

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

# KLAUSUR CHEMIE

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

## Schwerpunkthema: Die Methanolsynthese

*(CO + 2 H<sub>2</sub> ⇌ CH<sub>3</sub>OH – eines der wichtigsten Industrieverfahren der Welt)*

Aufgabe	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5	A 6	A 7
Max. Punkte	12	14	16	18	16	14	16
Erreichte Punkte							

<b>Gesamt: 106 Punkte</b>	Note: _____
---------------------------	-------------

*Bearbeitungszeit: 180 Minuten | Hilfsmittel: TR, Periodensystem, Formelsammlung | Punktzahl: 106 P*

### Hintergrundtext: Die Methanolsynthese

Die Methanolsynthese gehört zu den bedeutendsten chemischen Industrieverfahren der Welt. Die weltweite Jahresproduktion liegt aktuell bei über 100 Millionen Tonnen. Methanol (CH<sub>3</sub>OH, auch Methylalkohol genannt) ist ein farbloser, flüssiger Stoff mit einem Siedepunkt von 65 °C und einer Dichte von 0,79 g/cm<sup>3</sup>. Es ist hochgiftig (bereits 30 mL können tödlich wirken oder zur Erblindung führen) und brennt mit einer fast unsichtbaren Flamme – beides Gründe, warum der Umgang in der Industrie höchste Sicherheitsstandards erfordert.

Methanol ist eine zentrale Grundchemikalie: Es dient als Ausgangsstoff für die Produktion von Formaldehyd (für Kunststoffe wie Bakelit und Melaminharze), Essigsäure, Methyl-tert-Butylether (MTBE, Kraftstoffadditiv), Biodiesel-Vorstufen und Lösungsmitteln. In den letzten Jahren gewinnt Methanol zusätzlich als Energieträger für die Energiewende stark an Bedeutung: "Grünes Methanol" aus CO<sub>2</sub> und erneuerbarem Wasserstoff gilt als möglicher CO<sub>2</sub>-neutraler Treibstoff für Schiffe, Flugzeuge und Brennstoffzellen-Fahrzeuge.

#### Die zentrale Reaktion

Die großtechnische Synthese verläuft nach der Bruttogleichung:



Die Reaktion ist exotherm und verläuft unter Verringerung der Stoffmenge an Gasteilchen (3 mol → 1 mol). Nach dem Prinzip von Le Chatelier wären für eine hohe Ausbeute also niedrige Temperaturen und hohe Drücke ideal. In der industriellen Praxis arbeitet man jedoch bei einem Kompromiss von ca. 250 °C und 50–100 bar – unter Einsatz eines Kupfer-Zink-Aluminiumoxid-Mischkatalysators (Cu/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Dieser Katalysator wurde 1966 von Imperial Chemical Industries (ICI) entwickelt und löste den älteren Hochdruck-Prozess mit Zinkchromit-Katalysator (BASF, 1923) ab, der noch bei 300 bar und 350 °C arbeiten musste. Der Wasserstoff für die Synthese stammt überwiegend aus dem Steam-Reforming von Erdgas:

**CH<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O ⇌ CO + 3 H<sub>2</sub>**. Das entstehende Synthesegas (CO + H<sub>2</sub>) wird direkt in den Methanol-Reaktor geleitet. Da pro Reaktordurchgang nur ca. 15 – 25 % Umsatz erreicht werden, läuft auch die Methanolsynthese im Kreislaufverfahren: das Methanol wird durch Abkühlung auskondensiert, die nicht umgesetzten Edukte (CO und H<sub>2</sub>) werden zurückgeführt.

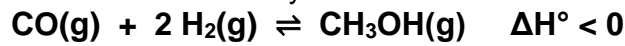
#### Gegebene Standardgrößen

Größe	Wert	Hinweis
ΔH <sub>f</sub> <sup>°</sup> (CO, g)	-110,5 kJ/mol	Standardbildungsenthalpie
ΔH <sub>f</sub> <sup>°</sup> (H <sub>2</sub> , g)	0 kJ/mol	Element im Standardzustand
ΔH <sub>f</sub> <sup>°</sup> (CH <sub>3</sub> OH, g)	-201,3 kJ/mol	Standardbildungsenthalpie
ΔH <sub>c</sub> <sup>°</sup> (CH <sub>3</sub> OH, l)	-726 kJ/mol	molare Verbrennungsenthalpie
M(CO)	28 g/mol	molare Masse
M(H <sub>2</sub> )	2 g/mol	molare Masse
M(CH <sub>3</sub> OH)	32 g/mol	molare Masse

Größe	Wert	Hinweis
$V_m$	22,4 L/mol	Molvolumen bei Normbedingungen (0 °C, 1013 hPa)
R	8,314 J/(mol·K)	Allgemeine Gaskonstante
R	0,0831 L·bar/(mol·K)	in praktischen Einheiten
c (Wasser)	4,18 kJ/(kg·K)	spezifische Wärmekapazität

**Aufgabe 1: Prinzip von Le Chatelier und Gleichgewichtsverschiebung [12 Punkte]**

Betrachten Sie die zentrale Reaktion der Methanolsynthese:



a) Erklären Sie mithilfe des Prinzips von Le Chatelier, wie eine Druckerhöhung das Gleichgewicht beeinflusst. Benennen Sie die Richtung der Verschiebung. [3 P]

---



---



---

b) Begründen Sie, warum eine Temperaturerhöhung die Ausbeute thermodynamisch verringert. [3 P]

---



---



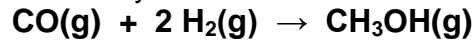
---

c) Vervollständigen Sie die folgende Tabelle. Geben Sie die Richtung der Gleichgewichtsverschiebung ( $\leftarrow$ ,  $\rightarrow$  oder „keine“) sowie eine kurze Begründung an. [6 P]

Bedingungsänderung	Verschiebung ( $\leftarrow$ , $\rightarrow$ oder keine)	Kurze Begründung
Temperatur erhöhen		
Druck erhöhen		
p(CO) erhöhen (CO-Überschuss)		
p(CH <sub>3</sub> OH) verringern (Methanolentnahme)		
Cu/ZnO-Katalysator zugeben		
p(H <sub>2</sub> ) verringern (H <sub>2</sub> -Mangel)		

## Aufgabe 2: Berechnung der Reaktionsenthalpie (Hess'scher Satz) [14 Punkte]

Gegeben ist die Bruttoreaktion der Methanolsynthese:



Verwenden Sie die Standardbildungsenthalpien aus der Tabelle des Hintergrundtextes.

