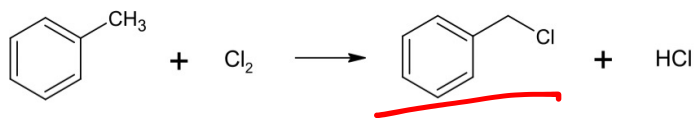


Geprüfte Industriemeister Fachrichtung Chemie

ΠΣ



Klausuraufgabe – Druck und Gas

Reaktionsgleichungen

Du sollst Methylbenzol (Toluol) monochlorieren, um Benzylchlorid herzustellen. Dazu wird das benötigte Chlorgas aus einem Druckgasbehälter entnommen. Der Behälter hat ein Nennvolumen von V=100 L. Das Chlorgas verhält sich wie ein ideales Gas.

Es sollen 50 kg Methylbenzol umgesetzt werden. Berechne, ob die theoretisch notwendige Menge an Chlorgas ausreicht, wenn der Druck im Behälter 180 bar beträgt und das Gas eine Temperatur von 25 °C hat.

Stoffdaten:

$$\bullet M(\text{Methylbenzol}) = 92,14 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 92,14 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$\bullet M(\text{Chlor}) = 70,91 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

→ Verfügbare Menge Chlor → Gasbehälter
 → Benötigte Menge Chlor → Methylbenzol

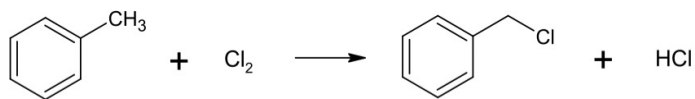
1. Schritt Benötigte Menge Chlor

Verhältnis der Stoffmengen 1:1

$$n(\text{Methylbenzol}) = \frac{m}{M} = \frac{50 \text{ kg}}{92,14 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}$$

$$n = 0,543 \text{ kmol}$$

→ Benötigte Stoffmenge $n(\text{Cl}_2)$



Klausuraufgabe – Druck und Gas

Reaktionsgleichungen

Du sollst Methylbenzol (Toluol) monochlorieren, um Benzylchlorid herzustellen. Dazu wird das benötigte Chlorgas aus einem Druckgasbehälter entnommen. Der Behälter hat ein Nennvolumen von $V=100\text{ L}$. Das Chlorgas verhält sich wie ein ideales Gas.

Es sollen 50 kg Methylbenzol umgesetzt werden. Berechne, ob die theoretisch notwendige Menge an Chlorgas ausreicht, wenn der Druck im Behälter 180 bar beträgt und das Gas eine Temperatur von 25 °C hat.

Stoffdaten:

$$\bullet M(\text{Methylbenzol}) = 92,14 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\bullet M(\text{Chlor}) = 70,91 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} = 8,314 \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$1\text{ bar} = 10^5\text{ Pa}$$

$$T = 298,15\text{ K}$$

2. Schritt Verfügbare Menge Chlor

$$p \cdot V = n_v \cdot R \cdot T$$

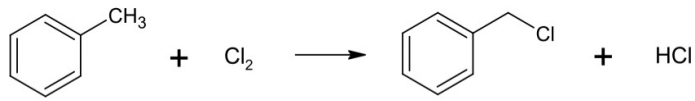
$$n_v = \frac{p \cdot V}{R \cdot T}$$

$$n_v = \frac{180 \cdot 10^5\text{ Pa} \cdot 0,1\text{ m}^3}{8,314 \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 298,15\text{ K}}$$

$$n_v(\text{Cl}_2) = 726,15\text{ mol}$$

$$= 0,726\text{ kmol}$$

$n_v(\text{Cl}_2) > n_b(\text{Cl}_2)$ Die Chlormenge reicht aus.



Klausuraufgabe – Druck und Gas

Reaktionsgleichungen

Du sollst Methylbenzol (Toluol) monochlorieren, um Benzylchlorid herzustellen. Dazu wird das benötigte Chlorgas aus einem Druckgasbehälter entnommen. Der Behälter hat ein Nennvolumen von $V=100$ L. Das Chlorgas verhält sich wie ein ideales Gas.

Es sollen 50 kg Methylbenzol umgesetzt werden. Berechne, ob die theoretisch notwendige Menge an Chlorgas ausreicht, wenn der Druck im Behälter 180 bar beträgt und das Gas eine Temperatur von $25\text{ }^\circ\text{C}$ hat.

Stoffdaten:

- $M(\text{Methylbenzol}) = 92,14 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$
- $M(\text{Chlor}) = 70,91 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$

Step 1: Ideale Gasgleichung

Bestimmung der Stoffmenge an Chlorgas im Behälter: Mit der idealen Gasgleichung kannst du die Stoffmenge n im Behälter berechnen:

$$n = \frac{p \cdot V}{R \cdot T} = \frac{180 \text{ bar} \cdot 0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{kmol} \cdot \text{K}}{0,08314 \frac{\text{bar} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \cdot 298,15 \text{ K}} = 0,726 \text{ kmol}$$

Step 2: Berechnung Stoffmenge an Chlor

Um 50 kg Methylbenzol umzusetzen, berechnest du die Stoffmenge von Methylbenzol. Da das Verhältnis von Chlor zu Methylbenzol 1:1 ist, benötigst du ebenfalls 0,543 kmol Chlor.

$$n(\text{Methylbenzol}) = \frac{m(\text{Methylbenzol})}{M(\text{Methylbenzol})} = \frac{50 \text{ kg}}{92,14 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 0,543 \text{ kmol}$$

Step 3: Vergleich der benötigten und verfügbaren Menge:

Verfügbare Menge Chlor: 0,726 kmol

Benötigte Menge Chlor: 0,543 kmol

Da die verfügbare Menge Chlorgas größer ist als die benötigte Menge, reicht das Chlorgas im Druckbehälter aus.

Klausuraufgabe – Katalysatoren

Reaktionsgleichungen

Viele chemische Verfahren werden erst durch den Einsatz von Katalysatoren wirtschaftlich.

a) Nenne vier Kriterien, nach denen Katalysatoren bewertet werden.

(4 Punkte)

b) Erkläre, was man unter den von dir in Teil a) genannten Kriterien versteht.

(8 Punkte)

a.

1. Aktivität:

Gibt an wie stark ein Katalysator bei einer bestimmten Temperatur die Reaktionsgeschwindigkeit beeinflusst.

Je höher die Aktivität desto schneller läuft die Reaktion ab.

2. Selektivität:

Gibt an wie gut ein Katalysator nur gewünschte Reaktionen fördert ohne Nebenreaktionen zu fördern.

Klausuraufgabe – Katalysatoren

Reaktionsgleichungen

Viele chemische Verfahren werden erst durch den Einsatz von Katalysatoren wirtschaftlich.

a) Nenne vier Kriterien, nach denen Katalysatoren bewertet werden.

(4 Punkte)

b) Erkläre, was man unter den von dir in Teil a) genannten Kriterien versteht.

(8 Punkte)

a.

Aufbau des Katalysators

- wie ist der Katalysator aufgebaut

Stabilität des Katalysators

- mechanische Beständigkeit

- chemische Beständigkeit

Standzeit

Wie lange kann ein Katalysator verwendet werden unter Aufrechterhaltung seiner

Aktivität und Selektivität

Klausuraufgabe – Katalysatoren

Reaktionsgleichungen

Viele chemische Verfahren werden erst durch den Einsatz von Katalysatoren wirtschaftlich.

a) Nenne vier Kriterien, nach denen Katalysatoren bewertet werden.

(4 Punkte)

b) Erkläre, was man unter den von dir in Teil a) genannten Kriterien versteht.

(8 Punkte)

a. Vier Kriterien zur Bewertung von Katalysatoren:

1. Aktivität
2. Selektivität
3. Aufbau des Katalysators
4. Mechanische und chemische Stabilität
5. Standzeit

b. Erklärung der Kriterien:

1. Aktivität: Die **Aktivität** eines Katalysators beschreibt, wie stark er die Geschwindigkeit einer Reaktion bei einer bestimmten Temperatur beeinflusst. Je höher die Aktivität, desto schneller läuft die Reaktion ab.

2. Selektivität: Ein Katalysator kann oft mehrere Reaktionen gleichzeitig beeinflussen. Die **Selektivität** gibt an, wie gut der Katalysator es schafft, nur eine bestimmte gewünschte Reaktion zu fördern, ohne Nebenreaktionen zu verstärken.

3. Aufbau des Katalysators: Katalysatoren können auf unterschiedliche Weise aufgebaut sein, z.B. als **Vollkatalysatoren**, **Schalenkatalysatoren** oder **Trägerkatalysatoren**. Sie können in verschiedenen Formen wie **Ringe**, **Tabletten** oder **Kugeln** vorliegen. Der Aufbau beeinflusst, wie gut sie in Reaktionsapparaturen eingebracht werden können, sowie ihre Oberflächenaktivität und Druckbeständigkeit.

4. Mechanische und chemische Stabilität: **Mechanische Stabilität** bedeutet, dass der Katalysator bei der Handhabung oder im Reaktor nicht zerfällt oder seine Struktur verliert. **Chemische Stabilität** heißt, dass der Katalysator gegen chemische Einflüsse von Edukten und Produkten resistent ist und sich nicht zersetzt.

5. Standzeit: Die **Standzeit** beschreibt, wie lange ein Katalysator seine Aktivität und Selektivität aufrechterhalten kann, bevor er ausgetauscht oder regeneriert werden muss.

ENTHALPIE

Reaktionsenthalpie
Berechnungen zur Enthalpie
Thermodynamik

Kapitel aus dem IHK-Rahmenplan

Chemische Prozesse und Verfahren

-> Verfahrens- und Anlagentechnik

Enthalpie

Reaktionsgleichungen

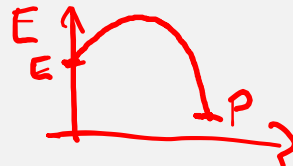


Enthalpie ist ein Maß für die Energie eines Systems. Sie umfasst die innere Energie und die Energie, die erforderlich ist, um das Volumen des Systems gegen einen äußeren Druck zu vergrößern. In chemischen Reaktionen betrachten wir **die Änderung der Enthalpie** ΔH , die den Energieunterschied zwischen den Reaktanten (Edukten) und Produkten beschreibt.

