

# Klausur Chemie

## Chemisches Gleichgewicht – MWG – Le Chatelier – Kinetik

### Schwerpunktthema: Das Ostwald-Verfahren (Salpetersäuresynthese)

### Hintergrundtext: Das Ostwald-Verfahren

Das Ostwald-Verfahren ist eines der wichtigsten chemischen Industrieverfahren der Welt. Es wurde Anfang des 20. Jahrhunderts vom deutschen Chemiker Wilhelm Ostwald entwickelt und wird zur Herstellung von Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ) verwendet. Salpetersäure zählt zu den bedeutendsten Grundchemikalien überhaupt.

Die weltweite Jahresproduktion beträgt mehr als 60 Millionen Tonnen. Salpetersäure wird vor allem für die Herstellung von Düngemitteln (insbesondere Ammoniumnitrat), Explosivstoffen (z. B. TNT, Nitroglycerin), Kunststoffen, Farbstoffen und Arzneimitteln benötigt. Ebenso wie die Schwefelsäureproduktion gilt die Salpetersäureproduktion als Indikator für die industrielle Leistungsfähigkeit eines Landes.

### Die drei Reaktionsschritte im Überblick

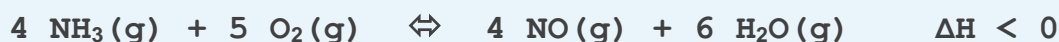
Schritt	Reaktionsgleichung	Bemerkung
1 Oxidation	$4 \text{NH}_3(\text{g}) + 5 \text{O}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 4 \text{NO}(\text{g}) + 6 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	exotherm, Pt/Rh-Katalysator, $\sim 850 \text{ }^\circ\text{C}$
2 Weiteroxidation	$2 \text{NO}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2 \text{NO}_2(\text{g})$	exotherm, spontan bei Abkühlung
3 Absorption	$3 \text{NO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow 2 \text{HNO}_3(\text{aq}) + \text{NO}(\text{g})$	NO wird zurückgeführt

Die erste Reaktion – die katalytische Oxidation von Ammoniak – ist der entscheidende und gleichgewichtsrelevante Schritt. Im Folgenden steht sie im Mittelpunkt der Aufgaben. Standardbildungsenthalpien für Berechnungen:

Stoff	$\Delta H_f^\circ$ (kJ/mol)
$\text{NH}_3(\text{g})$	-46,1
$\text{NO}(\text{g})$	+90,3
$\text{H}_2\text{O}(\text{g})$	-241,8
$\text{O}_2(\text{g})$	0

### Aufgabe 1: Prinzip von Le Chatelier (15 Punkte)

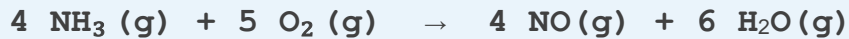
Betrachten Sie die Hauptreaktion des Ostwald-Verfahrens:



- Erklären Sie mithilfe des Prinzips von Le Chatelier, wie eine Temperaturerhöhung das Gleichgewicht beeinflusst. Begründen Sie Ihre Antwort. (4 P)
- Analysieren Sie den Einfluss einer Druckerhöhung auf das Gleichgewicht. Zählen Sie dazu die Mol Gasteilchen auf beiden Seiten aus. (4 P)
- In der Praxis arbeitet man trotz des Gleichgewichtsarguments bei hohen Temperaturen ( $\sim 850 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Erklären Sie diesen scheinbaren Widerspruch. (4 P)
- Das Produkt NO wird kontinuierlich aus dem Gleichgewicht entfernt und weiter verarbeitet. Welche Auswirkung hat das auf das Gleichgewicht? Begründen Sie. (3 P)

## Aufgabe 2: Berechnung der Reaktionsenthalpie (10 Punkte)

Verwenden Sie die im Sachtext angegebenen Standardbildungsenthalpien.



- Stellen Sie die Formel zur Berechnung der Reaktionsenthalpie  $\Delta H_r^\circ$  auf (Hess'scher Satz). (3 P)
- Berechnen Sie  $\Delta H_r^\circ$  in kJ/mol. Zeigen Sie den vollständigen Rechenweg. (5 P)
- Handelt es sich um eine exotherme oder endotherme Reaktion? Was bedeutet das für die technische Prozessführung? (2 P)

## Aufgabe 3: Wärmeberechnung (10 Punkte)

In einer Industrieanlage werden 340 g Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) vollständig umgesetzt.

