

Ammoniak-Herstellung (Haber-Bosch-Verfahren)

Reaktionstechnik – Prozeßkunde – heterogene Katalyse



Oberseminar, 26.10.2017, Caroline Röhr

Einleitung

Synthesegas-Gewinnung (nur Prinzip)

Physikalisch-chemische Grundlagen, Katalysator

Thermodynamik

Kinetik

Katalysator

Grundbegriffe der Reaktionstechnik

Reaktoren für die Ammoniak-Synthese

Gesamtanlagen (Beispiele)

Verwendung, Produktionszahlen

Literatur

Einleitung

Synthesegas-Gewinnung (nur Prinzip)

Physikalisch-chemische Grundlagen, Katalysator

Thermodynamik

Kinetik

Katalysator

Grundbegriffe der Reaktionstechnik

Reaktoren für die Ammoniak-Synthese

Gesamtanlagen (Beispiele)

Verwendung, Produktionszahlen

Literatur

Einleitung



Fritz Haber¹
(1868-1934)
Nobelpreis Chemie 1918



Carl Bosch²
(1874-1940)
Nobelpreis Chemie 1931

¹ Bildarchiv ETH Zürich; ² www.basf.com

Historisches

- ▶ **Fritz Haber** (1868-1934)
 - ▶ 1903-1909 (Karlsruhe): physikalisch-chemische Grundlagen
 - ▶ Beobachtung, dass NH_3 nicht vollständig zerfällt
 - ▶ Streit mit W. Ostwald und W. Nernst über die mögliche Verwendung
 - ▶ Nobelpreis Chemie 1918

Historisches

- ▶ **Fritz Haber** (1868-1934)
 - ▶ 1903-1909 (Karlsruhe): physikalisch-chemische Grundlagen
 - ▶ Beobachtung, dass NH_3 nicht vollständig zerfällt
 - ▶ Streit mit W. Ostwald und W. Nernst über die mögliche Verwendung
 - ▶ Nobelpreis Chemie 1918
- ▶ **Carl Bosch** (1874-1940)
 - ▶ Lösung der technischen Probleme (H_2 -Versprödung)
 - ▶ Rohrbündelreaktor
 - ▶ 1913: erste technische Synthese ↓
 - ▶ Nobelpreis Chemie 1931

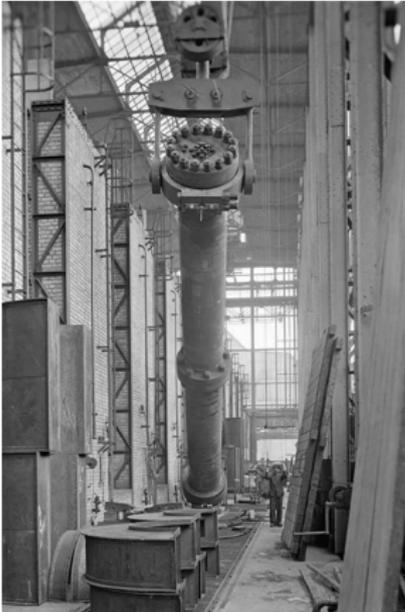
Historisches

- ▶ **Fritz Haber** (1868-1934)
 - ▶ 1903-1909 (Karlsruhe): physikalisch-chemische Grundlagen
 - ▶ Beobachtung, dass NH_3 nicht vollständig zerfällt
 - ▶ Streit mit W. Ostwald und W. Nernst über die mögliche Verwendung
 - ▶ Nobelpreis Chemie 1918
- ▶ **Carl Bosch** (1874-1940)
 - ▶ Lösung der technischen Probleme (H_2 -Versprödung)
 - ▶ Rohrbündelreaktor
 - ▶ 1913: erste technische Synthese ↓
 - ▶ Nobelpreis Chemie 1931
- ▶ **Alwin Mittasch** (1869-1953)
 - ▶ Katalysator-Entwicklung

Historisches

- ▶ **Fritz Haber** (1868-1934)
 - ▶ 1903-1909 (Karlsruhe): physikalisch-chemische Grundlagen
 - ▶ Beobachtung, dass NH_3 nicht vollständig zerfällt
 - ▶ Streit mit W. Ostwald und W. Nernst über die mögliche Verwendung
 - ▶ Nobelpreis Chemie 1918
- ▶ **Carl Bosch** (1874-1940)
 - ▶ Lösung der technischen Probleme (H_2 -Versprödung)
 - ▶ Rohrbündelreaktor
 - ▶ 1913: erste technische Synthese ↓
 - ▶ Nobelpreis Chemie 1931
- ▶ **Alwin Mittasch** (1869-1953)
 - ▶ Katalysator-Entwicklung
- ▶ ...
- ▶ **Gerhard Ertl** (Nobelpreis 2007)
 - ▶ Untersuchungen der Kinetik mit Oberflächen-Methoden

