

5.1. Chloralkali-Elektrolyse (technische Elektrolysen)

5. Basen



http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/Seminare/chloralkalielektrolyse_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

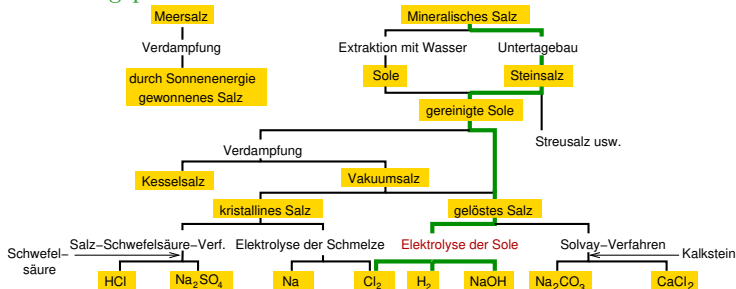
7 Weitere Anorganische Grund- und Wertstoffe

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

- ① Einleitung
- ② Vorbehandlungen der Sole
- ③ ① Diaphragma-Verfahren
- ④ ② Amalgam-Verfahren
- ⑤ ③ Membran-Verfahren
- ⑥ Vergleich der Verfahren
- ⑦ Eigenschaften, Produktionszahlen und Verwendung der Produkte
- ⑧ Literatur

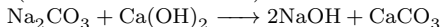
- ① **Einleitung**
- ② Vorbehandlungen der Sole
- ③ ① Diaphragma-Verfahren
- ④ ② Amalgam-Verfahren
- ⑤ ③ Membran-Verfahren
- ⑥ Vergleich der Verfahren
- ⑦ Eigenschaften, Produktionszahlen und Verwendung der Produkte
- ⑧ Literatur

► NaCl und Folgeprodukte

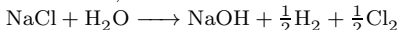


► Historisches

<1890 Kaustifizierung von Soda (NaOH = 'caustic soda')



>1890 Diaphragma- und Amalgamverfahren, elektrochemische Gewinnung

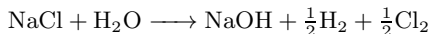


>1970 Membran-Verfahren

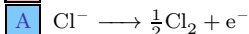
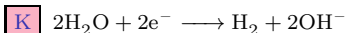
- Koppelprodukte: 1 t Cl₂ ↔ 1.13 t NaOH = 315 m³ H₂
- erste und bis heute wichtige grosstechnische (wässrige) Elektrolyse

- ▶ Elektrolyse einer wässrigen NaCl-Lösung

- ▶ Gesamtreaktion



- ▶ Teilreaktionen:

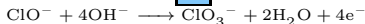


- ▶ Trennung von Anionen- und Kationen-Raum erforderlich da:

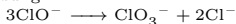
- $\text{H}_2 + \text{Cl}_2 = \text{Chlorknallgas (!)}$
- $\text{Cl}_2 + 2\text{OH}^- \longrightarrow \text{Cl}^- + \underbrace{\text{OCl}^-}_{\text{Hypochlorit}} + \text{H}_2\text{O}$ (Disproportionierung)

- \mapsto damit verbunden weitere Nebenreaktionen:

- elektrochemische Chlorat-Bildung, **A**

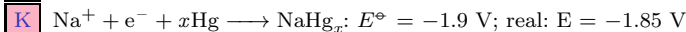
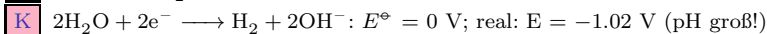
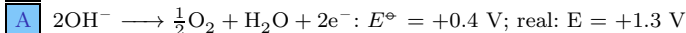
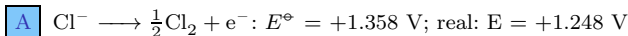


- chemische Chlorat-Bildung:



▶ **Gesamtreaktion:** $\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{NaOH} + \frac{1}{2}\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{Cl}_2$; $\Delta H = 217.9 \text{ kJ/mol}$

▶ **Redoxpotentiale**



▶ **Überspannungen** (η , bis zu 1 V) und reale Potentiale, abhängig vom

- NaCl-Konzentration, pH-Wert
- Fremdionen (Übergangsmetalle W, Mo, Fe, V usw.)
- Temperatur
- Stromdichten
- Elektrodenmaterial

▶ **Elektrodenmaterialien**

A hohe Überspannung für O_2 -Bildung an Graphit (früher) oder Edelmetallbeschichtete Ti-Bleche (heute für alle Verfahren)

