



AUFGABEN ZUM TECHMAX 10 AUF DEM WEG ZUM WASSERSTOFFSPEICHER – KATALYSATOREN FÜR DIE AMMO- NIAKZERLEGUNG

AUFGABENSAMMLUNG

Aufgabe 1

„Schon 1913 startete die industrielle Produktion nach dem Haber-Bosch-Verfahren, das bis heute im Einsatz ist. [...] Die Reaktionsgleichung der kompletten Ammoniaksynthese lautet $N_2 + 3 H_2 \rightarrow 2 NH_3$ “
(TECHMAX 10, S. 2 > QR)



Aufgabe 1.1

Erläutern Sie alle physikalisch-chemischen Möglichkeiten für eine möglichst hohe und schnelle Ammoniak-Ausbeute im Haber-Bosch-Verfahren. Benennen Sie das zugrunde liegende chemische Prinzip.



Aufgabe 1.2

In einem Experiment wird die Ammoniaksynthese bei verschiedenen Temperaturen untersucht. Alle anderen Bedingungen werden konstant gehalten. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle wiedergegeben:

Versuchsansatz Nr.	1	2
Temperatur	A	B
Stoffmengenkonzentration $c(N_2)$ in mol/l zu Beginn der Reaktion	0,030	0,030
Stoffmengenkonzentration $c(N_2)$ in mol/l nach Einstellung des Gleichgewichts	0,010	0,015

Beurteilen Sie, welche der Aussagen a, b und c zutreffend ist:

a) $A > B$

b) $A = B$

c) $A < B$



Aufgabe 1.3

Berechnen Sie anhand der in folgender Tabelle gegebenen Werte die Mindesttemperatur in $^{\circ}C$, die für einen thermodynamisch freiwilligen Reaktionsablauf der Ammoniaksynthese aus den Elementen notwendig ist.

(Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf Standardbedingungen. Die zu errechnende Temperatur stellt daher einen vereinfachten Näherungswert dar.)

Teilchen	H	H_2	N	N_2	O	O_2	NH_3
ΔH / [kJ/mol]	217,97	0	472,70	0	249,17	0	-46,11
ΔG / [kJ/mol]	203,25	0	455,56	0	231,73	0	-16,45
S / [J/K · mol]	114,71	130,684	153,30	191,61	161,06	205,138	192,45

Tab.: Thermodynamische Daten bei $T = 298,15 K$



Aufgabe 1.4

Die Schritte der Ammoniaksynthese werden im TECHMAX 10 in Abb. A und der zugehörigen Abbildungsbeschreibung auf S. 2 dargestellt.

Formulieren Sie zu einzelnen Zeitabschnitten anhand der Kugelteilchen-Darstellung sowie der Abbildungsbeschreibung die Reaktionsgleichungen.



Aufgabe 1.5

Die Einstellung einer Gleichgewichtslage kann grafisch dargestellt werden. Folgende Konzentration-Zeit- und Reaktionsgeschwindigkeit-Zeit-Diagramme, c/t -D und v/t -D, sind denkbar:

Beurteilen Sie jedes der acht Diagramme hinsichtlich seiner Eignung, die Einstellung des Ammoniak-Gleichgewichts darzustellen.