**a)** 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 den korrekten stöchiometrischen Koeffizienten zu. [3 P]

---

---

---

---

**b)** Berechnen Sie  $\Delta H_r^\circ$  in kJ/mol. Zeigen Sie den vollständigen Rechenweg mit allen Zwischenschritten (Produktsumme, Eduktsumme, Differenz). [4 P]

---

---

---

---

---

**c)** Vergleichen Sie Ihr Rechenergebnis mit dem im Hintergrundtext angegebenen Wert von  $\Delta H^\circ = -90,8$  kJ/mol. Beurteilen Sie die Übereinstimmung. [2 P]

---

---

**d)** Formulieren Sie, ob die Reaktion exotherm oder endotherm verläuft. Nennen Sie eine konkrete technische Konsequenz, die sich daraus für den industriellen Betrieb (z. B. Anlagenbau, Wärmemanagement) ergibt. [3 P]

---

---

---

**e)** Berechnen Sie zusätzlich die frei werdende Wärmeenergie  $Q$ , wenn in einer Industrieanlage 280 g CO vollständig zu Methanol umgesetzt werden. Achten Sie auf das Vorzeichen. [2 P]

---

---

---

**Aufgabe 3: Massenwirkungsgesetz und Gleichgewichtskonstante K<sub>p</sub> [16 Punkte]**

In einem Methanol-Reaktor wurden bei 250 °C im Gleichgewicht folgende Partialdrücke gemessen:

Stoff	Formel	Partialdruck (bar)
Kohlenstoffmonoxid	CO	5,0
Wasserstoff	H <sub>2</sub>	10,0
Methanol	CH <sub>3</sub> OH	20,0

a) Stellen Sie den vollständigen Ausdruck für die Gleichgewichtskonstante K<sub>p</sub> für die Methanolsynthese auf. [3P]

---

---

---

b) Berechnen Sie den Zahlenwert von K<sub>p</sub>. Zeigen Sie alle Zwischenschritte. [4P]

---

---

---

---

---

c) Bestimmen Sie die Einheit von K<sub>p</sub> rechnerisch. Geben Sie die Einheit in der Form bar<sup>n</sup> an. [3 P]

---

---

---

d) Erläutern Sie den prinzipiellen Unterschied zwischen K<sub>p</sub> und K<sub>c</sub>. Geben Sie an, mit welcher Größe K<sub>p</sub> und mit welcher Größe K<sub>c</sub> formuliert wird. Nennen Sie eine Bedingung, unter der K<sub>p</sub> und K<sub>c</sub> denselben Zahlenwert besitzen würden. Nutzen Sie die Formel:

$$K_p = K_c \cdot (R \cdot T)^{\Delta n}$$

wobei

K<sub>p</sub> Gleichgewichtskonstante mit Partialdrücken

K<sub>c</sub> Gleichgewichtskonstante mit Stoffmengenkonzentrationen

R allgemeine Gaskonstante

T absolute Temperatur in Kelvin ( T(K) = T(°C) + 273,15 )

Δn Änderung der Stoffmenge gasförmiger Teilchen. (Erklärung dazu in der Formelsammlung)

R = 8,314 J/(mol·K) oder R = 0,0831 L·bar/(mol·K).

[3 P]

---

---

e) Interpretieren Sie den berechneten  $K_p$ -Wert: Welche Seite des Gleichgewichts ist begünstigt? Ist der Wert für eine technische Anwendung günstig oder ungünstig? Begründen Sie kurz. [3 P]

---

---

**Aufgabe 4: Rückrechnung mit dem MWG – Stoffmengenänderung [18 Punkte]**

In einem geschlossenen Methanol-Reaktor (Volumen  $V = 1 \text{ L}$ ) wird ein Synthesegasgemisch mit Anfangskonzentrationen  $c_0(\text{CO}) = 2 \text{ mol/L}$  und  $c_0(\text{H}_2) = 4 \text{ mol/L}$  eingespeist (das entspricht genau dem stöchiometrischen Verhältnis 1 : 2; Methanol ist anfangs nicht vorhanden). Die Gleichgewichtskonstante bei der betrachteten Temperatur beträgt  $K_c = 0,25 \text{ (mol/L)}^{-2}$ . Im Gleichgewicht wird eine Methanolkonzentration von  $c(\text{CH}_3\text{OH}) = 1,0 \text{ mol/L}$  gemessen.

a) Stellen Sie eine vollständige Konzentrationsbilanz (Anfangs- und Gleichgewichtszustand) tabellarisch dar. Verwenden Sie die Stöchiometrie 1 : 2 : 1 (CO : H<sub>2</sub> : CH<sub>3</sub>OH). [4 P]

c in mol/L	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> OH
Anfang ( $c_0$ )			
Umsatz ( $\Delta c$ )			
Gleichgewicht			

b) Stellen Sie den  $K_c$ -Ausdruck für die Methanolsynthese mit Konzentrationen auf. [2 P]

---

---

c) Setzen Sie die berechneten Gleichgewichtskonzentrationen in den  $K_c$ -Ausdruck ein und berechnen Sie den Zahlenwert. Führen Sie eine Probe durch, indem Sie ihn mit dem oben angegebenen Wert  $K_c = 0,25 \text{ (mol/L)}^{-2}$  vergleichen. [4 P]

---

---

---

---

d) Berechnen Sie die Stoffmengen-Ausbeute (Umsatzgrad) an Methanol, bezogen auf den Ausgangsstoff CO (in %). Verwenden Sie: Umsatzgrad = umgesetzte Stoffmenge / Anfangsstoffmenge. [3 P]