Gegeben:  $M(\text{NH}_3) = 17 \text{ g/mol}$ ;  $\Delta H_r^\circ$  wie in Aufgabe 2 berechnet

- Berechnen Sie die Stoffmenge  $n(\text{NH}_3)$ . (3 P)
- Berechnen Sie die dabei frei werdende Wärmeenergie  $Q$  in kJ. Achten Sie auf das Vorzeichen. (4 P)
- Welche technische Maßnahme leitet sich aus der Wärmeentwicklung im industriellen Prozess ab? (3 P)

## Aufgabe 4: Massenwirkungsgesetz und Gleichgewichtskonstante (15 Punkte)

Im Gleichgewicht wurden folgende Partialdrücke gemessen:

Stoff	Partialdruck
$\text{NH}_3 (\text{g})$	0,50 bar
$\text{O}_2 (\text{g})$	1,20 bar
$\text{NO}(\text{g})$	2,40 bar
$\text{H}_2\text{O}(\text{g})$	3,00 bar

- Stellen Sie den Ausdruck für  $K_p$  für die Reaktion auf. Beachten Sie die Stöchiometrie. (4 P)
- Berechnen Sie den Zahlenwert von  $K_p$ . Zeigen Sie den vollständigen Rechenweg. (5 P)
- Bestimmen Sie die Einheit von  $K_p$  rechnerisch und geben Sie sie an. (3 P)
- Was sagt ein großer  $K_p$ -Wert ( $K_p \gg 1$ ) über die Lage des Gleichgewichts aus? (3 P)

## Aufgabe 5: Katalysator und Reaktionskinetik (10 Punkte)

Im Ostwald-Verfahren wird ein Platin-Rhodium-Netz (Pt/Rh) als Katalysator eingesetzt.

- Welche Aufgabe hat der Pt/Rh-Katalysator im Prozess? Erläutern Sie in Bezug auf die Aktivierungsenergie  $E_a$ . (3 P)
- Warum verändert ein Katalysator die Lage des chemischen Gleichgewichts nicht? (3 P)
- Erklären Sie den Unterschied zwischen Reaktionsgeschwindigkeit und chemischem Gleichgewicht. (2 P)
- Nennen Sie zwei wirtschaftliche Vorteile des Katalysatoreinsatzes in der Industrie. (2 P)

– Ende der Klausur –  
Viel Erfolg!

# Erwartungshorizont & Musterlösung

Klausur Chemie – Das Ostwald-Verfahren (Salpetersäuresynthese)

**⚠ Nur für Lehrkräfte – nicht an Schülerinnen und Schüler ausgeben**

## Notenübersicht (Gesamtpunkte: 60)

60–54	<b>1 (sehr gut)</b>
53–48	<b>2 (gut)</b>
47–39	<b>3 (befriedigend)</b>
38–30	<b>4 (ausreichend)</b>
29–18	<b>5 (mangelhaft)</b>
17–0	<b>6 (ungenügend)</b>

## Aufgabe 1: Prinzip von Le Chatelier ▶ Gesamt: 15 Punkte

### a) Temperaturerhöhung – Einfluss auf das Gleichgewicht [4 Punkte]

<b>1 P</b>	Die Reaktion ist exotherm ( $\Delta H < 0$ ) – Wärme wird als Produkt betrachtet.	<i>Formulierung sinngemäß</i>
<b>1 P</b>	Le Chatelier: System reagiert entgegengesetzt zur Störung → bei Temperaturerhöhung wird die endotherme Richtung bevorzugt.	
<b>1 P</b>	→ Gleichgewicht verschiebt sich nach links (Rückreaktion), Ausbeute an NO sinkt.	
<b>1 P</b>	Niedrige Temperaturen wären thermodynamisch günstiger für die Produktbildung.	

### b) Druckerhöhung – Analyse der Gasteilchen [4 Punkte]

<b>1 P</b>	Linksseitig: 4 mol $\text{NH}_3$ + 5 mol $\text{O}_2$ = 9 mol Gasteilchen.	<i>Zählung korrekt</i>
<b>1 P</b>	Rechtsseitig: 4 mol NO + 6 mol $\text{H}_2\text{O}$ = 10 mol Gasteilchen.	
<b>1 P</b>	Druckerhöhung → Gleichgewicht verschiebt sich zur Seite mit weniger Mol → nach links.	<i>Le Chatelier korrekt</i>
<b>1 P</b>	Druckerhöhung ist daher für das Ostwald-Verfahren ungünstig (anders als Haber-Bosch!).	<i>Vergleich fakultativ, +Bonus</i>