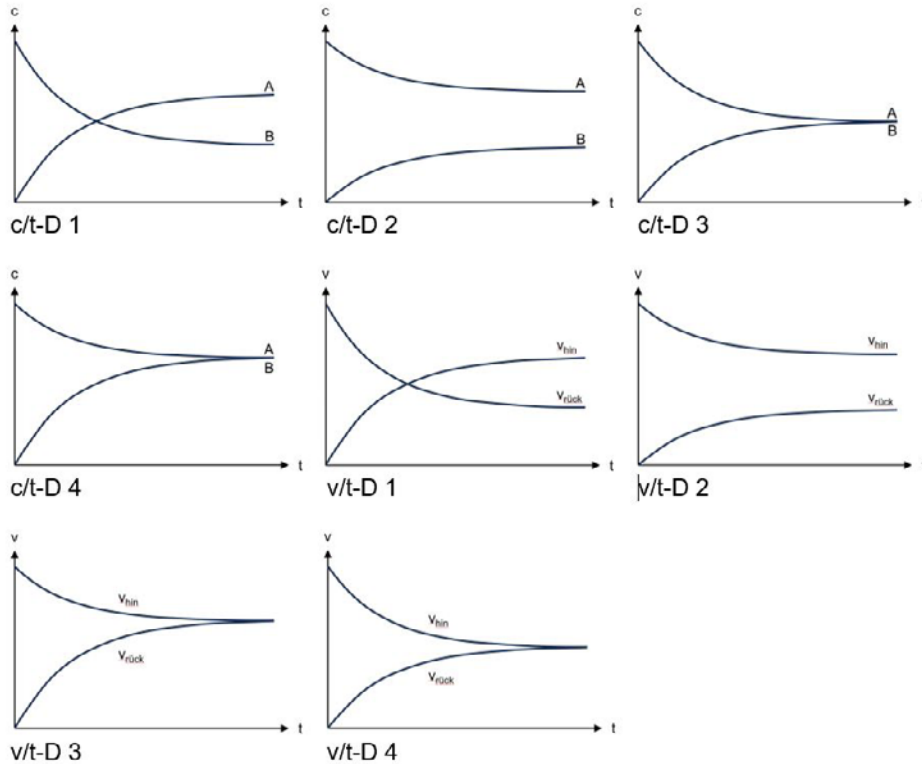


Abb. 1: © A. Wöhl / CC BY-NC-SA 4.0



Aufgabe 2

„Im Vergleich [...] bietet Ammoniak als Wasserstoffspeicher einige Vorteile. Der erste Vorteil ist seine hohe Energiedichte von 3,2 Kilowattstunden pro Liter, pro Kilogramm sogar 5,2 Kilowattstunden – zum Vergleich: bei Benzin sind es 9,7 beziehungsweise 12,7 Kilowattstunden.“ (TECHMAX 10, S. 2 f.)

Berechnen Sie anhand dieser Angaben die Massen-Dichte von flüssigem Ammoniak und flüssigem Benzin. Vergleichen Sie die beiden errechneten Werte.



Aufgabe 3

„Katalyse ist die Beschleunigung eines langsam verlaufenden chemischen Vorgangs durch die Gegenwart eines fremden Stoffes, der selbst unverändert bleibt. – Wilhelm Ostwald, um 1900“ (TECHMAX 10, S. 4, Link-Tipps, Pioniere des Wissens)

Beurteilen Sie die Aussage von Ostwald mit den heutigen Erkenntnissen zu Katalysevorgängen.



Aufgabe 4

Abb. B auf S. 3 im TECHMAX 10 zeigt die Ammoniakzersetzungsrate von vier verschiedenen Katalysator-Trägermaterial-Proben:

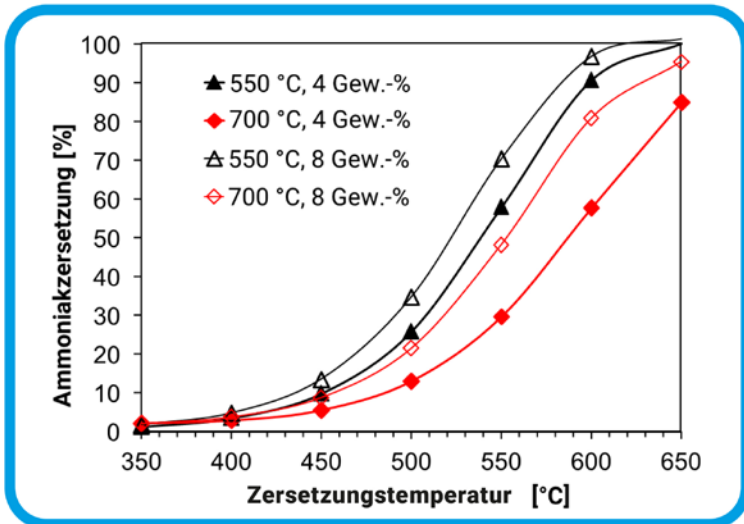


Abb. 2 © C. Weidenthaler; verändert nach ChemCatChem, Volume: 14, Issue: 20, 2022, DOI: (10.1002/cctc.202200688) / CC BY 4.0