Die Reaktionsenthalpie H

Reaktionsenthalpie ΔH_R gibt an, ob bei einer chemischen Reaktion Wärme frei wird oder zugeführt werden muss. Sie wird als der Unterschied der Enthalpie der Produkte und der Edukte berechnet:

$$\Delta H_R = H_{\text{Produkte}} - H_{\text{Edukte}}$$



Negative Reaktionsenthalpie $\Delta H_R < 0$

Die Reaktion ist **exotherm** – in einer exothermen Reaktion wird Energie an die Umgebung abgegeben, meistens als Wärme. Daher wird die Umgebung wärmer. Die Produkte haben eine niedrigere Enthalpie als die Edukte

Positive Reaktionsenthalpie $\Delta H_R > 0$

Bei einer **endothermen** Reaktion muss dem System Energie zugeführt werden, damit die Reaktion abläuft. Die Umgebung kühlt sich ab, weil Energie aufgenommen wird. Die Produkte haben eine höhere Enthalpie als die Edukte



Aktivierungsenergie E_A

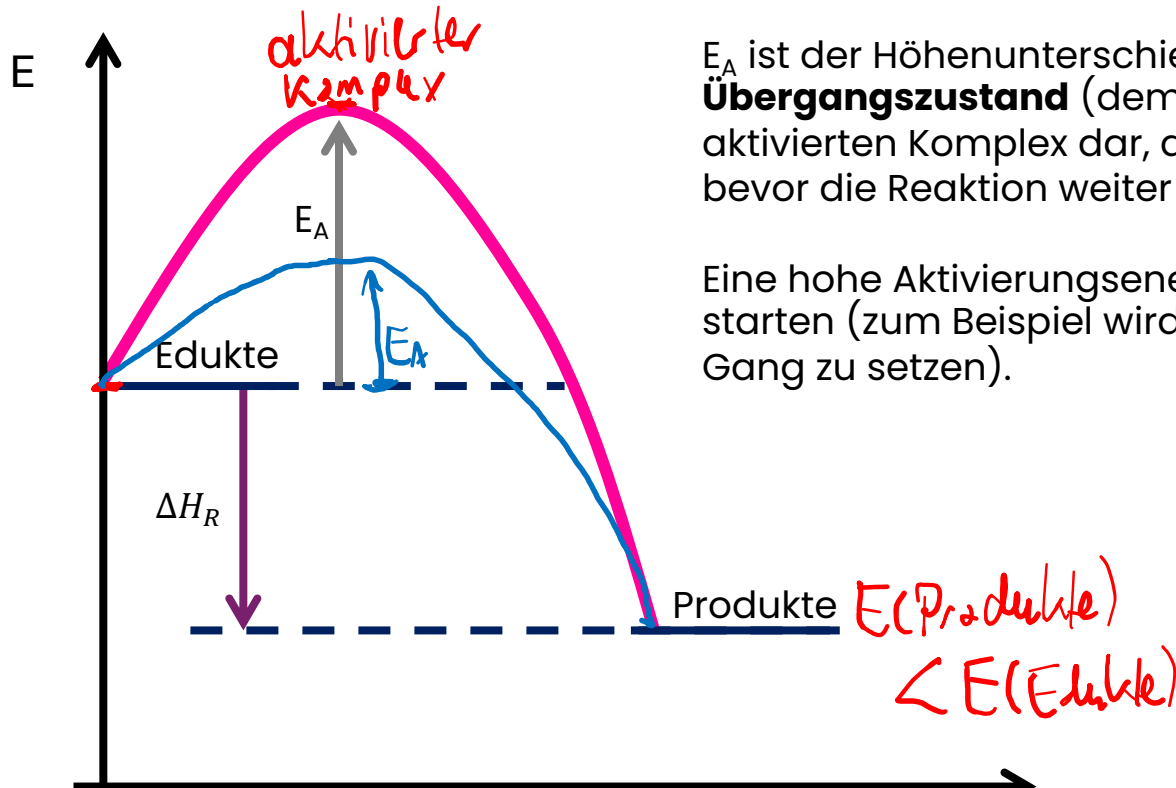
Die **Aktivierungsenergie** ist die minimale Energiemenge, die benötigt wird, damit eine chemische Reaktion überhaupt starten kann. Sie repräsentiert die Energie, die aufgebracht werden muss, um die Bindungen in den Edukten zu brechen, bevor neue Bindungen in den Produkten gebildet werden können.

Katalysatoren

Katalysatoren wirken, indem sie die Aktivierungsenergie herabsetzen, wodurch die Reaktion leichter und schneller ablaufen kann.

Enthalpie

Reaktionsgleichungen



E_A ist der Höhenunterschied zwischen dem Energieniveau der **Edukte** und dem **Übergangszustand** (dem höchsten Punkt des Diagramms). Dieser Punkt stellt den aktivierten Komplex dar, also den Zustand, den die Reaktanten erreichen müssen, bevor die Reaktion weiter zu den Produkten läuft.

Eine hohe Aktivierungsenergie bedeutet, dass es schwierig ist, die Reaktion zu starten (zum Beispiel wird mehr Wärme benötigt, um eine Verbrennungsreaktion in Gang zu setzen).

Verlauf mit Katalysator $\rightarrow \Delta H_R$ ändert sich nicht
 \rightarrow Reaktion kann schneller ablaufen

Die vertikale Linie zwischen den Energieniveaus der **Edukte** und **Produkte** stellt ΔH_R dar. In diesem Fall ist ΔH_R **negativ**, weil die Produkte weniger Energie haben als die Edukte.

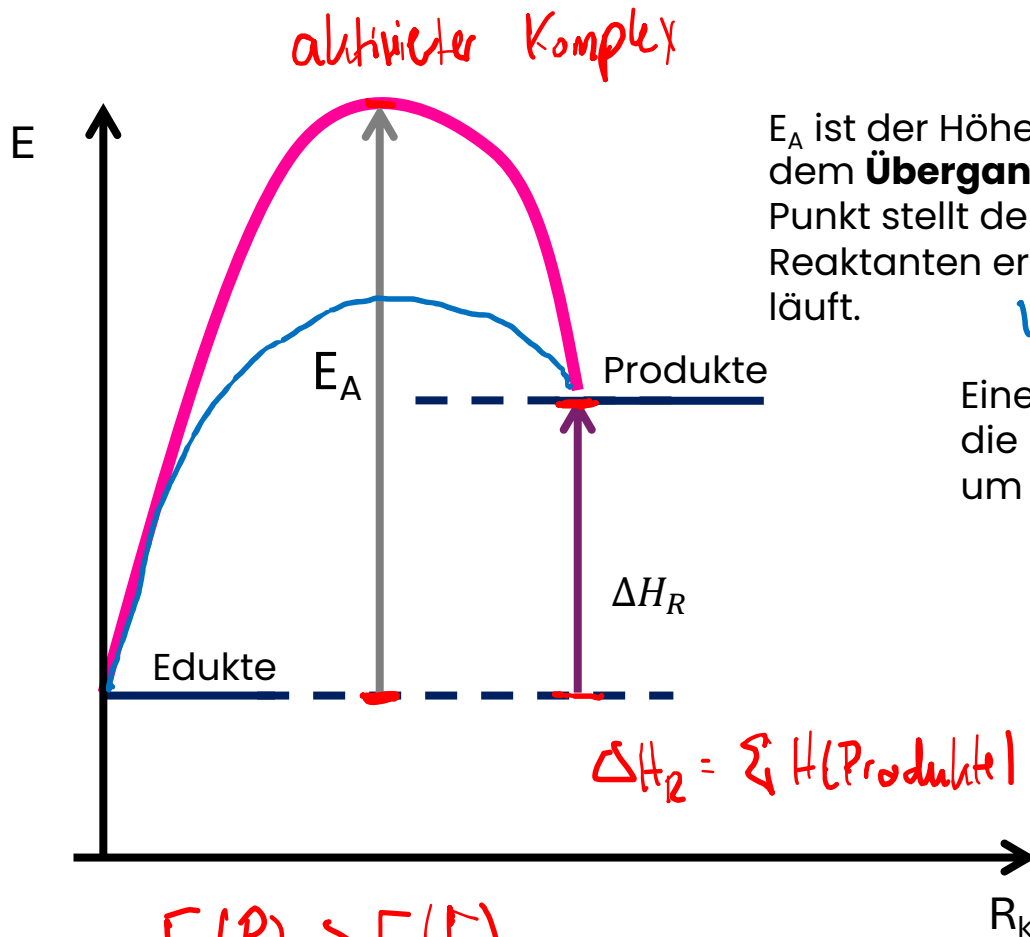
exotherme Reaktion
 \rightarrow Energie wird freigesetzt

R_k \rightarrow Reaktionskoordinate

= Fortschritt der Reaktion von den Edukten in Richtung Produkte

Enthalpie

Reaktionsgleichungen



E_A ist der Höhenunterschied zwischen dem Energieniveau der **Edukte** und dem **Übergangszustand** (dem höchsten Punkt des Diagramms). Dieser Punkt stellt den aktivierten Komplex dar, also den Zustand, den die Reaktanten erreichen müssen, bevor die Reaktion weiter zu den Produkten läuft.

Verlauf mit Katalysator

Eine hohe Aktivierungsenergie bedeutet, dass es schwierig ist, die Reaktion zu starten (zum Beispiel wird mehr Wärme benötigt, um eine Verbrennungsreaktion in Gang zu setzen).

Die vertikale Linie zwischen den Energieniveaus der **Edukte** und **Produkte** stellt ΔH_R dar. In diesem Fall ist ΔH_R **positiv**, weil die Produkte mehr Energie haben als die Edukte.

$$\Delta H_R = \sum H(\text{Produkte}) - \sum H(\text{Edukte}) > 0$$

$$E(P) > E(E)$$

endotherme Reaktion

Enthalpie

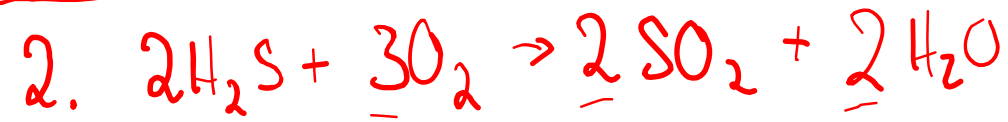
Reaktionsgleichungen

Das notwendige Schwefeldioxid zur Herstellung von Schwefelsäure nach dem Doppelkontaktverfahren kann entweder durch die Verbrennung von elementarem Schwefel oder durch Oxidation von Schwefelwasserstoff hergestellt werden.

