

### 3.1. Fragen zum chemischen Gleichgewicht

#### Reaktionsgeschwindigkeiten (5)

- Beschreibe die Reaktion von Salzsäure HCl mit Magnesium Mg mit einer Reaktionsgleichung und gib den Reaktionstyp an. (2)
- Verwendet man einen Liter Salzsäure mit  $[HCl] = 1 \text{ mol/l}$  bei  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , so haben sich nach 50 Sekunden 0,2 mol Wasserstoff gebildet. Wie groß war die mittlere Reaktionsgeschwindigkeit? (1)
- Welche Reaktionszeiten und welche Reaktionsgeschwindigkeiten sind bei einer Säurekonzentration von  $[HCl] = 2 \text{ mol/l}$  bei  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  zu erwarten? (2)

#### Lösung

- $2 \text{ H}^+\text{Cl}(\text{aq}) + \text{Mg} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{MgCl}_2(\text{aq})$  (Redoxreaktion)
- $c = 4 \text{ mmol l}^{-1} \text{ s}^{-1}$ .
- 2 mol/l: 25 Sekunden und  $c = 8 \text{ mmol l}^{-1} \text{ s}^{-1}$ .

#### Reaktionsgeschwindigkeiten (5)

- Beschreibe den Zerfall von Thioschwefelsäure mit einer Reaktionsgleichung und gib den Reaktionstyp an. (2)
- Bei  $20^\circ\text{C}$  wurde nach 50 Sekunden eine Schwefelkonzentration von 1 mmol/l gemessen. Wie groß war die mittlere Reaktionsgeschwindigkeit? (1)
- Welche Reaktionszeiten und welche Reaktionsgeschwindigkeiten sind bei  $30^\circ\text{C}$  und  $40^\circ\text{C}$  zu erwarten? (2)

#### Lösung

- $2 \text{ H}^+\text{Cl}(\text{aq}) + \text{Mg} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{MgCl}_2(\text{aq})$  (Redoxreaktion)
- $c = 4 \text{ mmol l}^{-1} \text{ s}^{-1}$ .
- 2 mol/l: 25 Sekunden und  $c = 8 \text{ mmol l}^{-1} \text{ s}^{-1}$ .

#### Reaktionsgeschwindigkeiten (5)

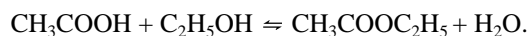
- Beschreibe die Reaktion von schwefliger Säure  $\text{H}_2\text{SO}_3$  und Iodat-Ionen  $\text{IO}_3^-$  mit einer Reaktionsgleichung und gib den Reaktionstyp an. (2)
- Bei einer anfänglichen Iodatkonzentration von 10 mmol/l wurde nach 50 Sekunden eine Iodkonzentration von 1 mmol/l gemessen. Wie groß war die Reaktionsgeschwindigkeit? (1)
- Welche Reaktionszeiten und welche Reaktionsgeschwindigkeiten sind bei einer Iodatkonzentration von 20 mmol/l zu erwarten?

#### Lösung

- $5 \text{ H}_2\text{SO}_3 + 2 \text{ IO}_3^- + 2 \text{ H}^+ \rightleftharpoons 5 \text{ H}_2\text{SO}_4 + \text{I}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- $v = 1 \text{ mmol/l} : 50 \text{ Sekunden} = 0,02 \text{ mmol/l}\cdot\text{s}$
- Die Reaktionsgeschwindigkeit ist bei diesem Versuch proportional zu  $[\text{IO}_3^-]$ , also  $v_{\text{neu}} = 0,04 \text{ mmol/l}\cdot\text{s}$ .

#### Estergleichgewicht (12)

Bei der Reaktion von Ethansäure  $\text{CH}_3\text{COOH}$  mit Ethanol  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  bildet sich unter Austritt von Wasser Ethansäure-ethyl-ester  $\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$ :



