

### 3.1. Aufgaben zum chemischen Gleichgewicht

#### Aufgabe 1: Reaktionsgeschwindigkeit

Bei der Reaktion von 5 mmol Mg mit 10 ml 1 m Salzsäure wurde das Volumen  $V(\text{H}_2)$  in ml des entwickelten Wasserstoffgases über die Zeit  $t$  in Minuten in die folgende Tabelle eingetragen:

t in Min	1	2	3	4	5	10	15
$V(\text{H}_2)$ in ml	30,0	52,5	69,4	82,0	91,5	113,2	118,4
$n(\text{H}_2)$ in mmol							
$n(\text{Mg}^{2+})$ in mmol							
$[\text{Mg}^{2+}]$ in mmol/ml							

- Rechne die Volumina  $V(\text{H}_2)$  in die Zahl  $n(\text{H}_2)$  der gebildeten Wasserstoffmoleküle um. (1 mmol Teilchen = 24 ml)
- Stelle die Reaktionsgleichung auf
- Gib mit Hilfe der Reaktionsgleichung die Zahl  $n(\text{Mg}^{2+})$  der gebildeten  $\text{Mg}^{2+}$ -Ionen an.
- Trage die Konzentrationen  $[\text{Mg}^{2+}]$  der  $\text{Mg}^{2+}$ -Ionen in die letzte Zeile ein.
- Beschreibe den Verlauf der Reaktion in einem Konzentrations-Zeit-Diagramm über 15 Minuten.
- Lies die Reaktionsgeschwindigkeit bei  $t = 0, 2, 5$  und 10 Minuten ab und erstelle daraus ein Reaktionsgeschwindigkeits-Zeit-Diagramm.
- Wie verändern sich die beiden Diagramme, wenn man die Temperatur um  $10^\circ\text{C}$  erhöht?
- Welche 2 Möglichkeiten gibt es noch, um die Reaktion zu beschleunigen?

#### Aufgabe 2: Reaktionsgeschwindigkeit

Beschreibe vier Möglichkeiten zur Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit und begründe mit Hilfe des Teilchenmodells

#### Aufgabe 3: Abhängigkeit von der Konzentration

Bestimme die Konzentrationsabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit für die folgenden Reaktionen:

- $\text{H}_2 + \text{I}_2 \rightarrow 2 \text{HI}$
- $2 \text{NO}_2 \rightarrow \text{N}_2\text{O}_4$
- $\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{NH}_3$
- $\text{IO}_3^- + 3 \text{HSO}_3^- \rightarrow \text{I}^- + 3 \text{SO}_4^{2-} + 3 \text{H}^+$
- $2 \text{HI} \rightarrow \text{H}_2 + \text{I}_2$
- $\text{N}_2\text{O}_4 \rightarrow 2 \text{NO}_2$
- $2 \text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 3 \text{H}_2$
- $2 \text{I}^- + \text{S}_2\text{O}_8^{2-} \rightarrow \text{I}_2 + 2 \text{SO}_4^{2-}$

#### Aufgabe 4: Verteilungsgleichgewichte

Ein Stoff A löst sich in Hexan 10 mal besser als in Wasser:  $\frac{A_{\text{Hexan}}}{A_{\text{Wasser}}} = 10$ . 1 mmol dieses Stoffes sind in 100 ml Wasser

gelöst. Um das Wasser zu reinigen, stehen 100 ml Hexan zur Verfügung. Berechne die im Wasser verbleibende Restmenge des Stoffes, wenn zur Extraktion

- 1 mal 100 ml Hexan in einem Arbeitsgang
- 2 mal 50 ml Hexan in zwei Arbeitsgängen
- 10 mal 10 ml Hexan in zehn Arbeitsgängen verwendet werden.

#### Aufgabe 5: Iodwasserstoffgleichgewicht

Wasserstoff und Jod reagieren zu Jodwasserstoff:  $\text{H}_2 + \text{I}_2 \rightleftharpoons 2 \text{HI}$  mit  $K = 54,3$ .

- Formuliere das Massenwirkungsgesetz für diese Reaktion.
- Ein Kolben mit einem Volumen  $V = 1$  Liter wurde mit 0,1 mol Wasserstoff und 0,1 mol Jod gefüllt. Wie viel mol Jodwasserstoff werden daraus gebildet?
- Warum ist das Volumen des Reaktionsgefäßes bei dieser Berechnung unerheblich?
- Wie viel mol Wasserstoff und Jod werden gebildet, wenn 0,1 mol Jodwasserstoff eingefüllt wurde?
- Berechne die Ausbeute (= erzeugte Produktmenge : Produktmenge bei vollständiger Umsetzung) für b).

#### Aufgabe 6: Massenwirkungsgesetz

Formuliere das Massenwirkungsgesetz für die folgenden Reaktionen:

- $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$
- $2 \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightleftharpoons 2 \text{H}_3\text{O}^+ + \text{SO}_4^{2-}$
- $2 \text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2 \text{SO}_3$
- $3 \text{H}_2\text{O} + \text{H}_3\text{PO}_4 \rightleftharpoons 3 \text{H}_3\text{O}^+ + \text{PO}_4^{3-}$
- $\text{H}_2\text{O} + \text{HCl} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{Cl}^-$
- $\text{CH}_4 + \text{NH}_3 \rightleftharpoons \text{HCN} + 3 \text{H}_2$

### Aufgabe 7: Wiederholung Strukturformeln

Zeichne passende Strukturformeln für die folgenden Summenformeln:

- a)  $C_2H_6$                       c)  $CH_3CH_2OH$                       e)  $CH_2O$                       g)  $CH_3COOH$   
b)  $CH_3OH$                       d)  $CH_3CH_2OCH_3$                       f)  $CH_3CHO$                       h)  $CH_3COOCH_3$

### Aufgabe 8: Wiederholung zwischenmolekulare Kräfte

Ordne die folgenden Moleküle nach Wasserlöslichkeit und Siedepunkt. Begründe anhand ihrer Strukturformeln mit Hilfe der zwischenmolekularen Kräfte:

- a)  $CH_3OH$ ,  $CH_3CH_2OH$ ,  $CH_3CH_2CH_2OH$   
b)  $C_2H_6$ ,  $CH_3OH$ ,  $CH_2O$   
c)  $CH_3CH_2OH$ ,  $CH_3OCH_3$ ,  $HCOOCH_3$

### Aufgabe 9: Estersynthese

Bei der Reaktion von Ethansäure  $CH_3COOH$  mit Ethanol  $C_2H_5OH$  bildet sich unter Austritt von Wasser Ethansäure-ethyl-ester  $CH_3COOC_2H_5$ :  $CH_3COOH + C_2H_5OH \rightleftharpoons CH_3COOC_2H_5 + H_2O$ .