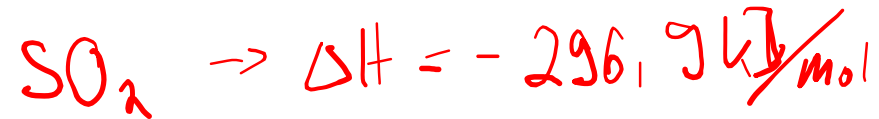
- a) Formuliere die beiden Reaktionsgleichungen. (7 Punkte)
 b) Berechne, bei welcher Reaktion mehr Energie freigesetzt wird. Verwende dafür die Angaben aus der Anlage 1. (10 Punkte)

Verbindung	ΔH_f° in $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
CH _{4(g)}	-74,8
C ₂ H _{2(g)}	226,7
C ₂ H _{4(g)}	52,3
C ₂ H _{6(g)}	-84,7
C ₃ H _{8(g)}	-103,9
C ₇ H _{16(g)}	-187,8
CH ₃ OH _(g)	-201,2
CH ₃ OH _(l)	-238,6
C ₂ H ₅ OH _(l)	-277,7
C ₂ H ₅ OH _(g)	-235
CH ₃ CH(OH)CH _{3(g)}	-272,3
CH ₃ COOH _(l)	-487
C ₆ H _{6(l)}	49,0
C ₆ H _{6(g)}	82,9
CH ₂ -(CH ₂) _{12(g)}	-153,75
HCHO _(g)	-116
CH ₃ CHO _(g)	-166
CH ₃ COCH _{3(g)}	-218
CO _(g)	-110,5
CO _{2(g)}	-394
H ⁺ _(aq)	0,0
HBr _(g)	-36,2
HCl _(g)	-92,3
HF _(g)	-268,6
HI _(g)	25,9
H ₂ O _(g)	-241,8
H ₂ O _(l)	-285,9
H ₂ O _(s)	-292
H ₂ O _{2(l)}	-188,1
H ₂ S _(g)	-21
NH _{3(g)}	-46,2
N ₂ H _{4(g)}	95,4
NO _(g)	90,4
NO _{2(g)}	33,8
N ₂ O _(g)	81,6
N ₂ O _{4(g)}	9,7
OH _(aq)	-230
SO _{2(g)}	-296,9
SO _{3(g)}	-395,2
SOCl _{2(l)}	-245,6
CaCO _{3(s)}	-1206
CaSO _{4(s)}	-1470
Elemente	0

Reaktionsgleichungen



Aus Tabelle / Anlage 1



$$\Delta H_R = \sum H_f(\text{Produkte}) - \sum H_f(\text{Edukte})$$

$$= 1 \text{ mol} (-296,9 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}) - (0) = -296,9 \text{ kJ}$$

$\Delta H < 0 \rightarrow$ exotherme Reaktion

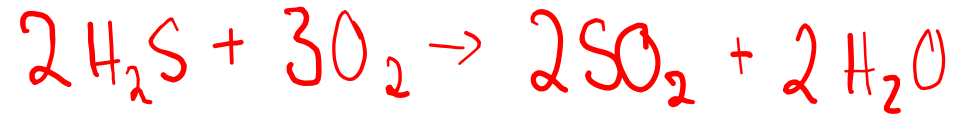
Enthalpie

Reaktionsgleichungen

Das notwendige Schwefeldioxid zur Herstellung von Schwefelsäure nach dem Doppelkontaktverfahren kann entweder durch die Verbrennung von elementarem Schwefel oder durch Oxidation von Schwefelwasserstoff hergestellt werden.

- a) Formuliere die beiden Reaktionsgleichungen. (7 Punkte)
 b) Berechne, bei welcher Reaktion mehr Energie freigesetzt wird. Verwende dafür die Angaben aus der Anlage 1. (10 Punkte)

Verbindung	ΔH_f° in $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
CH _{4(g)}	-74,8
C ₂ H _{2(g)}	226,7
C ₂ H _{4(g)}	52,3
C ₂ H _{6(g)}	-84,7
C ₃ H _{8(g)}	-103,9
C ₇ H _{16(g)}	-187,8
CH ₃ OH _(g)	-201,2
CH ₃ OH _(l)	-238,6
C ₂ H ₅ OH _(l)	-277,7
C ₂ H ₅ OH _(g)	-235
CH ₃ CH(OH)CH _{3(g)}	-272,3
CH ₃ COOH _(l)	-487
CeH _{6(l)}	49,0
CeH _{6(g)}	82,9
CH ₃ -(CH ₂) ₂ (g)	-153,75
HCHO _(g)	-116
CH ₃ CHO _(g)	-166
CH ₃ COCH _{3(g)}	-218
CO _(g)	-110,5
CO _{2(g)}	-394
H ⁺ _(aq)	0,0
HBr _(g)	-36,2
HCl _(g)	-92,3
HF _(g)	-268,6
H ₂ O _(g)	-241,8
H ₂ O _(l)	-285,8
H ₂ O _(s)	-292
H ₂ O _{2(g)}	-188,1
H ₂ S _(g)	-21
NH _{3(g)}	-46,2
N ₂ H _{4(g)}	95,4
NO _(g)	90,4
NO _{2(g)}	33,8
N ₂ O _(g)	81,6
N ₂ O _{4(g)}	9,7
OH _(g)	220
SO _{2(g)}	-296,9
SO _{3(g)}	-395,7
SOCl _{2(l)}	-245,6
CaCO _{3(s)}	-1206
CaO _(s)	-635
Elemente	0



Edukte

$$\text{O}_2 = H_0 = 0$$

$$\text{H}_2\text{S} = H_0 = -21 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

Produkte:

$$\text{SO}_2 = H_0 = -296,9 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\text{H}_2\text{O} = H_0 = -241,8 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\Delta H_R = \sum H(\text{Produkte}) - \sum H(\text{Edukte})$$

$$= (2 \text{ mol} \cdot -296,9 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} + 2 \text{ mol} \cdot -241,8 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}) - (2 \text{ mol} \cdot -21 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} + 0)$$

$$\Delta H_R = -1.035,4 \text{ kJ}$$

$\Delta H_R < 0 \rightarrow$ exotherme Reaktion

Enthalpie

Reaktionsgleichungen

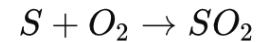
Das notwendige Schwefeldioxid zur Herstellung von Schwefelsäure nach dem Doppelkontaktverfahren kann entweder durch die Verbrennung von elementarem Schwefel oder durch Oxidation von Schwefelwasserstoff hergestellt werden.

- a) **Formuliere die beiden Reaktionsgleichungen.** (7 Punkte)
 b) **Berechne, bei welcher Reaktion mehr Energie freigesetzt wird. Verwende dafür die Angaben aus der Anlage 1.** (10 Punkte)

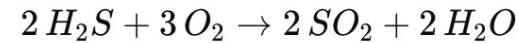
Verbindung	ΔH_f° in $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
CH _{4(g)}	-74,8
C ₂ H _{2(g)}	226,7
C ₂ H _{4(g)}	52,3
C ₂ H _{6(g)}	-84,7
C ₃ H _{8(g)}	-103,9
C ₇ H _{16(g)}	-187,8
CH ₃ OH _(g)	-201,2
CH ₃ OH _(l)	-238,6
C ₂ H ₅ OH _(l)	-277,7
C ₂ H ₅ OH _(g)	-235
CH ₃ CH(OH)CH _{3(g)}	-272,3
CH ₃ COOH _(l)	-487
C ₆ H _{6(l)}	49,0
C ₆ H _{6(g)}	82,9
CH ₂ -(CH ₂) _{2(g)}	-153,75
HCHO _(g)	-116
CH ₃ CHO _(g)	-166
CH ₃ COCH _{3(g)}	-218
CO _(g)	-110,5
CO _{2(g)}	-394
H ⁺ _(aq)	0,0
HBr _(g)	-36,2
HCl _(g)	-92,3
HF _(g)	-268,6
HI _(g)	25,9
H ₂ O _(g)	-241,8
H ₂ O _(l)	-285,9
H ₂ O _(s)	-292
H ₂ O _{2(l)}	-188,1
H ₂ S _(g)	-21
NH _{3(g)}	-46,2
N ₂ H _{4(g)}	95,4
NO _(g)	90,4
NO _{2(g)}	33,8
N ₂ O _(g)	81,6
N ₂ O _{4(g)}	9,7
OH ⁻ _(aq)	-230
SO _{2(g)}	-296,9
SO _{3(g)}	-395,2
SOCl _{2(l)}	-245,6
CaCO _{3(s)}	-1206
CaO _(s)	-635
Elemente	0

Reaktionsgleichungen:

1. Verbrennung von Schwefel:



2. Oxidation von Schwefelwasserstoff:



b. Berechnung der freigesetzten Energie:

Für Reaktion I (Verbrennung von Schwefel): Reaktionsenthalpie ΔH_R

$$\Delta H_R = \sum n \cdot \Delta H_{\text{Produkte}}^\circ - \sum n \cdot \Delta H_{\text{Edukte}}^\circ$$

Für die Produkte und Edukte dieser Reaktion:

$$\Delta H_R = n_{SO_2} \cdot \Delta H_{f,SO_2}^\circ - (n_S \cdot \Delta H_{f,S}^\circ + n_{O_2} \cdot \Delta H_{f,O_2}^\circ)$$

Einsetzen der Werte:

$$\Delta H_R = 1 \text{ mol} \cdot \left(-296,9 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right) - \left(1 \text{ mol} \cdot \left(0 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right) + 1 \text{ mol} \cdot \left(0 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right)\right) \rightarrow \Delta H_R = -296,9 \text{ kJ}$$

Für Reaktion II (Oxidation von Schwefelwasserstoff): Reaktionsenthalpie ΔH_R

Für die Produkte und Edukte der Reaktion:

$$\Delta H_R = n_{SO_2} \cdot \Delta H_{f,SO_2}^\circ + n_{H_2O} \cdot \Delta H_{f,H_2O}^\circ - (n_{H_2S} \cdot \Delta H_{f,H_2S}^\circ + n_{O_2} \cdot \Delta H_{f,O_2}^\circ)$$

$$\Delta H_R = 2 \text{ mol} \cdot \left(-296,9 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right) + 2 \text{ mol} \cdot \left(-241,8 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right) - \left(2 \text{ mol} \cdot \left(-21 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right) + 3 \text{ mol} \cdot \left(0 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right)\right) \rightarrow \Delta H_R = -1.035,4 \text{ kJ}$$

Bei der Umsetzung von Schwefelwasserstoff wird **mehr Energie** freigesetzt als bei der Umsetzung von elementarem Schwefel.