- Formuliere das Massenwirkungsgesetz für diese Reaktion. (1)
- 6 g Ethansäure wurden mit 4,6 g Ethanol versetzt. Nach einiger Zeit sind noch 0,03 mol Säure übrig. Berechne die Gleichgewichtskonstante K. (2)
- Wieviel Mol Ester werden gebildet, wenn 1 Mol Säure mit 4 Mol Alkohol versetzt wurden? (2)
- Wieviel Mol Ester bleiben übrig, wenn 2 Mol Ester mit 1 mol Wasser versetzt werden?
- Berechne die Ausbeute für c). (2)
- Berechne die Ausbeute, wenn der Ester jeweils abdestilliert wird, so dass nur noch 0,1 Mol Ester in der Reaktionslösung zurückbleiben. (2)
- Zeichne ein Energiediagramm und erkläre, wie sich die Ausbeute mit Hilfe der Temperatur erhöhen lässt. (2)
- Warum lässt sich die Ausbeute durch Zugabe von konzentrierter Schwefelsäure ebenfalls erhöhen? (1)

### Lösung

- a) 
$$\frac{[\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5] \cdot [\text{H}_2\text{O}]}{[\text{CH}_3\text{COOH}] \cdot [\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}]} = K$$
- b) Ausgangsmengen: 6 g = 0,1 mol CH<sub>3</sub>COOH und 4,6 g = 0,1 mol C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH. Im Gleichgewicht liegen vor:  
restliche Edukte 0,03 mol CH<sub>3</sub>COOH und 0,03 mol C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH sowie erzeugte Produkte 0,1 – 0,03 = 0,07 mol  
CH<sub>3</sub>COOC<sub>2</sub>H<sub>5</sub> und 0,07 mol H<sub>2</sub>O  
$$\Rightarrow K = \frac{0,07 \text{ mol} \cdot 0,07 \text{ mol}}{(0,03 \text{ mol}) \cdot (0,03 \text{ mol})} = 5,4$$
- c) 
$$\frac{x \cdot x}{(1 \text{ mol} - x) \cdot (4 \text{ mol} - x)} = 5,4 \Rightarrow x = 0,94 \text{ mol Ester bzw. Wasser}$$
- d) 
$$\frac{(2 - x) \cdot (1 - x)}{x^2} = 5,4 \Rightarrow x = 0,84 \text{ Mol Säure bzw. Alkohol} \Rightarrow 2 - 0,84 \text{ mol} = 1,16 \text{ Mol Ester bleiben übrig.}$$
- e) Ausbeute = erzeugte Produktmenge : Produktmenge bei vollständiger Umsetzung = 0,94 mol : 1 mol = 0,94 = 94%
- f) 
$$\frac{0,1 \text{ mol} \cdot x}{(1 \text{ mol} - x) \cdot (4 \text{ mol} - x)} = 5,4 \Rightarrow x = 0,99 \text{ mol Ester bzw. Wasser} \Rightarrow \text{Ausbeute} = 0,99 = 99 \%$$
- g) Schwefelsäure wirkt hygroskopisch (wasserentziehend). Durch Herabsetzung der Konzentration des Reaktionsproduktes Wasser wird die Hinreaktion gefördert.

### Iodwasserstoffgleichgewicht (14)

Wasserstoff und Jod reagieren zu Jodwasserstoff:  $\text{H}_2(\text{g}) + \text{I}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2 \text{HI}(\text{g})$  mit  $\Delta H = -16 \text{ kJ/mol}$  bei  $T = 500^\circ\text{C}$

- a) Formuliere das Massenwirkungsgesetz für diese Reaktion. (1)
- b) Ein Kolben mit einem Volumen  $V = 1 \text{ Liter}$  wurde mit 0,4 mol Wasserstoff und 0,4 mol Jod gefüllt. Nach einiger Zeit sind nur noch 0,1 mol Jod übrig. Berechnen Sie die Gleichgewichtskonstante  $K$ . (2)
- c) Berechne die Ausbeute in b) (1)
- d) Ein Kolben mit einem Volumen  $V = 1 \text{ Liter}$  wurde mit 0,1 mol Wasserstoff und 0,1 mol Jod gefüllt. Wieviel mol Jodwasserstoff werden daraus gebildet? (2)
- e) Wie viel mol Wasserstoff und Jod werden gebildet, wenn 0,1 mol Jodwasserstoff eingefüllt wurde? (2)
- f) Wie verändert sich die Ausbeute bei einer Druckerhöhung? Begründe. (1)
- g) Wie verändert sich die Ausbeute beim Erwärmen? Begründe. (2)
- h) Wie verändert sich die Ausbeute, wenn man HI aus dem Gasraum entfernt? (1)
- i) Begründe mit Hilfe zwischenmolekularer Kräfte, warum man HI durch Einspritzen von Wasser aus dem Gasraum entfernen kann. (2).