- a) Formuliere das Massenwirkungsgesetz für diese Reaktion.  
b) 1 Mol Säure wurden mit 1 Mol Alkohol versetzt. Nach einiger Zeit sind 0,8 Mol Ester entstanden. Berechne die Gleichgewichtskonstante K.  
c) Warum ist das Volumen der Reaktionslösung bei dieser Berechnung unerheblich?  
d) Wieviel Mol Ester werden gebildet, wenn 1 Mol Säure mit 4 Mol Alkohol versetzt wurden?  
e) Berechne die Ausbeute für d).  
f) Berechne die Ausbeute, wenn der Ester jeweils abdestilliert wird, so dass nur noch 0,1 Mol Ester in der Reaktionslösung zurückbleiben.

### Aufgabe 10: Bestimmung der Gleichgewichtskonstanten bei der Esterhydrolyse

Bei der Reaktion von 10 mmol Ethansäuremethylester mit 10 ml 1 m Natronlauge nach der Gleichung  $CH_3COOCH_3 + OH^- \rightleftharpoons CH_3COO^- + CH_3OH$  wurden die folgenden Werte gemessen:

t in Min	1	2	3	4	5	10	15
$[OH^-]$ in mmol/ml	8,5	7,2	6,3	5,6	5	3,57	3,2
$[CH_3COOCH_3]$ in mmol/ml							
$[CH_3COO^-]$ in mmol/ml							
$[CH_3OH]$ in mmol/ml							

- a) Formuliere die Reaktionsgleichung mit Strukturformeln  
b) Ergänze die fehlenden Konzentrationen in der Tabelle.  
c) Beschreibe den Verlauf der Reaktion in einem Konzentrations-Zeit-Diagramm über 15 Minuten.  
d) Wie hoch sind die Konzentrationen der Edukte und Produkte im Gleichgewicht?  
e) Bestimme die Gleichgewichtskonstante K

### Aufgabe 11: Dimerisierung von Stickstoffdioxid

Zwei Moleküle Stickstoffdioxid dimerisieren zu einem Molekül Distickstofftetroxid:  $2 NO_2 \rightleftharpoons N_2O_4$

- a) Formuliere das Massenwirkungsgesetz für diese Reaktion.  
b) Ein Kolben mit einem Volumen  $V = 1$  Liter wurde mit 0,26 mol Stickstoffdioxid gefüllt. Nach einiger Zeit sind 0,08 mol Distickstofftetroxid entstanden. Berechne die Gleichgewichtskonstante K.  
c) Welche Einheit hat K? In welchen Fällen hat K keine Einheit?  
d) Ein Kolben mit einem Volumen  $V = 1$  Liter wurde mit 0,1 mol Stickstoffdioxid gefüllt. Wie viel mol Distickstofftetroxid werden daraus gebildet?  
e) Wie viel mol Stickstoffdioxid werden gebildet, wenn 0,1 mol Distickstofftetroxid eingefüllt wurde?  
f) Berechne die Ausbeute für b).

### Aufgabe 12: Ammoniaksynthese

Stickstoff  $N_2$  und Wasserstoff  $H_2$  reagieren zu Ammoniak  $NH_3$ :  $N_2 + 3 H_2 \rightleftharpoons 2 NH_3$

- a) Formuliere das Massenwirkungsgesetz für diese Reaktion.  
b) Ein Kolben mit einem Volumen  $V = 1$  Liter wurde mit 0,24 mol Stickstoff und 0,32 mol Wasserstoff gefüllt. Nach einiger Zeit sind 0,08 mol Ammoniak entstanden. Berechne die Gleichgewichtskonstante K.  
c) Ein Kolben mit einem Volumen  $V = 1$  Liter wurde mit 2 mol Stickstoff und 4 mol Wasserstoff gefüllt. Wie viel mol Ammoniak werden daraus gebildet?  
d) Ein Kolben mit einem Volumen  $V = 1$  Liter wurde mit 0,1 mol Ammoniak gefüllt. Wie viel mol Stickstoff und wie viel mol Wasserstoff werden daraus gebildet?  
e) Berechne die Ausbeute für b) und c).

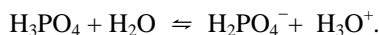
### Aufgabe 13: Schwefeltrioxidsynthese

Zwei Moleküle Schwefeldioxid reagieren mit einem Molekül Sauerstoff  $O_2$  zu zwei Molekülen Schwefeltrioxid: Formuliere das Massenwirkungsgesetz für diese Reaktion.

- Ein Kolben mit einem Volumen  $V = 1$  Liter wurde mit 0,4 mol Schwefeldioxid und 1,1 mol Sauerstoff gefüllt. Nach einiger Zeit sind 0,2 mol Schwefeltrioxid entstanden. Berechne die Gleichgewichtskonstante.
- Ein Kolben mit einem Volumen  $V = 1$  Liter wurde mit 4 mol Schwefeldioxid und 2 mol Sauerstoff gefüllt. Wie viel mol Schwefeltrioxid werden daraus gebildet?
- Wie viel mol Schwefeldioxid werden gebildet, wenn 0,1 mol Schwefeltrioxid eingefüllt wurde?
- Berechne die Ausbeute für b).