Katalyse, Enthalpie

Reaktionsgleichungen

Die Reaktion, die du großtechnisch durchführst, hat eine molare Reaktionsenthalpie von $\Delta H_r = -350 \text{ kJ/mol}$ und wird bei einer Reaktionstemperatur von 130 °C durchgeführt.

a) Zeichne ein Energie-Reaktionskoordinaten-Diagramm für diese Reaktion, bei dem die Reaktionsenthalpie dargestellt wird. Erläutere, ob es sich um eine exotherme oder endotherme Reaktion handelt.

(4 Punkte)

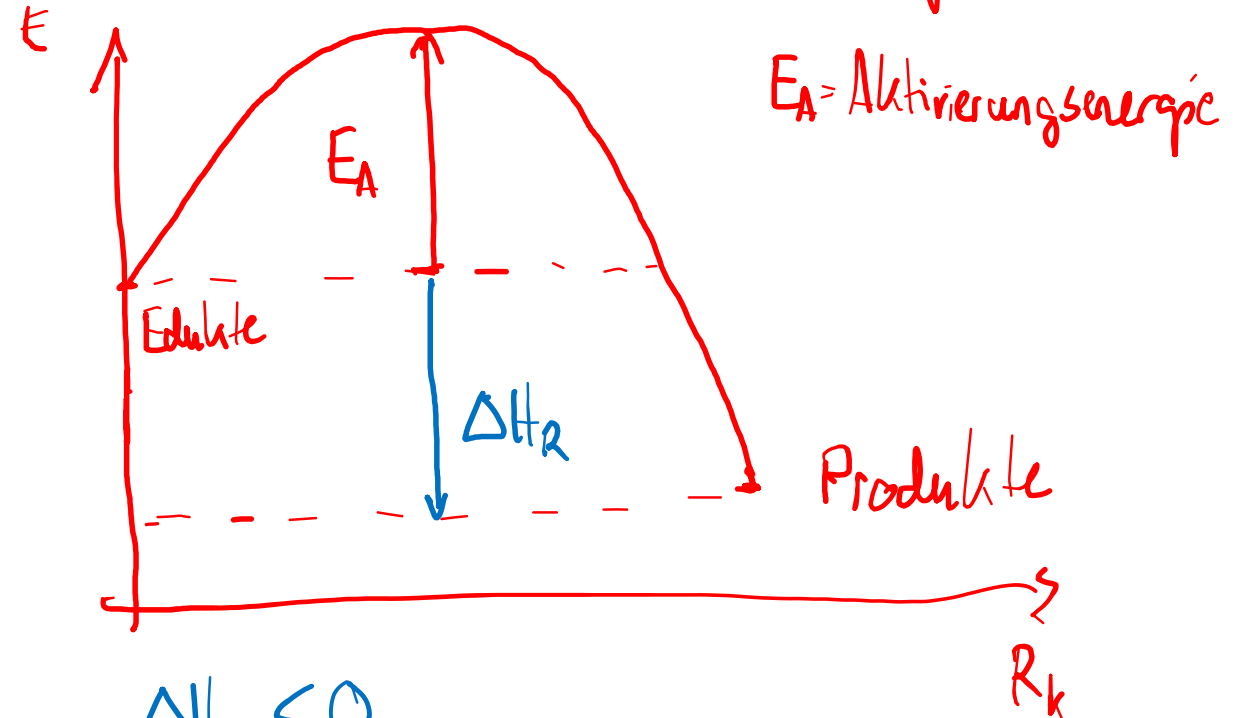
b) Markiere in dem Diagramm die Aktivierungsenergie und erkläre, was unter der Aktivierungsenergie zu verstehen ist.

(3 Punkte)

c) Erkläre, welche Auswirkung der Einsatz eines Katalysators auf die Reaktionsenthalpie und die Aktivierungsenergie hat.

(2 Punkte)

a) Energie - Reaktionskoordinaten - Diagramm



$$\Delta H_r < 0$$

→ exotherme Reaktion

→ Energie/Wärme wird freigesetzt



Katalyse, Enthalpie

Reaktionsgleichungen

Die Reaktion, die du großtechnisch durchführst, hat eine molare Reaktionsenthalpie von $\Delta H_r = -350 \text{ kJ/mol}$ und wird bei einer Reaktionstemperatur von 130 °C durchgeführt.

a) Zeichne ein Energie-Reaktionskoordinaten-Diagramm für diese Reaktion, bei dem die Reaktionsenthalpie dargestellt wird. Erläutere, ob es sich um eine exotherme oder endotherme Reaktion handelt.

(4 Punkte)

b) Markiere in dem Diagramm die Aktivierungsenergie und erkläre, was unter der Aktivierungsenergie zu verstehen ist.

(3 Punkte)

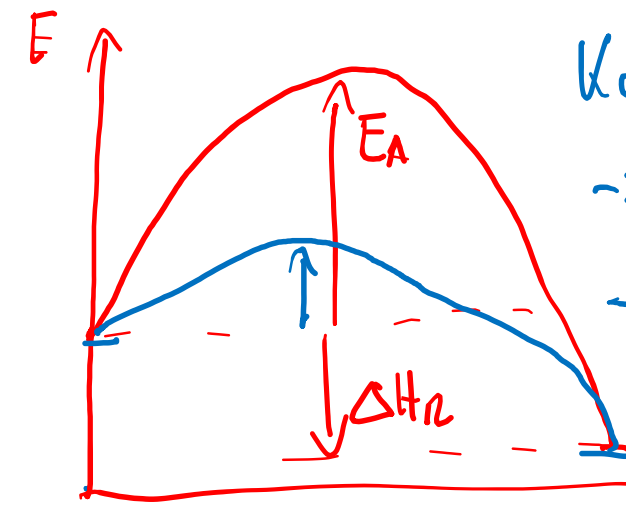
c) Erkläre, welche Auswirkung der Einsatz eines Katalysators auf die Reaktionsenthalpie und die Aktivierungsenergie hat.

(2 Punkte)

b) Aktivierungsenergie

Energie, die benötigt um die Edukte in einen reaktionsfähigen Zustand zu versetzen

c) →



Katalysator

→ verringert E_A
→ keinen Einfluss auf die Reaktionsenthalpie ΔH_r



In der Klausur ~ 14 Minuten Zeit

Katalyse, Enthalpie

Reaktionsgleichungen

Die Reaktion, die du großtechnisch durchführst, hat eine molare Reaktionsenthalpie von $\Delta H_r = -350 \text{ kJ/mol}$ und wird bei einer Reaktionstemperatur von 130 °C durchgeführt.
a) Zeichne ein Energie-Reaktionskoordinaten-Diagramm für diese Reaktion, bei dem die Reaktionsenthalpie dargestellt wird. Erläutere, ob es sich um eine exotherme oder endotherme Reaktion handelt.

(4 Punkte)

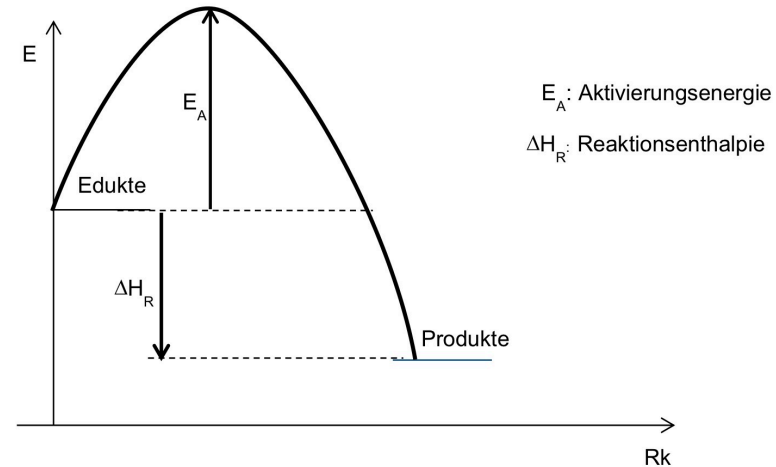
b) Markiere in dem Diagramm die Aktivierungsenergie und erkläre, was unter der Aktivierungsenergie zu verstehen ist.

(3 Punkte)

c) Erkläre, welche Auswirkung der Einsatz eines Katalysators auf die Reaktionsenthalpie und die Aktivierungsenergie hat.

(2 Punkte)

a)



Da die Reaktionsenthalpie negativ ist, handelt es sich um eine exotherme Reaktion.

b) Die Aktivierungsenergie ist die Energie, die benötigt wird, um die Edukte in einen reaktionsfähigen Zustand zu versetzen.

c) Ein Katalysator verringert die Aktivierungsenergie, hat jedoch keinen Einfluss auf die Reaktionsenthalpie.

MTBE

Methyl-tert-Butylether

- a. Berechne die Reaktionsenthalpie der Reaktion zur Bildung von 60 t MTBE. Gib an, ob die Reaktion exotherm oder endotherm ist, und begründe dies. (6 Punkte)
- b. Erkläre zwei verfahrenstechnische Maßnahmen, die die Gleichgewichtsreaktion positiv in Richtung Produkt verschieben. (4 Punkte)

• Molare Masse von MTBE:

$$M = 88,2 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 0,0882 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

• Standardbildungsenthalpien ΔH_f° :

- ΔH_f° (Isobuten) = $-17 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
- ΔH_f° (Methanol) = $-238 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
- ΔH_f° (MTBE) = $-315,4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$

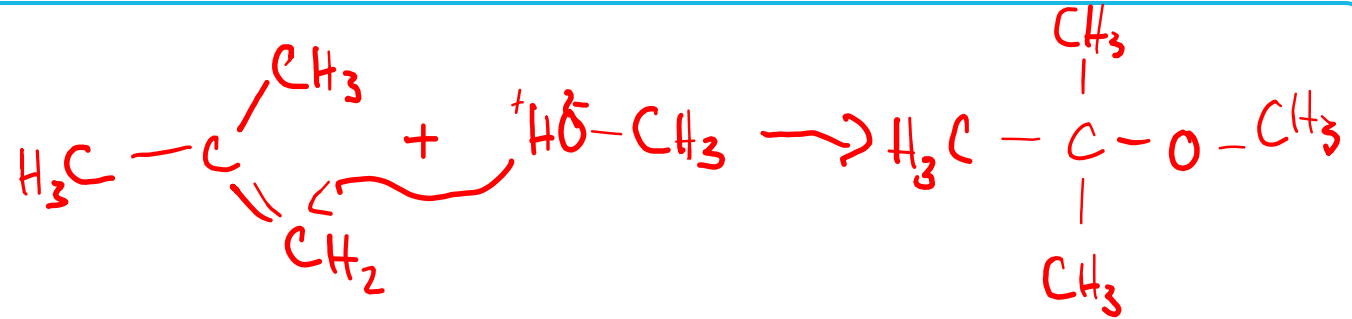
• Masse von MTBE:

- $m = 60 \text{ t} = 60.000 \text{ kg}$

$$n = \frac{m}{M}$$

Enthalpie

Reaktionsgleichungen



a)

$$\Delta H_R = \sum H_f^\circ(\text{Produkte}) - \sum H_f^\circ(\text{Edukte})$$

$$= (-315,4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}) - (-238 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}) + (-17 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}})$$

$$\Delta H_R = -60,4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$\Delta H_R < 0 \rightarrow$ Reaktion ist exotherm

Enthalpie

Reaktionsgleichungen

- a. Berechne die Reaktionsenthalpie der Reaktion zur Bildung von 60 t MTBE. Gib an, ob die Reaktion exotherm oder endotherm ist, und begründe dies. (6 Punkte)
- b. Erkläre zwei verfahrenstechnische Maßnahmen, die die Gleichgewichtsreaktion positiv in Richtung Produkt verschieben. (4 Punkte)

- Molare Masse von MTBE:

$$M = 88,2 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 0,0882 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

- Standardbildungsenthalpien ΔH_f° :

- ΔH_f° (Isobuten) = $-17 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$

- ΔH_f° (Methanol) = $-238 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$

- ΔH_f° (MTBE) = $-315,4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$

- Masse von MTBE:

- $m = 60 \text{ t} = 60.000 \text{ kg}$

$$\Delta H_R = -60,4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \Rightarrow \text{Bildung von 1 mol MTBE}$$

$$n = \frac{m}{M} = \frac{60.000 \text{ kg}}{0,0882 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}} = 680.272 \text{ mol}$$

$$\Delta H_R = n \cdot \Delta H_{R1\text{mol}} = 680.272 \text{ mol} \cdot (-60,4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}) \\ = -41.088.429 \text{ kJ}$$

- a. Berechne die Reaktionsenthalpie der Reaktion zur Bildung von 60 t MTBE. Gib an, ob die Reaktion exotherm oder endotherm ist, und begründe dies. (6 Punkte)
- b. Erkläre zwei verfahrenstechnische Maßnahmen, die die Gleichgewichtsreaktion positiv in Richtung Produkt verschieben. (4 Punkte)

• Molare Masse von MTBE:

$$M = 88,2 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 0,0882 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

• Standardbildungsenthalpien ΔH_f° :

• ΔH_f° (Isobuten) = $-17 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$

• ΔH_f° (Methanol) = $-238 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$

• ΔH_f° (MTBE) = $-315,4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$

• Masse von MTBE:

• $m = 60 \text{ t} = 60.000 \text{ kg}$

b) Konzentration

-> Konzentration der Edukte erhöhen

-> Konzentration des Produkts verringern

Temperatur

-> exotherme Reaktion: Temperatursenkung zur Verschiebung des Gleichgewichts in Richtung der Produkte

- a. Berechne die Reaktionsenthalpie der Reaktion zur Bildung von 60 t MTBE. Gib an, ob die Reaktion exotherm oder endotherm ist, und begründe dies. (6 Punkte)
- b. Erkläre zwei verfahrenstechnische Maßnahmen, die die Gleichgewichtsreaktion positiv in Richtung Produkt verschieben. (4 Punkte)

- Molare Masse von MTBE:

$$M = 88,2 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 0,0882 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

- Standardbildungsenthalpien ΔH_f° :

- ΔH_f° (Isobuten) = $-17 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
- ΔH_f° (Methanol) = $-238 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
- ΔH_f° (MTBE) = $-315,4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$

- Masse von MTBE:

- $m = 60 \text{ t} = 60.000 \text{ kg}$

a) Reaktionsenthalpie

$$\Delta H_R = \sum \Delta H_{\text{Produkte}} - \sum \Delta H_{\text{Edukte}}$$

$$\Delta H_R = \left(-315,4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right) - \left(\left(-238 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right) + \left(-17 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right)\right)$$

$$\Delta H_R = -315,4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} - (-255 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}})$$

$$\Delta H_R = -60,4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$n = \frac{60.000 \text{ kg}}{0,0882 \text{ kg/mol}} = 680.272 \text{ mol}$$

$$\Delta H_R = n \cdot \Delta_m H_R = 680.272 \text{ mol} \cdot \left(-60,4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right)$$

$$\Delta H_R = -41.088.429 \text{ kJ}$$

Enthalpie

Reaktionsgleichungen

- a. Berechne die Reaktionsenthalpie der Reaktion zur Bildung von 60 t MTBE. Gib an, ob die Reaktion exotherm oder endotherm ist, und begründe dies. (6 Punkte)
- b. Erkläre zwei verfahrenstechnische Maßnahmen, die die Gleichgewichtsreaktion positiv in Richtung Produkt verschieben. (4 Punkte)

- Molare Masse von MTBE:

$$M = 88,2 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 0,0882 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

- Standardbildungsenthalpien ΔH_f° :

- ΔH_f° (Isobuten) = $-17 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$

- ΔH_f° (Methanol) = $-238 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$

- ΔH_f° (MTBE) = $-315,4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$

- Masse von MTBE:

- $m = 60 \text{ t} = 60.000 \text{ kg}$

- c) Zwei verfahrenstechnische Maßnahmen zur Verschiebung des Gleichgewichts in Richtung Produkt:

Konzentrationserhöhung eines Edukts:

Da es sich um eine Gleichgewichtsreaktion handelt, lässt sich das Gleichgewicht durch eine Erhöhung der Konzentration eines Edukts nach rechts (in Richtung Produkt) verschieben. Hier könnte man durch einen Überschuss an Methanol das Gleichgewicht zugunsten des Produkts (MTBE) verschieben.

Temperatursenkung:

Da die Reaktion exotherm ist, verschiebt eine Temperatursenkung das Gleichgewicht ebenfalls nach rechts. Eine niedrigere Temperatur (wie die gewählten $80 \text{ }^\circ\text{C}$) ist vorteilhaft, um die Ausbeute zu erhöhen, da hohe Temperaturen das Gleichgewicht in Richtung der Edukte verschieben würden. Allerdings darf die Temperatur nicht zu stark gesenkt werden, da dies die Reaktionsgeschwindigkeit negativ beeinflussen könnte.

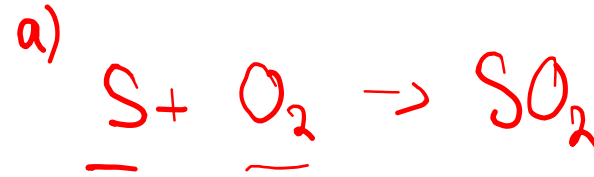
Klausuraufgabe – Wärme und Reaktionsgleichungen

Reaktionsgleichungen

Im Doppelkontaktverfahren werden 4,5 t elementarer Schwefel in der ersten Prozessstufe zu Schwefeldioxid (SO₂) verbrannt. Verwende für die Lösung der Aufgabe die Anlage 1.

- Formuliere die Reaktionsgleichung für die erste Stufe. (3 Punkte)
- Gib an, ob die Reaktion exotherm oder endotherm verläuft. (5 Punkte)
- Berechne die Wärmemenge (in MJ/h), die bei der Verbrennung von 4,5 t Schwefel entsteht. (5 Punkte)

Verbindung	ΔH_f° in kJ · mol ⁻¹	ΔG_f° in kJ · mol ⁻¹	S° in J · mol ⁻¹ · K ⁻¹
CH _{4(g)}	-74,8	-50,8	186,3
C ₂ H _{2(g)}	226,7	209,2	200,8
C ₂ H _{4(g)}	52,3	68,1	219,4
C ₂ H _{6(g)}	-84,7	-32,9	229,5
C ₃ H _{8(g)}	-103,9	-23,5	269,9
C ₄ H _{10(g)}	-127,3	-	-
C ₄ H _{8(g)}	-127,3	-	-
CH ₃ OH _(g)	-201,2	-161,9	237,6
CH ₃ OH _(l)	-238,6	-166,23	126,8
C ₂ H ₅ OH _(l)	-277,7	-174,8	160,7
C ₂ H ₅ OH _(g)	-235	-	-
CH ₃ COOH _(l)	-487	-392,4	159,8
C ₆ H _{6(l)}	49,0	124,5	172,8
C ₆ H _{6(g)}	82,9	129,7	269,2
CH ₂ =(CH ₂) _(g)	-153,75	-	-
HCHO _(g)	-116	-	219
CH ₃ CHO _(g)	-166	-	264
CH ₃ COCH _{3(g)}	-218	-	295
CO _(g)	-110,5	-137,3	197,9
CO _{2(g)}	-394	-394	231,6
H ⁺ _(aq)	0,0	0,0	0,0
HBr _(g)	-36,2	-53,2	198,5
HCl _(g)	-92,3	-95,3	186,7
HF _(g)	-268,6	270,7	173,5
HI _(g)	25,9	1,3	206,3
H ₂ O _(g)	-241,8	-228,6	188,7
H ₂ O _(l)	-285,9	-236,8	69,9
H ₂ O _(v)	-292	-	39,0
H ₂ O _{2(l)}	-188,1	-	109,2
H ₂ S _(g)	-21	-	206
NH _{3(g)}	-46,2	-16,7	192,5
N ₂ H _{4(g)}	95,4	159,4	238,5
NO _(g)	90,4	86,7	210,6
NO _{2(g)}	33,8	51,8	240,5
N ₂ O _(g)	81,6	103,6	220,0
N ₂ O _{4(g)}	9,7	98,3	304,3
SO _{2(g)}	-296,9	-300,4	248,5
SO _{3(g)}	-395,2	-370,4	256,2
SOCl _{2(l)}	-245,6	-	-
CaCO _{3(s)}	-1206	-	-
CaO _(s)	-635	-	-



b) Schwefel und Sauerstoff Element

$$\underline{H_0 = 0}$$

$$H_0(\text{SO}_2) = -296,9 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\Delta H_R = (-296,9 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}) - (0)$$

$$\Delta H_R = -296,9 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\Delta H_R < 0$$

Klausuraufgabe – Wärme und Reaktionsgleichungen

Reaktionsgleichungen

Im Doppelkontaktverfahren werden 4,5 t elementarer Schwefel in der ersten Prozessstufe zu Schwefeldioxid (SO₂) verbrannt. Verwende für die Lösung der Aufgabe die Anlage 1.