### Lösung

- a) 
$$\frac{[\text{HI}]^2}{[\text{H}_2] \cdot [\text{I}_2]} = K \quad (1)$$
- b) 
$$\frac{(2 \cdot (0,4 \text{ mol} - 0,1 \text{ mol}))^2}{(0,1 \text{ mol}) \cdot (0,1 \text{ mol})} = 36 \quad (2)$$
- c) 
$$\frac{0,6 \text{ mol}}{0,8 \text{ mol}} = 0,75 = 75 \% \quad (1)$$
- d) 
$$\frac{(2x)^2}{(0,1 \text{ mol} - x) \cdot (0,1 \text{ mol} - x)} = 36 \Rightarrow x = 0,075 \text{ mol} \Rightarrow 2x = 0,15 \text{ mol Iodwasserstoff} \quad (2)$$
- e) 
$$\frac{(2 \cdot (0,05 \text{ mol} - x))^2}{x \cdot x} = 36 \Rightarrow x = 0,0125 \text{ mol Iod bzw. Wasserstoff} \quad (2)$$
- f) Bei Druckerhöhung passiert nichts, da Edukte und Produkte gleich viel Raum beanspruchen (1)
- g) Durch Temperaturerhöhung wird mehr Energie zugeführt und die endotherme (=energieverbrauchende) Rückreaktion begünstigt, so dass sich das Gleichgewicht in Richtung der Edukte verschiebt. (2)
- h) Durch Entfernung einer Komponente wird die Reaktionsrichtung begünstigt, die dieses Komponente nachliefert, in diesem Fall die Hinreaktion. (1)
- i) Das polare Produkt HI löst sich in Wasser, die unpolaren Edukte H<sub>2</sub> und I<sub>2</sub> aber nicht. Durch Wassereinspritzung wird also das Produkt HI aus dem Gleichgewicht entfernt und die Hinreaktion begünstigt. (2)

### Iodwasserstoffgleichgewicht (12)

Wasserstoff und Jod reagieren zu Jodwasserstoff:  $\text{H}_2 + \text{I}_2 \rightleftharpoons 2 \text{HI}$  mit  $\Delta H = -16 \text{ kJ/mol}$  bei  $T = 500^\circ\text{C}$

- Formuliere das Massenwirkungsgesetz für diese Reaktion. (1)
- Ein Kolben mit einem Volumen  $V = 1$  Liter wurde mit  $0,3 \text{ mol}$  Wasserstoff und  $0,3 \text{ mol}$  Jod gefüllt. Nach einiger Zeit sind nur noch  $0,1 \text{ mol}$  Jod übrig. Berechne die Gleichgewichtskonstante  $K$ . (3)
- Ein Kolben mit einem Volumen  $V = 1$  Liter wurde mit  $0,1 \text{ mol}$  Wasserstoff und  $0,1 \text{ mol}$  Jod gefüllt. Wie viel mol Jodwasserstoff werden daraus gebildet? (2)
- Wieviel mol Wasserstoff und Jod werden gebildet, wenn  $0,1 \text{ mol}$  Jodwasserstoff eingefüllt wurde? (2)
- Berechne die Ausbeute in c) (1)
- In welche Richtung verschiebt sich das Gleichgewicht, wenn die Temperatur erhöht wird? Begründe. (2)
- Warum erhöht sich die Ausbeute, wenn man bei der Gasreaktion Wasser einspritzt? (1).