Einleitung



Reaktorinstallation in Oppau, 1913¹



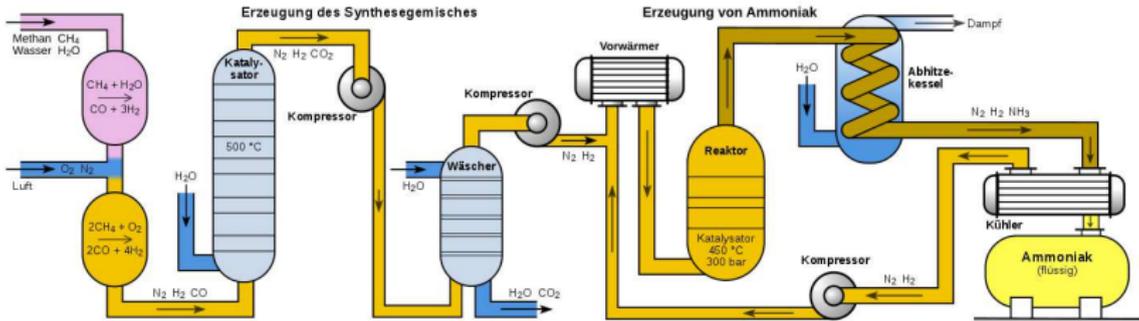
Moderner Casale-Converter²

¹ BASF, Wikimedia Commons; ² www.casale.ch

Eigenschaften von Ammoniak

- ▶ $\rho = 0.86 \text{ kg/m}^3$ (d.h. leichter als Luft)
- ▶ Sdp: $-33.4 \text{ }^\circ\text{C}$; Mp: $-77.7 \text{ }^\circ\text{C}$
- ▶ Kritischer Punkt: $t = 132.3 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 11.3 \text{ GPa}$
- ▶ giftig: 2 g/m^3 innerhalb 1 h tödlich
- ▶ hohe Verdampfungswärme (1262 kJ/kg) \mapsto Kälteindustrie
- ▶ sehr gut löslich in H_2O (Springbrunnenversuch)

Ammoniak-Herstellung (einfaches Schema)



Einleitung

Synthesegas-Gewinnung (nur Prinzip)

Physikalisch-chemische Grundlagen, Katalysator

Thermodynamik

Kinetik

Katalysator

Grundbegriffe der Reaktionstechnik

Reaktoren für die Ammoniak-Synthese

Gesamtanlagen (Beispiele)

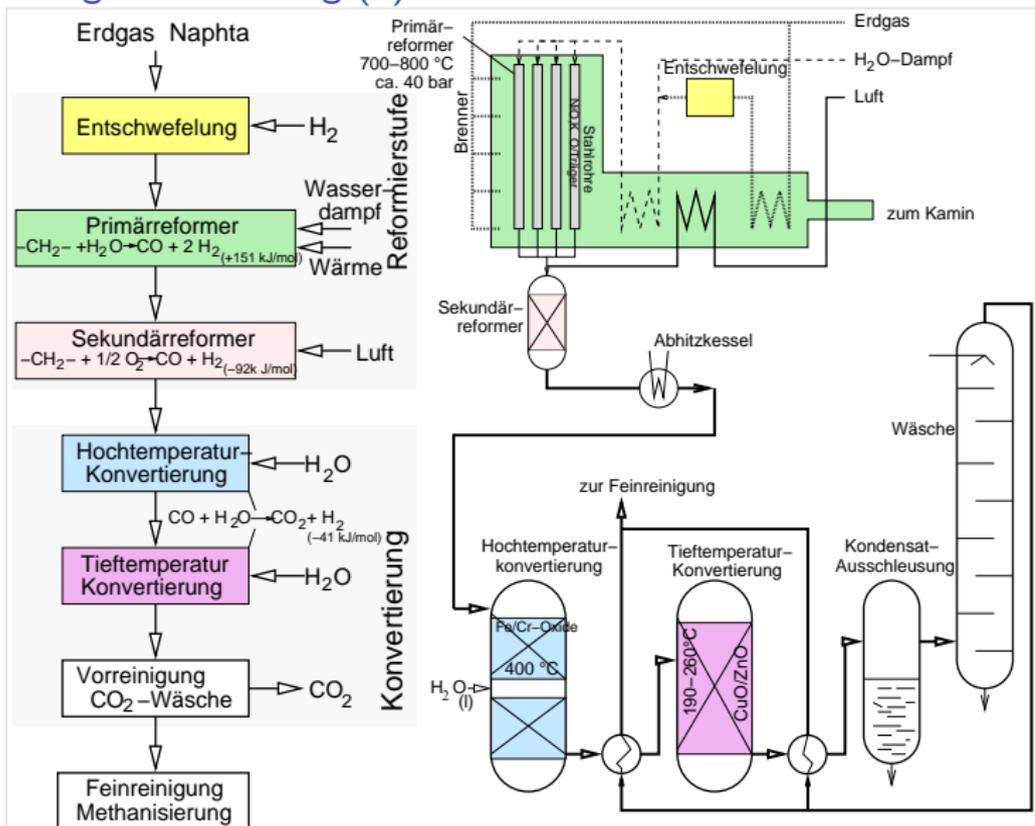
Verwendung, Produktionszahlen

Literatur

Synthesegas-Gewinnung (1)