K Hg (Amalgamverfahren: H_2 -Bildung unterdrückt); Membranverfahren: Ni

▶ **minimale Potentiale** ϵ (real ca. + 1 V)

- Diaphragma-Verfahren: $\epsilon = 2.27 \text{ V}$
- Amalgam-Verfahren: $\epsilon = 3.1 \text{ V}$

① Diaphragma-Verfahren (GRIESHEIM-Zelle)

- ältestes Verfahren, seit 1885 im Einsatz
- letzte zugelassene Anwendung von Chrysotil-Asbest
- keine Neuanlagen, Europa 2016: 13.9 %

② Amalgam-Verfahren (CASTNER-KELLNER-Verfahren)

- seit 1892 im Einsatz

1987 Verbot des Verfahrens in Japan

2003 USA: < 10 %; Europa: ca. 40 %

2016 Europa: 17.4 %

17.12.2017 Abschaltung der Anlagen (zur Chlor-Produktion) in Europa

2025 Minamata Convention: *'Mercury-cell chlor-alkali production is to be phased out'*
(Mitgliedsländer und Umsetzung s. <https://minamataconvention.org>)

③ Membran-Verfahren

> 1970 für alle Neuanlagen verwendet

▶ Entwicklung der Anteile der drei Verfahren (nur Europa!) Grafik für 2024 (S. 14)

1996 Amalgam: 64 %; Membran: 11 %; 24 % Diaphragma

2000 Amalgam: 54 %; Membran: 21 %; 23 % Diaphragma

2006 Amalgam: ca. 43 %

2011 Amalgam: 32 %; Membran: 51.5 %; 14 % Diaphragma

2016 Amalgam: 17.4 %; Membran: 66 %; 13.9 % Diaphragma

11.12.2017 Verbot des Amalgamverfahrens in Europa (Umsetzung Minamata Convention, s.u.)

2025 Diaphragma-Verfahren noch bei 8.4 %, aber Asbest-freie Membranen

▶ NaOH-Produktion

1950 $5.0 \cdot 10^6$ t/a (Welt)

1975 $25.2 \cdot 10^6$ t/a (Welt)

1995 $45 \cdot 10^6$ t/a

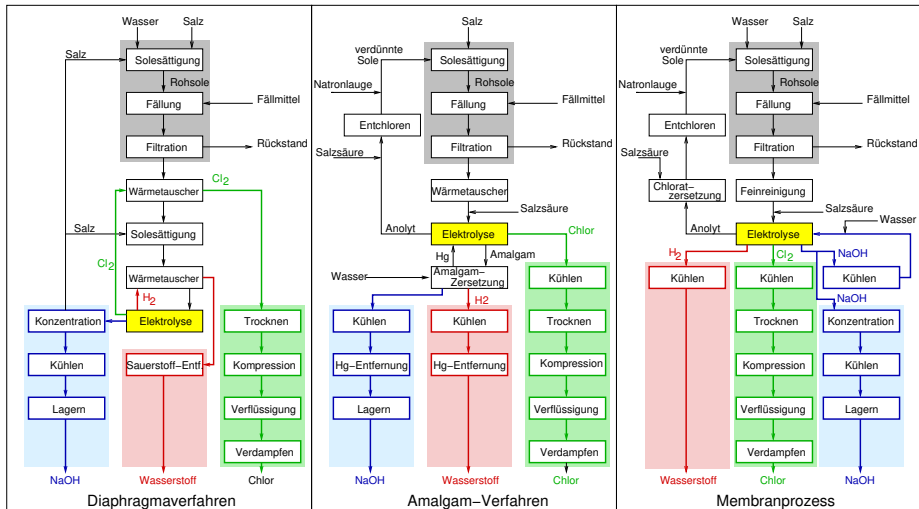
2016 $72 \cdot 10^6$ t/a (45 % China, 21 % USA)

2023 $50 \cdot 10^6$ t/a (D: 5 %; Europa: 15 %)

▶ Cl₂-Produktion

- !!!! noch suchen !! Grafik für 2024 (S. 14)

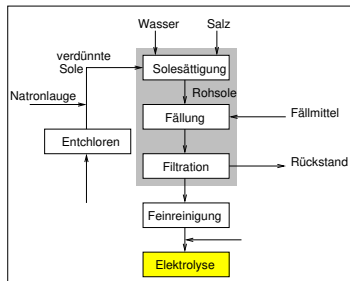
Gegenüberstellung der Verfahrensschritte