Ergänzen Sie hypothetische Kurven für folgende Katalysator-Trägermaterial-Kombinationen:

Herstellungstemperatur / [°C]	Cobaltanteil / [Gew.-%]
550	10
550	6
700	2

Aufgabe 5

„Auf der Oberfläche des Trägers bildet sich beim Herstellungsprozess elementares Cobalt. Dieses katalysiert die Ammoniakzerlegung. Ein Teil des Cobalts wandert in den Träger und bildet einen Mischkristall (rechts).“ (TECHMAX 10, S. 4, Abb. C)



Aufgabe 5.1

Formulieren Sie für die Erklärung des Inaktivierungsvorgangs geeignete Reaktionsgleichungen.



Aufgabe 5.2

Leiten Sie aus Abb. C die Koordinationszahlen von Aluminiumoxid ab. Begründen Sie daraus die Verhältnisformel des Salzes Al_2O_3 .



Aufgabe 6

„Ammoniak – ein guter Wasserstoffspeicher?“ Ist Ammoniak oder doch das unveränderte Original der bessere Speicher für Wasserstoff?

Bearbeiten Sie folgende LearningApp: <https://learningapps.org/watch?v=pn372nev523> oder > QR



Aufgabe 7

Bearbeiten Sie folgende LearningApp zum Video „Grüner Stahl – Ammoniak für die Eisenproduktion“:

<https://learningapps.org/watch?v=pf1p2d1un23> oder > QR





LÖSUNGEN

Lösung 1.1

- Druck erhöhen, da Begünstigung der Reaktion, bei der N (Gasteilchen) sinkt
- N (Edukte) erhöhen und N (Produkte) verringern, da Begünstigung der Verbrauchs- / Nachbildungsreaktion
- Temperaturverringern, da Begünstigung der exothermen Reaktion
- Temperatur nicht zu weit verringern, um Reaktionsgeschwindigkeit nicht zu weit herabzusetzen
- Katalysator verringert Aktivierungsenergie
- Prinzip des kleinsten Zwangs

Lösung 1.2

Die Reaktion ist exotherm, folglich wird bei höherer Temperatur die Rückreaktion bevorzugt. Die Gleichgewichtskonzentration des Edukts N_2 ist in Ansatz 1 geringer als in Ansatz 2, somit muss in Ansatz 1 die Temperatur geringer als in Ansatz 2 sein. Zutreffend ist daher nur die Aussage c) $A < B$.

Lösung 1.3

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

$$T = \frac{\Delta H - \Delta G}{\Delta S}$$

$$= \frac{[2 \cdot (-46,11 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}) - (1 \cdot 0 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} + 3 \cdot 0 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}})] - 0}{2 \cdot 0,19245 \frac{\text{kJ}}{\text{K} \cdot \text{mol}} - (1 \cdot 0,19161 \frac{\text{kJ}}{\text{K} \cdot \text{mol}} + 3 \cdot 0,130684 \frac{\text{kJ}}{\text{K} \cdot \text{mol}})} = \frac{-92,22 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}}{-0,198762 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}}$$

$$= 463,97 \text{ K}$$

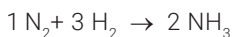
$$= 190,82 \text{ °C}$$

Lösung 1.4

- (2) $N_2(g) \rightarrow N_2(\text{ads})$
 $H_2(g) \rightarrow H_2(\text{ads})$
- (3) $N_2(\text{ads}) \rightarrow 2 N(\text{ads})$
 $3 H_2(\text{ads}) \rightarrow 6 H(\text{ads})$
- (4) $N(\text{ads}) + H(\text{ads}) \rightarrow NH(\text{ads})$
- (5) $NH(\text{ads}) + H(\text{ads}) \rightarrow NH_2(\text{ads})$
- (6) $NH_2(\text{ads}) + H(\text{ads}) \rightarrow NH_3(\text{ads})$
- (7) $NH_3(\text{ads}) \rightarrow NH_3(g)$

nach (7) $NH_3(\text{ads}) + H \rightarrow NH_4^+(\text{ads})$

Lösung 1.5



c/t-D 1, 2 und 3: Die Konzentration eines Edukt-Stoffs sinkt jeweils im selben Ausmaß wie die Konzentration eines Produkt-Stoffs steigt. Das ist mit den Koeffizienten der Reaktionsgleichung (1; 3; 2) nicht vereinbar. Somit sind die Darstellungen ungeeignet.