- Formuliere die Reaktionsgleichung für die erste Stufe. (3 Punkte)
- Gib an, ob die Reaktion exotherm oder endotherm verläuft. (5 Punkte)
- Berechne die Wärmemenge (in MJ/h), die bei der Verbrennung von 4,5 t Schwefel entsteht. (5 Punkte)

Verbindung	ΔH_f° in kJ · mol ⁻¹	ΔG_f° in kJ · mol ⁻¹	S° in J · mol ⁻¹ · K ⁻¹
CH _{4(g)}	-74,8	-50,8	186,3
C ₂ H _{2(g)}	226,7	209,2	200,8
C ₂ H _{4(g)}	52,3	68,1	219,4
C ₂ H _{6(g)}	-84,7	-32,9	229,5
C ₃ H _{8(g)}	-103,9	-23,5	269,9
C ₇ H _{16(g)}	-187,8	---	---
CH ₃ OH _(g)	-201,2	-161,9	237,6
CH ₃ OH _(l)	-238,6	-166,23	126,8
C ₂ H ₅ OH _(l)	-277,7	-174,8	160,7
C ₂ H ₅ OH _(g)	-235	---	---
CH ₃ COOH _(l)	-487	-392,4	159,8
C ₆ H _{6(l)}	49,0	124,5	172,8
C ₆ H _{6(g)}	82,9	129,7	269,2
CH ₂ =(CH ₂) _{2(g)}	-153,75	---	---
HCHO _(g)	-116	---	219
CH ₃ CHO _(g)	-166	---	264
CH ₃ COCH _{3(g)}	-218	---	295
CO _(g)	-110,5	-137,3	197,9
CO _{2(g)}	-394	-394	231,6
H ^{+(aq)}	0,0	0,0	0,0
HBr _(g)	-36,2	-53,2	198,5
HCl _(g)	-92,3	-95,3	186,7
HF _(g)	-268,6	270,7	173,5
HI _(g)	25,9	1,3	206,3
H ₂ O _(g)	-241,8	-228,6	188,7
H ₂ O _(l)	-285,9	-236,8	69,9
H ₂ O _(v)	-292	---	39,0
H ₂ O _{2(l)}	-188,1	---	109,2
H ₂ S _(g)	-21	---	206
NH _{3(g)}	-46,2	-16,7	192,5
N ₂ H _{4(g)}	95,4	159,4	238,5
NO _(g)	90,4	86,7	210,6
NO _{2(g)}	33,8	51,8	240,5
N ₂ O _(g)	81,6	103,6	220,0
N ₂ O _{4(g)}	9,7	98,3	304,3
OH ⁻ _(aq)	-230	-157,3	-10,7
SO _{2(g)}	-296,9	-300,4	248,5
SO _{3(g)}	-395,2	-370,4	256,2
SOCl _{2(l)}	-245,6	---	---
CaCO _{3(s)}	-1206	---	---
CaO _(s)	-635	---	---

In einer Stunde 4,5 t Schwefel

$$M(S) = 32 \frac{g}{mol} = 32 \frac{kg}{kmol}$$

$$\dot{m} = 4,5 \frac{t}{h}$$

$$= 4,500 \frac{kg}{h}$$

$$n = \frac{m}{M} = \frac{4,500 \frac{kg}{h}}{32 \frac{kg}{kmol}} = 140,625 \text{ kmol}$$

$$\Delta H_R = n \cdot \Delta_m H_R$$

$$= 140,625 \text{ mol} \cdot (-296,9 \frac{kJ}{mol})$$

$$= -41.751,562 \text{ kJ}$$

$$= -41.751,562 \frac{MJ}{h}$$

Klausuraufgabe – Wärme und Reaktionsgleichungen

Reaktionsgleichungen

Im Doppelkontaktverfahren werden 4,5 t elementarer Schwefel in der ersten Prozessstufe zu Schwefeldioxid (SO₂) verbrannt. Verwende für die Lösung der Aufgabe die Anlage 1.

- Formuliere die Reaktionsgleichung für die erste Stufe. (3 Punkte)
- Gib an, ob die Reaktion exotherm oder endotherm verläuft. (5 Punkte)
- Berechne die Wärmemenge (in MJ/h), die bei der Verbrennung von 4,5 t Schwefel entsteht. (5 Punkte)

Verbindung	ΔH_f° in kJ · mol ⁻¹	ΔG_f° in kJ · mol ⁻¹	S° in J · mol ⁻¹ · K ⁻¹
CH _{4(g)}	-74,8	-50,8	186,3
C ₂ H _{2(g)}	226,7	209,2	200,8
C ₂ H _{4(g)}	52,3	68,1	219,4
C ₂ H _{6(g)}	-84,7	-32,9	229,5
C ₃ H _{8(g)}	-103,9	-23,5	269,9
C ₇ H _{16(g)}	-187,8	---	---
CH ₃ OH _(g)	-201,2	-161,9	237,6
CH ₃ OH _(l)	-238,6	-166,23	126,8
C ₂ H ₅ OH _(l)	-277,7	-174,8	160,7
C ₂ H ₅ OH _(g)	-235	---	---
CH ₃ COOH _(l)	-487	-392,4	159,8
C ₆ H _{6(l)}	49,0	124,5	172,8
C ₆ H _{6(g)}	82,9	129,7	269,2
CH ₂ =(CH ₂) _(g)	-153,75	---	---
HCHO _(g)	-116	---	219
CH ₃ CHO _(g)	-166	---	264
CH ₃ COCH _{3(g)}	-218	---	295
CO _(g)	-110,5	-137,3	197,9
CO _{2(g)}	-394	-394	231,6
H ⁺ _(aq)	0,0	0,0	0,0
HBr _(g)	-36,2	-53,2	198,5
HCl _(g)	-92,3	-95,3	186,7
HF _(g)	-268,6	270,7	173,5
HI _(g)	25,9	1,3	206,3
H ₂ O _(g)	-241,8	-228,6	188,7
H ₂ O _(l)	-285,9	-236,8	69,9
H ₂ O _(s)	-292	---	39,0
H ₂ O _{2(l)}	-188,1	---	109,2
H ₂ S _(g)	-21	---	206
NH _{3(g)}	-46,2	-16,7	192,5
N ₂ H _{4(g)}	95,4	159,4	238,5
NO _(g)	90,4	86,7	210,6
NO _{2(g)}	33,8	51,8	240,5
N ₂ O _(g)	81,6	103,6	220,0
N ₂ O _{4(g)}	9,7	98,3	304,3
OH ⁻ _(aq)	-230	-157,3	-10,7
SO _{2(g)}	-296,9	-300,4	248,5
SO _{3(g)}	-395,2	-370,4	256,2
SOCl _{2(l)}	-245,6	---	---
CaCO _{3(s)}	-1206	---	---
CaO _(s)	-635	---	---

Klausuraufgabe – Wärme und Reaktionsgleichungen

Reaktionsgleichungen

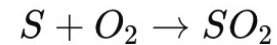
Im Doppelkontaktverfahren werden 4,5 t elementarer Schwefel in der ersten Prozessstufe zu Schwefeldioxid (SO₂) verbrannt. Verwende für die Lösung der Aufgabe die Anlage 1.

- Formuliere die Reaktionsgleichung für die erste Stufe. (3 Punkte)
- Gib an, ob die Reaktion exotherm oder endotherm verläuft. (5 Punkte)
- Berechne die Wärmemenge (in MJ/h), die bei der Verbrennung von 4,5 t Schwefel entsteht. (5 Punkte)

Verbindung	ΔH_f° in kJ · mol ⁻¹	ΔG_f° in kJ · mol ⁻¹	S° in J · mol ⁻¹ · K ⁻¹
CH _{4(g)}	-74,8	-50,8	186,3
C ₂ H _{2(g)}	226,7	209,2	200,8
C ₂ H _{4(g)}	52,3	68,1	219,4
C ₂ H _{6(g)}	-84,7	-32,9	229,5
C ₃ H _{8(g)}	-103,9	-23,5	269,9
C ₇ H _{16(g)}	-187,8	---	---
CH ₃ OH _(g)	-201,2	-161,9	237,6
CH ₃ OH _(l)	-238,6	-166,23	126,8
C ₂ H ₅ OH _(l)	-277,7	-174,8	160,7
C ₂ H ₅ OH _(g)	-235	---	---
CH ₃ COOH _(l)	-487	-392,4	159,8
C ₆ H _{6(l)}	49,0	124,5	172,8
C ₆ H _{6(g)}	82,9	129,7	269,2
CH ₂ =(CH ₂) _(g)	-153,75	---	---
HCHO _(g)	-116	---	219
CH ₃ CHO _(g)	-166	---	264
CH ₃ COCH _{3(g)}	-218	---	295
CO _(g)	-110,5	-137,3	197,9
CO _{2(g)}	-394	-394	231,6
H ^{+(aq)}	0,0	0,0	0,0
HBr _(g)	-36,2	-53,2	198,5
HCl _(g)	-92,3	-95,3	186,7
HF _(g)	-268,6	270,7	173,5
HI _(g)	25,9	1,3	206,3
H ₂ O _(g)	-241,8	-228,6	188,7
H ₂ O _(l)	-285,9	-236,8	69,9
H ₂ O _(v)	-292	---	39,0
H ₂ O _(2l)	-188,1	---	109,2
H ₂ S _(g)	-21	---	206
NH _{3(g)}	-46,2	-16,7	192,5
N ₂ H _{4(g)}	95,4	159,4	238,5
NO _(g)	90,4	86,7	210,6
NO _{2(g)}	33,8	51,8	240,5
N ₂ O _(g)	81,6	103,6	220,0
N ₂ O _{4(g)}	9,7	98,3	304,3
OH ⁻ _(aq)	-230	-157,3	-10,7
SO _{2(g)}	-296,9	-300,4	248,5
SO _{3(g)}	-395,2	-370,4	256,2
SOCl _{2(l)}	-245,6	---	---
CaCO _{3(s)}	-1206	---	---
CaO _(s)	-635	---	---

a. Reaktionsgleichung:

Die Verbrennung von Schwefel zu Schwefeldioxid lautet:



b. Reaktionsenthalpie und Reaktionstyp:

Zur Berechnung der Reaktionsenthalpie ΔH_R

$$\Delta H_R = \sum n \cdot \Delta H_{\text{Produkte}}^\circ - \sum n \cdot \Delta H_{\text{Edukte}}^\circ$$

Für die Reaktion:

$$\Delta H_R = n_{SO_2} \cdot \Delta H_{f,SO_2}^\circ - \left(n_S \cdot \Delta H_{f,S}^\circ + n_{O_2} \cdot \Delta H_{f,O_2}^\circ \right)$$

Einsetzen der Werte:

$$\Delta H_R = 1 \text{ mol} \cdot \left(-296,9 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) - \left(1 \text{ mol} \cdot \left(0 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) + 1 \text{ mol} \cdot \left(0 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) \right) \rightarrow \Delta H_R = -296,9 \text{ kJ}$$

Die Reaktion ist also exotherm, da die Reaktionsenthalpie negativ ist.

Klausuraufgabe – Wärme und Reaktionsgleichungen

Reaktionsgleichungen

Im Doppelkontaktverfahren werden 4,5 t elementarer Schwefel in der ersten Prozessstufe zu Schwefeldioxid (SO₂) verbrannt. Verwende für die Lösung der Aufgabe die Anlage 1.

- Formuliere die Reaktionsgleichung für die erste Stufe. (3 Punkte)
- Gib an, ob die Reaktion exotherm oder endotherm verläuft. (5 Punkte)
- Berechne die Wärmemenge (in MJ/h), die bei der Verbrennung von 4,5 t Schwefel entsteht. (5 Punkte)

Verbindung	ΔH_f° in kJ · mol ⁻¹	ΔG_f° in kJ · mol ⁻¹	S° in J · mol ⁻¹ · K ⁻¹
CH _{4(g)}	-74,8	-50,8	186,3
C ₂ H _{2(g)}	226,7	209,2	200,8
C ₂ H _{4(g)}	52,3	68,1	219,4
C ₂ H _{6(g)}	-84,7	-32,9	229,5
C ₃ H _{8(g)}	-103,9	-23,5	269,9
C ₇ H _{16(g)}	-187,8	---	---
CH ₃ OH _(g)	-201,2	-161,9	237,6
CH ₃ OH _(l)	-238,6	-166,23	126,8
C ₂ H ₅ OH _(l)	-277,7	-174,8	160,7
C ₂ H ₅ OH _(g)	-235	---	---
CH ₃ COOH _(l)	-487	-392,4	159,8
C ₆ H _{6(l)}	49,0	124,5	172,8
C ₆ H _{6(g)}	82,9	129,7	269,2
CH ₂ =(CH ₂) _{2(g)}	-153,75	---	---
HCHO _(g)	-116	---	219
CH ₃ CHO _(g)	-166	---	264
CH ₃ COCH _{3(g)}	-218	---	295
CO _(g)	-110,5	-137,3	197,9
CO _{2(g)}	-394	-394	231,6
H ^{+(aq)}	0,0	0,0	0,0
HBr _(g)	-36,2	-53,2	198,5
HCl _(g)	-92,3	-95,3	186,7
HF _(g)	-268,6	270,7	173,5
HI _(g)	25,9	1,3	206,3
H ₂ O _(g)	-241,8	-228,6	188,7
H ₂ O _(l)	-285,9	-236,8	69,9
H ₂ O _(s)	-292	---	39,0
H ₂ O _{2(l)}	-188,1	---	109,2
H ₂ S _(g)	-21	---	206
NH _{3(g)}	-46,2	-16,7	192,5
N ₂ H _{4(g)}	95,4	159,4	238,5
NO _(g)	90,4	86,7	210,6
NO _{2(g)}	33,8	51,8	240,5
N ₂ O _(g)	81,6	103,6	220,0
N ₂ O _{4(g)}	9,7	98,3	304,3
OH ^{-(aq)}	-230	-157,3	-10,7
SO _{2(g)}	-296,9	-300,4	248,5
SO _{3(g)}	-395,2	-370,4	256,2
SOCl _{2(l)}	-245,6	---	---
CaCO _{3(s)}	-1206	---	---
CaO _(s)	-635	---	---

c. Berechnung der freigesetzten Wärmemenge:

Zuerst berechnest du die Stoffmenge an Schwefel, die umgesetzt wird pro Stunde:

$$32 \text{ kg Schwefel} = 1 \text{ kmol}$$

→ Also für 4,5 t (4500 kg) Schwefel

$$4500 \text{ kg Schwefel} = 140,625 \text{ kmol}$$

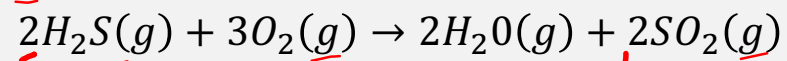
Nun berechnest du die Wärmemenge, die bei der Verbrennung von 1 kmol Schwefel freigesetzt wird.

- 1 mol Schwefel liefert 296,9 kJ
- 1 kmol Schwefel liefert 296,9 MJ
- 140,625 kmol Schwefel in. der Stunde liefern 41.751,56 MJ/h

Klausuraufgabe – Rohöl

Reaktionsgleichungen

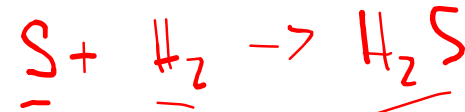
In der Raffinerie wird das Rohöl entschwefelt. Dazu wird der Schwefel mit Wasserstoff und Katalysator zu Schwefelwasserstoff konvertiert. Der anfallende Schwefelwasserstoff wird nach folgender Reaktionsgleichung zu Schwefeldioxid umgewandelt:



Berechne die Energie, die bei der Umwandlung von 300 kg Schwefelwasserstoff freigesetzt wird, wenn der Wirkungsgrad $\eta=0,85$ beträgt.

Verbindung	$\Delta H_f^\circ / \text{kJ/mol}^{-1}$	Verbindung	$\Delta H_f^\circ / \text{kJ/mol}^{-1}$
CaCO ₃ (s)	-1206,9	CaO (s)	-635,5
Ca(OH) ₂ (s)	-986,59	CH ₄ (g)	-74,85
C ₂ H ₂ (g)	+226,7	C ₂ H ₄ (g)	+52,30
CO (g)	-110,5	CO ₂ (g)	-393,5
Fe ₂ O ₃ (s)	-822,2	HBr (g)	-36,2
HCl (g)	-92,30	HCN (g)	+130,5
H ₂ O (g)	-241,8	H ₂ O (l)	-285,9
H ₂ S (g)	-20,2	NH ₃ (g)	-46,19
NO (g)	+90,37	NO ₂ (g)	+33,8
SO ₂ (g)	-296,9	SO ₃ (g)	-395,2
CH ₃ OH (l)	-238,6	CH ₃ OH (g)	-201,3
CH ₃ COOH (l)	-487,0	C ₂ H ₅ OH (l)	-277,6
Elemente	0	C ₂ H ₅ OH (g)	-235,1

a) Reaktion Schwefel und Wasserstoff



$$\Delta H = [-20,2 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}] - (0)$$

$$\Delta H = -20,2 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\Delta H_R = \sum H(\text{Produkte}) - \sum H(\text{Edukte})$$

$$= (2 \cdot H_0(\text{H}_2\text{O}) + 2 \cdot H_0(\text{SO}_2)) - (2 \cdot H_0(\text{H}_2\text{S}) + 3 \cdot H_0(\text{O}_2))$$

$$= (2 \cdot (-241,8 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}) + 2 \cdot (-296,9 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}})) - (2 \cdot (-20,2 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}) + 3 \cdot (0))$$

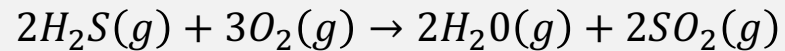
$$\Delta H_R = -1034,6 \text{ kJ}$$

$$M(\text{H}_2\text{S}) = 34,1 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

Klausuraufgabe – Rohöl

Reaktionsgleichungen

In der Raffinerie wird das Rohöl entschwefelt. Dazu wird der Schwefel mit Wasserstoff und Katalysator zu Schwefelwasserstoff konvertiert. Der anfallende Schwefelwasserstoff wird nach folgender Reaktionsgleichung zu Schwefeldioxid umgewandelt:



Berechne die Energie, die bei der Umwandlung von 300 kg Schwefelwasserstoff freigesetzt wird, wenn der Wirkungsgrad $\eta=0,85$ beträgt.

Verbindung	$\Delta H_f^\circ / \text{kJ/mol}^{-1}$	Verbindung	$\Delta H_f^\circ / \text{kJ/mol}^{-1}$
CaCO ₃ (s)	-1206,9	CaO (s)	-635,5
Ca(OH) ₂ (s)	-986,59	CH ₄ (g)	-74,85
C ₂ H ₂ (g)	+226,7	C ₂ H ₄ (g)	+52,30
CO (g)	-110,5	CO ₂ (g)	-393,5
Fe ₂ O ₃ (s)	-822,2	HBr (g)	-36,2
HCl (g)	-92,30	HCN (g)	+130,5
H ₂ O (g)	-241,8	H ₂ O (l)	-285,9
H ₂ S (g)	-20,2	NH ₃ (g)	-46,19
NO (g)	+90,37	NO ₂ (g)	+33,8
SO ₂ (g)	-296,9	SO ₃ (g)	-395,2
CH ₃ OH (l)	-238,6	CH ₃ OH (g)	-201,3
CH ₃ COOH (l)	-487,0	C ₂ H ₅ OH (l)	-277,6
Elemente	0	C ₂ H ₅ OH (g)	-235,1

$$\Delta H_r = -1034,6 \text{ kJ}$$

=> Energiemenge bei der Umwandlung von
2 mol H₂S

$$\rightarrow \Delta H_{\text{mol H}_2\text{S}} = -\frac{1034,6 \text{ kJ}}{2} = -507,3 \text{ kJ}$$

$$n = \frac{m}{M} = \frac{300 \text{ kg}}{34,1 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 8,798 \text{ kmol}$$

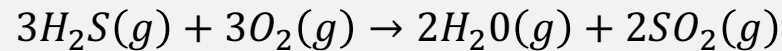
$$\Delta H = n \cdot \Delta H_{\text{mol H}_2\text{S}} \cdot \eta$$

$$= 8,798 \text{ mol} \cdot 507,3 \text{ kJ} \cdot 0,85 = 3.877,344 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

Klausuraufgabe – Rohöl

Reaktionsgleichungen

In der Raffinerie wird das Rohöl entschwefelt. Dazu wird der Schwefel mit Wasserstoff und Katalysator zu Schwefelwasserstoff konvertiert. Der anfallende Schwefelwasserstoff wird nach folgender Reaktionsgleichung zu Schwefeldioxid umgewandelt:



Berechne die Energie, die bei der Umwandlung von 300 kg Schwefelwasserstoff freigesetzt wird, wenn der Wirkungsgrad $\eta=0,85$ beträgt.

