

# THEORETISCHE PRÜFUNG




**51st — International  
Chemistry Olympiad  
France — Paris — 2019**

Making science together!

2019-07-26



 <p>Liberté • Égalité • Fraternité RÉPUBLIQUE FRANÇAISE</p>	<p>MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE ET DE LA JEUNESSE</p>	<p>MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR, DE LA RECHERCHE ET DE L'INNOVATION</p>
--	---	--

## Allgemeine Hinweise

- Die theoretische Prüfung umfasst 72 Seiten.
- Sie können mit der Arbeit beginnen, sobald das „Start“-Zeichen gegeben wird.
- Sie haben dann 5 Stunden Zeit für die Prüfung.
- Schreiben Sie alle Resultate und Antworten leserlich mit Kugelschreiber in die dafür vorgesehenen Antwortkästchen. Antworten ausserhalb der Antwortkästchen werden nicht bewertet.
- Wenn Sie Notizpapier benötigen, verwenden Sie die Rückseiten der Aufgabenblätter. Bedenken Sie, dass nichts ausserhalb der Antwortkästchen bewertet wird.
- Verwenden Sie lediglich den Stift und den Taschenrechner, welcher Ihnen zu Verfügung gestellt wird.
- Die offizielle englische Version der Prüfung kann – allein zur Klärung von Unklarheiten - angefragt werden.
- Falls Sie während der Prüfung den Saal verlassen müssen (um etwas zu essen oder zu trinken bzw. die Toilette aufzusuchen), halten Sie die entsprechende Karte hoch. Eine Prüfungsaufsicht wird Sie dann begleiten.
- Für Multiple-Choice-Fragen: Falls Sie Ihre Antwort ändern möchten, malen Sie das Antwortkästchen vollständig aus und zeichnen Sie ein neues leeres Kästchen nebenan.
- Die Prüfungsaufsicht wird 30 Minuten vor dem „Stop“-Zeichen eine Warnung geben.
- Unmittelbar nach dem „Stop“-Signal müssen Sie Ihre Arbeit beenden, spätestens aber nach einer halben Minute, ansonsten wird Ihre theoretische Prüfung mit 0 Punkten bewertet.
- Geben Sie das Prüfungsheft nach dem „Stop“-Signal in Ihren Umschlag zurück und warten Sie an Ihrem Platz. Eine Prüfungsaufsicht wird den Umschlag für Sie verschliessen und einsammeln.

**Viel Erfolg!**

## Inhaltsverzeichnis

Diese theoretische Prüfung umfasst 9 unabhängige Aufgaben. Deren relative Gewichtung ist in den Klammern angegeben.

Aufgabe T1: Unendlicher Kasten und Butadien	(6%)	p. 8
Aufgabe T2: Wasserstoffgewinnung durch Spaltung von Wasser	(7%)	p. 14
Aufgabe T3: Zum Silberchlorid	(5%)	p. 21
Aufgabe T4: Vom Schwarzpulver zur Entdeckung des Iods	(7%)	p. 28
Aufgabe T5: Azobenzen – $\beta$ -Cyclodextrin – Komplexe zur Bildung von Nanomaschinen	(8%)	p. 36
Aufgabe T6: Charakterisierung eines Block-Copolymers	(8%)	p. 47
Aufgabe T7: Ringrotation in einem [2]Catenan	(6%)	p. 56
Aufgabe T8: Identifikation und Synthese von Inositolen	(6%)	p. 62
Aufgabe T9: Synthese von Levobupivacain	(7%)	p. 68

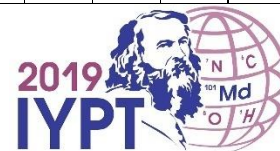
## Physikalische Konstanten und Gleichungen

In diesen Aufgaben wird angenommen, dass die Aktivitäten aller Spezies in wässriger Lösung gut durch ihre jeweilige Konzentration in mol L<sup>-1</sup> angenähert werden können. Zur weiteren Vereinfachung von Formeln wird die Standardkonzentration  $c^\circ = 1 \text{ mol L}^{-1}$  weggelassen.

Avogadrokonstante:	$N_A = 6.022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Universelle Gaskonstante:	$R = 8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Standarddruck:	$p^\circ = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
Atmosphärendruck:	$P_{\text{atm}} = 1 \text{ atm} = 1.013 \text{ bar} = 1.013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
Nullpunkt der Celsius-Skala:	273.15 K
Faradaykonstante:	$F = 9.649 \cdot 10^4 \text{ C mol}^{-1}$
Watt:	1 W = 1 J s <sup>-1</sup>
Kilowattstunde:	1 kWh = 3.6 · 10 <sup>6</sup> J
Plancksches Wirkungsquantum:	$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$
Vakuumlichtgeschwindigkeit:	$c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$
Elementarladung:	$e = 1.6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Elektrische Leistung:	$P = \Delta E \times I$
Wirkungsgrad:	$\eta = P_{\text{erhalten}} / P_{\text{eingesetzt}}$
Planck-Beziehung:	$E = hc / \lambda$
Idealgasgleichung:	$pV = nRT$
Gibbs Energie:	$G = H - TS$
	$\Delta_r G^\circ = -RT \ln K^\circ$
	$\Delta_r G^\circ = -n F E_{\text{Zelle}}^\circ$
	$\Delta_r G = \Delta_r G^\circ + RT \ln Q$
Reaktionsquotient $Q$ einer Reaktion $a \text{ A(aq)} + b \text{ B(aq)} \rightleftharpoons c \text{ C(aq)} + d \text{ D(aq)}$ :	$Q = \frac{[\text{C}]^c [\text{D}]^d}{[\text{A}]^a [\text{B}]^b}$
Henderson - Hasselbalch - Gleichung:	$\text{pH} = \text{p}K_a + \log \frac{[\text{A}^-]}{[\text{AH}]}$
Nernst - Gleichung:	$E = E^\circ - \frac{RT}{zF} \ln Q$
wobei $Q$ der Reaktionsquotient der Reduktionshalbgleichung ist	bei $T = 298 \text{ K}$ , $\frac{RT}{F} \ln 10 \approx 0.059 \text{ V}$
Lambert - Beer - Gesetz:	$A = \epsilon l c$
Integrale Geschwindigkeitsgesetze	
- Nullte Ordnung:	$[\text{A}] = [\text{A}]_0 - kt$
- Erste Ordnung:	$\ln[\text{A}] = \ln[\text{A}]_0 - kt$
- Zweite Ordnung:	$1/[\text{A}] = 1/[\text{A}]_0 + kt$
Halbwertszeit bei erster Ordnung:	$t_{1/2} = \ln 2 / k$
Zahlenmittel der Molmasse $M_n$ :	$M_n = \frac{\sum_i N_i M_i}{\sum_i N_i}$
Gewichtsmittel der Molmasse $M_w$ :	$M_w = \frac{\sum_i N_i M_i^2}{\sum_i N_i M_i}$
Polydispersitätsindex $I_p$ :	$I_p = \frac{M_w}{M_n}$

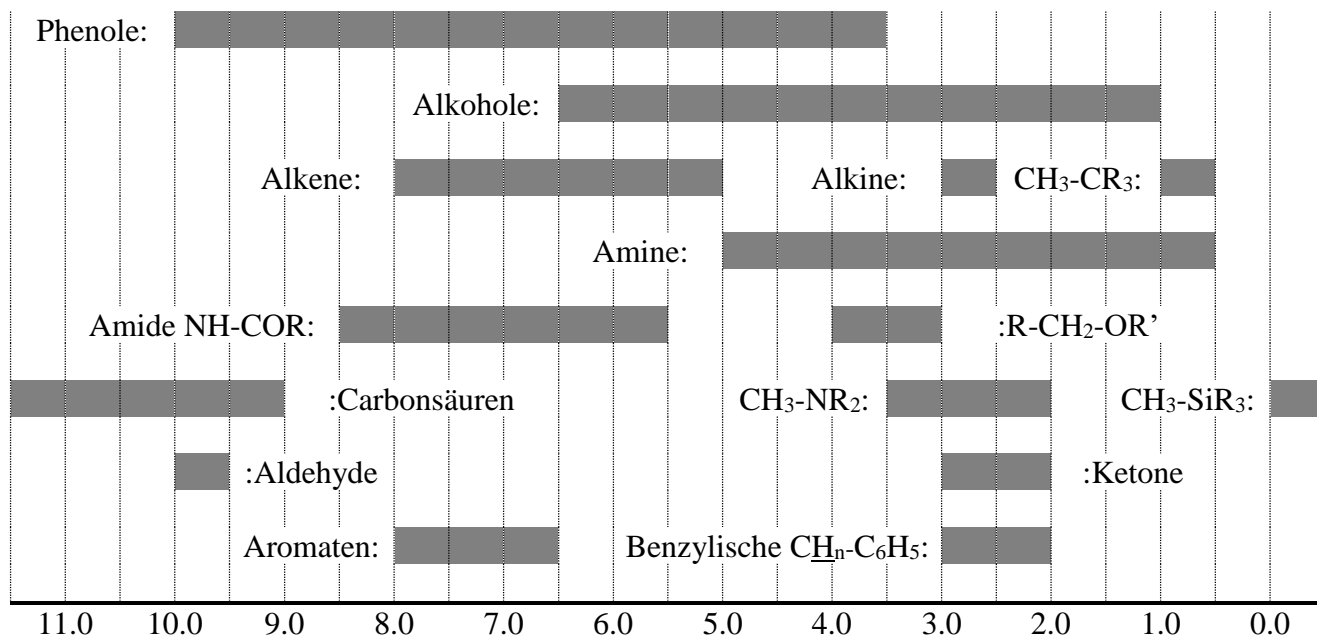
Periodensystem der Elemente

1																	18																														
1 H 1.008																	2 He 4.003																														
3 Li 6.94	4 Be 9.01											5 B 10.81	6 C 12.01	7 N 14.01	8 O 16.00	9 F 19.00	10 Ne 20.18																														
11 Na 22.99	12 Mg 24.31	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.97	16 S 32.06	17 Cl 35.45	18 Ar 39.95																														
19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.87	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.38	31 Ga 69.72	32 Ge 72.63	33 As 74.92	34 Se 78.97	35 Br 79.90	36 Kr 83.80																														
37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.95	43 Tc -	44 Ru 101.1	45 Rh 102.9	46 Pd 106.4	47 Ag 107.9	48 Cd 112.4	49 In 114.8	50 Sn 118.7	51 Sb 121.8	52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3																														
55 Cs 132.9	56 Ba 137.3	57-71 La-Lu	72 Hf 178.5	73 Ta 180.9	74 W 183.8	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.1	79 Au 197.0	80 Hg 200.6	81 Tl 204.4	82 Pb 207.2	83 Bi 209.0	84 Po -	85 At -	86 Rn -																														
87 Fr -	88 Ra -	89-103 Ac-Lr	104 Rf -	105 Db -	106 Sg -	107 Bh -	108 Hs -	109 Mt -	110 Ds -	111 Rg -	112 Cn -	113 Nh -	114 Fl -	115 Mc -	116 Lv -	117 Ts -	118 Og -																														
<table border="1"> <tr> <td>57 La 138.9</td> <td>58 Ce 140.1</td> <td>59 Pr 140.9</td> <td>60 Nd 144.2</td> <td>61 Pm -</td> <td>62 Sm 150.4</td> <td>63 Eu 152.0</td> <td>64 Gd 157.3</td> <td>65 Tb 158.9</td> <td>66 Dy 162.5</td> <td>67 Ho 164.9</td> <td>68 Er 167.3</td> <td>69 Tm 168.9</td> <td>70 Yb 173.0</td> <td>71 Lu 175.0</td> </tr> <tr> <td>89 Ac -</td> <td>90 Th 232.0</td> <td>91 Pa 231.0</td> <td>92 U 238.0</td> <td>93 Np -</td> <td>94 Pu -</td> <td>95 Am -</td> <td>96 Cm -</td> <td>97 Bk -</td> <td>98 Cf -</td> <td>99 Es -</td> <td>100 Fm -</td> <td>101 Md -</td> <td>102 No -</td> <td>103 Lr -</td> </tr> </table>																		57 La 138.9	58 Ce 140.1	59 Pr 140.9	60 Nd 144.2	61 Pm -	62 Sm 150.4	63 Eu 152.0	64 Gd 157.3	65 Tb 158.9	66 Dy 162.5	67 Ho 164.9	68 Er 167.3	69 Tm 168.9	70 Yb 173.0	71 Lu 175.0	89 Ac -	90 Th 232.0	91 Pa 231.0	92 U 238.0	93 Np -	94 Pu -	95 Am -	96 Cm -	97 Bk -	98 Cf -	99 Es -	100 Fm -	101 Md -	102 No -	103 Lr -
57 La 138.9	58 Ce 140.1	59 Pr 140.9	60 Nd 144.2	61 Pm -	62 Sm 150.4	63 Eu 152.0	64 Gd 157.3	65 Tb 158.9	66 Dy 162.5	67 Ho 164.9	68 Er 167.3	69 Tm 168.9	70 Yb 173.0	71 Lu 175.0																																	
89 Ac -	90 Th 232.0	91 Pa 231.0	92 U 238.0	93 Np -	94 Pu -	95 Am -	96 Cm -	97 Bk -	98 Cf -	99 Es -	100 Fm -	101 Md -	102 No -	103 Lr -																																	