---

---

---

e) Erläutern Sie, welche Bedeutung das stöchiometrische Anfangsverhältnis  $c_0(\text{CO}) : c_0(\text{H}_2) = 1 : 2$  für die Praxis hat. Diskutieren Sie kurz, was passieren würde, wenn der Wasserstoff im Unterschuss (z. B. nur 3 mol/L statt 4 mol/L) zugegeben würde. Welche verfahrenstechnische Maßnahme leitet sich daraus für die reale Anlage ab? [3 P]

---

---

---

---

f) Würde eine Druckerhöhung in diesem geschlossenen Reaktor die Ausbeute steigern? Begründen Sie kurz mit Le Chatelier. [2 P]

---

---

**Aufgabe 5: Kalorimetrie – Verbrennung des Endprodukts Methanol [16 Punkte]**

Methanol kann nicht nur als Grundchemikalie, sondern auch als Brennstoff (z. B. in Brennstoffzellen oder Verbrennungsmotoren) eingesetzt werden. In einem Schul-Kalorimeter wird der Heizwert von flüssigem Methanol experimentell bestimmt.

**Versuchsordnung:**

In einem Kalorimeter mit einer **Kalorimeterkonstante von  $C_{\text{kal}} = 250 \text{ J/K}$**  befindet sich **1,5 kg Wasser**. Die Anfangstemperatur beträgt  **$T_1 = 22 \text{ °C}$** . Es werden **3,2 g Methanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $M = 32 \text{ g/mol}$ )** vollständig verbrannt.

a) Berechnen Sie die Stoffmenge  $n(\text{CH}_3\text{OH})$ . [2 P]

---

---

b) Berechnen Sie die durch die Verbrennung freigesetzte Reaktionswärme  $Q$ . Verwenden Sie die molare Verbrennungsenthalpie  $\Delta H_{\text{c}}^\circ = -726 \text{ kJ/mol}$  aus der Tabelle des Hintergrundtextes. Achten Sie auf das Vorzeichen. [3 P]

---

---

c) Berechnen Sie die Temperaturänderung  $\Delta T$  im Kalorimeter unter Berücksichtigung der Kalorimeterkonstante. Verwenden Sie die Formel  $Q = (m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} + C_{\text{kal}}) \cdot \Delta T$ . [4 P]

---

---

---

---

d) Berechnen Sie die Endtemperatur  $T_2$  im Kalorimeter. [2 P]

---

---

e) In einem zweiten Versuch wurden 5,0 g Methanol verbrannt. Die Endtemperatur des Wassers stieg von  $20 \text{ °C}$  auf  $36,84 \text{ °C}$ . Berechnen Sie aus diesen Messwerten die molare Verbrennungsenthalpie  $\Delta H_{\text{c}}^\circ$  des Methanols. Vergleichen Sie mit dem Literaturwert. [3 P]

---

---

---

---

f) Nennen Sie zwei mögliche Fehlerquellen, die in einem realen Schul-Kalorimeter zu einem Messergebnis führen, das vom Literaturwert abweicht. [2 P]

---



---

**Aufgabe 6: Reaktionsgeschwindigkeit, Ausbeute und Arrhenius-Gleichung [14 P]**

In einem Laborversuch zur Methanolbildung wird der zeitliche Verlauf der Methanol-Konzentration verfolgt. Es ergeben sich folgende Messwerte:

Zeit t (min)	0	1	2	3	4	5	6
c(CH <sub>3</sub> OH) (mol/L)	0	0,40	0,64	0,78	0,86	0,92	0,95

a) Berechnen Sie die mittlere Reaktionsgeschwindigkeit der Methanolbildung in den ersten 3 Minuten. Geben Sie die Einheit korrekt an. [3 P]

---



---

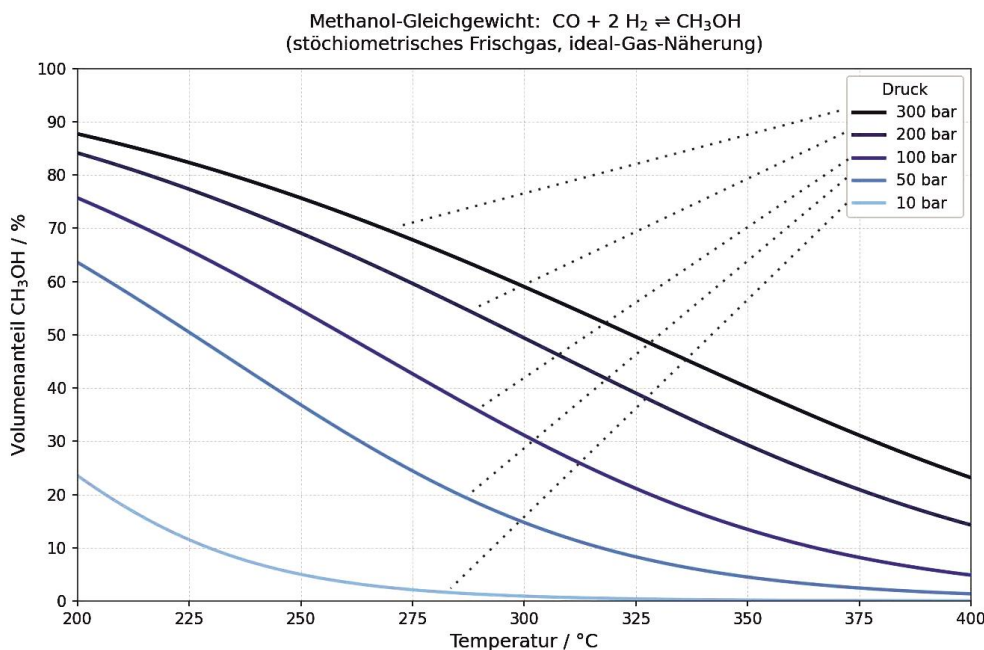
b) Beschreiben Sie das Vorgehen zur näherungsweisen Bestimmung der momentanen Reaktionsgeschwindigkeit zur 2. Minute (Sekantenverfahren zwischen t = 1 min und t = 3 min) und führen Sie die Rechnung durch. [3 P]