### Lösung

- $$\frac{[\text{HI}]^2}{[\text{H}_2] \cdot [\text{I}_2]} = K$$
- $$\frac{(2 \cdot (0,3 \text{ mol} - 0,1 \text{ mol}))^2}{(0,1 \text{ mol}) \cdot (0,1 \text{ mol})} = 16$$
- $$\frac{0,4 \text{ mol}}{0,6 \text{ mol}} = 0,67 = 67 \%$$
- $$\frac{(2x)^2}{(0,1 \text{ mol} - x) \cdot (0,1 \text{ mol} - x)} = 16 \Rightarrow x = 0,067 \Rightarrow 2x = 0,132 \text{ mol Iodwasserstoff}$$
- $$\frac{(2 \cdot (0,05 \text{ mol} - x))^2}{x \cdot x} = 16 \Rightarrow x = 0,0167 \text{ mol Iod bzw. Wasserstoff}$$
- Durch Temperaturerhöhung wird mehr Energie zugeführt und die endotherme (=energieverbrauchende) Rückreaktion begünstigt, so dass sich das Gleichgewicht in Richtung der Edukte verschiebt.
- Das polare Produkt HI löst sich in Wasser, die unpolaren Edukte  $\text{H}_2$  und  $\text{I}_2$  aber nicht. Durch Wassereinspritzung wird also das Produkt HI aus dem Gleichgewicht entfernt und die Hinreaktion begünstigt.

### Ammoniaksynthese (12)

Stickstoff  $\text{N}_2$  und Wasserstoff  $\text{H}_2$  reagieren zu Ammoniak  $\text{NH}_3$ :  $\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 \rightleftharpoons 2 \text{NH}_3$  mit  $\Delta H = -92 \text{ kJ/mol}$

- Formuliere das Massenwirkungsgesetz für diese Reaktion. (1)
- Ein Kolben mit einem Volumen  $V = 1$  Liter wurde mit  $0,12 \text{ mol}$  Stickstoff und  $0,26 \text{ mol}$  Wasserstoff gefüllt. Nach einiger Zeit sind  $0,04 \text{ mol}$  Ammoniak entstanden. Berechne die Gleichgewichtskonstante  $K$ . (3)
- Ein Kolben mit einem Volumen  $V = 1$  Liter wurde mit  $3 \text{ mol}$  Stickstoff und  $4 \text{ mol}$  Wasserstoff gefüllt. Wieviel mol Ammoniak werden daraus gebildet? (4)
- Berechne die Ausbeute für b). (1)
- Beschreibe und begründe zwei Maßnahmen zur Erhöhung der Ausbeute. (2)
- Warum erhöht sich die Ausbeute, wenn man bei der Gasreaktion Wasser einspritzt? (1).

### Lösung

a) 
$$\frac{[\text{NH}_3]}{[\text{N}_2] \cdot [\text{H}_2]^3} = K$$

b) Hinreaktion:  $0,02 \text{ mol N}_2 + 0,06 \text{ mol H}_2 \rightarrow 0,04 \text{ mol NH}_3$

$$\Rightarrow K = \frac{(0,04 \text{ mol/l})^2}{(0,12 \text{ mol/l} - 0,02 \text{ mol/l}) \cdot (0,26 \text{ mol/l} - 0,06 \text{ mol/l})^3} = 2 \text{ (l/mol)}^2$$

c) Hinreaktion:  $x \text{ mol N}_2 + 3x \text{ mol H}_2 \rightarrow 2x \text{ mol NH}_3$

$$\Rightarrow \frac{(2x \text{ mol/l})^2}{(2 \text{ mol/l} - x \text{ mol/l}) \cdot (4 \text{ mol/l} - 3x \text{ mol/l})^3} = 2 \text{ (l/mol)}^2 \Leftrightarrow \frac{(2x)^2}{(3-x) \cdot (4-3x)^3} = 2$$

$$\Rightarrow x = 1 \Rightarrow 2x = 2 \text{ mol Ammoniak wurden gebildet.}$$

d) Ausbeute = erzeugte Produktmenge : Produktmenge bei vollständiger Umsetzung mit  $x = \frac{4}{3}$

$$= 2 \text{ mol} : \frac{8}{3} \text{ mol}$$

$$= 0,75 = 75 \%$$

e) Durch Abkühlung wird Energie abgeführt und die exotherme (=energieliefernde) Hinreaktion begünstigt, so dass sich das Gleichgewicht in Richtung der Produkte verschiebt. Durch Druckerhöhung verschiebt sich das Gleichgewicht ebenfalls in Richtung der Produkte, da sie weniger Raum einnehmen als die Edukte.

f) Das polare Produkt  $\text{NH}_3$  löst sich in Wasser, die unpolaren Edukte  $\text{H}_2$  und  $\text{N}_2$  aber nicht. Durch Wassereinspritzung wird also das Produkt  $\text{NH}_3$  aus dem Gleichgewicht entfernt und die Hinreaktion begünstigt

