

Name: _____ Klasse: _____ Datum: _____

KLAUSUR CHEMIE

Chemisches Gleichgewicht • MWG • Le Chatelier • Kinetik • Thermodynamik

Schwerpunktthema: Das Steam-Reforming (Industrielle Wasserstoffherstellung)

Punkteübersicht

Aufgabe	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5	A 6
Max. Punkte	16	12	15	12	10	10
Erreichte Punkte						
Gesamt: 75 P	Note:					

Bearbeitungszeit: 90 Minuten | Hilfsmittel: Taschenrechner, Formelsammlung | Punktzahl: 75 P

Hintergrundtext: Das Steam-Reforming

Das Steam-Reforming (Dampfreformierung) ist das weltweit bedeutendste industrielle Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff (H_2). Über 95 % des global produzierten Wasserstoffs entstehen über diesen Prozess. Wasserstoff ist ein zentraler Rohstoff der chemischen Industrie und wird unter anderem für die Ammoniaksynthese (Haber-Bosch-Verfahren), die Methanolproduktion, Hydrierungsreaktionen in Raffinerien sowie zunehmend für Brennstoffzellen und die Energiewende eingesetzt.

Die zentrale Reaktion des Steam-Reforming lautet:



Die Reaktion ist stark endotherm; es muss kontinuierlich Wärme zugeführt werden. Aus diesem Grund arbeitet man industriell bei sehr hohen Temperaturen zwischen 700 °C und 1000 °C. Nach dem Prinzip von Le Chatelier begünstigen hohe Temperaturen bei endothermen Reaktionen die Produktbildung.

Hinsichtlich des Druckes gilt: Auf der Eduktseite befinden sich zwei Mol Gasteilchen (1 mol CH_4 + 1 mol H_2O), auf der Produktseite hingegen vier Mol Gasteilchen (1 mol CO + 3 mol H_2). Eine Druckerniedrigung würde das Gleichgewicht auf die Produktseite verschieben. In der industriellen Praxis arbeitet man dennoch bei moderat erhöhten Drücken (15–30 bar), da der erzeugte Wasserstoff anschließend ohnehin für Hochdruckprozesse (z. B. Ammoniaksynthese bei 200 bar) benötigt wird und eine spätere Verdichtung energetisch teurer wäre.

Zur Beschleunigung der Reaktion wird ein Nickel-Katalysator auf Aluminiumoxid-Träger (Ni/Al_2O_3) eingesetzt. Der Katalysator senkt die Aktivierungsenergie E_a ; die Lage des chemischen Gleichgewichts wird durch den Katalysator nicht verändert.

Das entstehende Kohlenstoffmonoxid CO wird anschließend in einem zweiten Reaktor durch die Wassergas-Shift-Reaktion weiter umgesetzt: $CO(g) + H_2O(g) \rightleftharpoons CO_2(g) + H_2(g)$. Dadurch wird die Wasserstoffausbeute zusätzlich erhöht und das toxische CO weitgehend entfernt.

Gegebene Standardbildungsenthalpien (zur Verwendung in Aufgabe 2)

Stoff	Formel	ΔH_f° (kJ/mol)	Hinweis
Methan	CH ₄ (g)	-75	
Wasser (gasförmig)	H ₂ O(g)	-242	Dampf!
Kohlenstoffmonoxid	CO(g)	-111	
Wasserstoff	H ₂ (g)	0	Element im Standardzustand

Aufgabe 1: Prinzip von Le Chatelier und Gleichgewichtsverschiebung [16P]

Betrachten Sie die zentrale Reaktion des Steam-Reforming:



- a) Erklären Sie mithilfe des Prinzips von Le Chatelier, warum eine Druckerniedrigung die Bildung von H₂ begünstigt. Zählen Sie hierzu die Mol Gasteilchen auf beiden Seiten der Gleichung aus und benennen Sie die Richtung der Verschiebung. [4 P]
- b) Begründen Sie, warum hohe Temperaturen die H₂-Ausbeute thermodynamisch begünstigen. Beziehen Sie sich auf das Vorzeichen von ΔH° . [3 P]
- c) Im technischen Prozess wird CO im nachgeschalteten Wassergas-Shift-Reaktor weiter umgesetzt und damit kontinuierlich aus dem Reaktionsgemisch entfernt. Erklären Sie, wie sich die Entfernung von CO auf das Gleichgewicht der Steam-Reforming-Reaktion auswirkt. Benennen Sie die Richtung der Verschiebung und beschreiben Sie die Konsequenz für die H₂-Ausbeute. [3 P]
- d) Vervollständigen Sie die folgende Tabelle zur Wirkung verschiedener Bedingungsänderungen auf das Gleichgewicht (Richtung der Verschiebung und kurze Begründung). [6 P]

Bedingungsänderung	Verschiebung (← / →)	Kurze Begründung
Temperatur erhöhen		
Druck erhöhen		
p(H ₂ O) erhöhen (Dampfüberschuss)		
p(CO) verringern (Entfernen)		
Katalysator (Nickel) zugeben		
p(H ₂) erhöhen (Rückführung)		

Aufgabe 2: Stoffmengen, Volumen und Energiebilanz [12 Punkte]

In einer Pilotanlage werden 100 mol Methan CH_4 vollständig nach der Steam-Reforming-Gleichung umgesetzt. Für die Reaktion gilt $\Delta H_r^\circ = +206 \text{ kJ/mol}$ (bezogen auf 1 mol CH_4).

Gegeben: Molvolumen $V_m = 22,4 \text{ L/mol}$ (Normbedingungen).

- Berechnen Sie die theoretisch entstehenden Stoffmengen $n(\text{H}_2)$ und $n(\text{CO})$. Begründen Sie das Verhältnis aus der Stöchiometrie der Reaktionsgleichung. [3 P]
- Berechnen Sie das Volumen des entstehenden Wasserstoffs $V(\text{H}_2)$ bei Normbedingungen und nennen Sie die Voraussetzung für die Anwendung des Molvolumens V_m . [3 P]
- Berechnen Sie die Wärmeenergie Q , die für den vollständigen Umsatz von 100 mol CH_4 zugeführt werden muss. Achten Sie auf das Vorzeichen und interpretieren Sie es physikalisch. [3 P]
- In der Industrie wird die benötigte Reaktionswärme häufig durch teilweise Verbrennung von Methan selbst erzeugt. Beschreiben Sie eine technische Konsequenz, die sich aus der stark endothermen Natur der Reaktion für den Anlagenbau und die Betriebskosten ergibt. [3 P]

Aufgabe 3: Massenwirkungsgesetz und Berechnung von K_p [15 Punkte]

In einem Steam-Reforming-Reaktor wurden bei $900 \text{ }^\circ\text{C}$ im Gleichgewicht folgende Partialdrücke gemessen:

Stoff	Formel	Partialdruck (bar)
Methan	CH_4	0,80
Wasser (Dampf)	H_2O	1,50
Kohlenstoffmonoxid	CO	4,00
Wasserstoff	H_2	6,00

- Stellen Sie den vollständigen Ausdruck für die Gleichgewichtskonstante K_p auf. Achten Sie auf die korrekte Konvention (Produkte/Edukte) und die stöchiometrischen Exponenten. [3 P]
- Berechnen Sie den Zahlenwert von K_p . Zeigen Sie alle Zwischenschritte (Zähler, Nenner, Division). [5P]
- Bestimmen Sie die Einheit von K_p rechnerisch, indem Sie die Einheiten von Zähler und Nenner explizit ausschreiben und kürzen. Geben Sie die Einheit in der Form bar^n an. [3 P]
- Erläutern Sie den prinzipiellen Unterschied zwischen K_p und K_c . Geben Sie an, mit welcher Größe K_p und mit welcher Größe K_c formuliert wird, und nennen Sie eine Reaktionssituation, in der beide Konstanten denselben Zahlenwert besitzen würden. [2 P]
- Interpretieren Sie den berechneten K_p -Wert: Welche Seite des Gleichgewichts ist begünstigt? Ist der Wert für eine technische Anwendung günstig oder ungünstig? [2 P]

Aufgabe 4: Anwendung des MWG – Rückrechnung und CO-Entfernung [12P]