Verbindung	$\Delta H_f^\circ / \text{kJ/mol}^{-1}$	Verbindung	$\Delta H_f^\circ / \text{kJ/mol}^{-1}$
CaCO ₃ (s)	-1206,9	CaO (s)	-635,5
Ca(OH) ₂ (s)	-986,59	CH ₄ (g)	-74,85
C ₂ H ₂ (g)	+226,7	C ₂ H ₄ (g)	+52,30
CO (g)	-110,5	CO ₂ (g)	-393,5
Fe ₂ O ₃ (s)	-822,2	HBr (g)	-36,2
HCl (g)	-92,30	HCN (g)	+130,5
H ₂ O (g)	-241,8	H ₂ O (l)	-285,9
H ₂ S (g)	-20,2	NH ₃ (g)	-46,19
NO (g)	+90,37	NO ₂ (g)	+33,8
SO ₂ (g)	-296,9	SO ₃ (g)	-395,2
CH ₃ OH (l)	-238,6	CH ₃ OH (g)	-201,3
CH ₃ COOH (l)	-487,0	C ₂ H ₅ OH (l)	-277,6
Elemente	0	C ₂ H ₅ OH (g)	-235,1

a. Berechnung der Reaktionsenthalpie:

Für die Reaktion:

$$\Delta H_R^\circ = \sum n \cdot \Delta H_{\text{Produkte}}^\circ - \sum n \cdot \Delta H_{\text{Edukte}}^\circ$$

$$\Delta H_R^\circ = [2 \cdot (-241,8 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}) + 2 \cdot (-296,9 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}})] - [2 \cdot (-20,2 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}) + 3 \cdot (0 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}})]$$

$$\Delta H_R^\circ = (-483,6 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} + -593,8 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}) - (-40,4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}})$$

$$\Delta H_R^\circ = -1.037 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

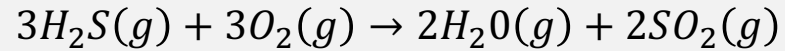
Das bedeutet, dass bei der Umsetzung von 2 Mol Schwefelwasserstoff eine Energie von -1.037 kJ freigesetzt wird. Nun berechnen wir die Stoffmenge n an Schwefelwasserstoff, die pro Stunde umgesetzt wird:

$$n = \frac{m}{M} = \frac{300 \cdot 10^3 \text{ g}}{34,1 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 8.797,65 \text{ mol/h}$$

Klausuraufgabe – Rohöl

Reaktionsgleichungen

In der Raffinerie wird das Rohöl entschwefelt. Dazu wird der Schwefel mit Wasserstoff und Katalysator zu Schwefelwasserstoff konvertiert. Der anfallende Schwefelwasserstoff wird nach folgender Reaktionsgleichung zu Schwefeldioxid umgewandelt:



Berechne die Energie, die bei der Umwandlung von 300 kg Schwefelwasserstoff freigesetzt wird, wenn der Wirkungsgrad $\eta=0,85$ beträgt.

Verbindung	$\Delta H_f^\circ / \text{kJ/mol}^{-1}$	Verbindung	$\Delta H_f^\circ / \text{kJ/mol}^{-1}$
CaCO ₃ (s)	-1206,9	CaO (s)	-635,5
Ca(OH) ₂ (s)	-986,59	CH ₄ (g)	-74,85
C ₂ H ₂ (g)	+226,7	C ₂ H ₄ (g)	+52,30
CO (g)	-110,5	CO ₂ (g)	-393,5
Fe ₂ O ₃ (s)	-822,2	HBr (g)	-36,2
HCl (g)	-92,30	HCN (g)	+130,5
H ₂ O (g)	-241,8	H ₂ O (l)	-285,9
H ₂ S (g)	-20,2	NH ₃ (g)	-46,19
NO (g)	+90,37	NO ₂ (g)	+33,8
SO ₂ (g)	-296,9	SO ₃ (g)	-395,2
CH ₃ OH (l)	-238,6	CH ₃ OH (g)	-201,3
CH ₃ COOH (l)	-487,0	C ₂ H ₅ OH (l)	-277,6
Elemente	0	C ₂ H ₅ OH (g)	-235,1

$$Q_{\text{gesamt}} = n \cdot \eta \cdot \Delta H_R^\circ$$

$$Q_{\text{gesamt}} = 8.797,65 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \cdot 0,85 \cdot \frac{-1.037 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}}{2}$$

$$Q_{\text{gesamt}} = 3.877.344 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 3.877,344 \frac{\text{MJ}}{\text{h}}$$

Klausuraufgabe – Wärmeenergie und Einsparung

Reaktionsgleichungen

Durch eine Erhöhung der Schleuderzahl einer Zentrifuge können pro Tag 100 kg Wasser mehr aus einem Filterkuchen abgetrennt werden. Dieses Wasser muss dann im anschließenden Kammetrockner nicht mehr verdampft werden, was zu einer Energieersparnis führt.

Daten:

- Verfügbarkeit der Anlage: 300 Tage pro Jahr
- Trocknungstemperatur im Trockner: 100 °C $\Delta T = 75\text{ K}$
- Feuchtguttemperatur: 25 °C
- Temperatur des Heizdampfes (bei ca. 3,5 bar, Siedetemperatur 135 °C)
- Kondensattemperatur (nach Abkühlung auf 100 °C zur Erzeugung des Heizdampfes verwendet)
- Spezifische Wärmekapazität von Wasser: $4,19\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
- Spezifische Verdampfungswärme von Wasser (bei 135 °C und 100 °C): $2.260\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ r

- Berechne die eingesparte Wärmeenergie pro Jahr in MJ.
- Berechne die eingesparte Masse des Heizdampfes des Trockners im Jahr.

a) Schritt 1: abgetrennte Wassermasse

$$\dot{m} = 100\frac{\text{kg}}{\text{d}} \cdot 300\frac{\text{d}}{\text{a}} = 30.000\frac{\text{kg}}{\text{a}}$$

Wärmemenge eingespart

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T + m \cdot \Delta h_r$$

$$= 30.000\frac{\text{kg}}{\text{a}} \cdot 4,19\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot 75\text{K} + 30.000\frac{\text{kg}}{\text{a}} \cdot 2.260\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$
$$= 77.227.500\frac{\text{kJ}}{\text{a}} = 77.227,5\frac{\text{MJ}}{\text{a}}$$

Klausuraufgabe – Wärmeenergie und Einsparung

Reaktionsgleichungen

Durch eine Erhöhung der Schleuderzahl einer Zentrifuge können pro Tag 100 kg Wasser mehr aus einem Filterkuchen abgetrennt werden. Dieses Wasser muss dann im anschließenden Kammetrockner nicht mehr verdampft werden, was zu einer Energieersparnis führt.

Daten:

- Verfügbarkeit der Anlage: 300 Tage pro Jahr
- Trocknungstemperatur im Trockner: 100 °C
- Feuchtguttemperatur: 25 °C
- Temperatur des Heizdampfes (bei ca. 3,5 bar, Siedetemperatur 135 °C)
- Kondensattemperatur (nach Abkühlung auf 100 °C zur Erzeugung des Heizdampfes verwendet)
- Spezifische Wärmekapazität von Wasser: $4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
- Spezifische Verdampfungswärme von Wasser (bei 135 °C und 100 °C): $2.260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

- Berechne die eingesparte Wärmeenergie pro Jahr in MJ.
- Berechne die eingesparte Masse des Heizdampfes des Trockners im Jahr.

b)

$$Q = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T + \dot{m} \cdot \Delta h_r$$

$$Q = \dot{m} \cdot (c \cdot \Delta T + \Delta h_r)$$

$$\frac{Q}{c \cdot \Delta T + \Delta h_r} = \dot{m}$$

$$\frac{77.227.500 \frac{\text{kJ}}{\text{a}}}{4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot 35\text{K} + 2.260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = \dot{m} = 32.089,21 \frac{\text{kg}}{\text{a}}$$

Klausuraufgabe – Kalorik

Reaktionsgleichungen

Durch eine Erhöhung der Schleuderschwindigkeit einer Zentrifuge können pro Tag 100 kg Wasser mehr aus einem Filterkuchen abgetrennt werden. Dieses Wasser muss dann im anschließenden Kammetrockner nicht mehr verdampft werden, was zu einer Energieersparnis führt.

Daten:

- Verfügbarkeit der Anlage: 300 Tage pro Jahr
- Trocknungstemperatur im Trockner: 100 °C
- Feuchtguttemperatur: 25 °C
- Temperatur des Heizdampfes (bei ca. 3,5 bar, Siedetemperatur 135 °C)
- Kondensattemperatur (nach Abkühlung auf 100 °C zur Erzeugung des Heizdampfes verwendet)
- Spezifische Wärmekapazität von Wasser: $4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
- Spezifische Verdampfungswärme von Wasser (bei 135 °C und 100 °C): $2.260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

- Berechne die eingesparte Wärmeenergie pro Jahr in MJ.
- Berechne die eingesparte Masse des Heizdampfes des Trockners im Jahr.

- Die abgetrennte Wassermasse pro Jahr beträgt:

$$q_m(\text{Jahr}) = q_m(\text{d}) \cdot 300 \frac{\text{d}}{\text{a}} = 100 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \cdot 300 \frac{\text{d}}{\text{a}} = 30.000 \frac{\text{kg}}{\text{a}}$$

Nun berechnen wir die eingesparte Wärmeenergie pro Jahr. Dazu wird das Wasser von der Feuchtguttemperatur (25 °C) auf die Verdampfungstemperatur (100 °C) erhitzt und anschließend verdampft:

$$\Phi = q_{mw} \cdot c_w \cdot \Delta\vartheta + q_{mw} \cdot \Delta h_v$$

$$\Phi = 30.000 \frac{\text{kg}}{\text{a}} \cdot 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot (100 - 25) \text{K} + 30.000 \frac{\text{kg}}{\text{a}} \cdot 2.260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Phi = 77.227.500 \frac{\text{kJ}}{\text{a}} = 77.227,5 \frac{\text{MJ}}{\text{a}}$$

- Berechnung der eingesparten Masse des Heizdampfes des Trockners pro Jahr: Für die Berechnung der eingesparten Heizdampfmasse gehen wir davon aus, dass der Heizdampf von 135 °C (Siedetemperatur) auf 100 °C (Kondensattemperatur) abkühlt:

$$\Phi = q_{mD} \cdot c_w \cdot \Delta\vartheta + q_{mD} \cdot \Delta h_v \quad \rightarrow \quad q_{mD} = \frac{\Phi}{c_w \cdot \Delta\vartheta + \Delta h_v}$$

$$q_{mD} = \frac{77.227.500 \frac{\text{kJ}}{\text{a}}}{4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot (135 - 100) \text{K} + 2.260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \quad \rightarrow \quad q_{mD} = 32.089,21 \frac{\text{kg}}{\text{a}}$$