c/t-D 4: Während eines beliebig wählbaren Zeitintervalls bis zur Einstellung der Gleichgewichtslage sinkt die Konzentration eines Edukt-Stoffs halb so stark wie die Konzentration eines Produkt-Stoffs steigt. Dies gilt für den Verbrauch von 1 N_2 für die Bildung von 2 NH_3 . Das Diagramm zeigt zwar nicht für alle an der

Reaktion beteiligten Stoffe die Bildungs- und Zersetzungsgeschwindigkeiten, die Kurvenverläufe sind jedoch korrekt. Somit ist die Darstellung geeignet.

v/t-D 1 und 2: Die Geschwindigkeiten für Hin- und Rückreaktion sind jeweils zwar ab einem gewissen Zeitpunkt parallel zur x-Achse, allerdings unterschiedlich hoch. Hin- und Rückreaktion laufen somit ab diesem Zeitpunkt jeweils isoliert betrachtet unverändert gleich schnell, in Relation zueinander aber unterschiedlich schnell ab. Es liegt kein Gleichgewicht vor. Die Diagramme sind Unsinn. Somit sind die Darstellungen ungeeignet.

v/t-D 3: Die Geschwindigkeiten für Hin- und Rückreaktion vereinigen sich zwar ab einem gewissen Zeitpunkt zu einer einzigen Parallelen zur x-Achse, allerdings sind die Geschwindigkeiten bis zur Gleichgewichtseinstellung unterschiedlich groß. Das ist unsinnig. Somit ist die Darstellung ungeeignet.

v/t-D 4: Die Geschwindigkeiten für Hin- und Rückreaktion vereinigen sich ab einem gewissen Zeitpunkt zu einer einzigen Parallelen zur x-Achse, die Geschwindigkeiten bis zur Gleichgewichtseinstellung verringern sich bzw. steigen im selben Ausmaß. Grafisch ergeben sich zueinander achsensymmetrische Kurvenverläufe. Somit ist die Darstellung geeignet.

Lösung 2

$$\text{Energiedichte von Ammoniak: } 3,2 \frac{\text{kWh}}{\text{l}} \triangleq 5,2 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

$$\frac{5,2}{3,2} \text{ l} \triangleq 1 \text{ kg}$$

$$\text{Massendichte: } \rho = \frac{m}{V}$$

$$\rho (\text{NH}_3 (\text{l})) = \frac{1 \text{ kg}}{\frac{3,2}{5,2} \text{ l}} = 0,615 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\text{Energiedichte von Benzin: } 9,7 \frac{\text{kWh}}{\text{l}} \triangleq 12,7 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

$$\frac{12,7}{9,7} \text{ l} \triangleq 1 \text{ kg}$$

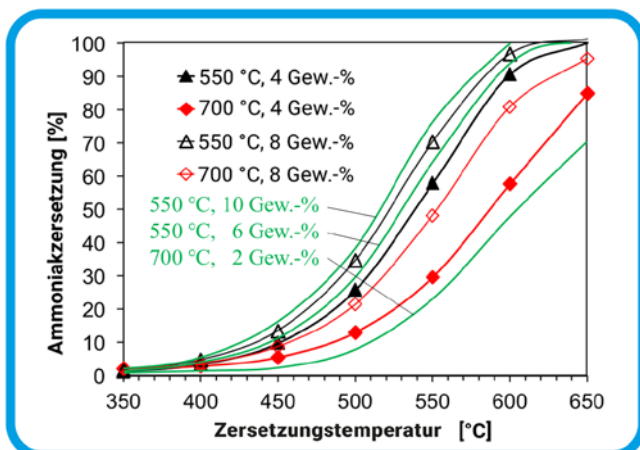
$$\rho (\text{Benzin (l)}) = \frac{1 \text{ kg}}{\frac{12,7}{9,7} \text{ l}} = 0,764 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Vergleich: $\rho (\text{NH}_3 (\text{l})) < \rho (\text{Benzin (l)})$

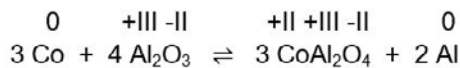
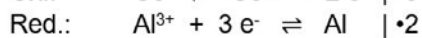
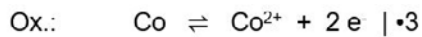
Lösung 3

Ostwalds Aussage ist falsch: „Und sie [Prof. Weidenthaler, Anm.] räumt auch gleich mit der Vorstellung auf, dass Katalysatoren sich während der Reaktion nicht verändern. Das Gegenteil ist der Fall.“ (S. 3). Zwar geht bezogen auf die Stoffebene ein Katalysator als Produkt aus der Reaktion hervor wie er als Edukt eingetreten war. Auf Teilchenebene hingegen interagiert ein Katalysator-Teilchen mit den Edukten und wird dabei selbst durch das Eingehen und Überwinden von Bindungen vorübergehend verändert.

Lösung 4



Lösung 5.1

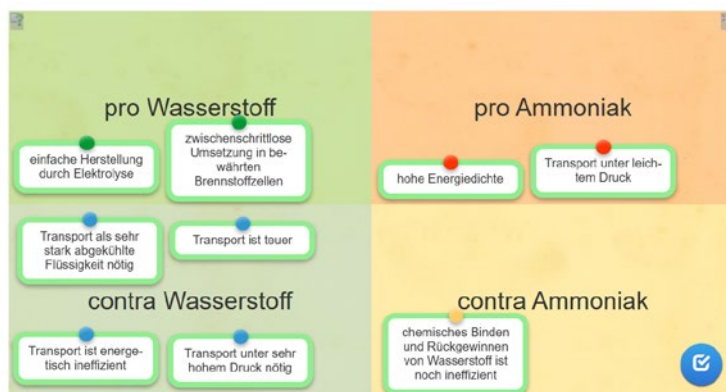


Die bei der Redoxreaktion entstehenden Aluminium-Atome sind elektrostatisch nicht mehr ausreichend gebunden und können das Ionengitter verlassen (vgl. Ionengitterlücken in Abb. C, rechts).

Lösung 5.2

Jedes Al^{3+} -Ion ist oktaedrisch von sechs Oxid-Ionen umgeben, jedes O^{2-} -Ion quadratisch von vier Aluminium-Ionen. Die Koordinationszahlen 4 und 6 lassen sich kürzen auf 2 und 3 $\Rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$.

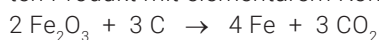
Lösung 6



Lösung 7

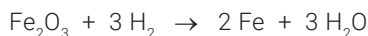
Einblendung 1:

Die großtechnische Erzeugung von Eisen aus Eisenerz erfolgt im Hochofen in aufeinanderfolgenden chemischen Prozessen. Erstellen Sie eine Gesamtgleichung der Reduktion von Eisen(III)-oxid zum gewünschten Produkt mit elementarem Kohlenstoff (vereinfacht für Kohle) als Reduktionsmittel.



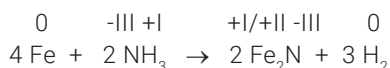
Einblendung 2:

Erstellen Sie eine Gesamtgleichung für die Reduktion von Eisen(III)-oxid mit Wasserstoff als Reduktionsmittel.



Einblendung 3:

Das entstehende Rostschutzmittel ist v.a. Dieisennitrid. Erstellen Sie die zugehörige Reaktionsgleichung. Bestimmen Sie die Oxidationszahlen aller Atome und Ionen.



Der Text wird unter [CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) veröffentlicht.

Stand 01/2024; Text: A. Wöhl; Layout und Redaktion: max-wissen-Team