### Aufgabe 14: pH-Wert einer schwachen Säure

Phosphorsäure reagiert mit Wasser unter Bildung von Dihydrogenphosphat-Ionen und Hydroxonium-Ionen:



- Formuliere das Massenwirkungsgesetz für diese Reaktion.
- Wie viel mol  $H_2O$  enthält ein Liter Wasser? Wie groß ist  $[H_2O]$  in einer verdünnten wässrigen Lösung?
- Informiere dich im Buch über die Definition des pH-Wertes. Wie groß ist der pH-Wert bei  $[H_3O^+] = 10^{-4}$  mol/l? Wie groß ist  $[H_3O^+]$  bei  $pH = 8$ ?
- Löst man 2 mol Phosphorsäure in einem Liter Wasser, so erhält man  $pH = 1$ . Berechne die Gleichgewichtskonstante  $K$  und runde auf die 4. Stelle nach dem Komma.
- Wie viel mol Phosphorsäure müssen in einem Liter Wasser gelöst werden, wenn man  $pH = 2$  erreichen will?
- Welchen pH erhält man, wenn man 0,5 mol Phosphorsäure in einem Liter Wasser löst?

### Aufgabe 15: Prinzip vom kleinsten Zwang

In welche Richtung verschieben sich die folgenden Gleichgewichte

- bei der angegebenen Konzentrationsänderung
- bei Druckerhöhung
- bei Temperaturerhöhung?

- |  |  |
|--|--|
| a) $N_2(g) + 3 H_2(g) \rightleftharpoons 2 NH_3(g)$ ,                  | $\Delta H < 0$ ; $[NH_3]$ herauf- oder herabsetzen   |
| b) $C(s) + CO_2(g) \rightleftharpoons 2 CO(g)$ ,                       | $\Delta H > 0$ , $[CO_2]$ herauf- oder herabsetzen   |
| c) $Ca(HCO_3)_2(s) \rightleftharpoons CaCO_3(s) + H_2O(l) + CO_2(g)$ , | $\Delta H > 0$ , $[CO_2]$ herauf- oder herabsetzen   |
| d) $H_2O(g) + C(s) \rightleftharpoons H_2(g) + CO(g)$ ,                | $\Delta H > 0$ , $[CO]$ herauf- oder herabsetzen     |
| e) $2 SO_2(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2 SO_3(g)$ ,                 | $\Delta H < 0$ , $[O_2]$ herauf- oder herabsetzen    |
| f) $H_3O^+(aq) + OH^-(aq) \rightleftharpoons 2 H_2O(l)$                | $\Delta H < 0$ , $[H_3O^+]$ herauf- oder herabsetzen |

### Aufgabe 16: technische Ammoniaksynthese

Die exotherme Ammoniaksynthese aus den Elementen wird technisch bei  $p = 200$  bar und  $t = 500^\circ C$  unter Verwendung eines Eisenkatalysators durchgeführt (Haber-Bosch-Verfahren). In einem geschlossenen Reaktionsbehälter erhält man einen Volumenanteil von 17,6 %  $NH_3$ , wenn vorher  $N_2$  und  $H_2$  im Verhältnis 1:3 eingefüllt wurden. Um die Ausbeute zu erhöhen, werden die Gase nach dem Verlassen des Ammoniakofens abgekühlt, wobei  $NH_3$  kondensiert und abgetrennt werden kann. Das restliche  $N_2$  und  $H_2$  wird wieder in den Ammoniakofen zurückgepumpt.

- Erkläre mit Hilfe des Prinzips vom kleinsten Zwang, wie sich hohe Drücke und Temperaturen auf die Ausbeute auswirken.
- Aus wirtschaftlichen Gründen wird eine ziemlich hohe Reaktionstemperatur gewählt, obwohl sich dadurch die Ausbeute verringert. Erkläre, warum sich die Produktionsleistung (= Ausbeute pro Zeit) des Ammoniakofens durch die Temperaturerhöhung trotzdem verbessert.
- Warum wird der Katalysator zugefügt? Welchen Einfluss hat der Katalysator auf die Ausbeute?
- Berechne die Gleichgewichtskonstante  $K$  bei 200 bar und  $500^\circ C$ . Das Molvolumen bei 200 bar und  $500^\circ C$  ist  $V_n = 0,32$  l/Mol.

Hinweis: Stelle die Reaktionsgleichung für  $x$  mol umgesetzten  $N_2$  auf und berechne die Gesamtzahl  $n_{ges}$  der im

Gleichgewicht vorhandenen Teilchen ( $N_2$ ,  $H_2$  und  $NH_3$ ) in Abhängigkeit von  $x$ . Aus  $0,176 = \frac{n_{NH_3}}{n_{ges}}$  ergibt sich dann  $x$ .

- Erkläre mit Hilfe des Prinzips vom kleinsten Zwang, warum die Abtrennung des  $NH_3$  und Rückführung des restlichen  $N_2$  und  $H_2$  die Ausbeute erhöhen.
- Erkläre mit Hilfe des Buches die besondere Konstruktion des Ammoniakofens nach Carl Bosch.

### Aufgabe 17: technische Schwefelsäuresynthese

1. **Rösten** von **Pyrit**  $\text{FeS}_2$  an der Luft:  $4 \text{FeS}_2 + 11 \text{O}_2 \rightleftharpoons 2 \text{Fe}_2\text{O}_3 + 8 \text{SO}_2$  mit  $\Delta H = -3309 \text{ kJ/mol}$
  2. **Kontaktverfahren**: Schwefeldioxid wird an der Luft bei  $t = 600^\circ\text{C}$  und  $p = 1 \text{ bar}$  über Vanadiumpentoxid  $\text{V}_2\text{O}_5$  geleitet, das als **Katalysator** dient:
    1. Schritt: Oxidation des  $\text{SO}_2$  durch  $\text{V}_2\text{O}_5$ :  $2 \text{V}_2\text{O}_5 + 2 \text{SO}_2 \rightleftharpoons \text{V}_2\text{O}_4 + 2 \text{SO}_3$
    2. Schritt: Regeneration des Katalysators durch Luft- $\text{O}_2$ :  $2 \text{V}_2\text{O}_4 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2 \text{V}_2\text{O}_5$
    - Gesamtbilanz:  $2 \text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2 \text{SO}_3$  mit  $\Delta H = -198 \text{ kJ/mol}$ .
  3.  $\text{SO}_3$  löst sich nur schwer in Wasser, relativ leicht und schnell dagegen in ca. 20 %-iger Schwefelsäure, wobei sich zunächst **Dischwefelsäure**  $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_7$  bildet. In diesem Falls dienen die schon vor der Reaktion vorhandenen Schwefelsäuremoleküle als **Katalysator**:
    1. Schritt: Bildung der Dischwefelsäure:  $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{S}_2\text{O}_7$
    2. Schritt: Regeneration des Katalysators durch Wasser:  $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2 \text{H}_2\text{SO}_4$
    - Gesamtbilanz:  $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{SO}_4$
- a) Gib die Oxidationszahlen für Eisen und Schwefel beim Röstvorgang an und kennzeichne den Elektronenübergang durch einen Pfeil.
- b) Was passiert, wenn man das beim Röstvorgang entstehende  $\text{SO}_2$  direkt in Wasser leitet? (saurer Regen!)
- c) In einem geschlossenen Reaktionsgefäß bei  $t = 600^\circ\text{C}$  und  $p = 1 \text{ bar}$  wurden  $\text{SO}_2$  und  $\text{O}_2$  im Verhältnis 2:1 eingepumpt und zur Reaktion gebracht. Nach Einstellung des Gleichgewichtes  $2 \text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2 \text{SO}_3$  wurde ein Volumenanteil von 76 %  $\text{SO}_3$  gemessen. Das Molvolumen bei diesen Bedingungen ist 72,5 l/mol. Berechne die Gleichgewichtskonstante.  
Hinweis: Stelle die Reaktionsgleichung für  $x$  mol umgesetzten  $\text{O}_2$  auf und berechne die Gesamtzahl  $n_{\text{ges}}$  der im Gleichgewicht vorhandenen Teilchen ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_2$  und  $\text{SO}_3$ ) in Abhängigkeit von  $x$ . Aus  $0,76 = \frac{n_{\text{SO}_3}}{n_{\text{ges}}}$  ergibt sich dann  $x$ .
- d) Erkläre, warum die Ausbeute an  $\text{SO}_3$  bei steigenden Drücken und sinkenden Temperaturen wächst.
- e) Warum arbeitet man im großtechnischen Verfahren trotzdem mit einer relativ hohen Temperatur von  $600^\circ\text{C}$ ?
- f)  $\text{SO}_3$  entsteht auch ohne Katalysator bei der Verbrennung von Schwefel oder Schwefeldioxid. Welchen Zweck hat der Katalysator?
- g) Erkläre, warum die Abtrennung des  $\text{SO}_3$  und Rückführung des restlichen  $\text{SO}_2$  und  $\text{O}_2$  die Ausbeute erhöhen

### 3.1. Lösungen zu den Aufgaben zum chemische Gleichgewicht

#### Aufgabe 1: Reaktionsgeschwindigkeit

t in Min	1	2	3	4	5	10	15
V(H <sub>2</sub> ) in ml	30,0	52,5	69,4	82,0	91,5	113,2	118,4
n(H <sub>2</sub> ) in mmol	1,25	2,18	2,89	3,42	3,81	4,72	4,93
n(Mg <sup>2+</sup> ) in mmol	1,25	2,18	2,89	3,42	3,81	4,72	4,93
[Mg <sup>2+</sup> ] in mmol/ml	0,125	0,218	0,289	0,342	0,381	0,472	0,493

#### Aufgabe 2: Reaktionsgeschwindigkeit

Siehe Skript

#### Aufgabe 3: Abhängigkeit von der Konzentration

- a)  $v_{\text{hin}} = k_{\text{hin}} \cdot [\text{H}_2] \cdot [\text{I}_2]$   
 b)  $v_{\text{rück}} = k_{\text{rück}} \cdot [\text{HI}]^2$   
 c)  $v_{\text{hin}} = k_{\text{hin}} \cdot [\text{NO}_2]^2$   
 d)  $v_{\text{rück}} = k_{\text{rück}} \cdot [\text{N}_2\text{O}_4]$   
 e)  $v_{\text{hin}} = k_{\text{hin}} \cdot [\text{NH}_3]^2$   
 f)  $v_{\text{rück}} = k_{\text{rück}} \cdot [\text{N}_2] \cdot [\text{H}_2]$ , wenn der geschwindigkeitsbestimmende Schritt  $\text{N}_2 + \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{NH}$  ist  
 g)  $v_{\text{hin}} = k_{\text{hin}} \cdot [\text{IO}_3^-] \cdot [\text{HSO}_3^-]$ , wenn der geschwindigkeitsbestimmende Schritt  $\text{IO}_3^- + \text{HSO}_3^- \rightarrow ?$  ist  
 h)  $v_{\text{hin}} = k_{\text{hin}} \cdot [\text{I}^-] \cdot [\text{S}_2\text{O}_8^{2-}]$ , wenn der geschwindigkeitsbestimmende Schritt  $\text{I}^- + \text{S}_2\text{O}_8^{2-} \rightarrow ?$  ist

#### Aufgabe 4: Verteilungsgleichgewichte

a) 1 mal 100 ml Hexan in einem Arbeitsgang: Aus  $10 = \frac{A_{\text{Hexan}}}{A_{\text{Wasser}}} = \frac{n_{\text{Hexan}} \cdot V_{\text{Wasser}}}{n_{\text{Wasser}} \cdot V_{\text{Hexan}}} = \frac{n_{\text{Hexan}} \cdot 100 \text{ ml}}{(1 \text{ mmol} - n_{\text{Hexan}}) \cdot 100 \text{ ml}}$   
 $= \frac{n_{\text{Hexan}}}{1 \text{ mmol} - n_{\text{Hexan}}}$  folgt  $n_{\text{Hexan}} = \frac{10}{11} \text{ mmol}$  und  $n_{\text{Wasser}} = \frac{1}{11} \text{ mmol}$ .

b) 2 mal 50 ml Hexan in zwei Arbeitsgängen: Aus  $10 = \frac{A_{\text{Hexan}}}{A_{\text{Wasser}}} = \frac{n_{\text{Hexan}} \cdot V_{\text{Wasser}}}{n_{\text{Wasser}} \cdot V_{\text{Hexan}}} = \frac{n_{\text{Hexan}} \cdot 100 \text{ ml}}{(1 \text{ mmol} - n_{\text{Hexan}}) \cdot 50 \text{ ml}}$   
 $= \frac{2n_{\text{Hexan}}}{1 \text{ mmol} - n_{\text{Hexan}}}$  folgt  $n_{\text{Hexan}} = \frac{10}{12} \text{ mmol}$  und  $n_{\text{Wasser1}} = \frac{2}{12} \text{ mmol} = \frac{1}{6} \text{ mmol}$  im ersten Arbeitsgang. Im zweiten

Arbeitsgang wird in der Rechnung nur 1 mmol durch  $\frac{1}{6} \text{ mmol}$  ersetzt und man erhält  $n_{\text{Wasser2}} = \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{6} = \left(\frac{1}{6}\right)^2 = \frac{1}{36} \text{ mmol}$

c) 10 mal 10 ml Hexan in zehn Arbeitsgängen: Aus  $10 = \frac{A_{\text{Hexan}}}{A_{\text{Wasser}}} = \frac{n_{\text{Hexan}} \cdot V_{\text{Wasser}}}{n_{\text{Wasser}} \cdot V_{\text{Hexan}}} = \frac{n_{\text{Hexan}} \cdot 100 \text{ ml}}{(1 \text{ mmol} - n_{\text{Hexan}}) \cdot 10 \text{ ml}}$   
 $= \frac{10n_{\text{Hexan}}}{1 \text{ mmol} - n_{\text{Hexan}}}$  folgt  $n_{\text{Hexan}} = \frac{10}{20} = \frac{1}{2} \text{ mmol}$  und  $n_{\text{Wasser1}} = \frac{1}{2} \text{ mmol}$  im ersten Arbeitsgang. Im zweiten Arbeitsgang

wird in der Rechnung nur 1 mmol durch  $\frac{1}{2} \text{ mmol}$  ersetzt und man erhält  $n_{\text{Wasser10}} = \left(\frac{1}{2}\right)^{10} = \frac{1}{1024} \text{ mmol}$

#### Aufgabe 5: Iodwasserstoffgleichgewicht

a)  $\frac{\text{HI}^2}{\text{H}_2 \cdot \text{I}_2} = 54,3$

b)  $x \text{ H}_2 + x \text{ I}_2 \rightarrow 2x \text{ HI} \Rightarrow \frac{(2x)^2}{(0,1-x) \cdot (0,1-x)} = 54,3$

$\Rightarrow x = 0,0786 \Rightarrow 2x = 0,1573 \text{ mol/l HI}$  wurden gebildet.

c)  $V = 1 \text{ l}$  kann im MWG gekürzt werden.

d)  $2x \text{ HI} \rightarrow x \text{ H}_2 + x \text{ I}_2 \Rightarrow \frac{(0,1-2x)^2}{x \cdot x} = 54,3$

$\Rightarrow x = 0,01067 \text{ mol Iod bzw. Wasserstoff}$

e) Ausbeute = erzeugte Produktmenge : Produktmenge bei vollständiger Umsetzung =  $0,157 \text{ mol} : 0,2 \text{ mol} = 0,78 = 78 \%$

	Vorher	GGW
[H <sub>2</sub> ] in mol/l	0,1	0,1 - x
[I <sub>2</sub> ] in mol/l	0,1	0,1 - x
[HI] in mol/l	0	2x

	Vorher	GGW
[H <sub>2</sub> ] in mol/l	0	x
[I <sub>2</sub> ] in mol/l	0	x
[HI] in mol/l	0,1	0,1 - 2x

### Aufgabe 6: Massenwirkungsgesetz

$$a) K = \frac{\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}^2}{\text{CH}_4 \cdot \text{O}_2^2}$$

$$b) K = \frac{\text{SO}_3^2}{\text{SO}_2^2 \cdot \text{O}_2}$$

$$c) K = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+] \cdot [\text{Cl}^-]}{\text{H}_2\text{O} \cdot \text{HCl}}$$

$$d) K = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]^2 \cdot [\text{SO}_4^{2-}]}{\text{H}_2\text{O}^2 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4}$$

$$e) K = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]^3 \cdot [\text{PO}_4^{3-}]}{\text{H}_2\text{O}^3 \cdot \text{H}_3\text{PO}_4}$$

$$f) K = \frac{\text{HCN} \cdot \text{H}_2^3}{\text{CH}_4 \cdot \text{NH}_3}$$

### Aufgabe 7: Wiederholung Strukturformeln

Siehe 2. Organische Chemie I: a) Ethan, b) Methanol, c) Ethanol, d) Ethyl-Methyl-Ether, e) Methanal, f) Ethanal, g) Ethansäure, h) Ethansäure-Methyl-Ester

### Aufgabe 8: Wiederholung zwischenmolekulare Kräfte

Siehe 1.8. Zwischenmolekulare Kräfte und 2. Organische Chemie I:

- In der Reihe Methanol, Ethanol, Propanol bleiben die Dipol-Dipol-Kräfte aufgrund der jeweils einen OH-Gruppe gleich, die Van-der-Waals-Kräfte wachsen mit der Molekülgröße jedoch an. Die Siedepunkte wachsen daher ebenfalls von links nach rechts, der unpolare Charakter nimmt zu und die Wasserlöslichkeit nimmt ab.
- In der Reihe Ethan, Methanal, Methanol bleiben die Van-der-Waals-Kräfte aufgrund der ähnlichen Molekülgröße annähernd gleich, die Dipol-Dipol-Kräfte nehmen jedoch infolge der polaren C=O und C-O-H-Gruppen stark zu. Die Siedepunkte wachsen daher ebenfalls von links nach rechts, der unpolare Charakter nimmt ab und die Wasserlöslichkeit nimmt zu.
- In der Reihe Dimethylether, Methansäure-methyl-ester, Ethanol, bleiben die Van-der-Waals-Kräfte aufgrund der ähnlichen Molekülgröße annähernd gleich, die Dipol-Dipol-Kräfte nehmen jedoch infolge der polaren C=O und C-O-H-Gruppen stark zu. Die Siedepunkte wachsen daher ebenfalls von links nach rechts, der unpolare Charakter nimmt ab und die Wasserlöslichkeit nimmt zu.

### Aufgabe 9: Estersynthese

$$a) \frac{\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5 \cdot [\text{H}_2\text{O}]}{\text{CH}_3\text{COOH} \cdot \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} = K$$

$$b) x \text{CH}_3\text{COOH} + x \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} \rightarrow x \text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5 + x \text{H}_2\text{O} \text{ mit } x = 0,8 \text{ mol}$$
$$\Rightarrow \frac{0,8 \text{ mol} \cdot 0,8 \text{ mol}}{(1 \text{ mol} - 0,8 \text{ mol}) \cdot (1 \text{ mol} - 0,8 \text{ mol})} = 16$$

c)  $V = 1 \text{ l}$  kann im MWG gekürzt werden.

$$d) x \text{CH}_3\text{COOH} + x \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} \rightarrow x \text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5 + x \text{H}_2\text{O}$$
$$\Rightarrow \frac{x \cdot x}{(1-x) \cdot (4-x)} = 16 \Rightarrow x = 0,98 \text{ mol Ester bzw. Wasser}$$

e) Ausbeute = erzeugte Produktmenge : Produktmenge bei vollständiger Umsetzung =  $0,98 \text{ mol} : 1 \text{ mol} = 0,98 = 98 \%$

$$f) \frac{0,1 \cdot x}{(1-x) \cdot (4-x)} = 16 \Rightarrow x = 0,998 \text{ mol Ester bzw. Wasser} \Rightarrow \text{Ausbeute} = 0,998 = 99,8 \%$$

### Aufgabe 10: Bestimmung der Gleichgewichtskonstanten bei der Esterhydrolyse

t in Min	1	2	3	4	5	10	15
$[\text{OH}^-]$ in mmol/ml	8,5	7,2	6,3	5,6	5	3,57	3,2
$[\text{CH}_3\text{COOCH}_3]$ in mmol/ml	8,5	7,2	6,3	5,6	5	3,57	3,2
$[\text{CH}_3\text{COO}^-]$ in mmol/ml	1,5	2,8	3,7	4,4	5	6,43	6,8
$[\text{CH}_3\text{OH}]$ in mmol/ml	1,5	2,8	3,7	4,4	5	6,43	6,8

- Siehe 2. Organische Chemie I
- Siehe oben
- Vgl. Skript
- Die Konzentrationen nähern sich asymptotisch den Sättigungsgrenzen = Gleichgewichtskonzentrationen  $[\text{OH}^-] = [\text{CH}_3\text{COOCH}_3] \approx 3 \text{ mmol/l}$  und  $[\text{CH}_3\text{COO}^-] = [\text{CH}_3\text{OH}] \approx 7 \text{ mmol/l}$ .

$$e) K = \frac{\text{Ethanoat} \cdot \text{Ethanol}}{\text{Ester} \cdot \text{Hydroxid}} = \frac{3 \cdot 3}{7 \cdot 7} \approx 0,08$$

### Aufgabe 11: Dimerisierung von Stickstoffdioxid

a)  $\frac{N_2O_4}{NO_2^2} = K$

b)  $2x NO_2 \rightarrow x N_2O_4$  mit  $x = 0,08 \text{ mol/l}$   
 $\Rightarrow \frac{0,08}{(0,26 - 0,16)^2} = 8 \text{ l/mol}$

c) [K] = Liter pro mol. Im Zähler des MWG müssen genauso viele Faktoren stehen wie im Nenner, d.h. Auf der Produktseite der RG müssen genauso viele Teilchen stehen wie auf der Eduktseite.

d)  $\frac{x}{(0,1 - 2x)^2} = 8$

$\Rightarrow x \approx 0,023 \text{ mol } N_2O_4$  wurden gebildet.

e)  $\frac{0,1 - x}{(2x)^2} = 8$

$\Rightarrow x \approx 0,042 \text{ mol}$

$\Rightarrow 2x = 0,084 \text{ mol } NO_2$  wurden gebildet.

f) Ausbeute = erzeugte Produktmenge : Produktmenge bei vollständiger Umsetzung  
 $= 0,08 \text{ mol} : 0,13 \text{ mol}$   
 $= 0,615 = 61,5 \%$

	Vorher	GGW
[NO <sub>2</sub> ] in mol/l	0,26	0,26 - 2x
[N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ] in mol/l	0	x

	Vorher	GGW
[NO <sub>2</sub> ] in mol/l	0,1	0,1 - 2x
[N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ] in mol/l	0	x

	Vorher	GGW
[NO <sub>2</sub> ] in mol/l	0	2x
[N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ] in mol/l	0,1	0,1 - x

### Aufgabe 12: Ammoniaksynthese

a)  $\frac{NH_3}{N_2 \cdot H_2^3} = K$

b)  $x N_2 + 3x H_2 \rightarrow 2x NH_3$  mit  $x = 0,04 \text{ mol}$

$\Rightarrow \frac{(0,08 \text{ mol/l})^2}{(0,24 \text{ mol/l} - 0,04 \text{ mol/l}) \cdot (0,32 \text{ mol/l} - 0,12 \text{ mol/l})^3} = 4 \text{ (l/mol)}^2$

c)  $\frac{(2x)^2}{(2-x) \cdot (4-3x)^3} = 4$

d)  $\Rightarrow x = 1 \Rightarrow 2x = 2 \text{ mol } NH_3$  wurden gebildet.