1. Rohstoff: Erdgas/Naphta
2. **Entschwefeln** wegen Metall-Katalysatoren [$M \mapsto MS$ (Vergiftung)]
3. + $H_2O \implies$ **Steam-Reforming** (Primärreformer)
 - ▶ $-CH_2- + H_2O \xrightarrow[Ni-Kat.]{700^\circ C, 40\text{-bar}} \underbrace{2H_2 + CO}_{\text{Synthesegas}}; +150 \text{ kJ/mol C (endotherm)}$
 - ▶ Vorheizung der Gase mit Brenner; ca. 700 - 800 °C, 40 bar
 - ▶ 20 cm dicke Rohre mit reduziertem NiO-Katalysator (Ni aktiv)
4. + O_2 (oder Luft) \implies **Partial-Oxidation (POX)** (Sekundärreformer)
 - ▶ $-CH_2- + \frac{1}{2}O_2 \xrightarrow{1200^\circ C} H_2 + CO; -92 \text{ kJ/mol C (exotherm)}$
 - ▶ ausgemauerter Schachtreaktor
5. beide Reaktionen in Kombination (Energetik!), beide liefern $CO + H_2$
6. **Konvertierung** (Einstellen des Wassergas-Gleichgewichts)
 - ▶ $CO + H_2O \xrightarrow{<500^\circ C, \text{weit rechts}} CO_2 + H_2; -41 \text{ kJ/mol (exotherm)}$
 - ▶ T ca. 200 - 400 °C, Oxid-Katalysatoren; in 2 Stufen:
 - ▶ HT-Konvertierung: 350 °C Fe/Cr-Oxid-Kat.
 - ▶ TT-Konvertierung: 200 °C Cu/Zn-Oxid-Kat.
7. **CO₂-Wäsche**
 - ▶ physikalisch (Absorption in Methanol, Druckwäsche)
 - ▶ chemisch (organische Amine, K₂CO₃-Lösung)

Synthesegas-Gewinnung (2)



Einleitung

Synthesegas-Gewinnung (nur Prinzip)

Physikalisch-chemische Grundlagen, Katalysator

Thermodynamik

Kinetik

Katalysator

Grundbegriffe der Reaktionstechnik

Reaktoren für die Ammoniak-Synthese

Gesamtanlagen (Beispiele)

Verwendung, Produktionszahlen

Literatur

Thermodynamik

- ▶ Reaktionsgleichung: $\frac{3}{2}\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{N}_2 \rightleftharpoons \text{NH}_3$
- ▶ qualitativ (Le Chatelier):
 - ▶ $\Delta H_{298}^\ominus = -45.93 \text{ kJ/mol NH}_3$ (exotherm)
 - ▶ Abnahme der Zahl der Gasteilchen
- ▶ Gleichgewichtskonstante (p =Partialdrücke, y =Molenbrüche; P =Gesamtdruck)

$$K_p = \frac{p_{\text{NH}_3}}{p_{\text{H}_2}^{3/2} p_{\text{N}_2}^{1/2}} = \frac{y_{\text{NH}_3}}{y_{\text{H}_2}^{3/2} y_{\text{N}_2}^{1/2} P} \quad \textcircled{1}$$

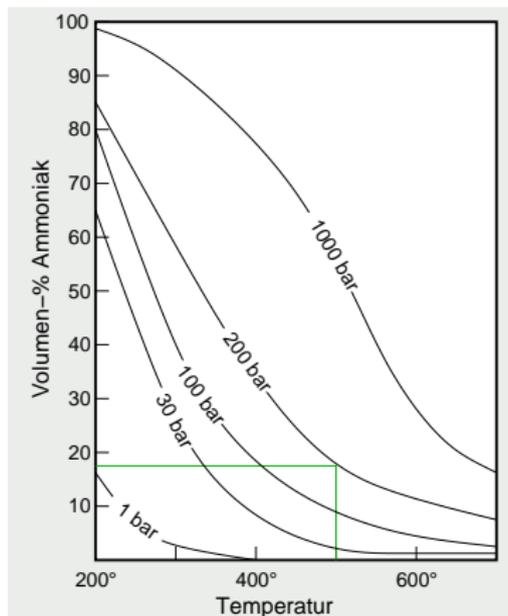
- ▶ **T-Abhängigkeit** (P =const.)
 - ▶ aus $\Delta G^\ominus = -RT \ln K_p$ ② und $\Delta G^\ominus = \Delta H^\ominus - T \Delta S^\ominus$
 - ▶ folgt: $\ln K_p = -\frac{\Delta H^\ominus}{RT} + \text{const.}$ ③ (van't Hoff)
 - ▶ $\mapsto \uparrow T \mapsto K_p \downarrow, y_{\text{NH}_3}$ im Gas \downarrow

- ▶ **P-Abhängigkeit** (T =const.)
 - ▶ keine Fremdgase: $y_{\text{NH}_3} + y_{\text{H}_2} + y_{\text{N}_2} = 1$ ④
 - ▶ stöchiometrisches Verhältnis: $y_{\text{H}_2}/y_{\text{N}_2} = 3$ ⑤
 - ▶ ④ und ⑤ in ③ (für K_p) eingesetzt und umformen:

$$y_{\text{NH}_3} = 1 + a - \sqrt{a^2 + 2a} \text{ mit: } a = \frac{8}{\sqrt{27}} \frac{1}{K_p P} \quad \textcircled{6}$$