$^1\text{H}$  NMR

## Chemische Verschiebung von Wasserstoff (in ppm / TMS)



## H-H Kopplungskonstanten (in Hz)

Wasserstoffart	$ J_{ab} $ (Hz)
$\text{R}_2\text{CH}_a\text{H}_b$	4-20
$\text{R}_2\text{H}_a\text{C-CR}_2\text{H}_b$	2-12 falls frei drehbar: 6-8 ax.-ax. (Cyclohexan): 8-12 ax.-eq. oder eq.-eq. (Cyclohexan): 2-5
$\text{R}_2\text{H}_a\text{C-CR}_2\text{-CR}_2\text{H}_b$	falls frei drehbar: < 0.1 ansonst (starr): 1-8
$\text{RH}_a\text{C=CRH}_b$	<i>cis</i> : 7-12 <i>trans</i> : 12-18
$\text{R}_2\text{C=CH}_a\text{H}_b$	0.5-3
$\text{H}_a(\text{CO})\text{-CR}_2\text{H}_b$	1-3
$\text{RH}_a\text{C=CR-CR}_2\text{H}_b$	0.5-2.5

eq. = äquatorial, ax. = axial

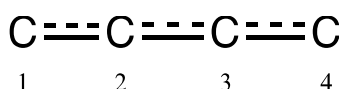
## IR-Spektroskopie-Tabelle

Schwingungsmodus	$\sigma$ (cm <sup>-1</sup> )	Intensität
Alkohole O-H (Streckung)	3600-3200	stark
Carbonsäure O-H (Streckung)	3600-2500	stark
N-H (Streckung)	3500-3350	stark
$\equiv$ C-H (Streckung)	3300	stark
=C-H (Streckung)	3100-3000	schwach
C-H (Streckung)	2950-2840	schwach
-(CO)-H (Streckung)	2900-2800	schwach
C $\equiv$ N (Streckung)	2250	stark
C $\equiv$ C (Streckung)	2260-2100	variabel
Aldehyd C=O (Streckung)	1740-1720	stark
Anhydrid C=O (Streckung)	1840-1800; 1780-1740	schwach; stark
Ester C=O (Streckung)	1750-1720	stark
Keton C=O (Streckung)	1745-1715	stark
Amid C=O (Streckung)	1700-1500	stark
Alken C=C (Streckung)	1680-1600	schwach
Aromaten C=C (Streckung)	1600-1400	schwach
CH <sub>2</sub> (Biegung/Beugung)	1480-1440	mittel-stark
CH <sub>3</sub> (Biegung/Beugung)	1465-1440; 1390-1365	mittel-stark
C-O-C (Streckung)	1250-1050	stark
C-OH (Streckung)	1200-1020	stark
NO <sub>2</sub> (Streckung)	1600-1500; 1400-1300	stark

Aufgabe T1	Frage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Gesamt
6% der Gesamtpunkte	max. Punkte	3	4	4	2	3	2	2	4.5	2.5	3	3	33
	Punkte												

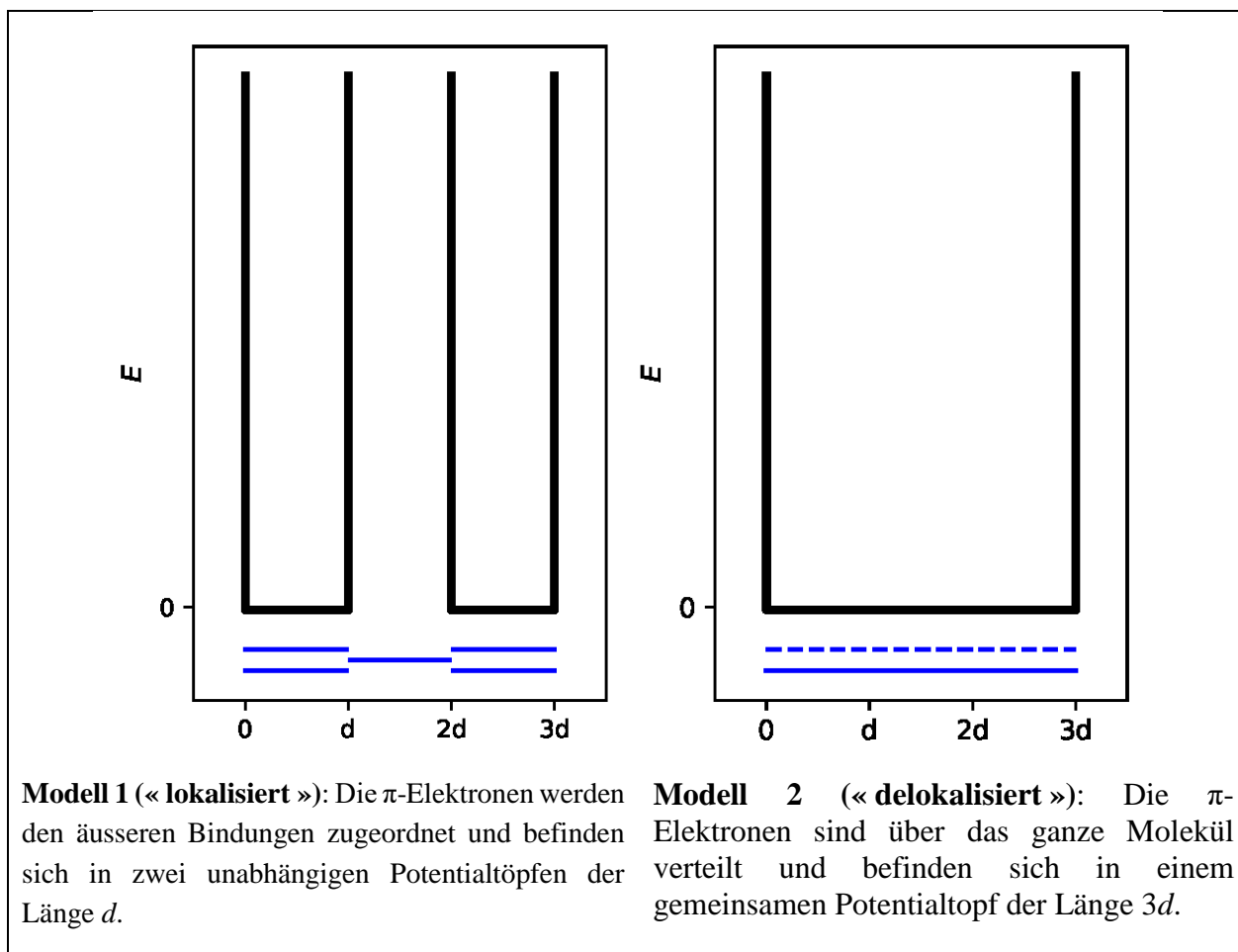
## Aufgabe T1: Unendlicher Kasten und Butadien

Das Molekül Buta-1,3-dien wird oft als  $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$  mit abwechselnden Einfach- und Doppelbindungen geschrieben. Dennoch wird dessen chemische Reaktivität durch diese Beschreibung nicht hinreichend erfasst und eine Beschreibung durch  $\pi$ -Elektronen, verteilt entlang aller 3 Bindungen, ist zweckmässiger:



Dieses System kann als eindimensionaler Kasten (*d.h.* unendlich tiefer Potentialtopf), in dem sich die Elektronen frei bewegen können, beschrieben werden. Die Energie eines Elektrons in einem solchen unendlich tiefen Kasten der Länge  $L$  ist:  $E_n = \frac{n^2 h^2}{8m_e L^2}$ , mit  $n$  als ganze Zahl **grösser null**.

- Zwei verschiedene Modelle werden untersucht. **Skizzieren** Sie mindestens die drei niedrigsten Energielevel  $E_n$  **für beide Modelle** in den dazugehörigen Diagrammen. Zeigen Sie dabei, dass die relativen Energieniveaus sich zwischen den verschiedenen Modellen unterscheiden.





2. **Platzieren** Sie die  $\pi$ -Elektronen für Modell 1 in das vorherige Diagramm und **drücken** Sie die Gesamtenergie des  $\pi$ -System von Modell 1 in Abhängigkeit  $h$ ,  $m_e$  und  $d$  aus.

$$E(1) =$$

3. **Platzieren** Sie die  $\pi$ -Elektronen für Modell 2 in das vorherige Diagramm und **drücken** Sie die Gesamtenergie des  $\pi$ -System von Modell 2 in Abhängigkeit  $h$ ,  $m_e$  und  $d$  aus.

$$E(2) =$$

Die Konjugationsenergie ist die Gesamtenergie des tatsächlichen  $\pi$ -Systems abzüglich der Summe der Energien von Ethylenmolekülen mit der gleichen Anzahl an Elektronen.

4. **Drücken** Sie die Konjugationsenergie  $\Delta E_c$  von Butadien in Abhängigkeit von  $h$ ,  $m_e$  und  $d$  aus.

$$\Delta E_c =$$

Da die Modelle 1 und 2 zu stark vereinfacht sind, wird im Folgenden ein detaillierteres Modell eingeführt.

5. **Zeichnen** Sie drei andere Resonanzstrukturen von Butadien als Strukturformeln.



Um die Grösse der Kohlenstoffatome miteinzubeziehen, wird Modell 2 wie folgt zu Modell 3 erweitert:

- Die neue Länge des Kastens ist  $L$  und reicht von 0 bis  $L$ ;
- Die Kohlenstoffatome befinden sich an den Punkten  $L/8$ ,  $3L/8$ ,  $5L/8$  und  $7L/8$ .