### Ammoniakgleichgewicht (10)

2 Liter Ammoniakgas  $\text{NH}_3$  wurden in einem Liter Wasser gelöst.

a) Stelle die Reaktionsgleichung für die Reaktion von Ammoniak mit Wasser auf und benenne alle Produkte. (1)

b) Stelle das Massenwirkungsgesetz auf. (1)

c) Wieviel Mol Ammoniak und wieviel Mol Wasser lagen zu Beginn der Reaktion vor? (2)

d) Nach der Einstellung des Gleichgewichtes haben sich 1,26 mmol Hydroxid-Ionen gebildet. Berechne die Gleichgewichtskonstante K. (2)

e) Wieviele Hydroxid-Ionen bilden sich, wenn man 1 Mol Ammoniak in einem Liter Wasser löst? (2)

f) In welche Richtung verschiebt sich das Gleichgewicht, wenn der Versuch mit Natronlauge anstelle von Wasser durchgeführt wird? (Begründung!) (2)

### Lösung

a)  $\text{H}_2\text{O (fl)} + \text{NH}_3\text{(g)} \rightleftharpoons \text{OH}^-\text{(gel)} + \text{NH}_4^+\text{(gel)}$   
Säure      Base      Hydroxid-Ion      Ammonium-Ion

b) 
$$\frac{[\text{OH}^-] \cdot [\text{NH}_4^+]}{[\text{H}_2\text{O}] \cdot [\text{NH}_3]} = K$$

c)  $2 \text{ l} = 89,3 \text{ mmol NH}_3$  und  $1000 \text{ g} = 55555 \text{ mmol H}_2\text{O}$

d) 
$$K = \frac{1,26 \text{ mmol} \cdot 1,26 \text{ mmol}}{(55555 \text{ mmol} - 1,26 \text{ mmol}) \cdot (89,3 \text{ mmol} - 1,26 \text{ mmol})} = 3,25 \cdot 10^{-7}$$

e) 
$$\frac{x \cdot x}{(55555 \text{ mmol} - x) \cdot (1000 \text{ mmol} - x)} = 3,25 \cdot 10^{-7} \Rightarrow x = 4,3 \text{ mmol OH}^- \text{-Ionen}$$

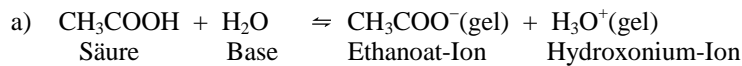
f) Die Konzentration der  $\text{OH}^-$ -Ionen ist in Natronlauge viel höher als in Wasser. Da bei der Hinreaktion  $\text{OH}^-$ -Ionen als Produkt entstehen, führt die Erhöhung ihrer Konzentration zu einer Verschiebung des Gleichgewichtes auf die Seite der Edukte.

### Essigsäuregleichgewicht (10)

6 g Ethansäure  $\text{CH}_3\text{COOH}$  wurden in einem Liter Wasser gelöst.

- Formulieren Sie die Reaktionsgleichung für die Reaktion von Ethansäure mit Wasser und benennen Sie alle Produkte. (1)
- Formulieren Sie das Massenwirkungsgesetz. (1)
- Wieviele Mol Ethansäure und wieviel Mol Wasser lagen zu Beginn der Reaktion vor? (2)
- Nach der Einstellung des Gleichgewichtes haben sich 1,33 mmol Hydroxonium-Ionen gebildet. Berechnen Sie die Gleichgewichtskonstante  $K$ . (2)
- Wieviele Hydroxonium -Ionen bilden sich, wenn man 1 Mol Ethansäure in einem Liter Wasser löst? (2)
- In welche Richtung verschiebt sich das Gleichgewicht, wenn der Versuch mit Salzsäure anstelle von Wasser durchgeführt wird? (Begründung!) (2)