- ▶ a klein, wenn P groß + K_p groß (wenn T -klein)
- ▶ je kleiner a , umso näher ist y_{NH_3} an 1

Thermodynamik: graphische Darstellung



- ▶ P groß $\mapsto a$ klein $\mapsto y_{\text{NH}_3}$ nahe 1
- ▶ T groß $\mapsto K_p$ klein $\mapsto a$ groß $\mapsto y_{\text{NH}_3}$ klein gegen 1

Einleitung

Synthesegas-Gewinnung (nur Prinzip)

Physikalisch-chemische Grundlagen, Katalysator

Thermodynamik

Kinetik

Katalysator

Grundbegriffe der Reaktionstechnik

Reaktoren für die Ammoniak-Synthese

Gesamtanlagen (Beispiele)

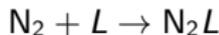
Verwendung, Produktionszahlen

Literatur

Kinetik: Tempkin-Pizhev-Gleichung

Reaktionsschritte (vereinfacht)

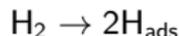
- ▶ ① Adsorption von molekularem N_2



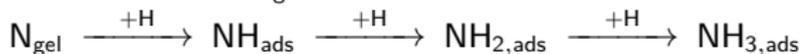
- ▶ ② N 'löst' sich im Fe (geschwindigkeitsbestimmend; Bildung von Fe-Subnitriden)



- ▶ ③ Adsorption von H_2 unter Dissoziation: (H auf Fe-Oberfläche mobil)



- ▶ ④ stufenweise Reaktion von N_{gel} mit H_{ads} :



- ▶ ⑤ Desorption von NH_3



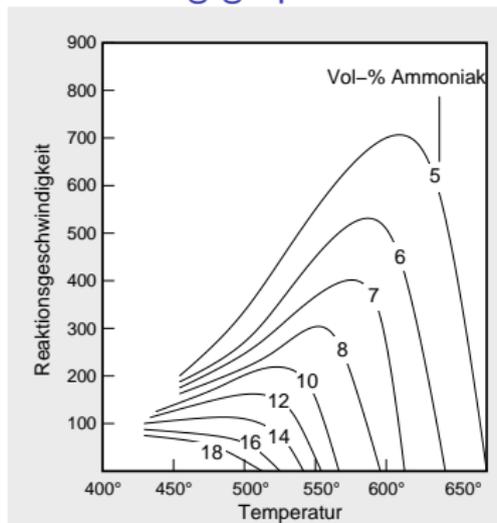
Kinetik: Tempkin-Pizhev-Gleichung

Gesamtgleichung der Kinetik (nach länglicher Ableitung)

$$r_{\text{NH}_3} = \underbrace{k_B p_{\text{NH}_3}^{-1} p_{\text{H}_2}^{3/2} p_{\text{N}_2}}_{\text{a_kinetischer Term}} \left(1 - \underbrace{\frac{1}{K_{p_{\text{NH}_3}}^2} p_{\text{NH}_3}^2 p_{\text{H}_2}^{-3} p_{\text{N}_2}^{-1}}_{\text{b_Potentialterm}} \right)$$

- ▶ mit k_B : Geschwindigkeitskonstante der NH_3 -Bildung ($\propto k_{2,\text{hin}}$ der Rkt. ②)
- ▶ **a: kinetischer Term**: $= k_B p_{\text{NH}_3}^{-1} p_{\text{H}_2}^{3/2} p_{\text{N}_2}$
 - ▶ für T -Abhängigkeit nach Arrhenius: $= k_B^0 e^{-E_a/RT} p_{\text{NH}_3}^{-1} p_{\text{H}_2}^{3/2} p_{\text{N}_2}$
 - ▶ $\mapsto r_{\text{NH}_3}$ steigt exponentiell mit T
 - ▶ \mapsto kleine NH_3 -Konzentrationen günstig, da Rkt. -1 . Ordnung bzgl. p_{NH_3}
- ▶ **b: Potentialterm**: $= 1 - \frac{1}{K_{p_{\text{NH}_3}}^2} p_{\text{NH}_3}^2 p_{\text{H}_2}^{-3} p_{\text{N}_2}^{-1}$
 - ▶ im Gleichgewicht $= 0$
 - ▶ \mapsto wegen T -Abhängigkeit der GG-Konstante K_p
 - ▶ (K_p fällt mit steigendem T , da exotherme Reaktion)
 - ▶ $\mapsto r$ fällt mit steigendem T

Kinetik: Tempkin-Pizhev-Gleichung graphisch



- ▶ r als Raumvolumengeschwindigkeit [$\text{kmol NH}_3/\text{h m}^3_{\text{Kat.}}$]
- ▶ r erst mit höherer T sinnvoll groß (wegen a)
- ▶ r steigt mit T
- ▶ r durchläuft ein Maximum, dessen Höhe mit zunehmender NH_3 -Konzentration abnimmt

Einleitung

Synthesegas-Gewinnung (nur Prinzip)

Physikalisch-chemische Grundlagen, Katalysator

Thermodynamik

Kinetik

Katalysator

Grundbegriffe der Reaktionstechnik

Reaktoren für die Ammoniak-Synthese

Gesamtanlagen (Beispiele)