Für die Steam-Reforming-Reaktion gilt bei 900 °C: $K_p = 2,5 \cdot 10^2$ (in passender Einheit). In einem Reaktor liegen folgende Gleichgewichts-Partialdrücke vor:

Stoff	Partialdruck (bar)
CH ₄	1,2
H ₂ O	2,0
CO	3,0
H ₂	? (gesucht)

- Lösen Sie den MWG-Ausdruck nach $p(\text{H}_2)$ auf. Geben Sie die umgestellte Formel explizit an. [3 P]
- Berechnen Sie den Gleichgewichtsdruck $p(\text{H}_2)$. Zeigen Sie alle Zwischenschritte (Einsetzen, Wurzelziehen, Endergebnis). [4 P]
- Im realen Prozess wird CO durch den nachgeschalteten Shift-Reaktor kontinuierlich aus dem Steam-Reforming-Reaktor entfernt, sodass $p(\text{CO})$ absinkt. Erklären Sie qualitativ (ohne Neuberechnung), wie sich $p(\text{H}_2)$ im neuen Gleichgewicht verändert. Begründen Sie mit dem MWG-Ausdruck und Le Chatelier. [3 P]
- Geben Sie die Einheit des in Teilaufgabe (b) berechneten $p(\text{H}_2)$ an und überprüfen Sie die Einheit von K_p durch eine Dimensionsanalyse: $\text{bar}^{(?)}$ muss passen. [2 P]

Aufgabe 5: Katalysator, Kinetik und Thermodynamik [10 Punkte]

Beim Steam-Reforming wird ein Nickel-Katalysator auf Al₂O₃-Träger eingesetzt (Ni/Al₂O₃).

- Erläutern Sie die Funktion des Nickel-Katalysators in Bezug auf die Aktivierungsenergie E_a und beschreiben Sie die heterogene Katalyse auf molekularer Ebene. [3 P]
- Begründen Sie, warum der Katalysator den Wert von K_p nicht verändert. Nutzen Sie dabei die Begriffe Hin- und Rückreaktion sowie die Geschwindigkeitskonstanten k_H und k_R . [3 P]
- Vergleichen Sie die kinetische Größe „Reaktionsgeschwindigkeit“ mit der thermodynamischen Größe „chemisches Gleichgewicht“, indem Sie die folgende Tabelle vervollständigen. [4 P]

Vergleichsmerkmal	Reaktionsgeschwindigkeit	Chemisches Gleichgewicht
Beschreibt ...		
Beeinflusst durch Temperatur?		
Beeinflusst durch Katalysator?		
Zugeordnetes Teilgebiet		

Aufgabe 6: Industrielle Bedingungen und wirtschaftliche Bewertung [10P]

a) Nennen Sie drei industrielle Anwendungen von Wasserstoff und ordnen Sie jeweils eine kurze Begründung zu, warum Wasserstoff dort benötigt wird. [3 P]

Anwendung	Begründung / Funktion des H ₂
1.	
2.	
3.	

b) Erläutern Sie, warum man trotz thermodynamisch günstiger Druckerniedrigung in der Industrie bei moderat erhöhten Drücken (15–30 bar) arbeitet. Nennen Sie zwei Argumente. [3 P]

c) Nennen Sie zwei Nachteile sehr hoher Reaktionstemperaturen (> 1000 °C) bezüglich Material, Sicherheit oder Wirtschaftlichkeit. [2 P]

d) Beurteilen Sie kurz: Warum ist die nachgeschaltete Wassergas-Shift-Reaktion $\text{CO}(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightleftharpoons \text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$ sowohl chemisch als auch ökonomisch sinnvoll? [2 P]

– Ende der Klausur –
Viel Erfolg!

ERWARTUNGSHORIZONT & MUSTERLÖSUNG

Klausur Chemie – Das Steam-Reforming (Wasserstoffherstellung)

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

Erwartungshorizont Aufgabe 1: Le Chatelier und Gleichgewicht

a) Druckerniedrigung [4 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Edukte: 1 mol CH ₄ + 1 mol H ₂ O = 2 mol Gasteilchen; Produkte: 1 mol CO + 3 mol H ₂ = 4 mol Gasteilchen.	Zählung korrekt
1	Druckerniedrigung → System reagiert gemäß Le Chatelier entgegen der Störung; es wird mehr Volumen „verbraucht“ → Verschiebung zur Seite mit mehr Gasteilchen.	
1	→ Gleichgewicht verschiebt sich nach rechts (Produktseite, 4 mol).	Richtung benennen
1	→ H ₂ -Ausbeute steigt; Praxisbezug: technisch wird dennoch moderat erhöhter Druck verwendet (Folgeprozesse benötigen Hochdruck).	Praxisbezug

b) Temperaturerhöhung (endotherm) [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Die Reaktion ist endotherm ($\Delta H^\circ > 0$; $\Delta H^\circ = +206 \text{ kJ/mol}$) → Wärme kann als „Edukt“ betrachtet werden.	Vorzeichen nennen
1	Le Chatelier: Bei Temperaturerhöhung wird die endotherme Richtung (Hinreaktion) begünstigt → Gleichgewicht verschiebt sich nach rechts.	
1	→ Höhere H ₂ -Ausbeute; K _p steigt mit steigender Temperatur.	

c) Entfernung von CO durch Shift-Reaktor [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Durch Entfernen von CO sinkt p(CO) → Störung des Gleichgewichts auf der Produktseite.	Störung benennen
1	Le Chatelier: System reagiert entgegen der Störung → Hinreaktion wird begünstigt, um CO nachzubilden → Verschiebung nach rechts.	Richtung
1	→ H ₂ -Ausbeute steigt; gleichzeitig wird mehr CH ₄ /H ₂ O umgesetzt → Prinzip der gekoppelten Reaktoren (Steam-Reforming + Shift) wirtschaftlich vorteilhaft.	Praxisbezug

d) Tabelle Bedingungsänderungen [6 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Temperatur erhöhen → nach rechts (→); endotherme Hinreaktion wird begünstigt.	
1	Druck erhöhen → nach links (←); System weicht zur Seite mit weniger Gasteilchen (2 mol) aus.	
1	p(H ₂ O) erhöhen → nach rechts (→); Edukt-Erhöhung verschiebt zu Produkten (Dampfüberschuss in Praxis genutzt).	Praxisbezug Bonus
1	p(CO) verringern (Entfernen) → nach rechts (→); System bildet entferntes Produkt nach.	

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Katalysator → keine Verschiebung (\pm); Gleichgewicht wird nur schneller erreicht, K_p unverändert.	<i>Wichtig: keine Verschiebung!</i>
1	$p(\text{H}_2)$ erhöhen (Rückführung) → nach links (\leftarrow); Produktdruck zwingt Rückreaktion.	

Erwartungshorizont Aufgabe 2: Stoffmengen, Volumen und Energiebilanz

a) Stoffmengen $n(\text{H}_2)$ und $n(\text{CO})$ [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Stöchiometrie: 1 mol CH_4 liefert 3 mol H_2 und 1 mol CO (Verhältnis 1 : 3 : 1).	
1	$n(\text{H}_2) = 3 \cdot n(\text{CH}_4) = 3 \cdot 100 \text{ mol} = 300 \text{ mol H}_2$.	
1	$n(\text{CO}) = 1 \cdot n(\text{CH}_4) = 100 \text{ mol CO}$.	

b) Volumen $V(\text{H}_2)$ bei Normbedingungen [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Formel: $V = n \cdot V_m$	
1	$V(\text{H}_2) = 300 \text{ mol} \cdot 22,4 \text{ L/mol} = 6720 \text{ L} = 6,72 \text{ m}^3$.	\pm Rundung
1	Voraussetzung: ideales Gasverhalten bei Normbedingungen (0 °C, 1013 hPa).	Voraussetzung nennen

c) Wärmeenergie Q [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	$\Delta H_r^\circ = +206 \text{ kJ/mol}$ bezogen auf 1 mol CH_4 (laut Angabe).	Bezug beachten
1	$Q = n(\text{CH}_4) \cdot \Delta H_r^\circ = 100 \text{ mol} \cdot 206 \text{ kJ/mol} = +20\,600 \text{ kJ}$.	
1	Positives Vorzeichen → endotherm; Wärme muss dem System zugeführt werden (von außen!).	Vorzeichen erklären

d) Technische Konsequenz [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Kontinuierliche Wärmezufuhr nötig → Reformier-Öfen mit Brennern, Wärmetauschern; hohe Investitionskosten.	Anlagenbau
1	Hoher Energieverbrauch / Brennstoffkosten (oft 25–30 % des Methaneinsatzes wird verbrannt, um Reaktionswärme zu liefern).	Betriebskosten
1	Materialbelastung: hitzebeständige Legierungen (z. B. HK40, HP-Stähle) für Reformier-Rohre nötig; CO_2 -Emissionen aus der Verbrennung als ökologischer Nachteil.	Material / Ökologie

Erwartungshorizont Aufgabe 3: MWG und Berechnung von K_p

a) K_p -Ausdruck [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	$K_p = \frac{p(\text{CO}) \cdot p(\text{H}_2)^3}{[p(\text{CH}_4) \cdot p(\text{H}_2\text{O})]}$	Formel vollständig
1	Produkte im Zähler (CO , H_2), Edukte im Nenner (CH_4 , H_2O).	

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Exponenten entsprechen Stöchiometrikoeffizienten: 1, 3, 1, 1. K _p verwendet Partialdrücke (nicht Konzentrationen).	<i>kein K_c</i>

b) Berechnung K_p [5 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Zähler: $p(\text{CO}) \cdot p(\text{H}_2)^3 = 4,00 \cdot (6,00)^3 = 4,00 \cdot 216 = 864 \text{ bar}^4$	
1	Nenner: $p(\text{CH}_4) \cdot p(\text{H}_2\text{O}) = 0,80 \cdot 1,50 = 1,20 \text{ bar}^2$	
2	$K_p = 864 / 1,20 = 720$	$\pm 5 \text{ Toleranz}$
1	Mit Einheit: $K_p \approx 720 \text{ bar}^2$ (siehe c).	

c) Einheit von K_p [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Zähler: $\text{bar}^1 \cdot \text{bar}^3 = \text{bar}^4$	
1	Nenner: $\text{bar}^1 \cdot \text{bar}^1 = \text{bar}^2$	
1	Einheit: $\text{bar}^4 / \text{bar}^2 = \text{bar}^2$ (also Form bar^n mit $n = +2$).	

d) Unterschied K_p und K_c [2 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	K _p wird mit Partialdrücken (bar) formuliert, K _c mit Stoffmengenkonzentrationen (mol/L). Beide beschreiben dieselbe Gleichgewichtslage, sind aber unterschiedliche Größen mit unterschiedlichen Einheiten.	<i>klare Abgrenzung</i>
1	Beide Konstanten besitzen denselben Zahlenwert, wenn die Summe der stöchiometrischen Koeffizienten auf beiden Seiten gleich ist ($\Delta n = 0$), d. h. wenn sich die Mol Gasteilchen nicht ändern.	<i>z. B. $\text{H}_2 + \text{I}_2 \rightleftharpoons 2 \text{HI}$</i>

e) Interpretation K_p ≈ 720 bar² [2 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	$K_p \gg 1 \rightarrow$ Gleichgewicht liegt deutlich auf der Produktseite (CO, H ₂ überwiegen).	
1	Technisch günstig: hohe H ₂ -Ausbeute bei 900 °C; die gewählten Bedingungen sind wirtschaftlich gerechtfertigt.	<i>Praxisbezug</i>

Erwartungshorizont Aufgabe 4: Rückrechnung und CO-Entfernung

a) Umstellen nach p(H₂) [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Ausgangsgleichung: $K_p = [p(\text{CO}) \cdot p(\text{H}_2)^3] / [p(\text{CH}_4) \cdot p(\text{H}_2\text{O})]$	
1	Umstellen nach p(H ₂) ³ : $p(\text{H}_2)^3 = [K_p \cdot p(\text{CH}_4) \cdot p(\text{H}_2\text{O})] / p(\text{CO})$	
1	Dritte Wurzel ziehen: $p(\text{H}_2) = \sqrt[3]{ [K_p \cdot p(\text{CH}_4) \cdot p(\text{H}_2\text{O})] / p(\text{CO}) }$	<i>Formel explizit</i>

b) Berechnung p(H₂) [4 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Zähler: $K_p \cdot p(\text{CH}_4) \cdot p(\text{H}_2\text{O}) = 250 \cdot 1,2 \cdot 2,0 = 600$ (Einheit $\text{bar}^2 \cdot \text{bar}^2 = \text{bar}^4$)	$K_p = 2,5 \cdot 10^2 = 250$
1	Division durch $p(\text{CO})$: $600 / 3,0 = 200 \text{ bar}^3$	
1	$p(\text{H}_2) = \sqrt[3]{200} \approx 5,85 \text{ bar}$	$\pm 0,1$ Toleranz
1	Rechenweg vollständig und nachvollziehbar; Einheit bar korrekt.	

c) Wirkung der CO-Entfernung [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Wenn $p(\text{CO})$ sinkt, wird der Zähler kleiner, der Reaktionsquotient $Q_p: p(\text{CO}) \cdot p(\text{H}_2)^3 / [p(\text{CH}_4) \cdot p(\text{H}_2\text{O})]$ wird kleiner als K_p , daher verschiebt sich das Gleichgewicht nach rechts und $p(\text{H}_2)$ steigt. \rightarrow System ist nicht mehr im Gleichgewicht.	MWG-Argument
1	Le Chatelier: System reagiert entgegen der Störung \rightarrow Hinreaktion bevorzugt $\rightarrow p(\text{H}_2)$ steigt (und $p(\text{CO})$ wird teilweise nachgebildet, $p(\text{CH}_4)$ und $p(\text{H}_2\text{O})$ sinken).	Richtung
1	Konsequenz: Im neuen Gleichgewicht ist $p(\text{H}_2)$ höher als zuvor \rightarrow das ist das technische Prinzip des nachgeschalteten Shift-Reaktors zur Ausbeutesteigerung.	Praxisbezug

d) Dimensionsanalyse [2 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	$p(\text{H}_2)$ hat Einheit bar (Druck einer einzelnen Komponente).	
1	Konsistenzprüfung: $p(\text{H}_2)^3$ in bar^3 , Zähler insgesamt bar^4 (mit $p(\text{CO})$ in bar); Nenner bar^2 ($\text{CH}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$); $\rightarrow K_p = \text{bar}^4/\text{bar}^2 = \text{bar}^2$. Passt zum gegebenen K_p -Zahlenwert.	Dimensionsanalyse

Erwartungshorizont Aufgabe 5: Katalysator und Kinetik

a) Funktion des Nickel-Katalysators [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Nickel senkt die Aktivierungsenergie E_a der Reaktion durch einen alternativen Reaktionsmechanismus.	
1	Mehr Moleküle besitzen bei gleicher Temperatur ausreichend kinetische Energie \rightarrow höhere Reaktionsgeschwindigkeit (Maxwell-Boltzmann-Verteilung).	höhere Stufe
1	Heterogene Katalyse: CH_4 und H_2O adsorbieren an der Ni-Oberfläche; C-H- und O-H-Bindungen werden geschwächt/gespalten; die Produkte CO und H_2 desorbieren.	Adsorption

b) Gleichgewichtslage unverändert [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Der Katalysator beschleunigt Hin- und Rückreaktion in gleichem Maße.	Schlüsselaussage
1	Das Verhältnis der Geschwindigkeitskonstanten $k_H / k_R (= K_p)$ bleibt unverändert.	
1	Das Gleichgewicht wird schneller erreicht (kürzere Einstellzeit),	

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
	aber die Gleichgewichts-Partialdrücke und damit K_p bleiben dieselben.	

c) Vergleichstabelle Kinetik vs. Thermodynamik [4 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Beschreibt: Reaktionsgeschwindigkeit → wie schnell die Reaktion abläuft (Hin- und Rückreaktion). Gleichgewicht → das Konzentrations-/Druckverhältnis im Endzustand (wie weit die Reaktion verläuft).	
1	Temperatur: Geschwindigkeit → erhöht sich stark (RGT-Regel, Arrhenius). Gleichgewicht → wird verschoben (Lage von K_p ändert sich; bei endothermer Reaktion zu Produkten).	
1	Katalysator: Geschwindigkeit → erhöht sich. Gleichgewicht → wird NICHT verschoben (K_p unverändert).	<i>wichtig!</i>
1	Teilgebiet: Geschwindigkeit → Kinetik. Gleichgewicht → Thermodynamik / Chemisches Gleichgewicht.	