	Vorher	GGW
[H <sub>2</sub> ] in mol/l	0,32	0,32 - 3x
[N <sub>2</sub> ] in mol/l	0,24	0,24 - x
[NH <sub>3</sub> ] in mol/l	0	2x

	Vorher	GGW
[H <sub>2</sub> ] in mol/l	4	4 - 3x
[N <sub>2</sub> ] in mol/l	2	2 - x
[NH <sub>3</sub> ] in mol/l	0	2x

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

$= 2 \text{ mol} : \frac{8}{3} \text{ mol}$   
 $= 0,67 = 67 \%$

### Aufgabe 13: Schwefeltrioxidsynthese

a)  $\frac{SO_3^2}{SO_2^2 \cdot O_2} = K$  und  $2x SO_2 + x O_2 \rightarrow 2x SO_3$  für  $x = 0,1 \text{ mol/l}$

$\Rightarrow K = \frac{(0,2 \text{ mol/l})^2}{(0,4 \text{ mol/l} - 0,2 \text{ mol/l})^2 \cdot (1,1 \text{ mol/l} - 0,1 \text{ mol/l})} = 1 \text{ l/mol}$

b)  $2x SO_2 + x O_2 \rightarrow 2x SO_3 \Rightarrow \frac{(2x)^2}{(4-2x)^2 \cdot (2-x)} = 1$

$\Rightarrow x = 1 \Rightarrow 2x = 2 \text{ mol } SO_3$  wurden gebildet.

c)  $2x SO_3 \rightarrow 2x SO_2 + x O_2 \Rightarrow \frac{(1-2x)^2}{(2x)^2 \cdot x} = 1 \Leftrightarrow 4x^3 - (1-2x)^2 = 0$

mit GTR ergibt sich näherungsweise  $x \approx 0,32 \Rightarrow 2x = 0,64 \text{ mol } SO_2$  wurden gebildet.

d) Ausbeute = erzeugte Produktmenge : Produktmenge bei vollständiger Umsetzung mit  $x = 2$   
 $= 2 \text{ mol} : 4 \text{ mol}$   
 $= 0,5 = 50 \%$

	Vorher	GGW
[SO <sub>2</sub> ] in mol/l	0,4	0,4 - 2x
[O <sub>2</sub> ] in mol/l	1,1	1,1 - x
[SO <sub>3</sub> ] in mol/l	0	2x

	Vorher	GGW
[SO <sub>2</sub> ] in mol/l	4	4 - 2x
[O <sub>2</sub> ] in mol/l	2	2 - x
[SO <sub>3</sub> ] in mol/l	0	2x

#### Aufgabe 14: pH-Wert einer schwachen Säure

- a) 
$$\frac{[\text{H}_2\text{PO}_4^-] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]}{\text{H}_3\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}} = K$$
- b) 1 Liter = 1000 g = 55,6 mol Wasser in einem Liter  $\Rightarrow [\text{H}_2\text{O}] = 55,6 \text{ mol/l}$
- c) pH = negative Hochzahl der als Zehnerpotenz geschriebenen Hydroxonium-Ionenkonzentration in mol/l  
 $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-4} \text{ mol/l} \Rightarrow \text{pH} = 4$  und  $\text{pH} = 8 \Rightarrow [\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-8} \text{ mol/l}$ .
- d)  $x \text{ H}_3\text{PO}_4 + x \text{ H}_2\text{O} \rightarrow x \text{ H}_2\text{PO}_4^- + x \text{ H}_3\text{O}^+$  mit  $x = 0,1 \text{ mol/l}$  wegen  $\text{pH} = 1$   

$$\Rightarrow \frac{0,1 \text{ mol/l} \cdot 0,1 \text{ mol/l}}{(2 \text{ mol/l} - 0,1 \text{ mol/l}) \cdot (55,6 \text{ mol/l} - 0,1 \text{ mol/l})} = \frac{0,1 \cdot 0,1}{(2 - 0,1) \cdot (55,6 - 0,1)} = 0,0001$$
- e)  $x \text{ H}_3\text{PO}_4 + x \text{ H}_2\text{O} \rightarrow x \text{ H}_2\text{PO}_4^- + x \text{ H}_3\text{O}^+$  mit  $x = 0,01 \text{ mol/l} \Rightarrow \text{pH} = 2$   

$$\Rightarrow \frac{0,01 \cdot 0,01}{(x - 0,01) \cdot (55,6 - 0,01)} = 0,0001 \Rightarrow x = 0,027 \text{ mol Phosphorsäure in einem Liter Wasser.}$$
- f)  $x \text{ H}_3\text{PO}_4 + x \text{ H}_2\text{O} \rightarrow x \text{ H}_2\text{PO}_4^- + x \text{ H}_3\text{O}^+ \Rightarrow \text{pH} = -\log x$   

$$\Rightarrow \frac{x \cdot x}{(0,5 - x) \cdot (55,6 - x)} = 0,0001 \Rightarrow x = 0,05 \text{ mol H}_3\text{O}^+ \text{ in einem Liter Wasser}$$
  

$$\Rightarrow [\text{H}_3\text{O}^+] = 0,05 \text{ mol/l} \Rightarrow \text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] = 1,3.$$