---



---

c) In der Abbildung unten ist die Abhängigkeit der Methanol-Ausbeute in % von der Temperatur dargestellt. Erklären Sie den Kurvenverlauf in Abhängigkeit vom Druck. Welche Ausbeute erwartet man bei der Temperatur 250°C und einem Druck von 100 bar. Warum wird die Synthese nicht beim Druck 300 bar und der Temperatur von 200°C durchgeführt? [3 P]



**d) Die Geschwindigkeitskonstante:** Die Geschwindigkeitskonstante  $k$  der Methanolsynthese hängt nach der Arrhenius-Gleichung von der Temperatur ab:

$$K = A \cdot e^{-\frac{E_A}{R \cdot T}}$$

In einem Versuch wurde bei  $T_1 = 500 \text{ K}$  eine Geschwindigkeitskonstante  $k_1 = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  und bei  $T_2 = 600 \text{ K}$  eine Geschwindigkeitskonstante  $k_2 = 5,4 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  gemessen. Berechnen Sie die Aktivierungsenergie  $E_A$  mithilfe der logarithmierten Form der Arrhenius-Gleichung:

$$\ln \frac{k_2}{k_1} = \frac{E_A}{R \cdot T} \cdot \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

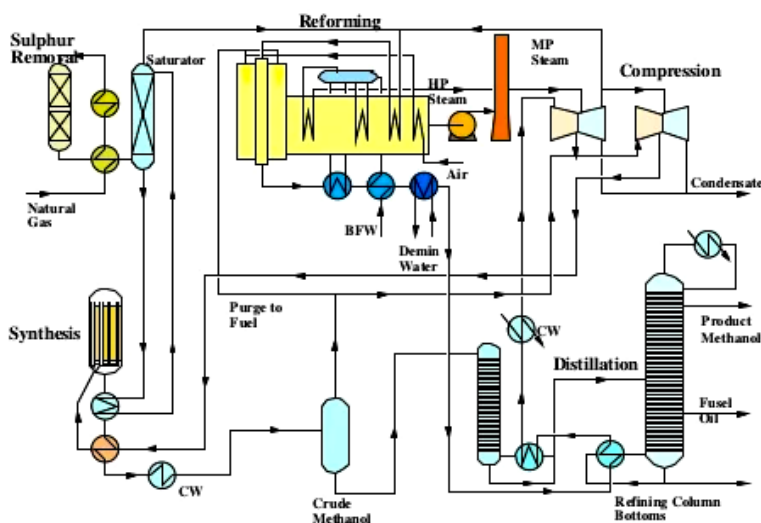
[3 P]

Hinweis:  $R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ . Endergebnis in  $\text{kJ}/\text{mol}$  angeben.

**e)** Erklären Sie kurz, wie sich der Katalysator ( $\text{Cu}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) physikalisch auf die Aktivierungsenergie  $E_a$  und damit auf  $k$  auswirkt. [2 P]

### Aufgabe 7: Industrielles Verfahrensschema der Methanolsynthese [16P]

Das nachfolgende Schema zeigt vereinfacht den Verfahrensablauf einer typischen Methanolanlage. Die einzelnen Bereiche sind mit den Nummern 1 bis 6 gekennzeichnet. Sie umfassen Erdgas-Aufbereitung, Steam-Reformer, Verdichtung, Reaktor mit Katalysatorschüttung, Kondensator/Abscheider und Rückführung.



GRAFIK 1: Verfahrensschema Methanolsynthese (Bereiche 1 – 6)

a) Beschreiben Sie mit eigenen Worten, was in den Bereichen 1 bis 6 passiert. Geben Sie, wo nötig, die ablaufenden chemischen Reaktionen an. Benennen Sie die Funktion jedes Bauteils (z. B. Reformier, Kompressor, Reaktor, Kondensator, Rückföhrleitung) und verknüpfen Sie diese mit den jeweiligen Reaktionsbedingungen (T, p, Katalysator). **[12 P]**

**Bereich 1:**

---

---

**Bereich 2:**

---

---

**Bereich 3:**

---

---

**Bereich 4:**

---

---

**Bereich 5:**

---

---

**Bereich 6:**

---

---

b) Begründen Sie, warum trotz der nach Le Chatelier günstigen hohen Drücke industriell nur mit ca. 50 – 100 bar (nicht etwa 300 bar wie früher) gearbeitet wird. Nennen Sie zwei Argumente. **[4 P]**

---

---

---

---

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

# ERWARTUNGSHORIZONT & MUSTERLÖSUNG

Klausur Chemie – Die Methanolsynthese

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

Notenschlüssel (106 Punkte)

Notenschlüssel auf 90 P (Standardberechnung), Bonus kann Note verbessern:

Punkte	Note	Bemerkung
90 – 81	1 (sehr gut)	≥ 90 %
80 – 72	2 (gut)	≥ 80 %
71 – 59	3 (befriedigend)	≥ 65 %
58 – 45	4 (ausreichend)	≥ 50 %
44 – 27	5 (mangelhaft)	≥ 30 %
26 – 0	6 (ungenügend)	< 30 %

Mit Hinweis: "Aufgabe 7 ist Bonusaufgabe. Erreichte Punkte werden zusätzlich angerechnet und können die Note um max. eine Stufe verbessern."

## Erwartungshorizont Aufgabe 1: Le Chatelier [Gesamt: 12 P]

### a) Druckerhöhung [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Edukte: 1 mol CO + 2 mol H <sub>2</sub> = 3 mol Gasteilchen; Produkte: 1 mol CH <sub>3</sub> OH = 1 mol Gasteilchen.	Zählung korrekt
1	Le Chatelier: Druckerhöhung → System weicht zur Seite mit weniger Mol aus → Verschiebung nach rechts (Produktseite).	Richtung benennen
1	→ Methanol-Ausbeute steigt; Druckerhöhung ist thermodynamisch vorteilhaft für die CH <sub>3</sub> OH-Bildung.	Praxisbezug

### b) Temperaturerhöhung [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Die Reaktion ist exotherm ( $\Delta H^\circ < 0$ ) → Wärme zählt als Produkt.	Vorzeichen nennen
1	Le Chatelier: Bei Temperaturerhöhung wird die exotherme Hinreaktion gehemmt → Gleichgewicht verschiebt sich nach links.	
1	→ Methanol-Ausbeute sinkt mit steigender Temperatur; niedrige Temperaturen wären thermodynamisch günstiger.	

### c) Tabelle Bedingungsänderungen [6 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Temperatur erhöhen → nach links (←); exotherme Hinreaktion wird gehemmt.	
1	Druck erhöhen → nach rechts (→); System weicht zur Seite mit weniger Gasteilchen aus (3 → 1 mol).	
1	p(CO) erhöhen → nach rechts (→); Erhöhung eines Edukts verschiebt zu den Produkten.	
1	p(CH <sub>3</sub> OH) verringern (Entnahme) → nach rechts (→); System bildet entferntes Produkt nach.	
1	Cu/ZnO-Katalysator → keine Verschiebung; Gleichgewicht wird nur schneller erreicht, K <sub>p</sub> unverändert.	Wichtig: keine Verschiebung!

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	$p(\text{H}_2)$ verringern $\rightarrow$ nach links ( $\leftarrow$ ); Verringerung eines Edukts verschiebt zu Edukten zurück.	

### Erwartungshorizont Aufgabe 2: Hess'scher Satz [Gesamt: 14 P]

#### a) Formel und Zuordnung [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	Produkt: $\text{CH}_3\text{OH}$ (Koeff. 1); Edukte: $\text{CO}$ (Koeff. 1), $\text{H}_2$ (Koeff. 2).	Koeffizienten korrekt
1	$\text{H}_2$ als Element im Standardzustand: $\Delta H_f^\circ = 0 \text{ kJ/mol}$ .	Standardzustand

#### b) Berechnung $\Delta H_r^\circ$ [4 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Produkte: $1 \times (-201,3) = -201,3 \text{ kJ}$	
1	Edukte: $1 \times (-110,5) + 2 \times 0 = -110,5 \text{ kJ}$	$\text{H}_2 = 0$ beachten
2	$\Delta H_r^\circ = -201,3 - (-110,5) = -201,3 + 110,5 = -90,8 \text{ kJ/mol}$	$\pm 2 \text{ kJ Toleranz}$

#### c) Vergleich [2 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Berechneter Wert ( $-90,8 \text{ kJ/mol}$ ) stimmt exakt mit dem im Hintergrundtext angegebenen Literaturwert überein.	
1	Übereinstimmung bestätigt die Korrektheit der Anwendung des Hess'schen Satzes.	

#### d) Interpretation und technische Konsequenz [3 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), sonst Temperaturanstieg $\rightarrow$ Verschiebung nach links $\rightarrow$ Ausbeuteverlust.	Gleichgewichtsbezug
1	Energierückgewinnung möglich (Dampferzeugung), reduziert Betriebskosten.	Praxisbezug

#### e) Wärmeberechnung [2 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	$n(\text{CO}) = m / M = 280 \text{ g} / 28 \text{ g/mol} = 10 \text{ mol}$ ; $\Delta H_r^\circ$ bezieht sich auf 1 mol $\text{CO} \rightarrow \Delta H$ pro mol $\text{CO} = -90,8 \text{ kJ/mol}$ .	Stoffmenge korrekt
1	$Q = n \times \Delta H = 10 \text{ mol} \times (-90,8 \text{ kJ/mol}) = -908 \text{ kJ}$ . Negatives Vorzeichen: exotherm.	$\pm 5 \text{ kJ Toleranz}$

### Erwartungshorizont Aufgabe 3: MWG und $K_p$ [Gesamt: 16 P]

#### a) $K_p$ -Ausdruck [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	$K_p = p(\text{CH}_3\text{OH}) / [p(\text{CO}) \cdot p(\text{H}_2)^2]$	Formel vollständig
1	Produkt im Zähler ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), Edukte im Nenner ( $\text{CO}$ , $\text{H}_2$ ).	Konvention
1	Exponenten = stöchiometrische Koeffizienten: 1, 1, 2. Partialdrücke ( $K_p$ ), nicht Konzentrationen.	Stöchiometrie

**b) Berechnung Kp [4 P]**

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Zähler: $p(\text{CH}_3\text{OH}) = 20,0 \text{ bar}$	
1	Nenner: $p(\text{CO}) \cdot p(\text{H}_2)^2 = 5,0 \cdot (10,0)^2 = 5,0 \cdot 100 = 500 \text{ bar}^3$	Zwischenrechnung
2	$K_p = 20,0 / 500 = 0,04 \text{ bar}^{-2} = 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ bar}^{-2}$	$\pm 0,005$ Toleranz

**c) Einheit von Kp [3 P]**

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Zähler: $\text{bar}^1$ (aus $p(\text{CH}_3\text{OH})$ )	
1	Nenner: $\text{bar}^1 \times \text{bar}^2 = \text{bar}^3$	
1	Einheit: $\text{bar} / \text{bar}^3 = \text{bar}^{-2} \rightarrow$ Form $\text{bar}^n$ mit $n = -2$ .	

**d) Unterschied Kp und Kc [3 P]**

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Kp wird mit Partialdrücken (bar) formuliert, Kc mit Stoffmengenkonzentrationen (mol/L).	Klare Abgrenzung
1	Beide beschreiben dieselbe Gleichgewichtslage, sind aber unterschiedliche Größen mit unterschiedlichen Einheiten.	
1	Identischer Zahlenwert nur, wenn $\Delta n = 0$ (Mol Gasteilchen auf beiden Seiten gleich), z. B. bei $\text{H}_2 + \text{I}_2 \rightleftharpoons 2 \text{ HI}$ .	Höhere Stufe

**e) Interpretation  $K_p \approx 0,04 \text{ bar}^{-2}$  [3 P]**

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Vorsicht bei der reinen Größenbetrachtung: Da Kp hier dimensionsbehaftet ist (Einheit $\text{bar}^{-2}$ ), darf nicht einfach „ $K_p < 1$ , also liegt das Gleichgewicht auf der Eduktseite“ gefolgert werden — der Zahlenwert hängt von der gewählten Druckeinheit ab.	Korrekte methodische Warnung
1	Aussagefähiger ist der Vergleich der konkreten Gleichgewichtspartialdrücke: $p(\text{CH}_3\text{OH}) = 20 \text{ bar}$ liegt zwar höher als $p(\text{CO}) = 5 \text{ bar}$ , aber gemessen am insgesamt eingesetzten Stoffmengenstrom ( $\Sigma p \approx 35 \text{ bar}$ ) ist der Methanolanteil pro Reaktordurchgang noch begrenzt.	Praxisbezug
1	Daraus folgt für den Betrieb: die Methanolbildung pro Reaktordurchgang ist begrenzt (typisch 15 – 25 % Umsatz); die Gesamtausbeute wird industriell durch Auskondensieren des Methanols und Rückführung der Edukte (Kreislaufverfahren) auf ca. 95 % gesteigert.	Praxisbezug

**Erwartungshorizont Aufgabe 4: Rückrechnung mit MWG [Gesamt: 18 P]****a) Konzentrationstabelle [4 P]**

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Anfang: $c_0(\text{CO}) = 2 \text{ mol/L}$ ; $c_0(\text{H}_2) = 4 \text{ mol/L}$ ; $c_0(\text{CH}_3\text{OH}) = 0$ .	
1	Umsatz aus dem gemessenen Methanol-Endwert: $c(\text{CH}_3\text{OH}) = 1 \text{ mol/L} \rightarrow \Delta c(\text{CH}_3\text{OH}) = +1 \text{ mol/L}$ .	
1	Stöchiometrie 1 : 2 : 1 (CO : H <sub>2</sub> : CH <sub>3</sub> OH) $\rightarrow \Delta c(\text{CO}) = -1 \text{ mol/L}$ ; $\Delta c(\text{H}_2) = -2 \text{ mol/L}$ .	wichtig!

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Gleichgewicht: $c(\text{CO}) = 2 - 1 = 1 \text{ mol/L}$ ; $c(\text{H}_2) = 4 - 2 = 2 \text{ mol/L}$ ; $c(\text{CH}_3\text{OH}) = 1 \text{ mol/L}$ .	vollständig

#### b) Kc-Ausdruck [2 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	$K_c = c(\text{CH}_3\text{OH}) / [c(\text{CO}) \cdot c(\text{H}_2)^2]$	Formel vollständig
1	Produkt im Zähler, Edukte im Nenner; Exponenten = stöchiometrische Koeffizienten (1, 1, 2).	

#### c) Zahlenwert Kc und Probe [4 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Einsetzen der Gleichgewichtskonzentrationen: $K_c = 1 / [1 \cdot (2)^2]$	
1	Zwischenrechnung: Nenner = $1 \cdot 4 = 4 \text{ (mol/L)}^3$ ; Zähler = 1 mol/L	
1	$K_c = 1 / 4 = 0,25 \text{ (mol/L)}^{-2}$	exaktes Ergebnis
1	Probe: Berechneter Wert $0,25 \text{ (mol/L)}^{-2}$ stimmt exakt mit dem angegebenen Kc-Wert überein. → Die Zusammensetzung liegt tatsächlich im Gleichgewicht.	Konsistenz bestätigt

#### d) Stoffmengen-Ausbeute / Umsatzgrad [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	$n(\text{CO})$ anfangs = 2 mol (bei $V = 1 \text{ L}$ ); umgesetzt: 1 mol CO (da $\Delta c(\text{CO}) = -1 \text{ mol/L}$ und $V = 1 \text{ L}$ ).	Stoffmengenbezug
1	Umsatzgrad = umgesetzte Stoffmenge / Anfangsstoffmenge = $1 \text{ mol} / 2 \text{ mol} = 0,5 = 50 \%$ .	Rechnung
1	Stoffmengen-Ausbeute an Methanol, bezogen auf CO: 50 %. Auch aus $\text{H}_2$ -Sicht: 2 mol von 4 mol $\text{H}_2$ verbraucht = 50 %.	Endergebnis + Kontrolle

#### e) Bedeutung des stöchiometrischen Verhältnisses 1 : 2 [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Das Verhältnis $c_0(\text{CO}) : c_0(\text{H}_2) = 1 : 2$ entspricht exakt der Stöchiometrie der Reaktion. Damit werden beide Edukte gleichzeitig vollständig umgesetzt — keines bleibt am Ende übrig (kein Überschuss, kein Mangel).	Optimum für maximale Ausbeute
1	Bei $\text{H}_2$ -Unterschuss (z. B. 3 mol/L statt 4 mol/L) wäre $\text{H}_2$ das limitierende Edukt: maximal 1,5 mol/L $\text{H}_2 \rightarrow$ maximal 0,75 mol/L $\text{CH}_3\text{OH}$ ; ein Teil des CO bliebe ungenutzt zurück.	Limitierendes Edukt
1	Verfahrenstechnik: Da Steam-Reforming ein Synthesegas mit Verhältnis $\text{CO} : \text{H}_2 \approx 1 : 3$ liefert (also $\text{H}_2$ -Überschuss), die Methanolsynthese aber 1 : 2 braucht, wird das Gas durch $\text{CO}_2$ -Zugabe oder Mischung mit weiterem CO auf das benötigte Verhältnis nachjustiert; alternativ wird der $\text{H}_2$ -Überschuss bewusst akzeptiert und zurückgeführt.	Praxisbezug

#### f) Druckeinfluss in geschlossenem Reaktor [2 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Edukte: 3 mol Gas (1 mol CO + 2 mol $\text{H}_2$ ) → Produkt: 1 mol Gas ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ). Druckerhöhung verschiebt das Gleichgewicht nach Le Chatelier auf die Seite mit weniger Gasteilchen.	Le Chatelier