### Lösung



b) 
$$\frac{[\text{CH}_3\text{COO}^-] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{CH}_3\text{COOH}] \cdot [\text{H}_2\text{O}]} = K$$

c) 6 g = 100 mmol  $\text{CH}_3\text{COOH}$  und 1000 g = 55555 mmol  $\text{H}_2\text{O}$

d) 
$$\frac{1,33 \text{ mmol} \cdot 1,33 \text{ mmol}}{(55555 \text{ mmol} - 1,33 \text{ mmol}) \cdot (100 \text{ mmol} - 1,33 \text{ mmol})} = 3,25 \cdot 10^{-7}$$

e) 
$$\frac{x \cdot x}{(55555 \text{ mmol} - x) \cdot (1000 \text{ mmol} - x)} = 3,25 \cdot 10^{-7} \Rightarrow x = 4,3 \text{ mmol } \text{H}_3\text{O}^+\text{-Ionen}$$

f) Die Konzentration der  $\text{H}_3\text{O}^+$ -Ionen ist in Salzsäure viel höher als in Wasser. Da bei der Hinreaktion  $\text{H}_3\text{O}^+$ -Ionen als Produkt entstehen, führt die Erhöhung ihrer Konzentration zu einer Verschiebung des Gleichgewichtes auf die Seite der Edukte.

### Reaktion von Ammoniumchlorid mit Wasser (12)

Gibt man 10 g Ammoniumchlorid in 1 Liter Wasser, so erhält man eine schwach saure Lösung.

- Warum löst sich Ammoniumchlorid in Wasser? Beschreibe den Lösungsvorgang mit einer Reaktionsgleichung und benenne die dabei entstehenden Teilchen. (2)
- Berechne die Konzentration dieser Lösung. (2)
- Untersuche die beiden beim Lösen entstandenen Ionen auf sauren bzw. basischen Charakter und gib gegebenenfalls die Reaktionsgleichung für die Reaktion mit Wasser und den pK-Wert an. (6)
- Berechne den pH-Wert der Lösung. (2)

### Lösung

a) Ammoniumchlorid ist ein Salz, dessen Ionengitter durch die polaren Wassermoleküle zerstört wird:



b) 53,5 g  $\text{NH}_4\text{Cl} = 1 \text{ mol } \text{NH}_4\text{Cl}$   
10 g  $\text{NH}_4\text{Cl} = 0,187 \text{ mol } \text{NH}_4\text{Cl}$

$\Rightarrow$  man erhält eine 0,187-molare Ammoniumchloridlösung.

c)  $\text{NH}_4^+$  kann ein Proton  $\text{H}^+$  an  $\text{H}_2\text{O}$  abgeben (Reaktion als **Säure**):  $\text{NH}_4^+ + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{NH}_3 + \text{H}_3\text{O}^+$  mit  $\text{pK}_S = 9,25$   
Die Aufnahme eines Protons (Reaktion als **Base**) ist extrem unwahrscheinlich, da  $\text{NH}_4^+$  positiv geladen ist und die ebenfalls positiv geladenen Protonen  $\text{H}^+$  abstößt.

$\text{Cl}^-$  kann offensichtlich kein Proton mehr abgeben (keine Reaktionen als **Säure** möglich)

Es kann ein Proton aufnehmen (Reaktion als **Base**):  $\text{H}_2\text{O} + \text{Cl}^- \rightleftharpoons \text{OH}^- + \text{HCl}$  mit  $\text{pK}_B \approx 20$ . Wegen der stabilen Edelgaskonfiguration des Chloridions liegt das Gleichgewicht extrem auf der linken Seite, d.h., diese Reaktion ist zu vernachlässigen.

d) Der pH-Wert dieser Lösung ist  $\text{pH} = \frac{1}{2} (\text{pK}_S - \log c_0) = 5,13$

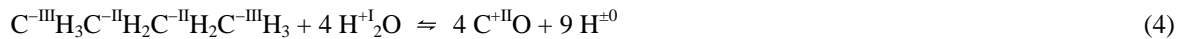
### Redoxreaktionen, funktionelle Gruppen, Prinzip vom kleinsten Zwang

Die BASF bezieht praktisch alle Rohstoffe außer Kochsalz und Wasser aus dem Steamcracker im Zentrum des Betriebes. In dieser Anlage werden die verschiedenen Erdölfractionen, die über die Pipeline aus der Raffinerie in Karlsruhe geliefert werden, mit heißem Wasserdampf behandelt. Aus den langkettigen Kohlenwasserstoffen des Vakuum-Rückstandes erhält man dabei das so genannte Synthesegas, ein Gemisch aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff.