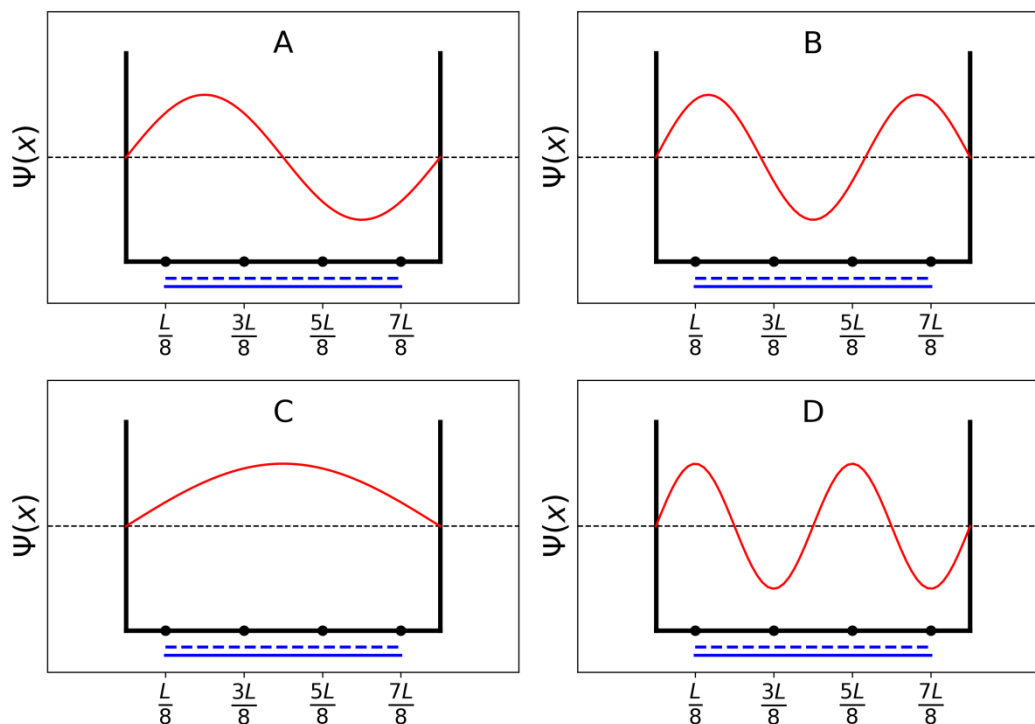
Für jedes Niveau  $n$  wird die  $\pi$ -Wellenfunktion beschrieben als:

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$

und die  $\pi$ -Elektronendichte für dieses System mit  $N$   $\pi$ -Elektronen ist:

$$\rho(x) = 2 \sum_{i=1}^{N/2} |\psi_i(x)|^2$$

Die vier  $\pi$ -Wellenfunktion mit den entsprechenden Molekülorbitalen des  $\pi$ -System sind **in zufälliger Reihenfolge** unten dargestellt:



6. **Ordnen** Sie die Energien der vier  $\pi$ -Wellenfunktionen ( $E_A$ ,  $E_B$ ,  $E_C$  und  $E_D$ ).

$< \quad < \quad <$

7. **Nennen** Sie die Orbitale (A, B, C oder D), welche in Butadien mit Elektronen gefüllt sind.

8. **Geben** Sie für Modell 3 die Werte der  $\pi$ -Wellenfunktionen  $\psi_n$  für die besetzten Niveaus an den Positionen 0,  $L/4$  und  $L/2$ , für  $n = 1$  und  $n = 2$  in Abhängigkeit von  $L$  an.

$$\psi_1(0) =$$

$$\psi_1\left(\frac{L}{4}\right) =$$

$$\psi_1\left(\frac{L}{2}\right) =$$

$$\psi_2(0) =$$

$$\psi_2\left(\frac{L}{4}\right) =$$

$$\psi_2 \left( \frac{L}{2} \right) =$$

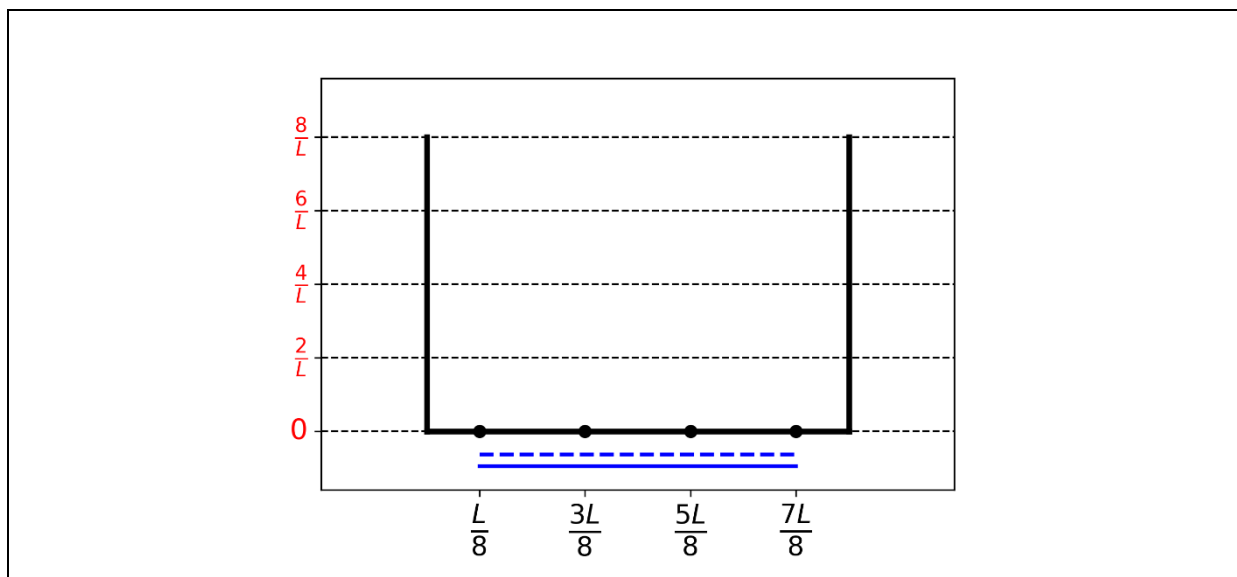
9. **Geben** Sie für Modell 3 die Werte der  $\pi$ -Elektronendichte an den Positionen 0,  $L/4$  und  $L/2$  an.

$$\rho(0) =$$

$$\rho \left( \frac{L}{4} \right) =$$

$$\rho \left( \frac{L}{2} \right) =$$

10. **Zeichnen** Sie die  $\pi$ -Elektronendichte zwischen 0 und  $L$ .



11. **Ordnen** Sie die folgenden CC-Bindungen (B1, B2, ..., B5) von kurz nach lang. Verwenden Sie die Symbole = und <:

- B1: C1C2 im Butadienmolekül
- B2: C2C3 im Butadienmolekül
- B3: C3C4 im Butadienmolekül
- B4: CC im Ethanmolekül
- B5: CC im Ethenmolekül

Aufgabe T2	Frage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Gesamt
7% der Gesamtpunkte	max. Punkte	1	4	2	3	3	6	4	1	8	2	34
	Punkte											

## Aufgabe T2: Wasserstoffgewinnung durch Spaltung von Wasser

Daten:

Verbindung	H <sub>2</sub> (g)	H <sub>2</sub> O(l)	H <sub>2</sub> O(g)	O <sub>2</sub> (g)
$\Delta_f H^\circ$ (kJ mol <sup>-1</sup> )	0	-285.8	-241.8	0
$S_m^\circ$ (J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	130.6	69.9	188.7	205.2

Molekularer Wasserstoff (H<sub>2</sub>) kann als Alternative zu fossilen Brennstoffen verwendet werden. Die grösste Herausforderung dabei liegt in der Senkung der Kosten und der Umweltbelastung in der Produktion von H<sub>2</sub>. In dieser Hinsicht ist die Spaltung von Wasser eine vielversprechende Zukunftstechnologie.

1. **Schreiben** Sie die ausgeglichene Reaktionsgleichung der Spaltung von flüssigem Wasser auf. Verwenden Sie einen stöchiometrischen Koeffizienten von 1 für Wasser.

2. **Begründen** Sie anhand einer Berechnung, ob die Reaktion bei 298 K spontan abläuft. Verwenden Sie nur die angegebenen thermodynamischen Daten.

Berechnung:

Läuft die Reaktion spontan ab?

Ja
  Nein

Die Spaltung von Wasser kann elektrochemisch mit zwei Elektroden, die mit einem Generator verbunden sind, in einem sauren Wasserbad durchgeführt werden (siehe Abb. 1). Gasblasen bilden sich an beiden Elektroden.

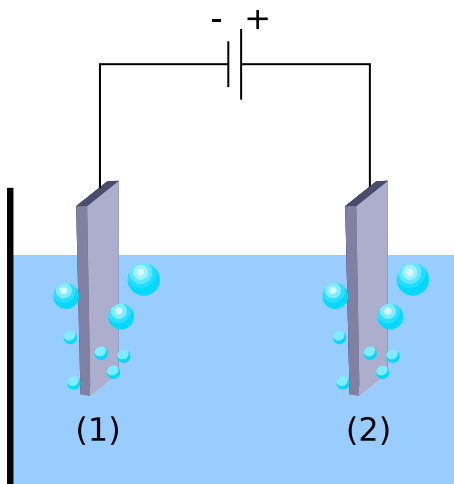


Abb. 1 – Elektrochemische Zelle zur Spaltung von Wasser.

3. **Notieren** Sie die ausgeglichenen Halbzellgleichungen für beide Elektroden.

Elektrode (1):

Elektrode (2):

4. **Bestimmen** Sie ausgehend von den thermodynamischen Daten (oder Frage 2) den Wert  $\Delta E_{\text{th}}$  zwischen den Elektroden bei 298 K (auf 3 Nachkommastellen genau). Nehmen Sie dazu an, dass Reaktanden und Produkte in ihrem Standardzustand vorliegen. Vergleichen Sie Ihr Resultat mit der tatsächlich anzulegenden Spannung  $\Delta E_{\text{angelegt}}$ , damit die Reaktion abläuft. **Kreuzen** Sie die richtige Bedingung an.

Berechnung:

$\Delta E_{\text{angelegt}} = \Delta E_{\text{th}}$

$\Delta E_{\text{angelegt}} > \Delta E_{\text{th}}$  , wobei  $\Delta E_{\text{th}} = \dots\dots\dots$  V (auf 3 Nachkommastellen)

$\Delta E_{\text{angelegt}} < \Delta E_{\text{th}}$

Falls Sie  $\Delta E_{\text{th}}$  nicht berechnen können, nehmen Sie für den Rest der Aufgabe 1.200 V als Wert an.

Experimentell wird eine höhere Spannung benötigt, um die Spaltung von Wasser zu erreichen. Für eine vorgegebene Pt-Kathode hängt die notwendige Mindestspannung  $\Delta E_{\min}$  für die Wasserspaltung wie folgt vom Anodenmaterial ab:

Anode	$\Delta E_{\min}$ (V)
IrO <sub>x</sub>	1.6
NiO <sub>x</sub>	1.7
CoO <sub>x</sub>	1.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.9

Der Unterschied zwischen  $\Delta E_{\min}$  und  $\Delta E_{\text{th}}$  verursacht Energieverluste eines solchen Geräts.

5. **Geben** Sie für ein solches Gerät den allgemeinen Ausdruck der Leistungseffizienz  $\eta_{\text{elec}}$  (Anteil der eingesetzten Energie, welcher zu Wasserspaltung führt) in Abhängigkeit von  $\Delta E_{\text{th}}$  und  $\Delta E_{\min}$  an. **Berechnen** Sie weiter die Leistungseffizienz der Wasserelektrolyse für eine Pt-Kathode und eine Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Anode. **Geben** Sie die effizienteste Anode unter der Annahme einer identischen Stromstärke  $I$  an.

$\eta_{\text{elec}} =$

Leistungseffizienz für eine Pt-Kathode und eine Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Anode:

$\eta_{\text{elec}} =$                       %

Effizienteste Anode:

*Falls Sie  $\eta_{\text{elec}}$  nicht berechnen können, nehmen Sie für den Rest der Aufgabe den Wert  $\eta_{\text{elec}} = 75\%$  an.*

Eine Alternative zur Wasserelektrolyse ist die direkte, photokatalytische Wasserspaltung, bei der ein Halbleiter durch die Absorption von Licht aktiviert wird.