- ① Einleitung
- ② Vorbehandlungen der Sole
- ③ ① Diaphragma-Verfahren
- ④ ② Amalgam-Verfahren
- ⑤ ③ Membran-Verfahren
- ⑥ Vergleich der Verfahren
- ⑦ Eigenschaften, Produktionszahlen und Verwendung der Produkte
- ⑧ Literatur

Gewinnung und Vorbehandlung der Sole

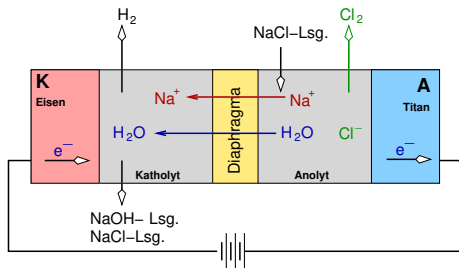
- ▶ **Sole:** gesättigt: 320 g NaCl/l
- ▶ meist aus festem Steinsalz hergestellt, wg. Nachkonzentration im Kreisprozeß
- ▶ **Vorreinigung der Sole:** Entfernung von
 - Ca, Mg, usw. (Krustenbildner: unlösliche Hydroxid-Niederschläge)
 - Ti, Fe, W ('Herdbildner': Veränderungen der Elektroden-Überspannungen)
- ▶ Fällungen mit NaOH, Na₂CO₃
- ▶ Sulfat als BaSO₄ oder Gips
- ▶ Klären und Filtrieren (Sandfilter)
- ▶ **Feinreinigung** über Ionenaustauscher (nur Membranverfahren)
- ▶ ggf. **Vorwärmung** der Sole (z.B. mit H₂/Cl₂-Gas aus Elektrolyse)



Reinigungsschritte vor der Elektrolyse

- ① Einleitung
- ② Vorbehandlungen der Sole
- ③ ① Diaphragma-Verfahren**
- ④ ② Amalgam-Verfahren
- ⑤ ③ Membran-Verfahren
- ⑥ Vergleich der Verfahren
- ⑦ Eigenschaften, Produktionszahlen und Verwendung der Produkte
- ⑧ Literatur

① Diaphragma-Verfahren: Prinzip



- ▶ Diaphragma aus Weiss-Asbest: Na^+ - und H_2O -durchlässig
- ▶ **A** früher Graphit, heute Ti-Blech (O_2 -Abscheidung gehemmt)
- ▶ **K** Eisen oder Stahl
- ▶ Katholyt: 190 g/l NaCl und 130 g/l NaOH
- ▶ $T = 90\text{ }^\circ\text{C}$; $U = 3.5 - 4.2\text{ V}$

Betrieb

- ▶ Salzlösung in Anodenraum
- ▶ Verarmung an Cl^- durch Anoden-Reaktion
- ▶ Dünnschicht strömt durch Diaphragma in Kathodenraum
- ▶ Vermischung mit gebildeter NaOH
- ▶ Rückvermischung der NaOH zur Anode durch Strömung vermeiden (Chloratbildung, Sauerstoffabscheidung)
- ▶ Elektrolyse nur bis zu geringen NaOH-Konzentrationen möglich

① Diaphragma-Verfahren (Forts.)

▶ Rohprodukte der Elektrolyse

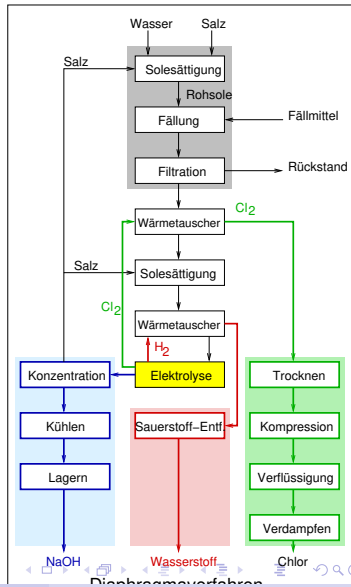
- NaOH: 130-150 g/l (ca. 15 %-ig)
- NaCl: 160-210 g/l
- NaClO₃: 0.05-0.25 g/l

▶ nachgeschaltete Eindampfprozesse

- hoher NaCl-Gehalt
- Eindampfen \mapsto zuerst NaCl-Abscheidung (schlechte Löslichkeit von NaCl in NaOH, z.B. 50 %-Lauge nur 2 %-NaCl)
- NaCl abzentrifugieren und einspeisen (Salzkreislauf)

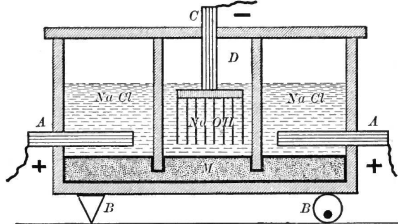
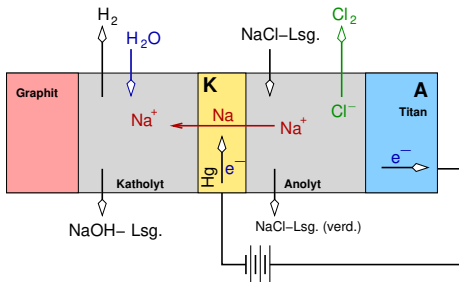
▶ zusammenfassend:

- ⊖ Cl₂ ist O₂-haltig
- ⊖ NaOH verdünnt
- ⊖ NaCl-Verunreinigung hoch
- ⊖ Asbest als Diaphragma
- ⊖ hoher Energieverbrauch ca. 3 200 kWh/t NaOH



- ① Einleitung
- ② Vorbehandlungen der Sole
- ③ ① Diaphragma-Verfahren
- ④ ② Amalgam-Verfahren
- ⑤ ③ Membran-Verfahren
- ⑥ Vergleich der Verfahren
- ⑦ Eigenschaften, Produktionszahlen und Verwendung der Produkte
- ⑧ Literatur

② Amalgam-Verfahren: Prinzip



Skizze einer Einfachanlage

- ▶ **A** s. Diaphragma-Verfahren
- ▶ **K** elementares Hg
- ▶ Ausnutzung der hohen Überspannung von H₂ an Hg (Na/H-Potentiale vertauscht)
- ▶ Elektrolysezelle:

$$2\text{NaCl} \longrightarrow 2\text{Na}_{\text{Hg}} + \text{Cl}_2$$
- ▶ separater Amalgamabscheider:

$$2\text{Na} + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{NaOH} + \text{H}_2$$
- ▶ Cl₂-freie Natronlauge
- ▶ NaCl-freie (< 0.006 Gew.-% NaCl) bis 50%-ige Natronlauge

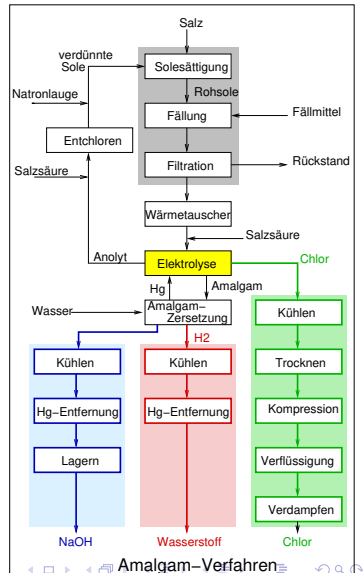
② Amalgam-Verfahren: Elektrolyse-Zelle

► Elektrolyse

- $T = 80\text{ °C}$, $U = 3.5\text{-}4.5\text{ V}$ (höher als bei anderen Verfahren)
- $I = 300\text{ kA}$ bzw. $8\text{-}15\text{ kA/m}^2$
- **K** elementares Hg
- **A** 10 cm dicke gelochte Graphitplatten bzw. mit Edelmetallen beschichtetes Ti
- leicht geneigter (15 mm/m) Stahlboden, Fläche $15 \times 2\text{ m}$
- Hg fließt mit 15 cm/s, Sole dazu im Gleichstrom
- ca. 3 t Hg/Zelle

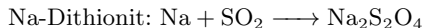
► Produkte

- Dünnsöle: noch 270 g/l NaCl
- Na-Amalgam mit bis ca. 0.5 % Na
- für alle Produkte: Hg-Abscheider

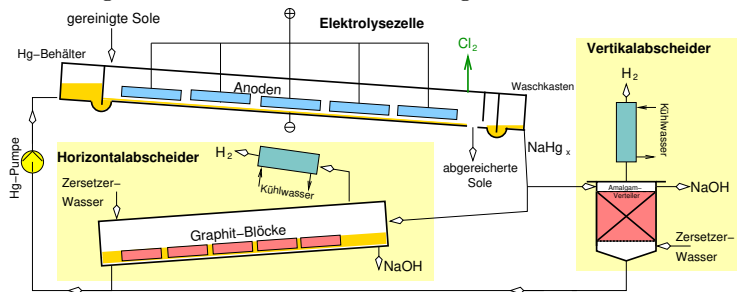


② Amalgam-Verfahren: Amalgam-Abscheider/Zersetzer

- ▶ Reaktion: $2\text{Na} + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{NaOH} + \text{H}_2$
- ▶ katalytische Reaktion an Graphit (kurzgeschlossener Hg/C-Kontakt)
- ▶ Bauarten: Vertikal- oder Horizontalabscheider
- ▶ NaOH bis 50 Gew.-%
- ▶ flexibel, da Herstellung anderer Na-Salze möglich:



- ▶ hierfür Amalgamverfahren bis auf Weiteres zugelassen



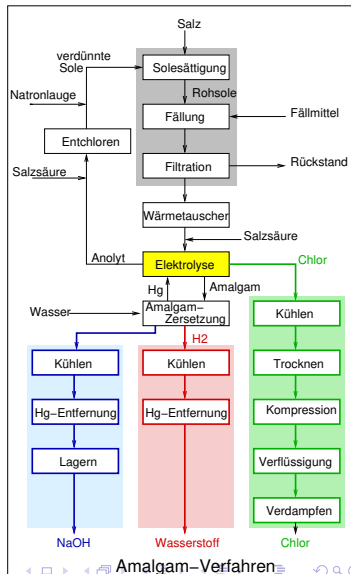
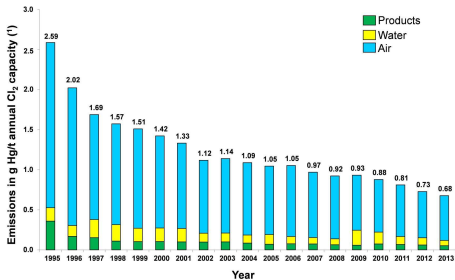
Amalgamverfahren: Elektrolysezelle mit zwei alternativen Amalgam-Abscheidern

② Amalgam-Verfahren (Forts.)

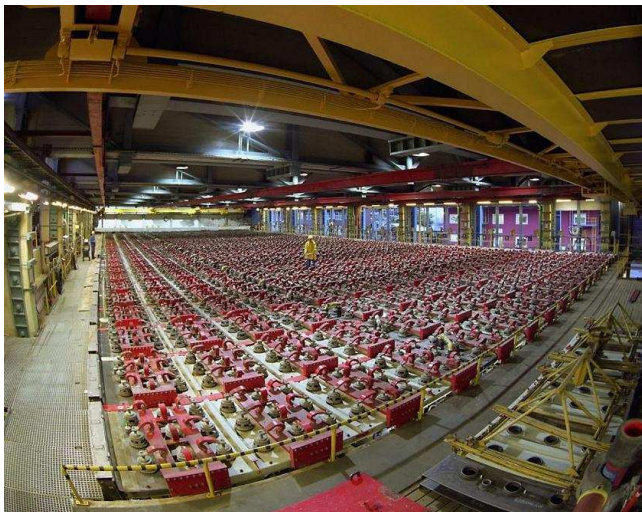
- ▶ Sole wird im Kreislauf geführt
- ▶ in allen Produktströmen Hg-Abscheider erforderlich

▶ zusammenfassend:

- ⊕ Cl^- -freie Natronlauge (<0.01 %)
- ⊖ mittlerer Energieverbrauch (ca. 2 800 kWh/t NaOH)
- ⊖ Hg! (1992: 26 t; Europa 2016: 1.4 t)



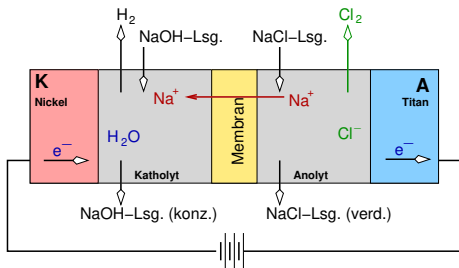
② Amalgam-Verfahren (Fotos)



Fa. BASF, Ludwigshafen, 2010
(2013: 170 000 t Cl_2 /a; Hg-'Verbrauch': 0.64 g Hg/t Cl_2)

- ① Einleitung
- ② Vorbehandlungen der Sole
- ③ ① Diaphragma-Verfahren
- ④ ② Amalgam-Verfahren
- ⑤ **③ Membran-Verfahren**
- ⑥ Vergleich der Verfahren
- ⑦ Eigenschaften, Produktionszahlen und Verwendung der Produkte
- ⑧ Literatur

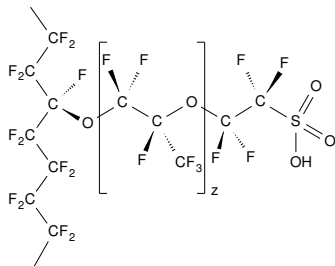
③ Membran-Verfahren: Prinzip



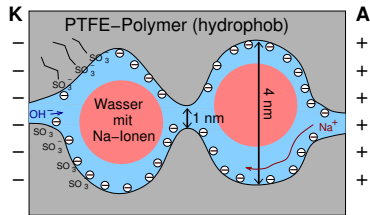
- ▶ Elektroden analog zum Diaphragma-Verfahren (A Ti; K Ni)
- ▶ Membran nur Na^+ -permeabel und hydraulisch dicht
- ▶ vollständige Trennung der Gase, von Wasser und Cl^- -Ionen in den beiden Halbzellen
- ▶ Anodenraum:
NaCl: 310 g/l \Rightarrow 200 g/l
- ▶ Kathodenraum:
NaOH: 30 Gew.-% \Rightarrow 32 Gew.-%

③ Membran-Verfahren: Die Membran

- ▶ polymere fluorierte Kohlenwasserstoffe
- ▶ Seitenketten mit Sulfonat- und Carboxylat-Gruppen
- ▶ 'Nafion' (Fa. DuPont); käuflich: H-Form
- ▶ 2-[1-[Difluor[(trifluorethenyl)oxy]methyl]-1,2,2,2-tetrafluorethoxy]-1,1,2,2-tetrafluorethansulfonsäure
- ▶ hydraulisch undurchlässig
- ▶ Na^+ -Ionenleiter
- ▶ Dicke: 130-250 μm
- ▶ auf gelochter Kathode befestigt
- ▶ bei guter Sole (< 0.02 ppm Ca und Mg) mittlerweile mehrere Jahre haltbar



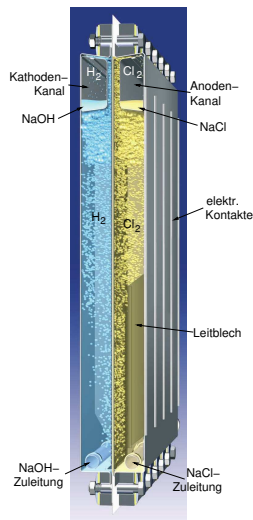
Chemismus der Membran



Funktionsweise der gequollenen Membran

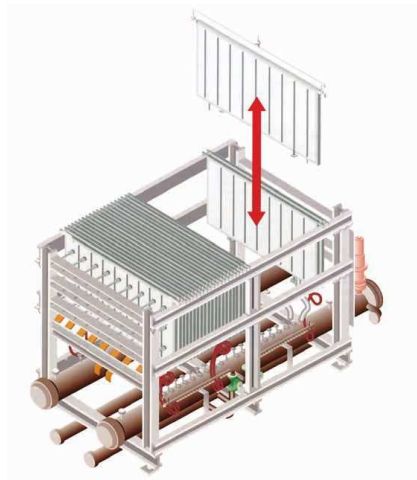
③ Membran-Verfahren: Einzelzelle*

- ▶ **A** Ti mit $\text{TiO}_2/\text{RuO}_2$ -Deckschicht
- ▶ **K** Ni
- ▶ Zuleitungen usw. aus Teflon (PTFE)
- ▶ Anodenhalbraum mit Einbauten (Bleche zum Umlauf)
- ▶ Cl_2 -Blasen, Ausleitung gelöst in NaCl
- ▶ Kathodenhalbraum ohne Einbauten
- ▶ Strom in Reihe durch Module
- ▶ Stoffstrom parallel durch Zellatterie
- ▶ aktive Fläche pro Element: 5 m^2



③ Membran-Verfahren: Module

- ▶ modulare Anlagen, bis ca. 200 Zellmodule
- ▶ Versorgung/Zuleitungen usw. von unten (Zugänglichkeit)
- ▶ Strom in Reihe durch Module (bipolare Zellen)
- ▶ Stoffstrom parallel durch Zellbatterie



(Quelle: Fa. Thyssen-Krupp Electrolysis GmbH)

③ Membran-Verfahren

▶ typische Betriebsbedingungen

- Spannung: 2.3 - 3.2 V
- Stromdichte: bis 7 kA/m²
- T = 88-90 °C

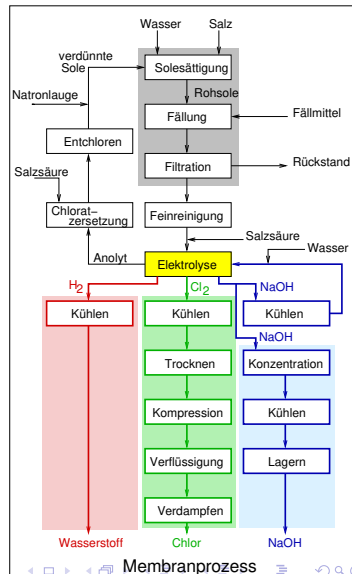
▶ Produkte

- Katholyt: 32 Gew.-% NaOH
- NaCl-Gehalt < 30 ppm
- Cl₂: > 98 Vol.-% (O₂ < 1 Vol.-%)
- H₂: > 99.9 Vol.-%

▶ Sole- und NaOH-Kreisprozeß

▶ zusammenfassend:

- ⊖ sehr saubere Sole erforderlich
- ⊖ Membran teuer und empfindlich
- ⊕ geringerer Energieverbrauch
- ⊕ bis 35 % NaOH möglich
- ⊕ praktisch Cl⁻-freie NaOH
- ⊕ kein Asbest, kein Hg
- ⊕ Energieverbrauch ca. 2 100 kWh/t NaOH



② Membran-Verfahren (Foto)

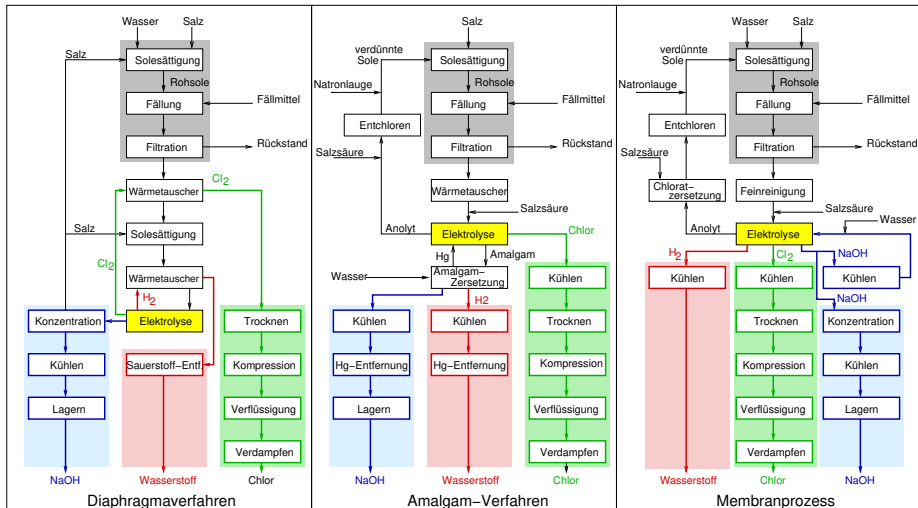


Montage der Module eines bipolaren Uhde BM 2.7 Elektrolysierr

(Quelle: Fa. Thyssen-Krupp Electrolysis GmbH, ehem. Uhde/Thyssen-Krupp, DeNora)

- ① Einleitung
- ② Vorbehandlungen der Sole
- ③ ① Diaphragma-Verfahren
- ④ ② Amalgam-Verfahren
- ⑤ ③ Membran-Verfahren
- ⑥ Vergleich der Verfahren
- ⑦ Eigenschaften, Produktionszahlen und Verwendung der Produkte
- ⑧ Literatur

Gegenüberstellung der Verfahrensschritte



Vergleich der Verfahren

Verfahren	Diaphragma-V.	Amalgam-V.	Membran-Verfahren
Anode	RuO ₂ /TiO ₂ /SnO ₂ -beschichtetes Ti-Substrat		
Kathode	Stahl	Hg	Ni mit Edelmetall-Beschichtung
Separator	Asbest	–	Ionenaustauschermembran
Zellspannung [V]	2.90 - 3.60	3.15 - 4.80	2.35 - 4.00
Stromdichte [kA/m ²]	2.2 - 14.5	0.8 - 2.7	1.0 - 6.5
pH	2.5 - 3.5	2 - 5	2 - 4
Energie (nur Elektrolyse)	2600 - 3100 kWh	3000 - 4400 kWh	2100 - 3000 kWh
Heissdampf	2.7 - 5.3 t	–	0.5 - 1.7 t
Kathoden-Produkt	10 - 12 % NaOH, H ₂	Na-Amalgam	30 - 33 % NaOH, H ₂
Zersetzer-Produkt	–	50 % NaOH, H ₂	–
Verdampfer-Produkt	50 % NaOH	–	50 % NaOH
NaOH- Fremdstoffe	NaCl NaClO ₃		
	10 000 mg/kg	50 mg/kg	50 mg/kg
	1 000 mg/kg	5 mg/kg	10 - 15 mg/kg
Cl ₂ - Fremd- stoffe [Vol.-%]	O ₂ H ₂ N ₂		
	0.5 - 2.0	0.1 - 0.3	0.5 - 2.0
	0.1 - 0.5	0.1 - 0.5	0.03 - 0.3
	1.0 - 3.0	0.2 - 0.5	–
Nachteile	Asbest	Hg	teuer (Membran)
Vorteile	günstig, konz. NaOH	flexibel (Zers.)	sauber

- ① Einleitung
- ② Vorbehandlungen der Sole
- ③ ① Diaphragma-Verfahren
- ④ ② Amalgam-Verfahren
- ⑤ ③ Membran-Verfahren
- ⑥ Vergleich der Verfahren
- ⑦ Eigenschaften, Produktionszahlen und Verwendung der Produkte
- ⑧ Literatur

Eigenschaften und Verwendung von NaOH

▶ Weltjahresproduktion: $50 \cdot 10^6$ t (2023)

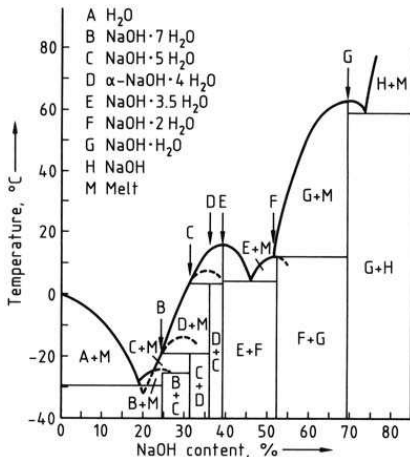
▶ **im Handel:**

- Lösungen: bis ca. 50 Gew.-%
- Mp: $320\text{ }^\circ\text{C}$ \leftrightarrow in Formen gegossen

▶ **Verwendung:**

- 29 %: Organische Synthesen (Farbstoffe, Pharmaka, Textilfasern)
- 4 %: Seifenproduktion (Kernseifen)
- 4 %: Bleiche (Textilverarbeitung)
- 5 %: Al und andere Metalle (Bauxit-Verfahren)
- 12 %: Papier- und Zellulose-Verarbeitung
- 3 %: Nahrungsmittel
- 3 %: Phosphate
- 18 %: andere anorganische Salze
- 18 %: Sonstiges

▶ **Preis:** 523 US-\$/t (Europa 12.2024, aktuell mit starken Schwankungen)



S. U. Pickerring, *J. Chem. Soc.* **63**, 890 (1893).

- ▶ Europa: $7.289 \cdot 10^3$ t (2023; -11 % gegenüber 2022)
- ▶ **Verwendung** (Europa)
 - 32 %: PVC
 - 31 %: Isocyanate und Oxygenate
 - 15 %: Anorganische Cl-Verbindungen
 - 12.8 %: Cl-Methan, Epichlorhydrin (Lösungsmittel)
 - 8.8 %: andere Organika
- ▶ **Preis**: 330 US-\$/t (Europa)

- ① Einleitung
- ② Vorbehandlungen der Sole
- ③ ① Diaphragma-Verfahren
- ④ ② Amalgam-Verfahren
- ⑤ ③ Membran-Verfahren
- ⑥ Vergleich der Verfahren
- ⑦ Eigenschaften, Produktionszahlen und Verwendung der Produkte
- ⑧ **Literatur**

Bücher und Artikel

- ▶ C. Kurt, J. Bittner: Sodium Hydroxide; in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH (2012).
- ▶ P. Schmittinger, Th. Florkiewicz, L. C. Curlin, B. Lüke, R. Scanell, Th. Navin, E. Zelfe, R. Bartsch: Chlorine; in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH (2012).
- ▶ [Electrochemistry Encyclopedia](#)
- ▶ Winnacker-Küchler: Chemische Technologie, Band I
- ▶ Emmons et al.: Technische Anorganische Chemie, 4. Aufl. 1990.
- ▶ [Chlorine Industry Review 2023/2024](#)
- ▶ Th. Brinkmann, G. G. Santonja, F. Schorcht, S. Roudier, L. D. Sancho (European Commission): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Chlor-alkali, 2014.

Links

- ▶ [Thyssen-Krupp Electrolysis GmbH](#)
- ▶ www.eurochlor.com

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), ...