

Name: \_\_\_\_\_ Klasse: \_\_\_\_\_ Datum: \_\_\_\_\_

# KLAUSUR CHEMIE

*Chemisches Gleichgewicht • MWG • Le Chatelier • Kinetik • Thermodynamik*

## Schwerpunktthema: Das Kontaktverfahren (Schwefelsäureherstellung)

### Punkteübersicht

Aufgabe	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5
Max. Punkte	18	10	12	15	10
Erreichte Punkte					
<b>Gesamt: 65 P</b>	<b>Note:</b>				

*Bearbeitungszeit: 90 Minuten | Hilfsmittel: Taschenrechner, Formelsammlung | Punktzahl: 65 Punkte*

### Hintergrundtext: Das Kontaktverfahren

Das Kontaktverfahren ist eines der bedeutendsten chemischen Industrieverfahren weltweit und dient der großtechnischen Herstellung von Schwefelsäure (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Schwefelsäure gilt als die meistproduzierte anorganische Grundchemikalie überhaupt – sie wird in der Produktion von Düngemitteln, Batteriesäuren, Kunststoffen, Farbstoffen, Waschmitteln und Arzneimitteln eingesetzt. Die globale Jahresproduktion übersteigt 250 Millionen Tonnen. In vielen Ländern gilt die Schwefelsäureproduktion als Indikator für industrielle Leistungsfähigkeit.

Die zentrale Reaktion des Kontaktverfahrens ist die katalytische Oxidation von Schwefeldioxid zu Schwefeltrioxid:



Die Reaktion ist exotherm; nach dem Prinzip von Le Chatelier begünstigen niedrigere Temperaturen die Produktbildung. Da die Reaktionsgeschwindigkeit bei tiefen Temperaturen jedoch zu gering ist, wählt man in der Praxis einen Kompromiss von etwa 450 °C. Als Katalysator wird Vanadium(V)-oxid (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) auf einem Siliciumdioxid-Träger (SiO<sub>2</sub>) eingesetzt – ein Beispiel für heterogene Katalyse.

Hinsichtlich des Druckes gilt: Auf der linken Seite befinden sich drei Mol Gasteilchen (2 mol SO<sub>2</sub> + 1 mol O<sub>2</sub>), auf der rechten nur zwei Mol SO<sub>3</sub>. Eine Druckerhöhung verschiebt das Gleichgewicht gemäß Le Chatelier in Richtung der Produktseite. In der technischen Praxis arbeitet man jedoch nur mit moderat erhöhten Drücken, da sehr hohe Drücke wirtschaftlich und sicherheitstechnisch aufwändig sind und der Zusatzgewinn an Ausbeute vergleichsweise klein bleibt.

Das entstandene SO<sub>3</sub> wird nicht direkt in Wasser geleitet (unkontrollierte Nebelbildung), sondern zunächst in konzentrierter Schwefelsäure absorbiert, wobei Oleum (H<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) entsteht, das anschließend mit Wasser zu Schwefelsäure verdünnt wird. Dieses mehrstufige Verfahren ist der Grund, warum man vom „Doppelkontaktverfahren“ spricht.

### Gegebene Standardbildungsenthalpien

Stoff	Formel	ΔH <sub>f</sub> <sup>°</sup> (kJ/mol)	Hinweis
Schwefeldioxid	SO <sub>2</sub> (g)	-297	
Schwefeltrioxid	SO <sub>3</sub> (g)	-396	
Sauerstoff	O <sub>2</sub> (g)	0	Element im Standardzustand
Schwefelsäure	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (l)	-814	Weiterverarbeitung

## Aufgabe 1: Prinzip von Le Chatelier und Gleichgewicht [18 Punkte]

Betrachten Sie die zentrale Reaktion des Kontaktverfahrens:

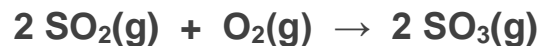


- Erklären Sie mithilfe des Prinzips von Le Chatelier, warum eine Druckerhöhung die Bildung von  $\text{SO}_3$  begünstigt. Zählen Sie hierzu die Mol Gasteilchen auf beiden Seiten der Gleichung aus. [4 P]
- Begründen Sie, warum niedrigere Temperaturen thermodynamisch günstiger für die  $\text{SO}_3$ -Ausbeute sind. Beziehen Sie sich auf das Vorzeichen von  $\Delta H^\circ$ . [4 P]
- Erläutern Sie, warum man im Kontaktverfahren trotzdem nicht bei sehr niedrigen Temperaturen (z. B.  $100^\circ\text{C}$ ) arbeitet. [4 P]
- Analysieren Sie anhand der folgenden Tabelle, wie sich die Bedingungen bei  $200^\circ\text{C}$ ,  $450^\circ\text{C}$  und  $700^\circ\text{C}$  auf Reaktionsgeschwindigkeit und Gleichgewichtslage auswirken. Füllen Sie die Tabelle aus und begründen Sie die Wahl von  $450^\circ\text{C}$  als Industrietemperatur. [6 P]

Temperatur ( $^\circ\text{C}$ )	Reaktionsgeschwindigkeit	Gleichgewichtslage ( $\text{SO}_3$ -Ausbeute)	Bewertung
200	?	?	?
450	?	?	?
700	?	?	?

## Aufgabe 2: Berechnung der Reaktionsenthalpie (Hess'scher Satz) [10 Punkte]

Gegeben ist die Bruttoreaktion:



Verwenden Sie die Standardbildungsenthalpien aus der obigen Tabelle.

- Stellen Sie die allgemeine Formel des Hess'schen Satzes zur Berechnung von  $\Delta H_r^\circ$  auf. Benennen Sie Produkte und Edukte dieser Reaktion und ordnen Sie die Standardbildungsenthalpien mit korrekten stöchiometrischen Koeffizienten zu. [3 P]
- Berechnen Sie  $\Delta H_r^\circ$  in  $\text{kJ/mol}$ . Zeigen Sie den vollständigen Rechenweg mit allen Zwischenschritten. [5 P]
- Formulieren Sie, ob die Reaktion exotherm oder endotherm verläuft. Nennen Sie eine konkrete technische Konsequenz, die sich daraus für den Industriebetrieb ergibt. [2 P]

## Aufgabe 3: Wärmeberechnung und Energiebilanz [12 Punkte]

In einer Industrieanlage werden  $224 \text{ L SO}_2$ -Gas unter Normbedingungen ( $0^\circ\text{C}$ ,  $1013 \text{ hPa}$ ) vollständig zu  $\text{SO}_3$  umgesetzt.

Gegebene Konstante: Molvolumen  $V_m = 22,4 \text{ L/mol}$

- Berechnen Sie die Stoffmenge  $n(\text{SO}_2)$  und erläutern Sie, welche Voraussetzung für die Anwendung des Molvolumens erfüllt sein muss. [3 P]
- Berechnen Sie die frei werdende Wärmeenergie  $Q$  in  $\text{kJ}$ . Achten Sie auf das Vorzeichen und interpretieren Sie es physikalisch. [4 P]
- In der Realität wird die Reaktionswärme nicht einfach abgeleitet, sondern gezielt genutzt. Beschreiben Sie zwei technische Möglichkeiten der Wärmenutzung und begründen Sie deren wirtschaftliche Bedeutung. [3 P]
- Ein Ingenieur plant, die Anlage so zu optimieren, dass  $448 \text{ L SO}_2$  pro Stunde umgesetzt werden. Berechnen Sie die pro Stunde freiwerdende Wärmeenergie  $Q$ . [2 P]

## Aufgabe 4: Massenwirkungsgesetz und Gleichgewichtskonstante $K_p$ [15P]

Im industriellen Kontaktverfahren wurden bei 450 °C folgende Gleichgewichts-Partialdrücke gemessen:

Stoff	Formel	Partialdruck (bar)
Schwefeldioxid	$\text{SO}_2$	2,0
Sauerstoff	$\text{O}_2$	1,5
Schwefeltrioxid	$\text{SO}_3$	8,0

- Stellen Sie den vollständigen Ausdruck für die Gleichgewichtskonstante  $K_p$  auf. Achten Sie auf die korrekte Konvention (Produkte/Edukte) und die stöchiometrischen Exponenten. [4 P]
- Berechnen Sie den Zahlenwert von  $K_p$ . Zeigen Sie alle Zwischenschritte (Zähler, Nenner, Division). [5 P]
- Bestimmen Sie die Einheit von  $K_p$  rechnerisch, indem Sie die Einheiten von Zähler und Nenner explizit ausschreiben und kürzen. [3 P]
- Interpretieren Sie den  $K_p$ -Wert: Was sagt er über die Gleichgewichtslage aus? Ist der berechnete Wert für eine technische Anwendung günstig oder ungünstig? Begründen Sie. [3 P]

## Aufgabe 5: Katalysator, Kinetik und Reaktionsenergetik [10 Punkte]

Im Kontaktverfahren wird Vanadium(V)-oxid ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) auf  $\text{SiO}_2$  als heterogener Katalysator eingesetzt.

- Erläutern Sie die Funktion des  $\text{V}_2\text{O}_5$ -Katalysators in Bezug auf die Aktivierungsenergie  $E_a$ . Beschreiben Sie, wie der Katalysator die Reaktion auf molekularer Ebene beeinflusst. [3 P]
- Begründen Sie, warum der Katalysator die Lage des chemischen Gleichgewichts (d. h. den Wert von  $K_p$ ) nicht verändert. Nutzen Sie dabei die Begriffe Hin- und Rückreaktion. [3 P]
- Erklären Sie den grundlegenden Unterschied zwischen Reaktionsgeschwindigkeit (kinetische Größe) und chemischem Gleichgewicht (thermodynamische Größe). Geben Sie je ein Beispiel, wie man jede dieser Größen beeinflussen kann. [2 P]
- Nennen und erläutern Sie zwei wirtschaftliche Vorteile des Katalysatoreinsatzes im industriellen Maßstab. [2 P]

– Ende der Klausur –  
**Viel Erfolg!**

# ERWARTUNGSHORIZONT & MUSTERLÖSUNG

Klausur Chemie – Das Kontaktverfahren (Schwefelsäureherstellung)

HINWEIS: Nur für Lehrkräfte – nicht an Schülerinnen und Schüler ausgeben!

## Erwartungshorizont Aufgabe 1: Le Chatelier und Gleichgewicht

### a) Druckerhöhung [4 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Links: 2 mol SO <sub>2</sub> + 1 mol O <sub>2</sub> = 3 mol Gasteilchen; Rechts: 2 mol SO <sub>3</sub> = 2 mol Gasteilchen.	Zählung muss korrekt sein
1	Druckerhöhung → System reagiert entgegen der Störung (Le Chatelier).	
1	→ Gleichgewicht verschiebt sich zur Seite mit weniger Mol → nach rechts (Produktseite).	Richtung benennen
1	→ Druckerhöhung ist vorteilhaft für die SO <sub>3</sub> -Ausbeute; Praxisbezug: mäßiger Druck aus Kostengründen.	Praxisbezug erwünscht

### b) Temperatur und Thermodynamik [4 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Die Reaktion ist exotherm ( $\Delta H^\circ < 0$ ) → Wärme ist ein „Produkt“ im weiteren Sinne.	Vorzeichen nennen
1	Le Chatelier: Bei Temperaturerhöhung wird die exotherme Richtung (Hinreaktion) gehemmt → Gleichgewicht verschiebt sich nach links.	
1	→ Niedrige Temperaturen begünstigen thermodynamisch die Produktseite (höhere SO <sub>3</sub> -Ausbeute).	
1	Quantitative Aussage: Bei niedrigen T liegt K <sub>p</sub> deutlich höher → mehr Produkt im Gleichgewicht.	Höhere Stufe

### c) Kompromisstemperatur 450 °C [4 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Bei niedrigen Temperaturen (< 300 °C) ist die Reaktionsgeschwindigkeit zu gering – wirtschaftlich nicht rentabel.	
1	Höhere Temperaturen beschleunigen die Reaktion (mehr Teilchen überwinden die Aktivierungsenergie E <sub>a</sub> ).	
1	Kompromiss bei ~450 °C: ausreichende Reaktionsgeschwindigkeit bei noch akzeptabler Gleichgewichtslage.	
1	Zusatz: V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> arbeitet in diesem Temperaturbereich optimal (Katalysatoreffizienz temperaturabhängig).	fakultativ / Bonus

### d) Tabellenauswertung Temperaturvergleich [6 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	200 °C: Reaktionsgeschwindigkeit sehr gering / praktisch keine Reaktion; GG-Lage (SO <sub>3</sub> -Ausbeute) sehr hoch; Bewertung: technisch unbrauchbar.	
2	450 °C: Reaktionsgeschwindigkeit gut (mit Katalysator ausreichend); GG-Lage: SO <sub>3</sub> -Ausbeute ~98 %; Bewertung: optimaler Industriekompromiss.	2 P für vollständige Zeile

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	700 °C: Reaktionsgeschwindigkeit sehr hoch; GG-Lage ungünstig (Ausbeute sinkt stark auf < 50 %); Bewertung: thermodynamisch nachteilig.	
2	Begründung der Wahl 450 °C: bester Kompromiss zwischen Kinetik und Thermodynamik; Katalysator setzt $E_a$ herab, sodass auch bei 450 °C ausreichende Geschwindigkeit erzielt wird.	2 P für Gesamtbegründung

### Erwartungshorizont Aufgabe 2: Reaktionsenthalpie

#### a) Hess'scher Satz – Formel [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	$\Delta H_r^\circ = \sum \Delta H_f^\circ(\text{Produkte}) - \sum \Delta H_f^\circ(\text{Edukte})$	Formel vollständig
1	Produkte: $2 \times \text{SO}_3$ ; Edukte: $2 \times \text{SO}_2 + 1 \times \text{O}_2$ ; Koeffizienten aus Stöchiometrie.	Koeff. berücksichtigt
1	$\text{O}_2$ und $\text{Cl}_2$ (Elemente im Standardzustand): $\Delta H_f^\circ = 0$ kJ/mol.	Standardzustand

#### b) Berechnung $\Delta H_r^\circ$ [5 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Produkte: $2 \times (-396) = -792$ kJ	
1	Edukte: $2 \times (-297) + 1 \times 0 = -594$ kJ	$\text{O}_2 = 0$ beachten
2	$\Delta H_r^\circ = -792 - (-594) = -792 + 594 = -198$ kJ/mol	$\pm 2$ kJ Toleranz
1	Einheit kJ/mol korrekt angegeben; Vorzeichen negativ (exotherm).	Einheit + Vorzeichen

#### c) Interpretation [2 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	$\Delta H_r^\circ < 0 \rightarrow$ exotherm; die Reaktion gibt Wärme an die Umgebung ab.	
1	Technisch: Wärme muss aktiv abgeführt werden (Kühlung/Wärmetauscher); alternativ: Energierückgewinnung durch Dampferzeugung.	

### Erwartungshorizont Aufgabe 3: Wärmeberechnung

#### a) Stoffmenge $n(\text{SO}_2)$ [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Formel: $n = V / V_m$	
1	$n = 224 \text{ L} / 22,4 \text{ L/mol} = 10 \text{ mol SO}_2$	
1	Voraussetzung: ideales Gasverhalten bei Normbedingungen (0 °C, 1013 hPa).	Voraussetzung nennen

#### b) Wärmeenergie Q [4 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	$\Delta H_r^\circ = -198$ kJ bezieht sich auf 2 mol $\text{SO}_2 \rightarrow \Delta H$ pro mol $\text{SO}_2 = -99$ kJ/mol	Bezug auf 2 mol!
1	$Q = n \times \Delta H$ pro mol = $10 \text{ mol} \times (-99 \text{ kJ/mol})$	
1	$Q = -990$ kJ	$\pm 5$ kJ Toleranz
1	Negatives Vorzeichen: Wärme wird vom System abgegeben (exotherm); das System gibt Energie an die Umgebung ab.	Vorzeichen erklären

**c) Technische Wärmenutzung [3 P]**

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Wärmetauscher: frei werdende Reaktionswärme wird zur Vorwärmung der Eduktgase (SO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> ) genutzt → Energieeinsparung.	
1	Dampferzeugung: Wärme erzeugt Dampf, der zur Stromerzeugung (Turbine) oder Prozessheizung eingesetzt wird.	
1	Wirtschaftliche Bedeutung: geringere Betriebskosten, höhere Energieeffizienz, Beitrag zur CO <sub>2</sub> -Reduktion.	<i>mind. 1 Aspekt</i>

**d) Optimierungsrechnung (448 L/h) [2 P]**

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	$n = 448 / 22,4 = 20 \text{ mol SO}_2 \text{ pro Stunde.}$	
1	$Q = 20 \times (-99) = -1980 \text{ kJ/h} \rightarrow \text{Anlage liefert } 1980 \text{ kJ Wärme pro Stunde.}$	

**Erwartungshorizont Aufgabe 4: Massenwirkungsgesetz und K<sub>p</sub>**

**a) K<sub>p</sub>-Ausdruck [4 P]**

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	$K_p = p(\text{SO}_3)^2 / [p(\text{SO}_2)^2 \times p(\text{O}_2)^1]$	<i>Formel vollständig</i>
1	Produkte im Zähler (SO <sub>3</sub> ), Edukte im Nenner (SO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> ).	
1	Exponenten entsprechen Stöchiometrikoeffizienten: 2, 2, 1.	
1	K <sub>p</sub> verwendet Partialdrücke, nicht Konzentrationen (kein K <sub>c</sub> ).	

**b) Berechnung K<sub>p</sub> [5 P]**

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Zähler: $p(\text{SO}_3)^2 = (8,0)^2 = 64,0 \text{ bar}^2$	
1	Nenner: $p(\text{SO}_2)^2 \times p(\text{O}_2) = (2,0)^2 \times 1,5 = 4,0 \times 1,5 = 6,0 \text{ bar}^3$	
2	$K_p = 64,0 / 6,0 \approx 10,67 \text{ bar}^{-1}$	$\pm 0,3 \text{ Toleranz}$
1	Rechenweg vollständig und nachvollziehbar dargestellt.	

**c) Einheit von K<sub>p</sub> [3 P]**

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Zähler: $\text{bar}^2$ (aus $p(\text{SO}_3)^2$ )	
1	Nenner: $\text{bar}^2 \times \text{bar}^1 = \text{bar}^3$	
1	Einheit: $\text{bar}^2 / \text{bar}^3 = \text{bar}^{-1}$ (alternativ: Pa <sup>-1</sup> akzeptabel)	

**d) Interpretation K<sub>p</sub> ≈ 10,67 [3 P]**

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	$K_p > 1$ : Gleichgewicht liegt auf der Produktseite (SO <sub>3</sub> bevorzugt).	
1	Im Gleichgewicht überwiegen Produkte gegenüber Edukten → hohe SO <sub>3</sub> -Ausbeute.	
1	Technisch günstig: akzeptable Ausbeute (~98 % in der Praxis) rechtfertigt die gewählten Bedingungen; Verfahren ist wirtschaftlich.	<i>Praxisbezug</i>