### c) Hohe Temperatur trotz ungünstiger Gleichgewichtslage [4 Punkte]

<b>1 P</b>	Bei niedrigen Temperaturen läuft die Reaktion zu langsam ab (geringe Reaktionsgeschwindigkeit).	
<b>1 P</b>	Hohe Temperaturen erhöhen die Reaktionsgeschwindigkeit (mehr Teilchen mit Ea).	
<b>1 P</b>	Kompromiss: ausreichend schnelle Reaktion bei akzeptabler Ausbeute (~850 °C).	
<b>1 P</b>	Auch die Katalysatoraktivität (Pt/Rh) ist temperaturabhängig – optimal bei ~850 °C.	<i>fakultativ</i>

**d) Produktentnahme (NO wird entfernt) [3 Punkte]**

1 P	Entfernen von NO = Senkung der Produktkonzentration.	
1 P	Le Chatelier: System reagiert, indem es mehr Produkt bildet → Gleichgewicht verschiebt sich nach rechts.	
1 P	→ Ausbeute steigt; NO wird kontinuierlich weiteroxidiert zu NO <sub>2</sub> (Schritt 2).	Prozessbezug gut

**Aufgabe 2: Berechnung der Reaktionsenthalpie** ▶ Gesamt: 10 Punkte**a) Formel (Hess'scher Satz) [3 Punkte]**

1 P	$\Delta H_r^\circ = \sum \Delta H_f^\circ(\text{Produkte}) - \sum \Delta H_f^\circ(\text{Edukte})$	
1 P	Korrekte Zuordnung: Produkte = NO, H <sub>2</sub> O; Edukte = NH <sub>3</sub> , O <sub>2</sub>	
1 P	Stöchiometrische Koeffizienten werden berücksichtigt (×4 bzw. ×6).	

**b) Berechnung von  $\Delta H_r^\circ$  [5 Punkte]**

1 P	Produkte: $4 \times (+90,3) + 6 \times (-241,8) = +361,2 + (-1450,8) = -1089,6 \text{ kJ}$	Rechenweg sichtbar
1 P	Edukte: $4 \times (-46,1) + 5 \times 0 = -184,4 \text{ kJ}$	$\Delta H(\text{O}_2) = 0$ beachten
2 P	$\Delta H_r^\circ = -1089,6 - (-184,4) = -905,2 \text{ kJ/mol}$	±5 kJ Toleranz
1 P	Einheit kJ/mol korrekt angegeben.	

**c) Interpretation und technische Konsequenz [2 Punkte]**

1 P	$\Delta H_r^\circ < 0$ → exotherm. Die Reaktion gibt Wärme ab.	
1 P	Technisch: Wärme muss abgeführt werden (Kühlung); kann zur Energierückgewinnung genutzt werden (Wärmetauscher).	

**Aufgabe 3: Wärmeberechnung** ▶ Gesamt: 10 Punkte**a) Stoffmenge n(NH<sub>3</sub>) [3 Punkte]**

1 P	Formel: $n = m / M$	
1 P	$n = 340 \text{ g} / 17 \text{ g/mol} = 20 \text{ mol}$	
1 P	Einheit mol korrekt.	

**b) Frei werdende Wärmeenergie Q [4 Punkte]**

1 P	$\Delta H_r^\circ$ bezieht sich auf 4 mol NH <sub>3</sub> → Q pro mol NH <sub>3</sub> = $-905,2 / 4 = -226,3 \text{ kJ/mol}$	
1 P	$Q = n \times \Delta H \text{ pro mol NH}_3 = 20 \text{ mol} \times (-226,3 \text{ kJ/mol})$	
1 P	$Q = -4526 \text{ kJ}$ (bzw. ~-4525 kJ je nach Rundung)	±20 kJ Toleranz
1 P	Negatives Vorzeichen: Wärme wird abgegeben (exotherm).	Vorzeichen wichtig!

**c) Technische Maßnahme [3 Punkte]**

1 P	Die große Wärmeentwicklung erfordert aktive Kühlung der Reaktionskammer.	
1 P	Wärmetauscher werden eingesetzt, um die frei werdende Energie zu nutzen (z. B. Dampferzeugung).	
1 P	Ohne Kühlung: Temperaturanstieg verschiebt Gleichgewicht nach links → Ausbeuteverlust.	Gleichgewichtsbezug

**Aufgabe 4: Massenwirkungsgesetz und Kp** ▶ Gesamt: 15 Punkte**a) Ausdruck für Kp aufstellen [4 Punkte]**

1 P	$K_p = \frac{p(\text{NO})^4 \times p(\text{H}_2\text{O})^6}{[p(\text{NH}_3)^4 \times p(\text{O}_2)^5]}$	Formel vollständig
1 P	Produkte im Zähler, Edukte im Nenner.	
1 P	Stöchiometrische Koeffizienten als Exponenten korrekt (4, 6, 4, 5).	
1 P	Formel mit Partialdrücken (nicht Konzentrationen) – Kp, nicht Kc.	