Verwendung, Produktionszahlen

Literatur

Katalysator: Standard-Fe-Katalysator

- ▶ poröser Voll-Katalysator (kein Träger-Kat.)
- ▶ als Pellets 6-10 mm (Druckabfall!)
- ▶ 45 % Porosität, ca. 30 nm Kristallitgrößen
- ▶ innere Oberfläche: 10-20 m²/g
- ▶ Fe₃O₄ (Magnetit), wird im Reaktor mit H₂ oberflächlich zu α-Fe reduziert (ca. 5 Tage, exotherme Reaktion)
- ▶ mit weiteren Oxiden (werden nicht reduziert)
 - ▶ 0.5 - 1.2 % K₂O (Aktivator: erhöht die Aktivität)
 - ▶ 2.5 - 4 % Al₂O₃ (Strukturstabilisator)
 - ▶ 0 - 1 % MgO (Strukturstabilisator)
 - ▶ 2 - 3.5 % CaO (erhöht Giftbeständigkeit gegen Cl + S)



1

Katalysator: Untersuchung der Wirkungsweise

- ▶ umfangreiche Untersuchungen der Wirkungsweise der Kats
- ▶ Nachweis von NH-Gruppen auf der Oberfläche (IR)
- ▶ (111)-Oberfläche (C_7) am reaktivsten
- ▶ α , β und γ Zwischenzustände
- ▶ angepasste Kinetik für ideale Oberflächen

Alternative Katalysatoren

- ▶ alternative Katalysatoren aus 3 Gruppen
 1. Ru, Os, Ir, Pt: Metalle, die keine Nitride bilden
 2. Mn, Co, Ni, Rh (und ihre Legierungen): Metalle, die unter den Synthesebedingungen noch keine Nitride bilden
 3. Mn, Mo oder V als Nitride
- ▶ einziger alternativer Katalysator in technischer Verwendung:
Ru-Katalysator mit Rb- oder Cs-Oxid-Aktivator auf Graphit-Träger
(Kellogg Advanced Ammonia Process, KAAP)
- ▶ aktueller Stand: s. Literatur in *Chius* **5**, 294 (2017).

Einleitung

Synthesegas-Gewinnung (nur Prinzip)

Physikalisch-chemische Grundlagen, Katalysator

Thermodynamik

Kinetik

Katalysator

Grundbegriffe der Reaktionstechnik

Reaktoren für die Ammoniak-Synthese

Gesamtanlagen (Beispiele)

Verwendung, Produktionszahlen

Literatur

Bilanzen

Bilanzen, die bei Anlagen-Projektierung zu berücksichtigen sind:

- ▶ Massenbilanz (chemische Reaktion: Thermodynamik, Kinetik)
- ▶ Energiebilanz (Thermodynamik)
- ▶ Impulserhaltung (Strömungslehre)

Reaktionsführungen

diskontinuierlich (Satzbetrieb)

- ▶ ermöglicht lange Reaktionszeiten
- ▶ leichtere Reinigung
- ▶ geringere Investition
- ▶ flexible Einsatzbereiche
- ▶ leichtere Änderungen der Bedingungen während des Betriebs

kontinuierlich (Fließbetrieb)

- ▶ keine Totzeiten
- ▶ gute Automation
- ▶ konstante Reaktionsbedingungen
- ▶ geringere Energiekosten durch Nutzung der Abwärme
- ▶ umweltfreundlicher

Reaktortypen: Vorteile

Rührkessel

(kontinuierlich oder diskontinuierlich)

- ▶ gute Vermischung
- ▶ einheitliches T und c
- ▶ leicht zu regeln
- ▶ gut zugänglich (Reinigung)
- ▶ hoher Durchsatz bei geringem Druckverlust
- ▶ geringer Platzbedarf
- ▶ einfacherer Korrosionsschutz
- ▶ bei Gefahr rasch zu entleeren

Strömungsrohr (kontinuierlich)

- ▶ hoher Umsatz bei geringem Reaktorvolumen
- ▶ gleichmäßige Verweilzeit
- ▶ große Wärmeaustauschfläche pro Reaktorvolumen
- ▶ hohe Wärmeübergangszahlen durch hohe Strömungsgeschwindigkeit
- ▶ leichte Wärmezu- und -abfuhr
- ▶ günstig für Druckreaktionen (Materialbeanspruchung wg. kleinem Durchmesser)
- ▶ Produkte/Edukte an verschiedenen Stellen zugebbar/abnehmbar

Reaktortypen: Nachteile

Rührkessel

(kontinuierlich oder diskontinuierlich)

- ▶ geringeres r , geringerer Umsatz
- ▶ höheres Reaktorvolumen
- ▶ ungleichmäßige Verweilzeit
- ▶ schlechte Wärmeabfuhr
- ▶ kein festangeordneter Katalysator möglich
- ▶ Verschleiß und Leckverluste durch bewegte Teile

Strömungsrohr

(kontinuierlich)

- ▶ ungleichmäßige Temperatur-Verteilung
- ▶ geringe Vermischung
- ▶ schlechte Reinigungsmöglichkeit
- ▶ hoher Druckverlust

Reaktortypen: Anwendungsbereiche

Rührkessel

(kontinuierlich oder diskontinuierlich)

- ▶ gas/flüssig-Reaktionen
- ▶ flüssig/flüssig-Reaktionen bei schlechter Mischbarkeit
- ▶ Reaktionen mit hochviskosen Stoffen
- ▶ Reaktionen mit suspendierten Katalysatoren

Strömungsrohr

(kontinuierlich)

- ▶ heterogen-katalysierte Reaktionen
- ▶ Flüssigphasen-Reaktionen ohne Mischungsschwierigkeiten
- ▶ homogene Gasphasen-Reaktionen

Reaktorschaltungen

Reaktorschaltungen

- ▶ Parallelschaltung von Rohrreaktoren \mapsto Rohrbündel-Reaktoren
- ▶ Serienschaltungen von Reaktoren
 - ▶ Kessel: Rührkesselkaskade
 - ▶ Rohre: Hordenreaktor
- ▶ Kessel-Rohr (Spezialreaktor für autokatalytisch Reaktionen)
- ▶ Reaktoren mit Rückführung

reale Reaktoren: immer zwischen den Idealtypen Rührkessel und Strömungsrohr

Auslegung/Berechnungen von Reaktoren

- ▶ Umsatz, Produktionsleitung (wirtschaftliche Gesichtspunkte)
- ▶ PC: Thermodynamik, Geschwindigkeitskonstante, Ordnung der Reaktion, Folge- und Nebenreaktionen
- ▶ Reaktorvolumen, Druckabfall

Einleitung

Synthesegas-Gewinnung (nur Prinzip)

Physikalisch-chemische Grundlagen, Katalysator

Thermodynamik

Kinetik

Katalysator

Grundbegriffe der Reaktionstechnik

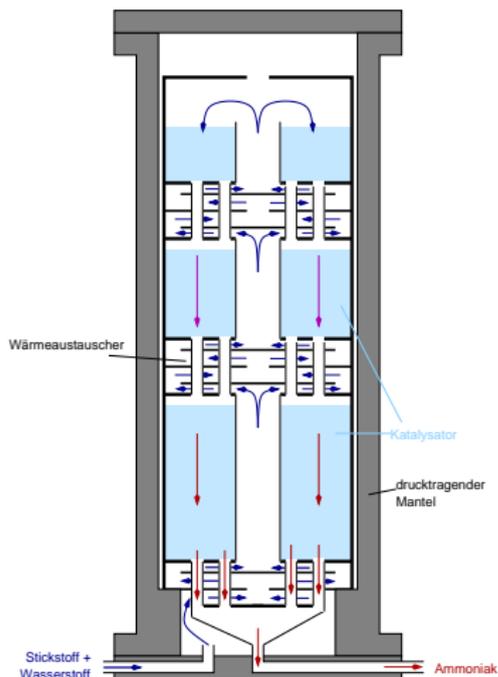
Reaktoren für die Ammoniak-Synthese

Gesamtanlagen (Beispiele)

Verwendung, Produktionszahlen

Literatur

Reaktoren



- ▶ heute ausschliesslich Vollraumreaktoren
- ▶ Hordenreaktoren mit mehreren Katalysatorhorden (meist 3)
- ▶ bei 500 t/d \mapsto 28 t Katalysator, von Stufe zu Stufe drastisch mehr
- ▶ wirtschaftlich: 500 bis 3300 t/d
- ▶ 100 - 300 cm Durchmesser des Kat.-Einsatzes
- ▶ Länge: 20-30 m
- ▶ 30 cm Durchmesser des Zentralrohrs
- ▶ Cr/Mo Stahl innen, aussen Stahlwickelrohr
- ▶ aktuelle Reaktoren \mapsto s. Broschüren und Ullmann-Artikel

Einleitung

Synthesegas-Gewinnung (nur Prinzip)