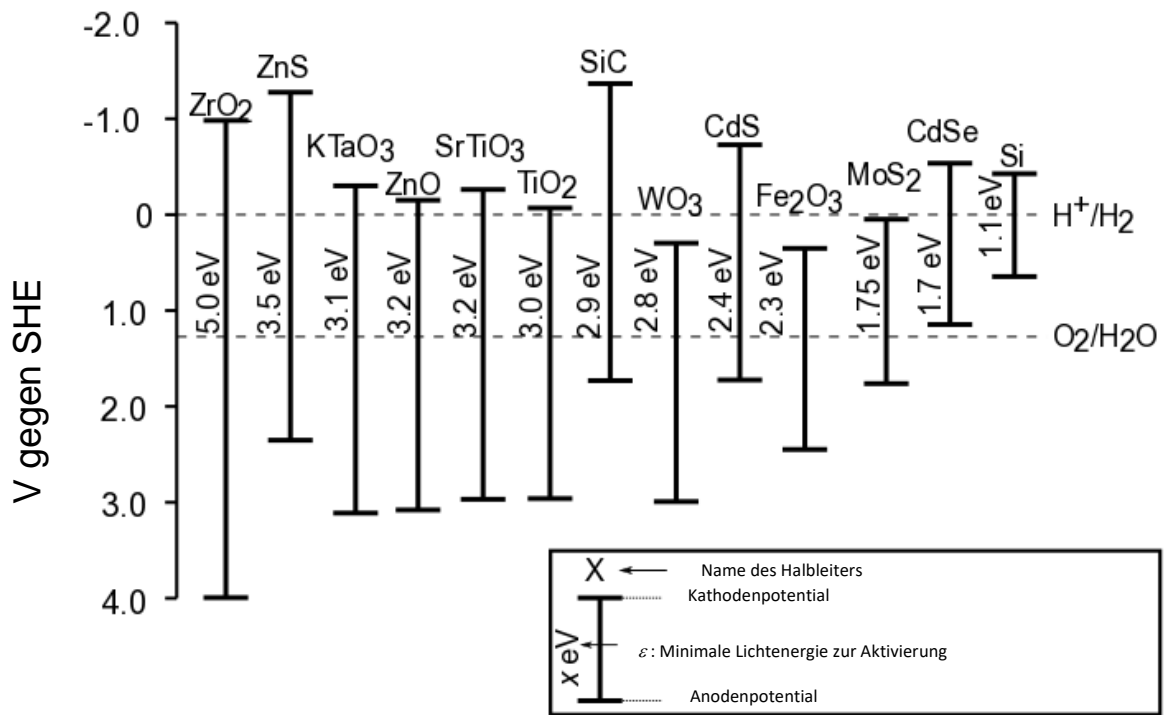


Abb. 2 – Bedingung für die Aktivierung und entsprechende Elektrodenpotentiale für verschiedene Halbleiter. Gestrichelte Linien geben die Potentiale für die Wasseroxidation und -reduktion an. SHE (Standard Hydrogen Electrode, Standardwasserstoffelektrode).

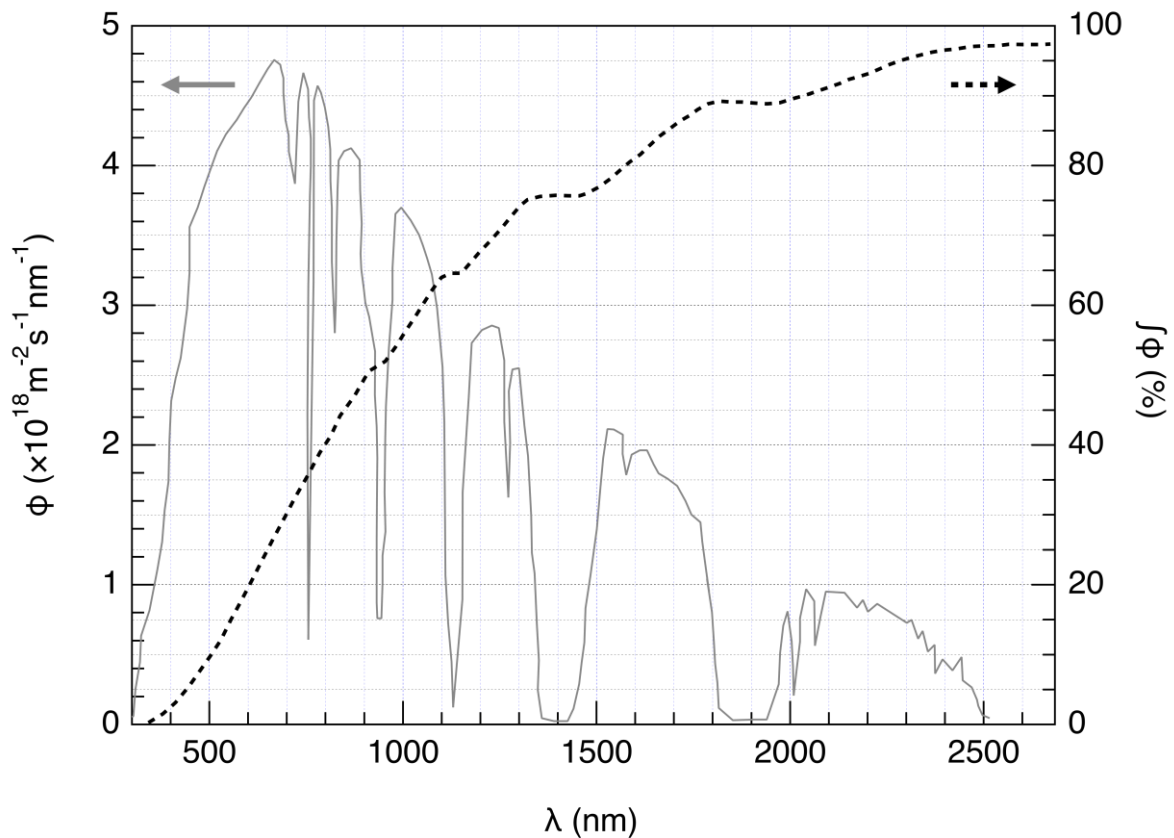


Abb. 3 – Linke Achse: Solarer Photonenfluss  $\phi$ . Der Photonenfluss ist die Anzahl an Photonen, welche pro Fläche und Zeit auf einen Halbleiter auftreffen. – Rechte Achse und gestrichelte Linie: Integrierter (engl.: cumulative) Photonenfluss (d.h. Anteil des Photonenflusses mit kürzerer Wellenlänge).

6. **Schätzen** Sie den Anteil des solaren Photonenflusses ab, welcher die folgenden Halbleiter aktivieren kann:  $\text{TiO}_2$ , CdS, Si. **Geben** Sie ausdrücklich die Gleichungen und Einheiten an, welche Sie für Ihre Berechnungen benutzen.

Erklärung / Berechnung:

	Ungefährer Anteil
$\text{TiO}_2$	%
CdS	%
Si	%

Die Aktivierung eines Halbleiters verändert dessen Oberflächenpotentiale so, dass diese als zwei Elektroden mit verschiedenen Potentialen betrachtet werden können.

7. **Wählen** Sie in der folgenden Liste die Halbleiter aus, welche nach Aktivierung sowohl als Kathode als auch als Anode für die Spaltung von Wasser dienen können. Verwenden Sie die Daten aus Abb. 2.

<input type="checkbox"/> ZrO <sub>2</sub>	<input type="checkbox"/> ZnO	<input type="checkbox"/> TiO <sub>2</sub>	<input type="checkbox"/> WO <sub>3</sub>
<input type="checkbox"/> CdS	<input type="checkbox"/> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<input type="checkbox"/> CdSe	<input type="checkbox"/> Si

8. **Geben** Sie den Halbleiter an, welcher bei einer gegebenen Lichteinstrahlung am effizientesten für die Spaltung von Wasser ist, wenn dieser Halbleiter sowohl als Kathode als auch als Anode verwendet wird.

Vor Kurzem wurde die Entwicklung von H<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> bei  $T = 25\text{ °C}$  und  $p_{\text{atm}}$  an einem Halbleiter, welcher mit nachgestelltem Sonnenlicht bestrahlt wurde, untersucht. Bei einer auftreffenden Lichtleistung von  $P = 1.0\text{ kW m}^{-2}$  auf einer Photoelektrode mit einer Fläche von  $S = 16\text{ mm}^2$ , wurde eine Entwicklung von  $V = 0.37\text{ cm}^3$  an H<sub>2</sub>(g) nach der Zeit  $\Delta t = 1$  Stunde gemessen.

9. **Berechnen** Sie die Leistungseffizienz  $\eta_{\text{direkt}}$  der Umsetzung.

Berechnung:

$$\eta_{\text{direkt}} = \quad \quad \quad \%$$

Falls Sie  $\eta_{\text{direkt}}$  nicht berechnen können, nehmen Sie für den Rest der Aufgabe  $\eta_{\text{direkt}} = 10\%$  an.

Folglich können zwei Methoden zur Wasserstoffherzeugung mittels Sonnenenergie verglichen werden: direkte Photokatalyse und indirekte Photoelektrolyse unter Verwendung eines Photovoltaikmoduls und einer Elektrolyseapparatur. Die Effizienz kommerzieller Photovoltaikmodule liegt etwa bei  $\eta_{\text{Modul}} = 20\%$ .

10. **Vergleichen** Sie die Leistungseffizienz beider Methoden,  $\eta_{\text{direkt}}$  und  $\eta_{\text{indirekt}}$ , wobei bei der Elektrolyse  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - und Pt-Elektroden verwendet werden.

Berechnung:

$\eta_{\text{direkt}} > \eta_{\text{indirekt}}$

$\eta_{\text{direkt}} \approx \eta_{\text{indirekt}}$

$\eta_{\text{direkt}} < \eta_{\text{indirekt}}$

Aufgabe T3	Frage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Gesamt
5% der Gesamtpunkte	max. Punkte	1	3	3	3	4	2	7	2	2	3	4	6	40
	Punkte													

## Aufgabe T3: Zum Silberchlorid

### Daten bei 298K:

$$pK_{s1}(\text{AgCl}) = 9.7; pK_{s2}(\text{Ag}_2\text{CrO}_4) = 12$$

$$\text{Bildungskonstante des Komplexes } [\text{Ag}(\text{NH}_3)_n]^+: \beta_n = 10^{7.2}$$

Potentiale bezogen auf die Normalwasserstoffelektrode:

$$\text{Standardpotential von } \text{Ag}^+/\text{Ag(s)}: E^\circ(\text{Ag}^+/\text{Ag(s)}) = 0.80 \text{ V}$$

$$\text{Apparentes Potential von } \text{O}_2(\text{aq})/\text{HO}^-(\text{aq}) \text{ (in Meerwasser)}: E'(\text{O}_2(\text{aq})/\text{HO}^-(\text{aq})) = 0.75 \text{ V}$$

### Teil A: Zitate aus einer Chemievorlesung von Louis Joseph Gay-Lussac

Die folgenden Zitate aus einer Chemievorlesung von Louis Joseph Gay-Lussac (frz. Chemiker und Physiker, 1778–1850) betreffen einige Eigenschaften von Silberchlorid.