**b) Berechnung des Zahlenwerts [5 Punkte]**

1 P	Zähler: $(2,40)^4 \times (3,00)^6 = 33,18 \times 729 = 24.178$	Zwischenschritte
1 P	$(2,40)^4 = 33,18$ ; $(3,00)^6 = 729$	
1 P	Nenner: $(0,50)^4 \times (1,20)^5 = 0,0625 \times 2,488 = 0,1555$	
1 P	$(0,50)^4 = 0,0625$ ; $(1,20)^5 = 2,488$	
1 P	$K_p = 24.178 / 0,1555 \approx 155.500$ ( $\approx 1,55 \times 10^5$ )	±10 % Toleranz

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

1 P	Zählereinheit: $\text{bar}^4 \times \text{bar}^6 = \text{bar}^{10}$	
1 P	Nennereinheit: $\text{bar}^4 \times \text{bar}^5 = \text{bar}^9$	
1 P	Einheit $K_p = \text{bar}^{10} / \text{bar}^9 = \text{bar}^1$ → Einheit: bar	oder Pa, atm

**d) Aussage Kp >> 1 [3 Punkte]**

1 P	$K_p \gg 1$ : Gleichgewicht liegt stark auf der Produktseite (rechts).	
1 P	Im Gleichgewicht deutlich mehr Produkte als Edukte vorhanden.	
1 P	Für die Industrie günstig: hohe Ausbeute an NO ohne extremen Aufwand.	Praxisbezug

**Aufgabe 5: Katalysator und Reaktionskinetik** ▶ Gesamt: 10 Punkte**a) Funktion des Pt/Rh-Katalysators** [3 Punkte]

<b>1 P</b>	Katalysator senkt die Aktivierungsenergie $E_a$ der Reaktion.	
<b>1 P</b>	→ Mehr Teilchen haben bei gleicher Temperatur ausreichend Energie → Reaktion läuft schneller ab.	
<b>1 P</b>	Pt/Rh bietet eine Oberfläche, an der $\text{NH}_3$ und $\text{O}_2$ adsorbieren und leichter reagieren (heterogene Katalyse).	

**b) Katalysator verändert Gleichgewichtslage nicht** [3 Punkte]

<b>1 P</b>	Ein Katalysator beschleunigt Hin- und Rückreaktion gleichermaßen.	<i>Schlüsselaussage</i>
<b>1 P</b>	Da sich das Verhältnis der Reaktionsgeschwindigkeiten nicht ändert, bleibt $K_p$ unverändert.	
<b>1 P</b>	Die Gleichgewichtslage (Konzentrationsverhältnisse) bleibt identisch – nur das Gleichgewicht wird schneller erreicht.	

**c) Reaktionsgeschwindigkeit vs. Gleichgewicht** [2 Punkte]

<b>1 P</b>	Reaktionsgeschwindigkeit: beschreibt, wie schnell Edukte zu Produkten reagieren (kinetische Größe).	
<b>1 P</b>	Chemisches Gleichgewicht: beschreibt das Konzentrationsverhältnis im Endzustand (thermodynamische Größe); unabhängig vom Weg.	

**d) Wirtschaftliche Vorteile des Katalysators** [2 Punkte]

<b>1 P</b>	Niedrigere Temperaturen möglich → Energieeinsparung / geringere Betriebskosten.	<i>je 1 Punkt</i>
<b>1 P</b>	Kürzere Reaktionszeit → höherer Durchsatz / mehr Produkt pro Zeiteinheit.	<i>2 aus 3 genügen</i>
<b>0 P</b>	(Alternativ: längere Lebensdauer des Katalysators = geringere Wartungskosten)	<i>Bonuspunkt möglich</i>

**Allgemeine Korrekturhinweise**

- ▶ Fachbegriffe müssen sinngemäß korrekt verwendet werden; exakte Formulierungen sind nicht zwingend erforderlich.
- ▶ Rechenaufgaben: Wenn der Ansatz korrekt ist, aber ein Rechenfehler vorliegt → halbe Punktzahl für den Rechenschritt.
- ▶ Einheiten: Fehlende oder falsche Einheit bei Endergebnis = Abzug von 1 Punkt pro Teilaufgabe (max. einmal).
- ▶ Le-Chatelier-Aufgaben: Für volle Punktzahl muss immer (1) Störung benannt, (2) Gegenreaktion erklärt und (3) Richtung der Verschiebung angegeben werden.
- ▶ Bonuspunkte (z. B. Vergleich mit Haber-Bosch, Praxisbezug) können Punktabzüge an anderer Stelle ausgleichen, max. jedoch die Aufgabenhöchstpunktzahl.

– Ende des Erwartungshorizonts –