#### Teil 1: Redoxgleichung (4)

Beschreiben Sie die Entstehung von Synthesegas aus (der Einfachheit halber) Butan durch eine Reaktionsgleichung mit Oxidationszahlen und deuten sie die Elektronenübergänge mit Pfeilen an.

#### Lösung



#### Teil 2: Organische Verbindungsklassen, Prinzip vom kleinsten Zwang (8)

Das Synthesegas kann u.a. zu den folgenden Produkten weiter reagieren:

- stark exotherm zu Methan
  - schwach exotherm zu Methanol
  - schwach exotherm zu Ethansäure
- a) Beschreiben Sie alle drei Reaktionen mit je einer Reaktionsgleichung. (3)
- b) Beschreiben Sie drei Maßnahmen, durch deren Kombination sich die Reaktion in jeweils eine der drei Richtungen steuern lässt. (5)

#### Lösung

- a) (1)  $\text{CO} + 3 \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$  (1)
- (2)  $\text{CO} + 2 \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{OH}$  (1)
- (3)  $2 \text{CO} + 2 \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{COOH}$  (1)
- b) Temperatur: Kühlung begünstigt (1) gegenüber (2) und (3) (1)
- Druck: Hohe Drücke begünstigen (1) und (3) gegenüber (2) (2)
- Wasserstoffanteil: Entfernung von Wasserstoff begünstigt (3) gegenüber (1) und (2) (2)

#### Teil 3: Gleichgewicht (Version mit mol/l) (14)

Um die Wasserstoffausbeute zu erhöhen, behandelt man das Kohlenstoffmonooxid wieder mit Wasserdampf und erhält Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff.

- a) Bei Ausgangskonzentrationen von  $[\text{CO}]_0 = [\text{H}_2]_0 = 0,1 \text{ mol/l}$  erhält man im Gleichgewicht  $[\text{CO}_2] = 0,05 \text{ mol/l}$ . Berechnen Sie die Gleichgewichtskonstante. (3)
- b) Berechnen Sie die Gleichgewichtskonzentrationen aller Stoffe, wenn die Ausgangskonzentration von Wasserdampf verdoppelt wird und  $[\text{CO}]_0 = 0,1 \text{ mol/l}$  beibehalten wird. (4)
- c) Die Zugabe von weiterem Wasserdampf beeinflusst das Gleichgewicht nicht nur auf der Seite der Edukte, sondern auch auf der Seite der Produkte positiv. Welches der Produkte reagiert mit dem überschüssigen Wasserdampf und warum verbessert das die Wasserstoffausbeute? Begründen Sie mit Hilfe einer Reaktionsgleichung und benennen Sie das Folgeprodukt. (3)
- d) Die Wasserstoffausbeute lässt sich durch die Zugabe von Kalklauge (gesättigte Lösung von Calciumhydroxid) nochmals deutlich erhöhen. Begründen Sie mit einer Reaktionsgleichung und benennen Sie das Folgeprodukt (2)
- e) Wie lässt sich die „verbrauchte“ Kalklauge aus c) gewinnbringend weiterverwenden? Formulieren Sie eine passende Reaktionsgleichung. (2)

#### Lösung

- a)  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$  mit  $K = \frac{[\text{CO}_2] \cdot [\text{H}_2]}{[\text{CO}] \cdot [\text{H}_2\text{O}]} = \frac{0,05 \cdot 0,05}{0,05 \cdot 0,05} = 1$  (3)
- b)  $\frac{x \cdot x}{(0,1-x) \cdot (0,2-x)} = 1 \Rightarrow 0,3x = 0,02 \Rightarrow [\text{H}_2] = [\text{CO}_2] = 0,067 \text{ mol/l}$ , (2)
- $[\text{CO}] = 0,1 - x = 0,033 \text{ mol/l}$  und  $[\text{H}_2\text{O}] = 0,2 - x = 0,133 \text{ mol/l}$ . (2)
- c) Der Wasserdampf reagiert mit  $\text{CO}_2$  zu Kohlensäure:  $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3$  (2)
- Um das Gleichgewicht zu erhalten, wird  $\text{CO}_2$  und damit auch  $\text{H}_2$  nachproduziert. (1)
- d) Die Kalklauge reagiert mit  $\text{CO}_2$  zu Kalk:  $\text{Ca}(\text{OH})_2 (\text{aq}) + \text{CO}_2 (\text{aq}) \rightleftharpoons \text{CaCO}_3 (\text{s}) + \text{H}_2\text{O}$ . (2)
- e) Der Kalk kann zu  $\text{CaO}$  gebrannt werden und als Kalkmörtel verkauft werden: (1)
- $\text{CaCO}_3 (\text{s}) \rightleftharpoons \text{CaO} (\text{s}) + \text{CO}_2 (\text{g})$  (1)