Physikalisch-chemische Grundlagen, Katalysator

Thermodynamik

Kinetik

Katalysator

Grundbegriffe der Reaktionstechnik

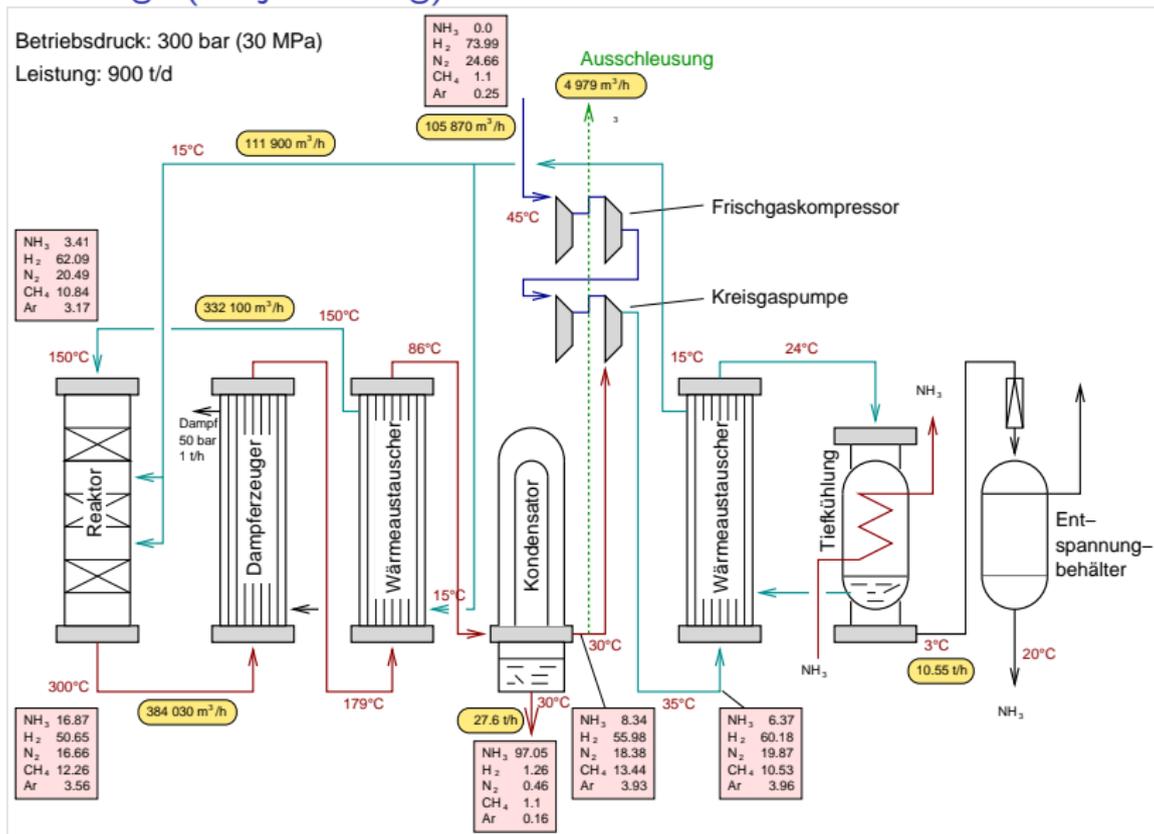
Reaktoren für die Ammoniak-Synthese

Gesamtanlagen (Beispiele)

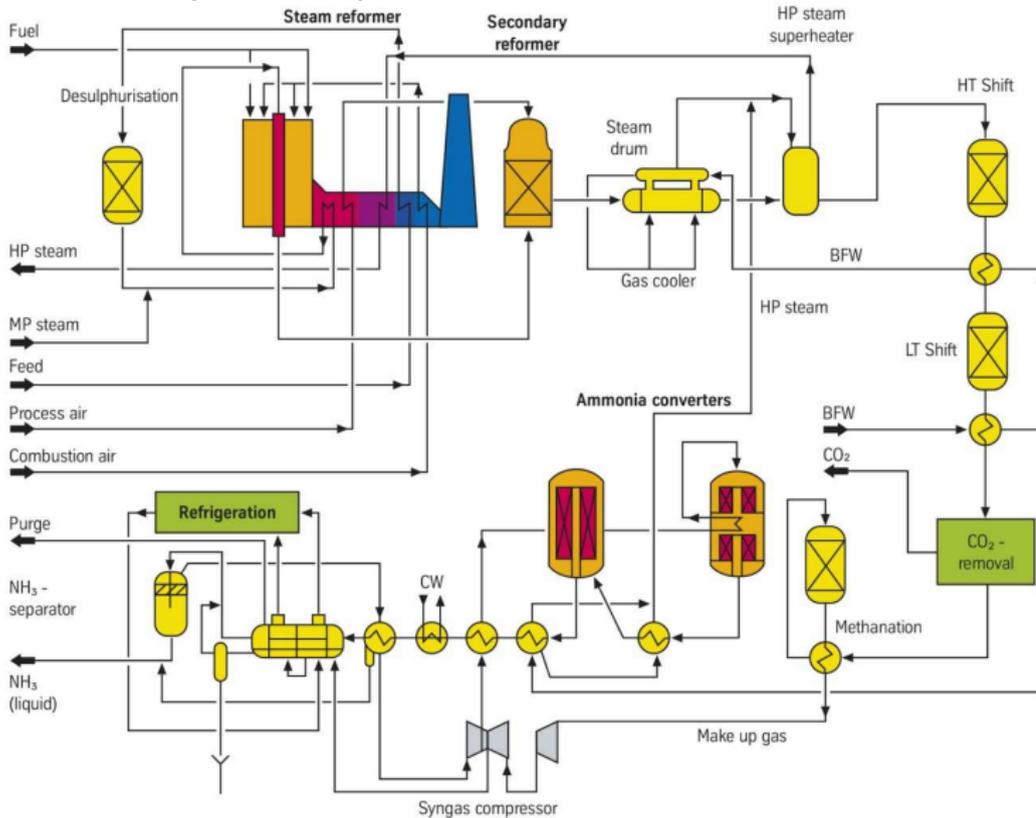
Verwendung, Produktionszahlen

Literatur

Gesamtanlage (Projektierung)



Gesamtanlage (Fa. Uhde)



Einleitung

Synthesegas-Gewinnung (nur Prinzip)

Physikalisch-chemische Grundlagen, Katalysator

Thermodynamik

Kinetik

Katalysator

Grundbegriffe der Reaktionstechnik

Reaktoren für die Ammoniak-Synthese

Gesamtanlagen (Beispiele)