**Zitat A:** „Ich spreche nun über Silberchlorid, einen milchig-weißen Feststoff. Er kann leicht erhalten werden, wenn man Chlorwasserstoffsäure in eine wässrige Lösung von Silbernitrat tropft.“

**Zitat B:** „Dieses Salz ist geschmacklos, da es schwerlöslich ist“

**Zitat C:** „Diese Verbindung ist völlig unlöslich in Alkohol und sogar in Säuren, ausgenommen konzentrierter Salzsäure, in welcher es sich freilich löst.“

**Zitat D:** „Andererseits ist Silberchlorid sehr gut in wässriger Ammoniaklösung löslich.“

**Zitat E:** „Und dann können wir das Silberchlorid wieder zum Vorschein bringen, indem wir eine Säure hinzufügen, die mit dem Ammoniak reagiert.“

**Zitat F:** „Wenn Sie ein Silbergefäß verwenden, um Salzwasser aus dem Meer einzudampfen, erhalten Sie Natriumchlorid, welches mit einem milchig-weißen Feststoff verunreinigt ist.“

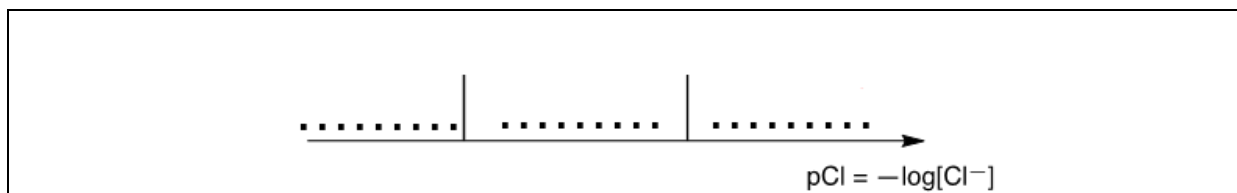
1. **Zitat A: Schreiben** Sie eine ausgeglichene Gleichung für die Synthese von  $\text{AgCl(s)}$  auf.

2. **Zitat B: Berechnen** Sie die Löslichkeit  $s$  von  $\text{AgCl(s)}$  in Wasser bei 298 K in  $\text{mol L}^{-1}$ .

Berechnung:

$s =$   $\text{mol L}^{-1}$

3. **Zitat C:** In Lösung mit hoher Chloridionenkonzentration wird ein Komplex im stöchiometrischen Verhältnis 1:2 gebildet. Gegeben ist eine rein qualitative Achse, entlang derer  $pCl$  von links nach rechts größer wird. **Schreiben** Sie auf die vorgesehenen Linien die jeweils dominierende Silberspezies. Zahlenwerte für  $pCl$  an den Grenzen werden nicht von Ihnen erwartet.



**Zitat D:** Bei Zusatz von Ammoniak zu Silberchlorid wird ein wohldefinierter Komplex der Stöchiometrie  $n$  gebildet.

4. **Schreiben** Sie eine ausgeglichene Gleichung für die Bildung des Komplexes  $[Ag(NH_3)_n]^+$  aus Silberchlorid an und **berechnen** Sie die entsprechende Gleichgewichtskonstante.

Gleichung:

Berechnung:

$K =$

*Wenn Sie  $K$  nicht berechnen können,  
verwenden Sie den folgenden Wert für den Rest der Aufgabe:  $K = 10^{-3}$*

5. Zu 0.1 mol Silberchlorid in 1 L Wasser wird Ammoniak zugesetzt, bis das letzte Körnchen Feststoff verschwindet. In diesem Moment ist  $[\text{NH}_3] = 1.78 \text{ mol L}^{-1}$ . **Ermitteln** Sie die Stöchiometrie des Komplexes unter Vernachlässigung von Verdünnungseffekten.

Berechnung:

$$n =$$

6. **Schreiben** Sie die ausgeglichene Gleichung für die chemische Reaktion aus **Zitat E**.

7. Wir nehmen an, dass Meerwasser leicht basisch und reich an Sauerstoff ist, und dass metallisches Silber den Sauerstoff unter diesen Bedingungen reduzieren kann. **Geben** Sie eine abgestimmte Gleichung für die Bildung des in **Zitat F** erwähnten Feststoffs an. Wählen Sie dabei den stöchiometrischen Koeffizienten 1 für Sauerstoff. **Berechnen** Sie die entsprechende Gleichgewichtskonstante bei 298 K.

Gleichung:

Berechnung:

$K =$



**Teil B: Mohrsche Titration**

Die Mohrsche Methode besteht in der Titration von  $\text{Cl}^-$  mit  $\text{Ag}^+$  in Gegenwart von Kaliumchromat ( $2 \text{K}^+$ ,  $\text{CrO}_4^{2-}$ ). Drei Tropfen ( $\sim 0.5 \text{ mL}$ ) einer  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  Lösung mit etwa  $7.76 \cdot 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$  werden zu  $V_0 = 20.00 \text{ mL}$  einer Natriumchloridlösung unbekannter Konzentration  $C_{\text{Cl}}$  gegeben. Diese Lösung wird dann mit Silbernitrat ( $\text{Ag}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) mit  $C_{\text{Ag}} = 0.050 \text{ mol L}^{-1}$  titriert, was sofort zur Bildung des Feststoffs **A** führt. Ein roter Niederschlag (Feststoff **B**) erscheint bei  $V_{\text{Ag}} = 4.30 \text{ mL}$ .

8. **Schreiben** Sie ausgeglichene Gleichungen für die beiden Reaktionen in diesem Experiment.  
**Berechnen** Sie die entsprechenden Gleichgewichtskonstanten.

	$K^{\circ}_1 =$
	$K^{\circ}_2 =$

9. **Identifizieren** Sie die Feststoffe.

Feststoff <b>A</b> :
Feststoff <b>B</b> :

10. **Berechnen** Sie die unbekannte Chloridkonzentration  $C_{\text{Cl}}$  in der Natriumchloridlösung

Berechnung:	
	$C_{\text{Cl}} =$ mol $\text{L}^{-1}$
<i>Wenn Sie <math>C_{\text{Cl}}</math> nicht berechnen können, verwenden Sie <math>C_{\text{Cl}} = 0.010 \text{ mol L}^{-1}</math> im Rest dieser Aufgabe.</i>	

11. **Berechnen** Sie das minimale Volumen  $V_{\text{Ag}}(\text{min})$ , bei dem  $\text{AgCl}(\text{s})$  ausfällt.

Berechnung:

$$V_{\text{Ag}}(\text{min}) = \quad \text{mL}$$

12. **Berechnen** Sie die Restkonzentration an Chloridionen  $[\text{Cl}^-]_{\text{res}}$  an dem Punkt, wo Silberchromat auszufallen beginnt. **Begründen** Sie durch Vergleich zweier Werte, dass  $\text{CrO}_4^{2-}$  ein guter Indikator ist.

Berechnung:

$$[\text{Cl}^-]_{\text{res}} = \quad \quad \quad \text{mol L}^{-1}$$

$\text{CrO}_4^{2-}$  ist ein guter Indikator, weil:

Aufgabe T4 7% der Gesamt- punkte	Frage	1	2	3	4	5	6	7	8	Gesamt
	max. Punkte	6	9	8	5	6	2	2	12	50
	Punkte									

## Aufgabe T4: Vom Schwarzpulver zur Entdeckung des Iods

Im 19. Jahrhundert hatte sich der französische Unternehmer B. Courtois auf die Produktion von Nitrat **A** ( $M_A(NO_3)_m$ ), welches zur Schwarzpulverherstellung verwendet wird, spezialisiert. Ursprünglich wurde **A** aus Asien importiert. Später wurde es aus Nitrat **B** ( $M_B(NO_3)_n$ ) hergestellt, wobei eine Austauschreaktion mit der aus Algen erhaltenen Verbindung **C** verwendet wurde.

- A** und **B** sind wasserfreie Nitrate von Alkali- oder Erdalkalimetallen ( $M_A$  und  $M_B$ ). Eines der Salze enthält mehr als 1 % (m/m) nichtmetallischer Verunreinigungen, das andere enthält  $9 \pm 3$  % (m/m) der Verunreinigungen. Die Gehalte der Metalle  $M_A$  und  $M_B$  der Proben betragen 38.4 % (m/m) bzw. 22.4 % (m/m). **Ermitteln** Sie die Formeln von **A** und **B** und begründen Sie Ihre Antwort durch eine **Berechnung**.



2. Berechnen Sie die Zusammensetzung (in % m/m) der Mischung **E**. Bedenken Sie, dass diese nur **A** und **B** und keine weiteren Verunreinigungen enthielt und dass **C** in reinem, wasserfreien Zustand eingesetzt wurde.

**A:**                                  % (m/m)                  und    **B:**                                  % (m/m)

3. **Ermitteln** Sie die Formel der Verbindungen **C** und **D** und **schreiben** Sie ausgeglichene Gleichungen für die Reaktion von **B** mit **C** auf.

**C:**und **D:**Reaktion von **B** mit **C**:

Um 1811 beobachtete Courtois bei der Arbeit mit Algenasche, dass Kupferkessel schneller als andere abgenutzt wurden. Als er dieses Phänomen näher untersuchte, kam seine Katze ins Labor und verschüttete konzentrierte Schwefelsäure über die getrocknete Algenasche. Sofort kamen violette Nebel aus dem Kessel (**1**, Schwefelsäure ist das Oxidationsmittel): Iod ( $I_2$ ) war soeben von der Katze entdeckt worden. Iod war die Ursache für die Korrosion des Kupfers (**2**). Wegen der medizinischen Anwendbarkeit von Iod, eröffnete Courtois kurzerhand eine neue Manufaktur, um es dort allerdings durch Reaktion der Algen mit Chlor herzustellen (**3**).

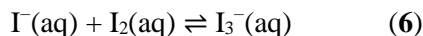
Heute wird Iod aus einigen Ausgangsstoffen ( $NO_3^-$ ,  $I^-$ ,  $H^+$ ) (**4**) oder ( $IO_3^-$ ,  $I^-$ ,  $H^+$ ) (**5**) hergestellt.

4. **Geben** Sie ausgeglichene Gleichungen für die Reaktionen **1–5** an.

<b>1</b>
<b>2</b>
<b>3</b>
<b>4</b>
<b>5</b>

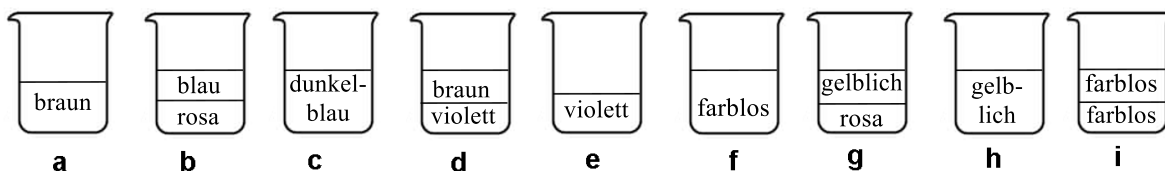
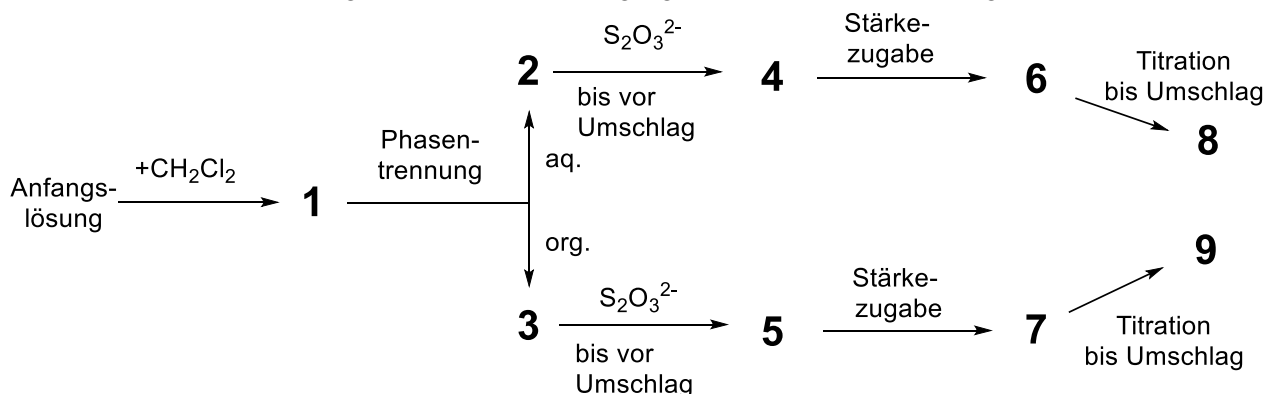


Die Löslichkeit von Iod in Wasser ist sehr gering, wird aber durch Zusatz von Iodidionen deutlich erhöht. Zusammen bilden sie Ionen wie Triiodid,  $I_3^-$ :



Gleichgewicht (6) kann untersucht werden, indem man  $I_2$  mit Dichlormethan extrahiert. Dabei lösen sich  $I^-$  und  $I_3^-$  nicht in organischen Lösungsmitteln,  $I_2$  jedoch schon. Nach Extraktion ist Iod in Dichlormethan 15-mal konzentrierter als im Wasser.