### Teil 3: Chemisches Gleichgewicht, Prinzip von kleinsten Zwang (Version mit %) (14)

Um die Wasserstoffausbeute zu erhöhen, behandelt man das Kohlenstoffmonooxid wieder mit Wasserdampf und erhält Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff.

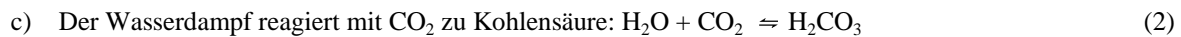
- Mischt man CO und H<sub>2</sub>O im Verhältnis 1 : 1, so erhält man im Gleichgewicht einen Volumenanteil von 25 % CO<sub>2</sub>. Berechnen Sie die Gleichgewichtskonstante. (3)
- Berechnen Sie die Gleichgewichtskonzentrationen aller Stoffe, wenn CO und H<sub>2</sub>O im Verhältnis 1 : 2 gemischt werden. (4)
- Die Zugabe von weiterem Wasserdampf beeinflusst das Gleichgewicht nicht nur auf der Seite der Edukte, sondern auch auf der Seite der Produkte positiv. Welches der Produkte reagiert mit dem überschüssigen Wasserdampf und warum verbessert das die Wasserstoffausbeute? Begründen Sie mit Hilfe einer Reaktionsgleichung und benennen Sie das Folgeprodukt. (3)
- Die Wasserstoffausbeute lässt sich durch die Zugabe von Kalklauge (gesättigte Lösung von Calciumhydroxid) nochmals deutlich erhöhen. Begründen Sie mit einer weiteren Reaktionsgleichung und benennen Sie das Folgeprodukt (2)
- Der bei d) entstehende Niederschlag löst sich wieder auf, wenn lang genug Kohlenstoffdioxid und Wasser eingeleitet werden. Formulieren Sie eine Reaktionsgleichung und benennen Sie das gelöste Salz (2)

#### Lösung

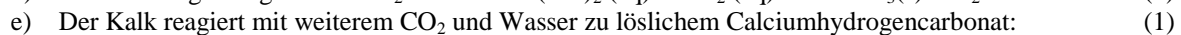
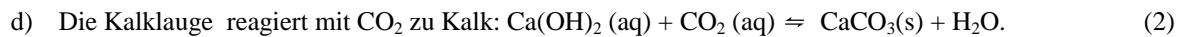
a)  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$  mit  $K = \frac{[\text{CO}_2] \cdot [\text{H}_2]}{[\text{CO}] \cdot [\text{H}_2\text{O}]} = \frac{0,25 \cdot 0,25}{0,25 \cdot 0,25} = 1$  (3)

b)  $\frac{x \cdot x}{\left(\frac{1}{3} - x\right) \cdot \left(\frac{2}{3} - x\right)} = 1 \Rightarrow x = \frac{2}{9}$  (2)

$\Rightarrow [\text{H}_2] = [\text{CO}_2] = \frac{2}{9} \approx 22,2\%$ ,  $[\text{CO}] = \frac{1}{3} - \frac{2}{9} = \frac{1}{9} \approx 11,1\%$  und  $[\text{H}_2\text{O}] = \frac{2}{3} - \frac{2}{9} = \frac{4}{9} \approx 44,4\%$ . (2)



Um das Gleichgewicht zu erhalten, wird CO<sub>2</sub> und damit auch H<sub>2</sub> nachproduziert. (1)



### Teil 4: Stöchiometrie (4)

Durch die fortlaufende Zugabe von frischer Kalklauge lässt sich die Ausbeute auf nahezu 100 % steigern. Wieviel Liter Wasserstoffgas kann man unter dieser Annahme aus einem Kilogramm Butan gewinnen? Wieviel Kilogramm Wasser werden dabei umgesetzt?

#### Lösung:

