

Klausur Chemie

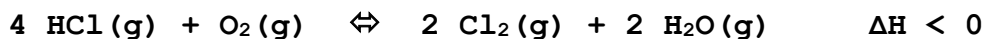
Chemisches Gleichgewicht – MWG – Le Chatelier – Kinetik
Schwerpunktthema: Der Deacon-Prozess (Chlorsynthese)

Hintergrundtext: Der Deacon-Prozess

Der Deacon-Prozess ist ein industrielles Verfahren zur Herstellung von Chlor (Cl_2) aus Chlorwasserstoff (HCl) durch Oxidation mit Sauerstoff. Das Verfahren wurde 1868 von Henry Deacon entwickelt und hat in der modernen Chemieindustrie nach wie vor mittlere industrielle Bedeutung, insbesondere dort, wo HCl als Abfallprodukt anderer Prozesse anfällt (z. B. bei der Chlorierung von Kohlenwasserstoffen).

Chlor zählt zu den wichtigsten Grundchemikalien der chemischen Industrie. Es wird für die Herstellung von PVC, Lösemitteln, Desinfektionsmitteln, Pflanzenschutzmitteln und Arzneimitteln benötigt. Die weltweite Chlorproduktion beträgt über 70 Millionen Tonnen pro Jahr.

Die Gleichgewichtsreaktion des Deacon-Prozesses lautet:



Die Reaktion ist exotherm. Als Katalysator wird Kupfer(II)-chlorid (CuCl_2) eingesetzt, das auf einem Träger (z. B. Al_2O_3) aufgebracht ist. Da die Reaktion bei höheren Temperaturen zwar schneller, aber mit geringerer Ausbeute abläuft, arbeitet man in der Industrie typischerweise bei Temperaturen zwischen 400 °C und 450 °C – ein Kompromiss zwischen Kinetik und Thermodynamik.

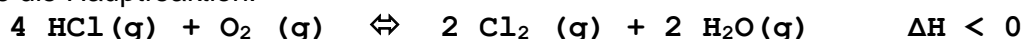
Der entscheidende Vorteil des Verfahrens liegt darin, dass es HCl – ein häufiges Nebenprodukt chlororganischer Synthesen – in den wertvollen Rohstoff Cl_2 zurückverwandelt (Chlor-Recycling). Damit leistet der Deacon-Prozess einen Beitrag zur Ressourceneffizienz und zur Kreislaufwirtschaft in der chemischen Industrie.

Gegebene Standardbildungsenthalpien

Stoff	ΔH_f° (kJ/mol)	
HCl(g)	-92,3	
Cl_2 (g)	0	Element im Standardzustand
H_2O (g)	-241,8	
O_2 (g)	0	Element im Standardzustand

Aufgabe 1: Prinzip von Le Chatelier (15 Punkte)

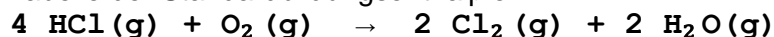
Betrachten Sie die Hauptreaktion:



- Erklären Sie mithilfe des Prinzips von Le Chatelier, wie eine Temperaturerhöhung das Gleichgewicht beeinflusst. Begründen Sie mit dem Vorzeichen von ΔH . [4 P]
- Analysieren Sie den Einfluss einer Druckerhöhung. Zählen Sie dazu die Mol Gasteilchen auf beiden Seiten aus und geben Sie die Richtung der Gleichgewichtsverschiebung an. [4 P]
- Warum arbeitet man in der Industrie trotz der exothermen Reaktion bei ~400–450 °C und nicht bei niedrigeren Temperaturen? [4 P]
- Das entstandene Cl_2 wird laufend aus dem Reaktionsgemisch entfernt. Erklären Sie die Auswirkung auf das Gleichgewicht. [3 P]

Aufgabe 2: Berechnung der Reaktionsenthalpie (10 Punkte)

Benutzen Sie die obige Tabelle der Standardbildungsenthalpien.



- Stellen Sie die allgemeine Formel zur Berechnung von ΔH_r° auf (Hess'scher Satz). [3 P]
- Berechnen Sie ΔH_r° in kJ/mol. Zeigen Sie den vollständigen Lösungsweg. [5 P]
- Formulieren Sie, ob die Reaktion exotherm oder endotherm ist, und nennen Sie eine technische Konsequenz daraus. [2 P]

Aufgabe 3: Wärmeberechnung (10 Punkte)

In einer Industrieanlage werden 365 g HCl vollständig umgesetzt. $M(\text{HCl}) = 36,5 \text{ g/mol}$.

- Berechnen Sie die Stoffmenge $n(\text{HCl})$. [3 P]
- Berechnen Sie die frei werdende Wärmeenergie Q in kJ. Achten Sie auf das Vorzeichen. [4 P]
- Welche technische Maßnahme ist aufgrund der Wärmeentwicklung im Prozess erforderlich? [3 P]

Aufgabe 4: Massenwirkungsgesetz und K_p (15 Punkte)

Im Gleichgewicht wurden folgende Partialdrücke gemessen:

Stoff	Partialdruck
HCl(g)	0,80 bar
O ₂ (g)	0,40 bar
Cl ₂ (g)	1,20 bar
H ₂ O(g)	1,20 bar

- Stellen Sie den Ausdruck für K_p auf. Beachten Sie Stöchiometrie und Konvention (Produkte/Edukte). [4 P]
- Berechnen Sie den Zahlenwert von K_p . Zeigen Sie alle Zwischenschritte. [5 P]
- Bestimmen Sie die Einheit von K_p rechnerisch. [3 P]
- Interpretieren Sie den K_p -Wert: Was sagt er über die Gleichgewichtslage aus? [3 P]

Aufgabe 5: Katalysator und Reaktionskinetik (10 Punkte)

Im Deacon-Prozess wird CuCl_2 (auf Al_2O_3) als Katalysator eingesetzt.

- Erläutern Sie die Funktion des Katalysators in Bezug auf die Aktivierungsenergie E_a . [3 P]
- Warum verändert der Katalysator die Lage des chemischen Gleichgewichts nicht? [3 P]
- Erklären Sie den Unterschied zwischen Reaktionsgeschwindigkeit und chemischem GG [2 P]
- Nennen Sie zwei wirtschaftliche Vorteile des Katalysatoreinsatzes in der Industrie. [2 P]

– Ende der Klausur –
Viel Erfolg!

Erwartungshorizont & Musterlösung

Klausur Chemie – Der Deacon-Prozess (Chlorsynthese)

⚠ Nur für Lehrkräfte – nicht an Schülerinnen und Schüler ausgeben

Erwartungshorizont Aufgabe 1: Prinzip von Le Chatelier [Gesamt: 15 P]

a) Temperaturerhöhung [4 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Die Reaktion ist exotherm ($\Delta H < 0$) → Wärme zählt als Produkt.	<i>Vorzeichen nennen</i>
1	Le Chatelier: System reagiert entgegen der Störung → exotherme Richtung wird bei Erwärmung gehemmt.	
1	→ Gleichgewicht verschiebt sich nach links (Rückreaktion), Ausbeute an Cl_2 sinkt.	<i>Richtung benennen</i>
1	Niedrige Temperaturen sind thermodynamisch günstiger für die Produktbildung.	