Verwendung, Produktionszahlen

Literatur

Verwendung von Ammoniak I: Herstellung von Düngemitteln

- ▶ **Weltjahresproduktion Ammoniak** (2014): 140 000 000 t
- ▶ davon ca. 80 % für Düngemittel
- ▶ Preis: 300 US-Dollar/t (fallend)

Produkt	Reaktion/Verfahren/Verwendung
Harnstoff	$2\text{NH}_3 + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{H}_2\text{NCOONH}_4$ $\text{H}_2\text{NCOONH}_4 \longrightarrow \text{NH}_2\text{CONH}_2 + \text{H}_2\text{O}$
Ammoniumsulfat	$2\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \longrightarrow (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
Ammoniumnitrat	$2\text{NH}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_4 \longrightarrow (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + \text{CaCO}_3$ $\text{NH}_3 + \text{HNO}_3 \longrightarrow \text{NH}_4\text{NO}_3$
Kalkammonsalpeter	Eintragen von CaCO_3 in eine NH_4NO_3 -Schmelze
Ammoniumphosphate	Neutralisation von H_3PO_4 mit NH_3
Ammoniumchlorid	Neutralisation von HCl mit NH_3 , doppelte Umsetzung von Ammoniumsalzen

Verwendung von Ammoniak II: Herstellung von Zwischen- u. Endprodukten

Produkt	Reaktion/Verfahren/Verwendung
Salpetersäure	$4\text{NH}_3 + 5\text{O}_2 \longrightarrow 4\text{NO} + 6\text{H}_2\text{O}$ $2\text{NO} + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{NO}_2$ $3\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{HNO}_3 + \text{NO}$
Blausäure	$\text{CH}_4 + \text{NH}_3 \longrightarrow \text{HCN} + 3\text{H}_2$
Hydrazin	$\text{NH}_3 + \text{Cl}_2 \longrightarrow \text{NH}_2\text{Cl} + \text{HCl}$ $\text{NH}_3 + \text{NH}_2\text{Cl} \longrightarrow \text{N}_2\text{H}_4 + \text{HCl}$
Ammoniumnitrit	$2\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{NO} + \text{NO}_2 \longrightarrow 2\text{NH}_4\text{NO}_2$
Hydroxylamin	$\text{NO}_2^- + 2\text{HSO}_3^- \longrightarrow \text{HON}(\text{SO}_3^-)_2 + \text{OH}^-$ $\text{HON}(\text{SO}_3^-)_2 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{HONHSO}_3^- + \text{HSO}_4^-$ $\text{HONHSO}_3^- + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{NH}_2\text{OH} + \text{HSO}_4^-$
Alkylamine	Umsetzung von Fettsäuren mit NH_3 zu Nitrilen, anschließende Hydrierung (Verwendung z.B. als Flotationsmittel)
Methylamine	Umsetzung von Methanol bzw. Dimethylether mit NH_3
Amidoschwefelsäure	$2\text{SO}_3 + 3\text{NH}_3 \longrightarrow \text{NH}(\text{SO}_3\text{NH}_4)_2$ $\text{NH}(\text{SO}_3\text{NH}_4)_2 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{NH}_2\text{SO}_3\text{H} + (\text{NH}_4)\text{SO}_4$
Acrylnitril	Ammonoxidation von Propen

Verwendung von Ammoniak III: Verwendung als Betriebsmittel

Produkt	Reaktion/Verfahren/Verwendung
NH ₃	Herstellung von Soda nach dem Ammoniak-Soda-Verfahren Desorption von n-Paraffinen aus Molsieben (Parex-Verfahren) Kältemittel

Einleitung

Synthesegas-Gewinnung (nur Prinzip)

Physikalisch-chemische Grundlagen, Katalysator

Thermodynamik

Kinetik

Katalysator

Grundbegriffe der Reaktionstechnik

Reaktoren für die Ammoniak-Synthese

Gesamtanlagen (Beispiele)

Verwendung, Produktionszahlen

Literatur

Literatur

Bücher und Artikel

- ▶ M. Appl: Ammonia: 2. Production Process; in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH (2012).
- ▶ Broschüre 'Ammonia', thyssenkrupp Industrial Solutions AG (s.u.)
- ▶ M. Bertau, A. Müller, P. Fröhlich, M. Katzberg: Industrielle Anorganische Chemie, Wiley VCH, 2013.
- ▶ Winnacker-Küchler: Chemische Technologie, Band I
- ▶ M. Baerns, A. Behr, A. Brehm, J. Gmehling, H. Hofmann, U. Onken, A. Renken: Technische Chemie Wiley-VCH, Weinheim, 2014.
- ▶ A. Behr, D. W. Agar, J. Jörissen: Einführung in die Technische Chemie, Spektrum, Heidelberg, 2010.

Anlagen/Kat-Hersteller (Links zu Web-Seiten)

- ▶ thyssen-krupp-industrial-solutions.com
- ▶ Haldor Topsoe, Dänemark
- ▶ Casale, Lugano
- ▶ Linde Engineering
- ▶ Johnson Matthey Catalysts