## Erwartungshorizont Aufgabe 5: Katalysator und Kinetik

### a) Funktion $V_2O_5$ -Katalysator [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	$V_2O_5$ senkt die Aktivierungsenergie $E_a$ der Reaktion (alternativer Reaktionsmechanismus).	
1	Mehr Moleküle besitzen bei gleicher Temperatur ausreichend Energie, um die Reaktion einzugehen → schnellerer Umsatz.	
1	Heterogene Katalyse: $SO_2$ und $O_2$ adsorbieren an der $V_2O_5$ -Oberfläche; dort reagieren sie ab und desorbieren als $SO_3$ .	<i>Heterogene Kat.</i>

### b) Gleichgewichtslage unverändert [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Katalysator beschleunigt Hin- und Rückreaktion in gleichem Maße.	<i>Schlüsselaussage</i>
1	Das Verhältnis der Geschwindigkeitskonstanten $k_H/k_R$ bleibt unverändert → $K_p$ wird nicht beeinflusst.	
1	Das Gleichgewicht wird schneller erreicht (kürzere Einstellzeit), aber die Gleichgewichtskonzentrationen/-drücke bleiben dieselben.	

### c) Reaktionsgeschwindigkeit vs. Gleichgewicht [2 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Reaktionsgeschwindigkeit: kinetische Größe – beschreibt, wie schnell Hin- und Rückreaktion ablaufen; beeinflussbar durch Temperatur, Konzentration, Katalysator, Oberfläche.	
1	Gleichgewicht: thermodynamische Größe – beschreibt das Konzentrations-/Druckverhältnis im Endzustand; beeinflussbar durch Temperatur (und Druck bei Gasen), nicht durch Katalysator.	

### d) Wirtschaftliche Vorteile Katalysatoreinsatz [2 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Niedrigere Betriebstemperatur möglich → geringerer Energieverbrauch / Kostenersparnis.	<i>2 von 3 genügen</i>
1	Kürzere Reaktionszeit → höherer Durchsatz pro Zeiteinheit (mehr Produkt pro Stunde).	
0	(Bonus: Längere Gerätelebensdauer bei niedrigeren Temperaturen / geringerer Korrosion.)	<i>Bonuspunkt möglich</i>

### Allgemeine Korrekturhinweise

- ▶ Fachbegriffe müssen sinngemäß korrekt verwendet werden; exakte Formulierungen sind nicht zwingend erforderlich.
- ▶ Rechenaufgaben: Ist der Ansatz korrekt, aber ein Rechenfehler vorhanden → halbe Punktzahl für den betreffenden Rechenschritt.
- ▶ Einheiten: Fehlende oder falsche Einheit beim Endergebnis = 1 Punkt Abzug pro Teilaufgabe (max. einmal je Aufgabe).
- ▶ Le-Chatelier-Aufgaben: Für volle Punktzahl muss (1) die Störung benannt, (2) die Gegenreaktion erklärt und (3) die Richtung der Verschiebung angegeben werden.
- ▶ Tabellen-Aufgabe (1d): Sinngemäß korrekte Formulierungen in den Zellen akzeptieren; auf chemische Korrektheit achten.
- ▶ Bonuspunkte (Praxisbezug, Querverweise, Transferleistungen) können Abzüge ausgleichen, aber die Aufgabenhöchstpunktzahl nicht überschreiten.
- ▶ Vorzeichen bei Q: Negatives Q = exotherm. Fehlendes Vorzeichen = Hinweis in der Korrektur, aber kein Punktabzug, wenn der Text die exotherme Natur beschreibt.

– Ende des Erwartungshorizonts –

Klausur & Erwartungshorizont – Kontaktverfahren | Chemie Sekundarstufe II