Erwartungshorizont Aufgabe 6: Industrielle Bedingungen

a) Drei Anwendungen von Wasserstoff [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Ammoniaksynthese (Haber-Bosch): $N_2 + 3 H_2 \rightleftharpoons 2 NH_3$ → Grundlage für Düngemittelproduktion (Welternährung).	<i>wichtigste Anwendung</i>
1	Methanolsynthese / Hydrierungsreaktionen in Raffinerien (z. B. Hydrocracken, Entschwefelung); H_2 dient zur Bindungsättigung / Schwefelentfernung.	
1	Brennstoffzellen / Energiewende: H_2 als sauberer Energieträger; bei Verbrennung mit O_2 entsteht nur H_2O . Akzeptiert auch: Margarineherstellung (Fetthärtung), Metallurgie (Reduktion).	<i>2 von vielen</i>

b) Mittlere Drücke statt Druckerniedrigung [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Wirtschaftlich: H_2 wird häufig direkt für Hochdruckfolgeprozesse (Haber-Bosch bei ~200 bar) benötigt → spätere Verdichtung wäre energetisch teurer als ein etwas ungünstigeres Gleichgewicht.	<i>Schlüssellargument</i>
1	Technisch: Höherer Durchsatz pro Reaktorvolumen, kompaktere Anlagenbauweise, geringere spezifische Investitionskosten.	
1	Kompromiss: Ausbeuteverlust durch Druck wird durch hohe Temperatur und Dampfüberschuss kompensiert; Praxisbedingung ~15–30 bar.	<i>Bonus / Praxis</i>

c) Nachteile sehr hoher Temperaturen [2 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Material: extreme Belastung von Reformier-Rohren; hochlegierte Spezialstähle nötig (HK40, HP-Stähle); Kriechen, Versprödung, kürzere Lebensdauer.	<i>Material</i>
1	Wirtschaftlich/Sicherheit: hoher Energieaufwand	<i>2 von 3</i>

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
	(Brennstoffkosten), CO ₂ -Emissionen, Sicherheitsrisiko durch heiße Hochdruckprozesse; Katalysatordeaktivierung durch Sintern.	

d) Sinnhaftigkeit der Shift-Reaktion [2 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Chemisch: CO wird zu CO ₂ umgewandelt, zusätzlich entsteht weiteres H ₂ → Gesamtausbeute an H ₂ steigt deutlich (ca. 1 mol CH ₄ → bis zu 4 mol H ₂ statt 3).	<i>Stöchiometrie</i>
1	Ökonomisch/sicherheitstechnisch: CO ist toxisch und Katalysatorgift für viele Folgeprozesse (z. B. Brennstoffzelle, Haber-Bosch) → Entfernung ist verfahrenstechnisch zwingend; CO ₂ leichter abtrennbar.	<i>Praxisbezug</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; Folgefehler werden nicht doppelt bestraft (Folgewertung).
- ▶ 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-Aufgaben (1d, 5c, 6a): Sinngemäß korrekte Formulierungen in den Zellen akzeptieren; auf chemische Korrektheit achten.
- ▶ MWG: Bei K_p-Aufgaben sind sowohl die korrekte Formel als auch korrekte Einheit für volle Punktzahl erforderlich.
- ▶ Bonuspunkte (Praxisbezug, Querverweise, Transferleistungen) können Abzüge ausgleichen, aber die Aufgabenhöchstpunktzahl nicht überschreiten.
- ▶ Vorzeichen bei Q: Positives Q = endotherm. Fehlendes Vorzeichen = Hinweis in der Korrektur, aber kein Punktabzug, wenn der Text die endotherme Natur beschreibt.

– Ende des Erwartungshorizonts –

Klausur & Erwartungshorizont – Steam-Reforming | Chemie Sekundarstufe II