#### Aufgabe 15: Prinzip vom kleinsten Zwang

- a)  $[\text{NH}_3] \uparrow \Rightarrow \text{GGW} \leftarrow; [\text{NH}_3] \downarrow \Rightarrow \text{GGW} \rightarrow;$   
 $\text{p} \uparrow \Rightarrow \text{GGW} \rightarrow$ , da links 4 mol = 89,6 Liter und rechts 2 mol = 44,8 Liter gasförmige Teilchen;  
 $\text{T} \uparrow \Rightarrow \text{GGW} \leftarrow$ , da exotherme Reaktion durch Wärmezufuhr gehemmt wird.
- b)  $[\text{CO}_2] \uparrow \Rightarrow \text{GGW} \rightarrow; [\text{CO}_2] \downarrow \Rightarrow \text{GGW} \leftarrow;$   
 $\text{p} \uparrow \Rightarrow \text{GGW} \leftarrow$ , da links 1 mol = 22,4 Liter und rechts 2 mol = 44,8 Liter gasförmige Teilchen;  
 $\text{T} \uparrow \Rightarrow \text{GGW} \rightarrow$ , da endotherme Reaktion durch Wärmezufuhr begünstigt wird.
- c)  $[\text{CO}_2] \uparrow \Rightarrow \text{GGW} \leftarrow; [\text{CO}_2] \downarrow \Rightarrow \text{GGW} \rightarrow;$   
 $\text{p} \uparrow \Rightarrow \text{GGW} \leftarrow$ , da rechts 1 mol = 22,4 Liter gasförmige Teilchen entstehen;  
 $\text{T} \uparrow \Rightarrow \text{GGW} \rightarrow$ , da endotherme Reaktion durch Wärmezufuhr begünstigt wird.
- d)  $[\text{CO}] \uparrow \Rightarrow \text{GGW} \leftarrow; [\text{CO}] \downarrow \Rightarrow \text{GGW} \rightarrow;$   
 $\text{p} \uparrow \Rightarrow \text{GGW} \leftarrow$ , da links 1 mol = 22,4 Liter und rechts 2 mol = 44,8 Liter gasförmige Teilchen;  
 $\text{T} \uparrow \Rightarrow \text{GGW} \rightarrow$ , da endotherme Reaktion durch Wärmezufuhr begünstigt wird.
- e)  $[\text{O}_2] \uparrow \Rightarrow \text{GGW} \rightarrow; [\text{O}_2] \downarrow \Rightarrow \text{GGW} \leftarrow;$   
 $\text{p} \uparrow \Rightarrow \text{GGW} \rightarrow$ , da links 3 mol = 67,2 Liter und rechts 2 mol = 44,8 Liter gasförmige Teilchen;  
 $\text{T} \uparrow \Rightarrow \text{GGW} \leftarrow$ , da exotherme Reaktion durch Wärmezufuhr gehemmt wird.
- f)  $[\text{H}_3\text{O}^+] \uparrow \Rightarrow \text{GGW} \rightarrow; [\text{H}_3\text{O}^+] \downarrow \Rightarrow \text{GGW} \leftarrow;$   
 $\text{p} \uparrow \Rightarrow$  keine (wesentliche) Änderung, da kein Gas entsteht oder verbraucht wird;  
 $\text{T} \uparrow \Rightarrow \text{GGW} \leftarrow$ , da exotherme Reaktion durch Wärmezufuhr gehemmt wird.

#### Aufgabe 16: technische Ammoniaksynthese Teil d)

$x \text{ N}_2 + 3x \text{ H}_2 \rightarrow 2x \text{ NH}_3$ . Im Gleichgewicht befinden sich also  $1 - x \text{ Mol N}_2 + 3 - 3x \text{ Mol H}_2 + 2x \text{ Mol NH}_3 = 4 - 2x \text{ Mol}$

Teilchen im Reaktionsbehälter, davon  $2x \text{ Mol NH}_3$ . Wegen  $0,176 = \frac{2x}{4 - 2x}$  folgt  $x = 0,3$  und  $K_p = \frac{\left(\frac{2x}{4 - 2x}\right)^2}{\frac{1 - x}{4 - 2x} \cdot \left(\frac{3 - 3x}{4 - 2x}\right)^3} =$

$\frac{(2x)^2}{(1 - x) \cdot (3 - 3x)^3} \cdot (4 - 2x)^2 = 0,641$ . Mit dem Molvolumen  $V = 0,32 \text{ l/mol}$  bei  $200 \text{ bar}/500 \text{ }^\circ\text{C}$  folgt  $K_c = K_p \cdot V^2 = 0,066 \text{ l}^2/\text{Mol}^2$



**Aufgabe 17: Technische Schwefelsäuresynthese Teil c)**

$2x$  Mol  $\text{SO}_2 + x$  Mol  $\text{O}_2 \rightarrow 2x$  Mol  $\text{SO}_3$ . Im Gleichgewicht befinden sich also  $2 - 2x$  Mol  $\text{SO}_2 + 1 - x$  Mol  $\text{O}_2 + 2x$  Mol  $\text{SO}_3 = 3 - x$  Mol Teilchen im Reaktionsbehälter, davon  $2x$  Mol  $\text{SO}_3$ . Wegen  $0,76 = \frac{2x}{3-x}$  folgt  $x = 0,82$  und  $K_p =$

$$\frac{\left(\frac{2x}{3-x}\right)^2}{\left(\frac{1-x}{3-x}\right) \cdot \left(\frac{2-2x}{3-x}\right)^2} = \frac{(2x)^2}{(1-x) \cdot (2-2x)^2} \cdot (3-x) = \frac{x^2}{(1-x)^3} (3-x) = 251,3.$$

Mit dem Molvolumen  $V = 72,5$  l/Mol bei 1 bar und  $600$  °C erhält man schließlich  $K_c = K_p \cdot V = 18219,3$  l/Mol.