Das folgende Experiment wurde ausgeführt: Zur Herstellung der Anfangslösung wurden einige Kristalle festen Iods in 50.0 mL einer wässrigen Kaliumiodidlösung (0.1112 g) gelöst. Dann wurden 50.0 mL Dichlormethan zugefügt, die Mischung wurde bis zur Gleichgewichtseinstellung heftig geschüttelt. Nach Phasentrennung wurden beide Phasen mit 16.20 mL (organische Phase) bzw. 8.00 mL (wässrige Phase) einer wässrigen Lösung von Natriumthiosulfat Pentahydrat (14.9080 g in 1.000 L Lösung) titriert, wobei auch Stärke zugesetzt wurde. Der Vorgang wird hier schematisch dargestellt:



5. **Ordnen** Sie jedem Schritt im Schema (1 – 9) die richtige Abbildung (a - i) zu.

Schritt	Abbildung
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	

6. **Geben** Sie abgestimmte Gleichungen für die beiden Reaktionen an, die in der wässrigen Phase zwischen Iodspezies und Natriumthiosulfat auftreten können.

7. **Berechnen** Sie die Masse von Iod, die zur Herstellung der Anfangslösung verwendet wurde.

$m(\text{I}_2) =$  g

8. **Berechnen** Sie für das Gleichgewicht (Reaktion 6) die Gleichgewichtskonstante  $K^\ominus$ .

$K^\circ =$

Aufgabe T5 8% der Gesamtpunkte	Frage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Gesamt
	max. Punkte	3	4	4	2	5	5	4	3	5	2	2	2	41
	Punkte													

## Aufgabe T5: Azobenzen – $\beta$ -Cyclodextrin – Komplexe zur Bildung von Nanomaschinen

Nanomaschinen sind molekulare Anordnungen, die Nanobewegungen (etwa zum Transport von Medikamenten) durch die Umwandlung von Energie bewirken. Zahlreiche Nanomaschinen machen sich die strahlungsinduzierte Isomerisierung von Azoverbindungen ( $R-N=N-R'$ ) zu Nutze.

- Zeichnen** Sie die Stereoisomere von Azobenzen ( $H_3C_6-N=N-C_6H_5$ ) und **zeichnen** Sie in jeder Struktur eine Linie zwischen den beiden Kohlenstoffatomen mit dem größten Abstand. **Vergleichen** Sie diese beiden Abstände ( $d_{trans}$  and  $d_{cis}$ ).

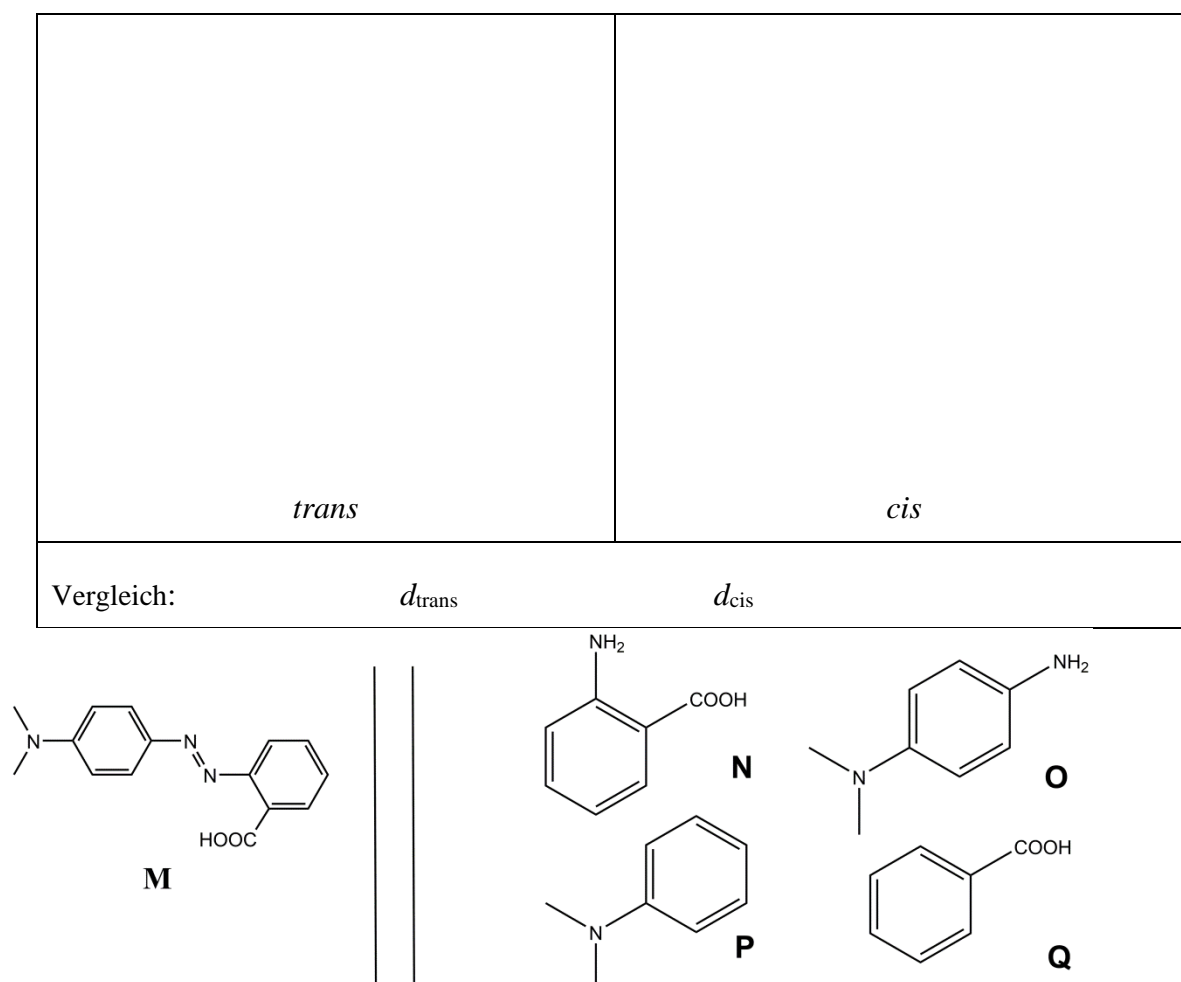


Abb. 1 – Mögliche Reaktanden für die Synthese von **M**.

2. **M** kann in zwei Schritten aus einfachen Ausgangsstoffen (Abb. 1) hergestellt werden. **Wählen** Sie aus den Vorschlägen (**N** bis **Q**) diejenigen, die **M** mit sehr hoher Regioselektivität liefern können. Natriumnitrit ( $\text{NaNO}_2$ ) in kalter wässriger Salzsäurelösung wird als Reagenz für den ersten Schritt eingesetzt.

Reaktanden: \_\_\_\_\_ und \_\_\_\_\_

### Bestimmung der Assoziationskonstante $K_t$

$\beta$ -Cyclodextrin (**C**, Abb. 2) ist ein cyclisches Heptamer aus Glucoseeinheiten, das Einschlusskomplexe mit Azoverbindungen eingehen kann. In den Fragen 3 bis 6 werden wir für die Bildung des Komplexes  $\text{CM}_{\text{trans}}$  (in Abb. 2 gezeigt) mit Hilfe der Spektroskopie die Assoziationskonstante  $K_t$  bestimmen.

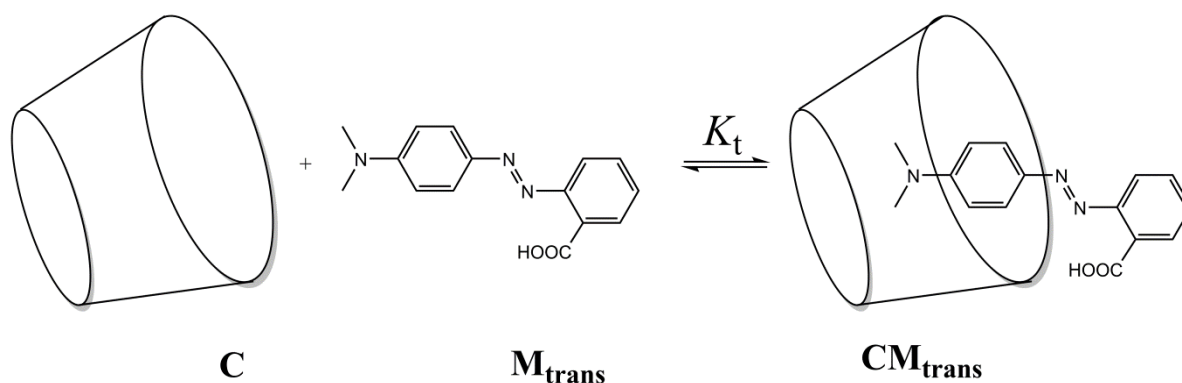


Abb. 2 – Bildung des Einschlusskomplexes  $\text{CM}_{\text{trans}}$ .

Etliche Lösungen werden bereitet, indem **C** und  $\text{M}_{\text{trans}}$  in verschiedenen Verhältnissen gemischt werden um die Anfangskonzentrationen  $[\text{C}]_0$  und  $[\text{M}_{\text{trans}}]_0$  zu erhalten. Während  $[\text{M}_{\text{trans}}]_0$  in allen Lösungen gleich ist, variiert  $[\text{C}]_0$ . Bei fixer Wellenlänge verfolgen wir die Veränderung der Differenz  $\Delta A$  zwischen der Absorption jeder Lösung und der einer reinen  $\text{M}_{\text{trans}}$ -Lösung. Wir bezeichnen die molaren Absorptionskoeffizienten von  $\text{CM}_{\text{trans}}$  und  $\text{M}_{\text{trans}}$ ,  $\epsilon_{\text{CM}_{\text{trans}}}$  bzw.  $\epsilon_{\text{M}_{\text{trans}}}$ .  $L$  die optische Weglänge des Strahls durch die Probe. Die Absorption von **C** ( $\epsilon_{\text{C}}$ ) ist vernachlässigbar.

3. **Zeigen** Sie, dass  $\Delta A = \alpha \cdot [C]_{\text{trans}}$  und **drücken** Sie  $\alpha$  durch bekannte Konstante(n) aus.

Zeigen Sie hier:

$$\alpha =$$

4. **Zeigen** Sie, dass wenn **C** in großem Überschuss gegenüber **M<sub>trans</sub>** vorliegt (*d.h.*  $[C]_0 \gg [M_{\text{trans}}]_0$ ), die Konzentration von **C** als konstant gelten kann:  $[C] \approx [C]_0$ .

Zeigen Sie hier:

5. **Zeigen** Sie, dass wenn **C** in großem Überschuss gegenüber **M<sub>trans</sub>** vorliegt (*d.h.*  $[C]_0 \gg [M_{\text{trans}}]_0$ ), gilt  $\Delta A = \alpha \cdot \frac{\beta \cdot [C]_0}{1 + K_t \cdot [C]_0}$ . **Drücken** Sie  $\beta$  durch Konstante(n) und Anfangskonzentration(en) aus.

Zeigen Sie hier:

$$\beta =$$

6. **Bestimmen Sie**  $K_t$  mit Hilfe der folgenden experimentell erhaltenen Kurve (Abb. 3).

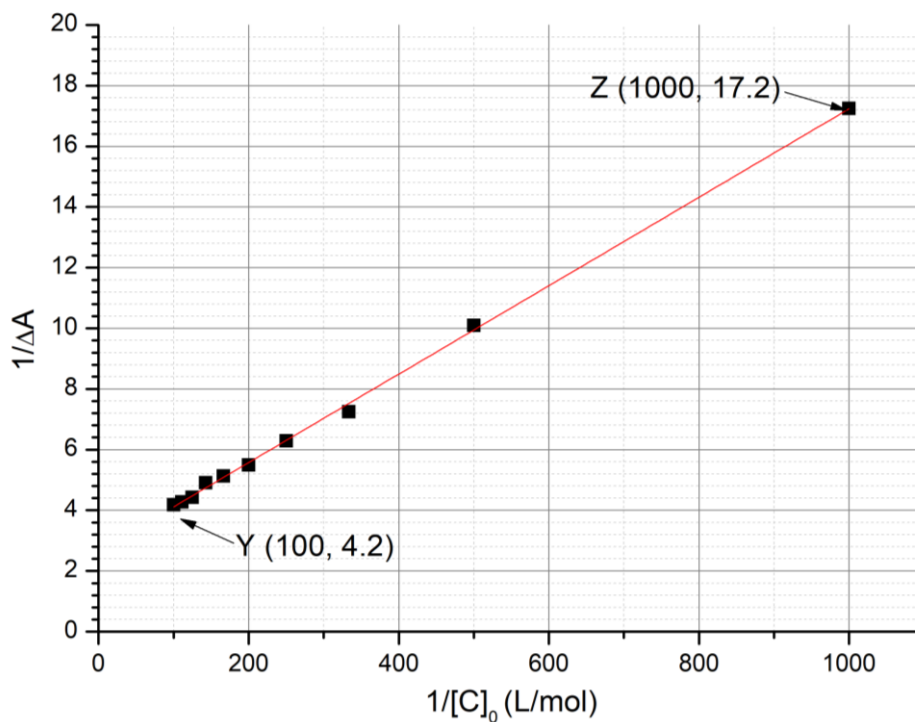


Abb. 3  $1/\Delta A$  als Funktion von  $1/[C]_0$ .

Berechnungen:



$$K_t =$$

### Bestimmung der Assoziationskonstante $K_c$

In den Fragen 7 bis 9 werden wir mit Hilfe kinetischer Untersuchungen die Assoziationskonstante  $K_c$  bestimmen, die zur Bildung des Einschlusskomplexes mit  $M_{cis}$ ,  $CM_{cis}$  gehört. Eine Probe, welche nur  $M_{trans}$  enthält, wird bestrahlt, wodurch eine bekannte Menge  $M_{cis}$ ,  $[M_{cis}]_0$  entsteht.  $M_{cis}$  (frei oder im Einschlusskomplex) isomerisiert dann thermisch induziert zu  $M_{trans}$ . In Abwesenheit von **C** folgt diese Isomerisierung einer Kinetik erster Ordnung mit einer Geschwindigkeitskonstante  $k_1$ . Alle Komplexierungsgleichgewichte stellen sich schneller ein als der Isomerisierungsprozess abläuft. Das Schema für die Reaktionen in diesem Experiment ist in Abb. 4 dargestellt.

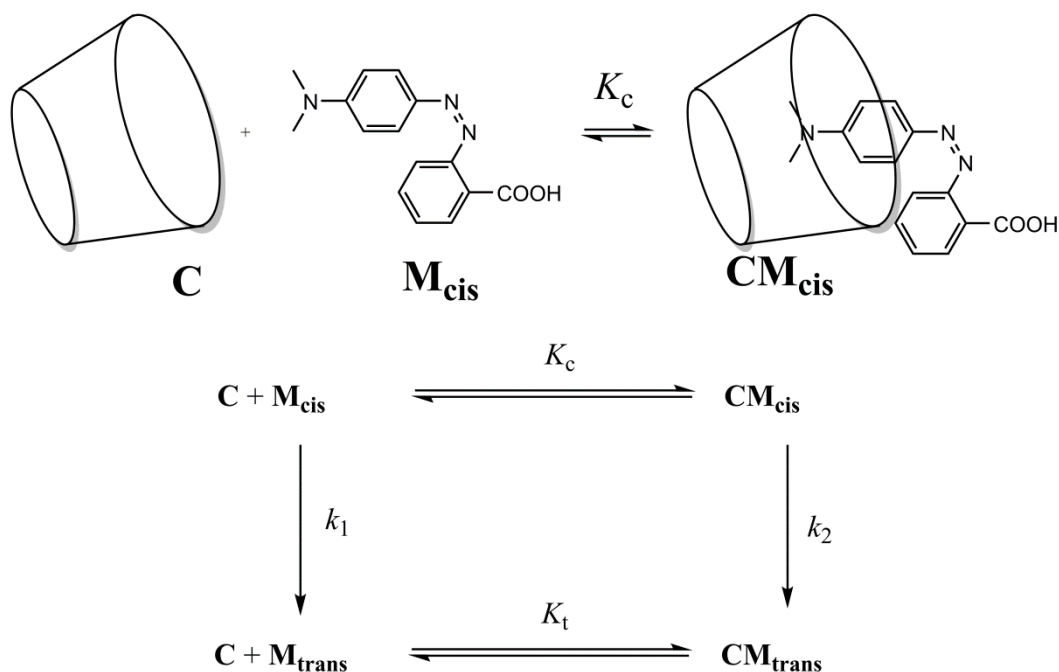


Abb. 4 – Schema für die Isomerisierung von  $M_{cis}$  in Gegenwart von **C**.

Die Geschwindigkeit (engl. *rate*)  $r$ , mit der  $\mathbf{M}_{\text{cis}}$  (frei und komplexiert) verschwindet, ist gegeben durch

$$r = k_1[\mathbf{M}_{\text{cis}}] + k_2[\mathbf{CM}_{\text{cis}}]$$

Experimentell findet man für  $r$  ein Geschwindigkeitsgesetz erster Ordnung mit einer apparenten Geschwindigkeitskonstante  $k_{\text{obs}}$ :

$$r = k_{\text{obs}}([\mathbf{M}_{\text{cis}}] + [\mathbf{CM}_{\text{cis}}])$$

7. **Zeigen** Sie, dass  $k_{\text{obs}} = \frac{\gamma + \delta \cdot k_2[\mathbf{C}]}{1 + K_c[\mathbf{C}]}$  und **drücken** Sie  $\gamma$  und  $\delta$  durch bekannte Konstante(n) aus.

Zeigen Sie hier:

$$\gamma =$$

und

$$\delta =$$

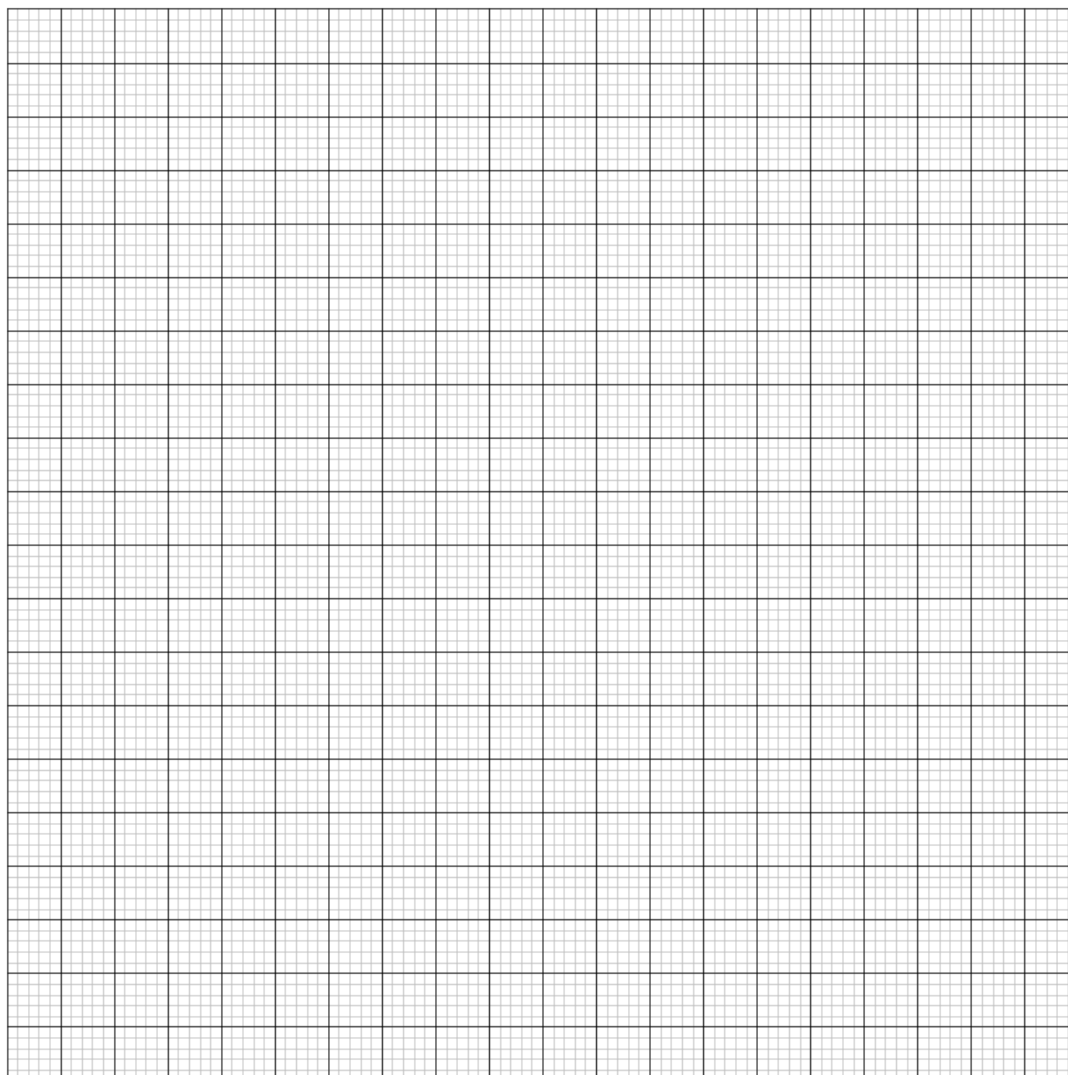
8. **Kreuzen** Sie an, unter welcher/welchen Bedingung/en die Halbwertszeit  $t_{1/2}$ , die zu  $k_{\text{obs}}$  gehört, ausgedrückt werden kann als  $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\gamma} (1 + K_c[\text{C}]_0)$ , wobei  $[\text{C}]_0 \gg [\text{M}_{\text{cis}}]_0$ . **Begründen** Sie Ihre Antwort mathematisch.

- Sehr langsame Isomerisierung von  $\text{M}_{\text{cis}}$  im Cyclodextrin  
 Sehr langsame Isomerisierung von freiem  $\text{M}_{\text{cis}}$   
  $\text{CM}_{\text{cis}}$  ist sehr stabil  
  $\text{CM}_{\text{trans}}$  ist sehr stabil

Begründung:

9. **Bestimmen** Sie -- unter der Annahme, dass die Bedingung(en) aus Frage 8 erfüllt sind --  $K_c$  durch lineare Regression. Verwenden Sie die Daten, die unten gegeben sind. Sie können den Taschenrechner verwenden oder einen Graphen zeichnen.