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	→ Verschiebung nach rechts; Ausbeute steigt. Genau aus diesem Grund arbeitet die Industrie bei 50 – 100 bar.	Praxisbezug

### Erwartungshorizont Aufgabe 5: Kalorimetrie [Gesamt: 16 P]

#### a) Stoffmenge $n(\text{CH}_3\text{OH})$ [2 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Formel: $n = m / M$	
1	$n = 3,2 \text{ g} / 32 \text{ g/mol} = 0,10 \text{ mol}$	

#### b) Reaktionswärme $Q$ [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Formel: $Q = n \cdot \Delta H_{\text{c}}^\circ$ (Beachte: das Produkt ergibt das Vorzeichen)	
1	$Q = 0,10 \text{ mol} \cdot (-726 \text{ kJ/mol})$	
1	$Q = -72,6 \text{ kJ}$ (negatives Vorzeichen: Wärme wird abgegeben, exotherme Verbrennung)	Vorzeichen wichtig

#### c) Temperaturänderung $\Delta T$ [4 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Formel: $\Delta T =  Q  / (m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} + C_{\text{kal}})$	Betrag von $Q$
1	Wärmekapazität Wasser: $m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} = 1,5 \text{ kg} \cdot 4,18 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 6,27 \text{ kJ/K}$	Zwischenrechnung
1	Gesamt-Wärmekapazität: $6,27 \text{ kJ/K} + 0,250 \text{ kJ/K} = 6,52 \text{ kJ/K}$	$C_{\text{kal}} = 250 \text{ J/K} = 0,25 \text{ kJ/K}$
1	$\Delta T = 72,6 \text{ kJ} / 6,52 \text{ kJ/K} \approx 11,13 \text{ K}$ ( $\pm 0,1 \text{ K}$ Toleranz)	Endergebnis

#### d) Endtemperatur $T_2$ [2 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	$T_2 = T_1 + \Delta T$	Formel
1	$T_2 = 22 \text{ }^\circ\text{C} + 11,13 \text{ K} = 33,13 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ Toleranz

#### e) Bestimmung $\Delta H_{\text{c}}^\circ$ aus Messung [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	$\Delta T = 36,84 - 20 = 16,84 \text{ K}$ ; $n = 5,0/32 = 0,15625 \text{ mol}$ ; $Q = (m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} + C_{\text{kal}}) \cdot \Delta T = 6,52 \text{ kJ/K} \cdot 16,84 \text{ K} \approx 109,8 \text{ kJ}$ .	$Q$ absolut
1	$\Delta H_{\text{c}}^\circ = -Q/n = -109,8 \text{ kJ} / 0,15625 \text{ mol} \approx -702,7 \text{ kJ/mol} \approx -703 \text{ kJ/mol}$ .	$\pm 10 \text{ kJ}$ Toleranz
1	Literaturwert $-726 \text{ kJ/mol}$ ; Abweichung ca. 3 % – akzeptabel für eine Schul-Apparatur.	Vergleich

#### f) Mögliche Fehlerquellen [2 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Wärmeverluste an die Umgebung (unvollständige Isolation des Kalorimeters).	Je 1 Punkt
1	Unvollständige Verbrennung (Bildung von CO/Ruß statt $\text{CO}_2$ ); ungenaue Massenbestimmung; verdunstetes Methanol vor der Zündung.	2 von vielen

## Erwartungshorizont Aufgabe 6: Kinetik & Arrhenius [Gesamt: 14 P]

### a) Mittlere Reaktionsgeschwindigkeit [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Formel: $\bar{v} = \Delta c(\text{CH}_3\text{OH}) / \Delta t$	Definition
1	Einsetzen: $\Delta c = c(3 \text{ min}) - c(0 \text{ min}) = 0,78 - 0 = 0,78 \text{ mol/L}$ ; $\Delta t = 3 \text{ min}$	Werte
1	$\bar{v} = 0,78 \text{ mol/L} / 3 \text{ min} = 0,26 \text{ mol}/(\text{L} \cdot \text{min})$	Ergebnis + Einheit

### b) Momentangeschwindigkeit bei $t = 2 \text{ min}$ [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Vorgehen: Sekantenverfahren – Sekante durch zwei Nachbarpunkte ( $t = 1 \text{ min}$ und $t = 3 \text{ min}$ ) approximiert die Tangentensteigung bei $t = 2 \text{ min}$ .	Methode
1	Werte: $\Delta c = 0,78 - 0,40 = 0,38 \text{ mol/L}$ ; $\Delta t = 3 - 1 = 2 \text{ min}$	Werte
1	$v_{\text{momentan}}(2 \text{ min}) \approx 0,38 / 2 = 0,19 \text{ mol}/(\text{L} \cdot \text{min})$	Toleranz $\pm 0,02$

### c) Diagramm-Auswertung [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	<b>Kurvenverlauf in Abhängigkeit vom Druck:</b> Bei jeder Temperatur liegt die Methanol-Ausbeute umso höher, je höher der Druck — die Hochdruck-Kurven liegen systematisch über den Niederdruck-Kurven. Begründung nach Le Chatelier: Edukte 3 mol Gas ( $1 \text{ CO} + 2 \text{ H}_2$ ) → Produkt 1 mol Gas ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ); eine Druckerhöhung verschiebt das Gleichgewicht auf die Seite mit weniger Gasteilchen, also nach rechts zum Methanol. Zusätzlich fallen alle Kurven mit steigender Temperatur ab (exotherme Reaktion, $\Delta H^\circ < 0$ ).	Druck- und T-Abhängigkeit korrekt mit Le Chatelier begründet
1	<b>Ablesewert bei 250 °C und 100 bar:</b> Methanol-Ausbeute ca. 55 %.	Ablesetoleranz $\pm 3 \%$ ; konkret vom verwendeten Diagramm abhängig
1	<b>Warum nicht bei 100 bar und 200 °C?</b> Bei 200 °C wäre die Ausbeute thermodynamisch zwar noch höher (Gleichgewicht liegt weiter rechts, da exotherme Reaktion durch niedrigere T begünstigt wird), <b>aber kinetisch ist die Reaktion zu langsam:</b> Die Aktivierungsenergie wird nur von einem zu kleinen Teilchenanteil erreicht (Arrhenius: $k = A \cdot e^{(-E_a/RT)}$ ), sodass selbst am Cu/ZnO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Katalysator kein wirtschaftlich nutzbarer Umsatz pro Reaktordurchgang zustande kommt. Industriell wählt man deshalb den <b>Kompromiss bei ca. 250 °C / 50–100 bar</b> — hoch genug für ausreichende Reaktionsgeschwindigkeit, niedrig genug für eine noch akzeptable Gleichgewichtsausbeute.	Entscheidend: kinetisches Argument (nicht thermodynamisches!); Begriff „Kompromiss zwischen Thermodynamik und Kinetik“ erwartet