b) Druckerhöhung [4 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Links: 4 mol HCl + 1 mol O_2 = 5 mol Gasteilchen.	<i>Zählung korrekt</i>
1	Rechts: 2 mol Cl_2 + 2 mol H_2O = 4 mol Gasteilchen.	
1	Druckerhöhung → Gleichgewicht verschiebt sich zur Seite mit weniger Mol → nach rechts (Produktseite).	
1	→ Druckerhöhung ist vorteilhaft für die Cl_2 -Ausbeute.	<i>Praxisbezug</i>

c) Kompromisstemperatur ~400–450 °C [4 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Bei niedrigen Temperaturen läuft die Reaktion zu langsam ab (geringe Reaktionsgeschwindigkeit).	
1	Höhere Temperaturen erhöhen die Reaktionsgeschwindigkeit (mehr Moleküle mit Ea).	
1	Kompromiss: ausreichend schnelle Reaktion bei noch akzeptabler Gleichgewichtslage.	
1	Katalysatoraktivität (CuCl_2) ist ebenfalls temperaturabhängig und optimal in diesem Bereich.	<i>fakultativ</i>

d) Entnahme von Cl_2 [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Entfernen von Cl_2 = Senkung der Produktkonzentration.	
1	Le Chatelier: System reagiert mit Bildung von mehr Produkt → Gleichgewicht verschiebt sich nach rechts.	
1	Ausbeute steigt; Verfahren wird durch kontinuierliche Produktentnahme effizienter.	

Erwartungshorizont Aufgabe 2: Berechnung der Reaktionsenthalpie [Gesamt: 10 P]

a) Formel (Hess'scher Satz) [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	$\Delta H_r^\circ = \sum \Delta H_f^\circ(\text{Produkte}) - \sum \Delta H_f^\circ(\text{Edukte})$	
1	Korrekte Zuordnung: Produkte = Cl ₂ , H ₂ O; Edukte = HCl, O ₂	
1	Stöchiometrische Koeffizienten werden multipliziert (×2 für H ₂ O, ×4 für HCl).	<i>Koeff. wichtig</i>

b) Berechnung [5 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Produkte: $2 \times 0 (\text{Cl}_2) + 2 \times (-241,8) = -483,6 \text{ kJ}$	<i>Cl₂ = 0 beachten</i>
1	Edukte: $4 \times (-92,3) + 1 \times 0 (\text{O}_2) = -369,2 \text{ kJ}$	<i>O₂ = 0 beachten</i>
2	$\Delta H_r^\circ = -483,6 - (-369,2) = -114,4 \text{ kJ/mol}$	<i>±5 kJ Toleranz</i>
1	Einheit kJ/mol korrekt angegeben.	

c) Interpretation [2 P]

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

Erwartungshorizont Aufgabe 3: Wärmeberechnung [Gesamt: 10 P]

a) Stoffmenge n(HCl) [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Formel: $n = m / M$	
1	$n = 365 \text{ g} / 36,5 \text{ g/mol} = 10 \text{ mol HCl}$	
1	Einheit mol korrekt.	

b) Wärmeenergie Q [4 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	$\Delta H_r^\circ = -114,4 \text{ kJ}$ bezieht sich auf 4 mol HCl $\rightarrow \Delta H$ pro mol HCl = $-28,6 \text{ kJ/mol}$	<i>Bezug auf 4 mol!</i>
1	$Q = n \times \Delta H \text{ pro mol} = 10 \text{ mol} \times (-28,6 \text{ kJ/mol})$	
1	$Q = -286 \text{ kJ}$	<i>±5 kJ Toleranz</i>
1	Negatives Vorzeichen: Wärme wird abgegeben (exotherm).	<i>Vorzeichen nennen</i>

c) Technische Maßnahme [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Aktive Kühlung der Reaktionskammer notwendig.	
1	Wärmetauscher: frei werdende Wärme kann z. B. zur Dampferzeugung genutzt werden.	
1	Ohne Kühlung steigt die Temperatur \rightarrow Gleichgewicht verschiebt sich nach links \rightarrow Ausbeuteverlust.	<i>Gleichgewichtsbezug</i>

Erwartungshorizont Aufgabe 4: Massenwirkungsgesetz und Kp [Gesamt: 15 P]

a) Kp-Ausdruck [4 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	$K_p = [p(\text{Cl}_2)^2 \times p(\text{H}_2\text{O})^2] / [p(\text{HCl})^4 \times p(\text{O}_2)^1]$	Formel vollständig
1	Produkte im Zähler, Edukte im Nenner.	
1	Exponenten entsprechen Stöchiometrikoeffizienten: 2, 2, 4, 1.	
1	Partialdrücke (Kp), nicht Konzentrationen (Kc).	

b) Berechnung Kp [5 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Zähler: $(1,20)^2 \times (1,20)^2 = 1,44 \times 1,44 = 2,074$	Zwischenrechnung
1	Nenner: $(0,80)^4 \times (0,40) = 0,4096 \times 0,40 = 0,1638$	
2	$K_p = 2,074 / 0,1638 \approx 12,65$	$\pm 0,5$ Toleranz
1	Rechenweg nachvollziehbar dargestellt.	

c) Einheit von Kp [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Zähler: $\text{bar}^2 \times \text{bar}^2 = \text{bar}^4$	
1	Nenner: $\text{bar}^4 \times \text{bar}^1 = \text{bar}^5$	
1	Einheit: $\text{bar}^4 / \text{bar}^5 = \text{bar}^{-1} \rightarrow$ Einheit: bar^{-1} (oder Pa^{-1})	

d) Interpretation $K_p \approx 12,65$ [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	$K_p > 1$: Gleichgewicht liegt auf der Produktseite.	
1	Im Gleichgewicht sind mehr Produkte (Cl_2 , H_2O) als Edukte (HCl , O_2) vorhanden.	
1	Für die Industrie günstig: akzeptable Ausbeute unter den gewählten Bedingungen.	Praxisbezug

Erwartungshorizont Aufgabe 5: Katalysator und Reaktionskinetik [Gesamt: 10 P]

a) Funktion CuCl_2 -Katalysator [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Katalysator senkt die Aktivierungsenergie E_a der Reaktion.	
1	Mehr Moleküle haben bei gleicher Temperatur genug Energie \rightarrow Reaktion läuft schneller ab.	
1	CuCl_2 auf Al_2O_3 : heterogene Katalyse; HCl und O_2 adsorbieren an der Oberfläche.	

b) Gleichgewichtslage bleibt unverändert [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Katalysator beschleunigt Hin- und Rückreaktion gleichermaßen.	Schlüsselaussage
1	Verhältnis der Geschwindigkeitskonstanten k_H/k_R bleibt gleich $\rightarrow K_p$ unverändert.	

1	Gleichgewicht wird schneller erreicht, aber Konzentrationsverhältnisse bleiben dieselben.	
---	---	--

c) Reaktionsgeschwindigkeit vs. Gleichgewicht [2 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Reaktionsgeschwindigkeit: kinetische Größe – wie schnell laufen Hin-/Rückreaktion ab.	
1	Gleichgewicht: thermodynamische Größe – Verhältnis der Konzentrationen im Endzustand; unabhängig vom Weg.	

d) Wirtschaftliche Vorteile [2 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Niedrigere Temperaturen möglich → Energieeinsparung / geringere Betriebskosten.	2 aus 3 genügen
1	Kürzere Reaktionszeit → höherer Durchsatz / mehr Produkt pro Zeiteinheit.	
0	(Alternativ: Katalysator verringert Maschinenverschleiß / Materialbeanspruchung)	Bonuspunkt möglich

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 Rechenschritt.
- ▶ Einheiten: Fehlende/falsche Einheit beim Endergebnis = 1 Punkt Abzug pro Teilaufgabe (max. einmal je Aufgabe).
- ▶ Le-Chatelier-Aufgaben: Für volle Punktzahl muss (1) Störung benannt, (2) Gegenreaktion erklärt und (3) Richtung angegeben werden.
- ▶ Bonuspunkte (z. B. Praxisbezug, Querverweise) können Abzüge ausgleichen, aber Aufgabenhöchstpunktzahl nicht überschreiten.

– Ende des Erwartungshorizonts –