Chemikalie
- ▶ ca. 85 % für Glas- und Chemie-Industrie
- ▶ **Einsatzgebiete**
  - **Glasindustrie** (Hauptverbraucher) ca. 50 %
    - Bestandteil des Ausgangsgemenges der Glasherstellung
    - Aufschluß von  $\text{SiO}_2$ ; 40 % für Flaschenglas
  - **chem. Industrie** ca. 20 %
    - diverse Na-Salze von Oxosäuren (Phosphate, Silicate (Wasserglas), Chromate, Hydrogencarbonate Sulfite, Nitrite, Peroxide, Tonerde, anorg. Pigmente)
    - Farben, Pharmazeutika, Wasch- und Reinigungsmittel
  - **sonstige Verbraucher**
    - Textilien, Zellstoff- und Papier-Industrie
    - Wasserenthärtung, Gasreinigung,
    - Stahlerzeugung (Reduktion der S- und P-Gehalte)
    - Leder-, Gummi-, Zucker- und Nahrungsmittel-Industrie

- ① Einleitung
- ② Allgemeines zu reziproken Umsetzungen
- ③ Reaktionsschritte des SOLVAY-Prozesses (PC)
- ④ Verfahrenstechnisches
- ⑤ Produkte, Produktion
- ⑥ Zusammenfassung und Literatur

## Bücher und Artikel

- ▶ Ch. Thieme, Sodium Carbonates; in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH (2012).

## Links

- ▶ [Fa. Solvay](#)

## ① Einleitung ✓

## ② Gase

- Edelgase,  $N_2$ ,  $O_2$  (Luftzerlegung, Rektifikation) ✓
- 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 (technische Elektrolyse) ⇨

## ⑥ Metalle

- Eisen, Stahl ✓
- Kupfer
- Aluminium

## ⑦ Weitere Anorganische Grund- und Wertstoffe

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