### d) Aktivierungsenergie $E_a$ [3 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Verhältnis: $k_2/k_1 = 5,4 \cdot 10^{-2} / 1,2 \cdot 10^{-3} = 45$ ; $\ln(45) \approx 3,807$ .	Zwischenrechnung

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	$1/T_1 - 1/T_2 = 1/500 - 1/600 = 0,002 - 0,001667 = 3,333 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ .	<i>Klammer</i>
1	$E_a = R \cdot \ln(k_2/k_1) / (1/T_1 - 1/T_2) = 8,314 \cdot 3,807 / 3,333 \cdot 10^{-4} \approx 94\,950 \text{ J/mol} \approx 95 \text{ kJ/mol}$ .	$\pm 3 \text{ kJ/mol}$ Toleranz

#### e) Wirkung des Katalysators auf $E_a$ [2 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Katalysator stellt einen alternativen Reaktionsweg mit niedrigerer Aktivierungsenergie $E_a$ zur Verfügung.	
1	Niedrigeres $E_a \rightarrow$ exponentiell höhere Geschwindigkeitskonstante $k = A \cdot e^{(-E_a/RT)}$ ; Reaktion läuft auch bei niedrigeren Temperaturen ausreichend schnell ab.	<i>Arrhenius-Bezug</i>

### Erwartungshorizont Aufgabe 7: Verfahrensschema [Gesamt: 16 P]

#### a) Beschreibung Bereiche 1 – 6 [12 P, je 2 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
2	Bereich 1 – Erdgas-Aufbereitung / Entschwefelung: Erdgas (hauptsächlich $\text{CH}_4$ ) wird gereinigt; insbesondere Schwefelverbindungen werden entfernt, da sie den Katalysator der Folgeschritte vergiften würden.	<i>Entschwefelung nennen</i>
2	Bereich 2 – Steam-Reformer: Erzeugung des Synthesegases. Reaktion: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + 3 \text{H}_2$ (endotherm, $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Katalysator, ca. $800 - 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Wichtiger Hinweis: das Reformer-Synthesegas hat das Verhältnis $\text{CO} : \text{H}_2 = 1 : 3$ , die Methanolsynthese benötigt aber $1 : 2 \rightarrow$ das Verhältnis muss vor dem Reaktor angepasst werden (z. B. durch $\text{CO}_2$ -Zugabe und Wassergas-Shift-Korrektur oder durch bewusste $\text{H}_2$ -Rückführung).	<i>Reaktion + Verhältnis-Problematik</i>
2	Bereich 3 – Verdichtung (Kompressor) und Vorwärmung (Wärmetauscher): Das Synthesegas wird auf den Reaktionsdruck ( $50 - 100 \text{ bar}$ ) komprimiert und auf Reaktionstemperatur (ca. $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ) vorgewärmt.	<i>Druck + T</i>
2	Bereich 4 – Methanol-Reaktor: Hauptreaktion $\text{CO} + 2 \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{OH}$ (exotherm, $\Delta H^\circ = -90,8 \text{ kJ/mol}$ ) am $\text{Cu}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Mischkatalysator bei ca. $250 \text{ }^\circ\text{C}$ und $50 - 100 \text{ bar}$ . Umsatz pro Durchgang ca. $15 - 25 \%$ .	<i>Hauptreaktion</i>
2	Bereich 5 – Kondensator/Abscheider: Das Reaktionsgemisch wird abgekühlt; Methanol (Siedepunkt $65 \text{ }^\circ\text{C}$ bei $1 \text{ bar}$ , deutlich höher unter Druck) kondensiert und wird flüssig vom Gasstrom getrennt. $\text{CO}$ und $\text{H}_2$ bleiben gasförmig.	<i>Phasentrennung</i>
2	Bereich 6 – Rückführung (Recycle-Stream): Nicht umgesetzte Edukte werden über einen Rückführkompressor zurück zum Reaktor geleitet. Dadurch wird die Gesamtausbeute trotz des geringen Umsatzes pro Durchgang auf ca. $95 \%$ gesteigert.	<i>Kreislaufprinzip</i>

#### b) Begründung Druckwahl $50 - 100 \text{ bar}$ [4 P]

P	Erwarteter Inhalt / Musterlösung	Hinweis / Toleranz
1	Sehr hohe Drücke ( $\geq 300 \text{ bar}$ ) erfordern extrem dickwandige, teure Hochdruckreaktoren und Spezial-Kompressoren $\rightarrow$ exponentiell steigende Investitionskosten.	<i>Material/Kosten</i>
1	Der neue $\text{Cu}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Katalysator (Niederdruckverfahren seit 1966) arbeitet bereits bei moderaten Drücken effizient; Kompromiss zwischen Ausbeute und Anlagenaufwand.	<i>Katalysator</i>
1	Geringerer Energieaufwand bei der Verdichtung $\rightarrow$ niedrigere	<i>Energie</i>

<b>P</b>	<b>Erwarteter Inhalt / Musterlösung</b>	<b>Hinweis / Toleranz</b>
	Betriebskosten und kleinere CO <sub>2</sub> -Bilanz.	
<b>1</b>	Höhere Sicherheit: bei 50 – 100 bar deutlich geringeres Explosions-/Leckagerisiko als bei 300 bar.	<i>Sicherheit</i>

**– Ende des Erwartungshorizonts –**