$[\text{C}]_0$ (mol L <sup>-1</sup> )	$t_{1/2}$ (s)	$[\text{C}]_0$ (mol L <sup>-1</sup> )	$t_{1/2}$ (s)
0	3.0	$3.0 \cdot 10^{-3}$	5.9
$1.0 \cdot 10^{-4}$	3.2	$5.0 \cdot 10^{-3}$	7.7
$5.0 \cdot 10^{-4}$	3.6	$7.5 \cdot 10^{-3}$	9.9
$1.0 \cdot 10^{-3}$	4.1	$1.0 \cdot 10^{-2}$	12.6



Gleichung für die lineare Regression:

$$K_c =$$

### Bildung von Nanomaschinen

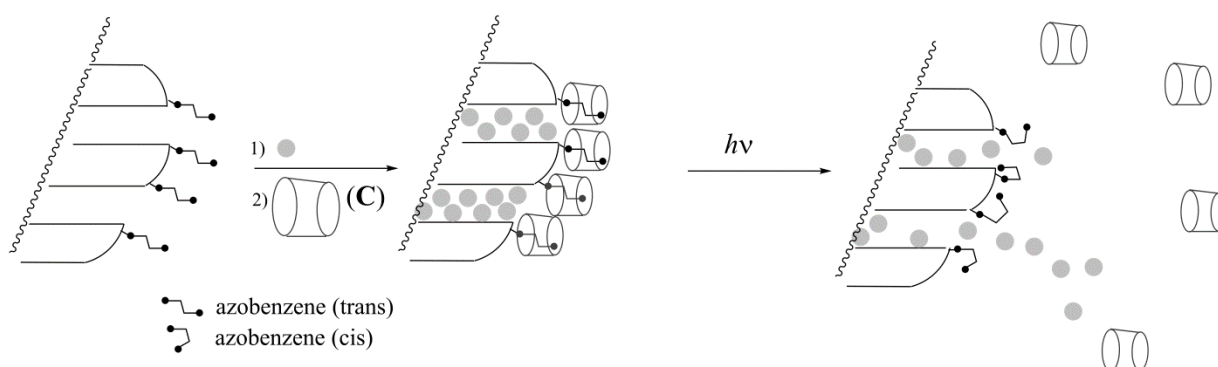


Abb. 5 – Die Dissoziation eines Azobenzene-Cyclodextrin-Einschlusskomplexes wird durch lichtausgelöste Isomerisierung eingeleitet und erlaubt Substanzfreisetzung (graue Kugeln).

Eine andere Azobenzene-Verbindung (für die  $K_c \ll K_t$ ), wird – zunächst in der *trans*-Form - kovalent an Kieselgel (engl. *silica*) gebunden (Abb. 5). Die Poren des Gels sind mit einem Farbstoff (Rhodamin B, graue Kugeln in Abb. 5) gefüllt. Nach Zusatz von C wird ein Einschlusskomplex gebildet, der die Poren verschließt und den Austritt des Farbstoffs verhindert.

10. **Wählen** Sie diejenige (nur eine) Bedingung aus, die sich am besten eignet, die Poren anfänglich mit C zu verschließen und den Farbstoff nach Bestrahlung freizusetzen.

- $K_t \gg 1$
- $K_t \gg 1$  und  $K_c \ll 1$
- $K_t / K_c \ll 1$
- $K_t \gg 1$  und  $K_c \gg 1$
- $K_c \ll 1$

Das mit dem Farbstoff beladene Azobenzene-Kieselgel wird in der Ecke einer Küvette platziert (siehe Abb. 6), sodass sich es nicht in der Lösung ausbreiten kann. Es wird dann mit einer Wellenlänge  $\lambda_1$  bestrahlt, um die Freisetzung des Farbstoffs aus den Poren auszulösen (siehe Abb. 5). Um diese Freisetzung mit Absorptionsspektroskopie zu verfolgen, messen wir die Absorbanz der Lösung bei der Wellenlänge  $\lambda_2$ .

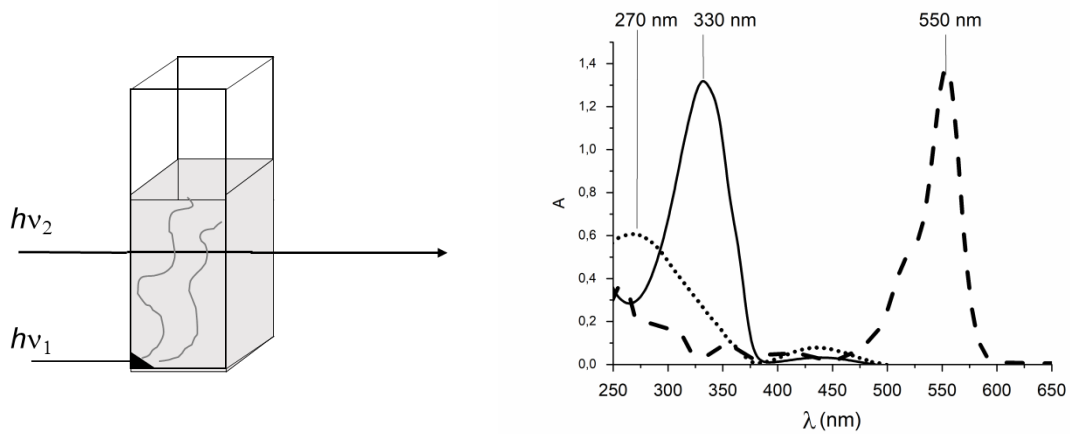


Abb. 6 – Links: experimenteller Aufbau, um die Farbstofffreisetzung zu verfolgen. – Rechts: Absorptionsspektren von *trans*-Azobenzene (durchgezogene Linie), *cis*-Azobenzene (gepunktete Linie) und Rhodamin B (gestrichelte Linie).

11. **Geben Sie**  $\lambda_1$  an.

$\lambda_1 =$             nm

12. **Geben Sie**  $\lambda_2$  an.

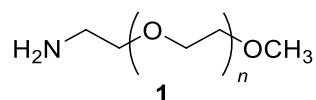
$\lambda_2 =$             nm

Aufgabe T6	Frage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Gesamt
8% der Gesamtpunkte	Max. Punkte	4	4	5	3	10	2	9	6	5	48
	Punkte										

## Aufgabe T6: Charakterisierung eines Block-Copolymers

Block-Copolymere, welche man durch Verknüpfung verschiedener Polymerblöcke erhält, haben einzigartige Eigenschaften, wie zum Beispiel die Fähigkeit zur Selbstassemblierung (self-assembly). In dieser Aufgabe wird die Synthese und Charakterisierung von solch einem Makromolekül untersucht.

### Untersuchung des ersten Polymerblocks:



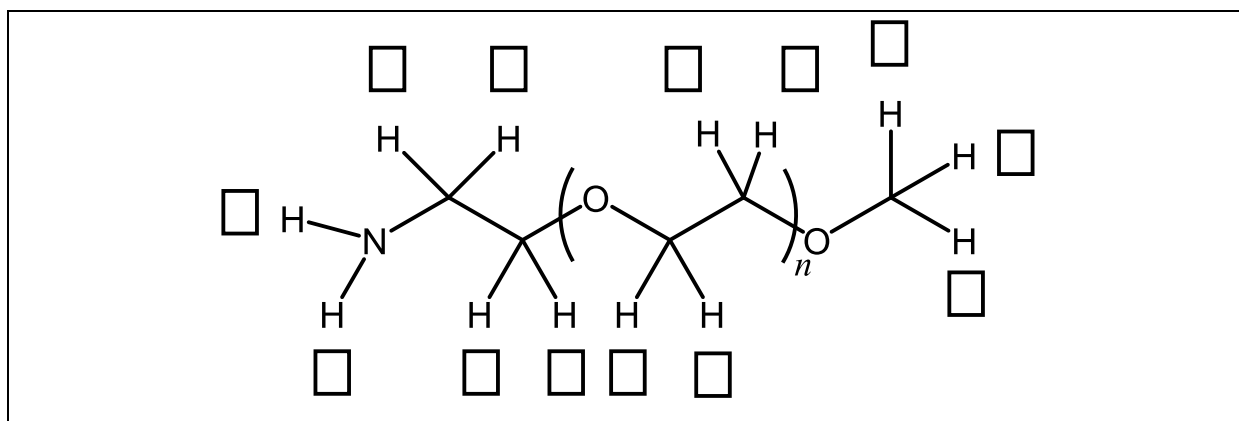
In diesem ersten Teil werden wir uns mit dem wasserlöslichen Homopolymer **1** ( $\alpha$ -methoxy- $\omega$ -aminopolyethylenglykol) beschäftigen.

Das  $^1\text{H-NMR}$ -Spektrum von **1** ( $\text{DMSO-}d_6$ ,  $60\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $500\text{ MHz}$ ) beinhaltet die folgenden Signale:

Index	$\delta$ (ppm)	Integral
a	2.7*	0.6
b	3.3	0.9
c	3.4	0.6
d	$\sim 3.5$	133.7

Tabelle 1. \*In der Anwesenheit von  $\text{D}_2\text{O}$ , verschwindet das Signal bei 2.7 ppm.

1. **Ordnen** Sie die  $^1\text{H-NMR}$ -Signale (a, b, c, d) aus Tabelle 1 jedem der Protonen zu.



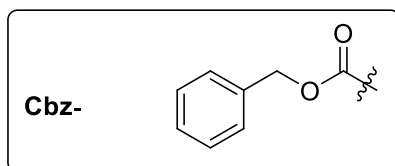
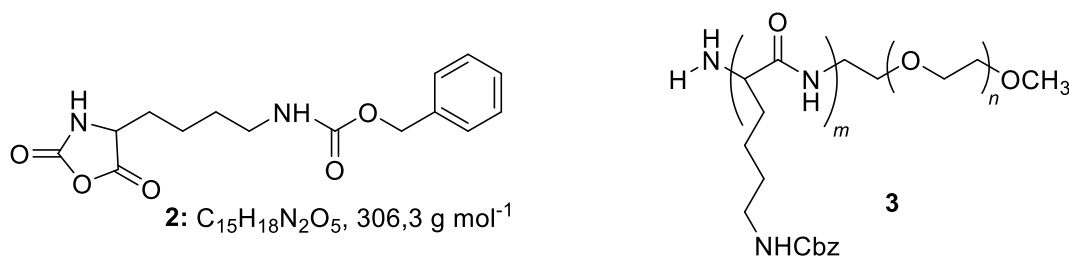
2. **Drücken** Sie den durchschnittlichen Polymerisationsgrad  $n$  als Funktion des Integrals  $A_{\text{OC}_2\text{H}_4}$  des NMR Signals der monomeren Einheit (repeating unit) und des Integrals  $A_{\text{OCH}_3}$  der Methylendgruppe aus. **Berechnen** Sie  $n$ .

$$n =$$

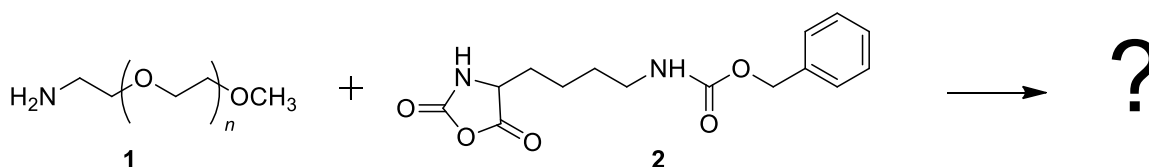
Falls sie  $n$  nicht berechnen konnten, nehmen Sie den Wert  $n = 100$  für den Rest der Aufgabe an.

### Untersuchung eines Diblock-Copolymers:

Die Synthese des zweiten Polymerblocks im Copolymer wird durch die Reaktion von **1** mit **2** ( $\epsilon$ -(Benzyloxycarbonyl)-Lysin  $N$ -Carboxyanhydrid) durchgeführt. Dies führt zum Block-Copolymer **3**.



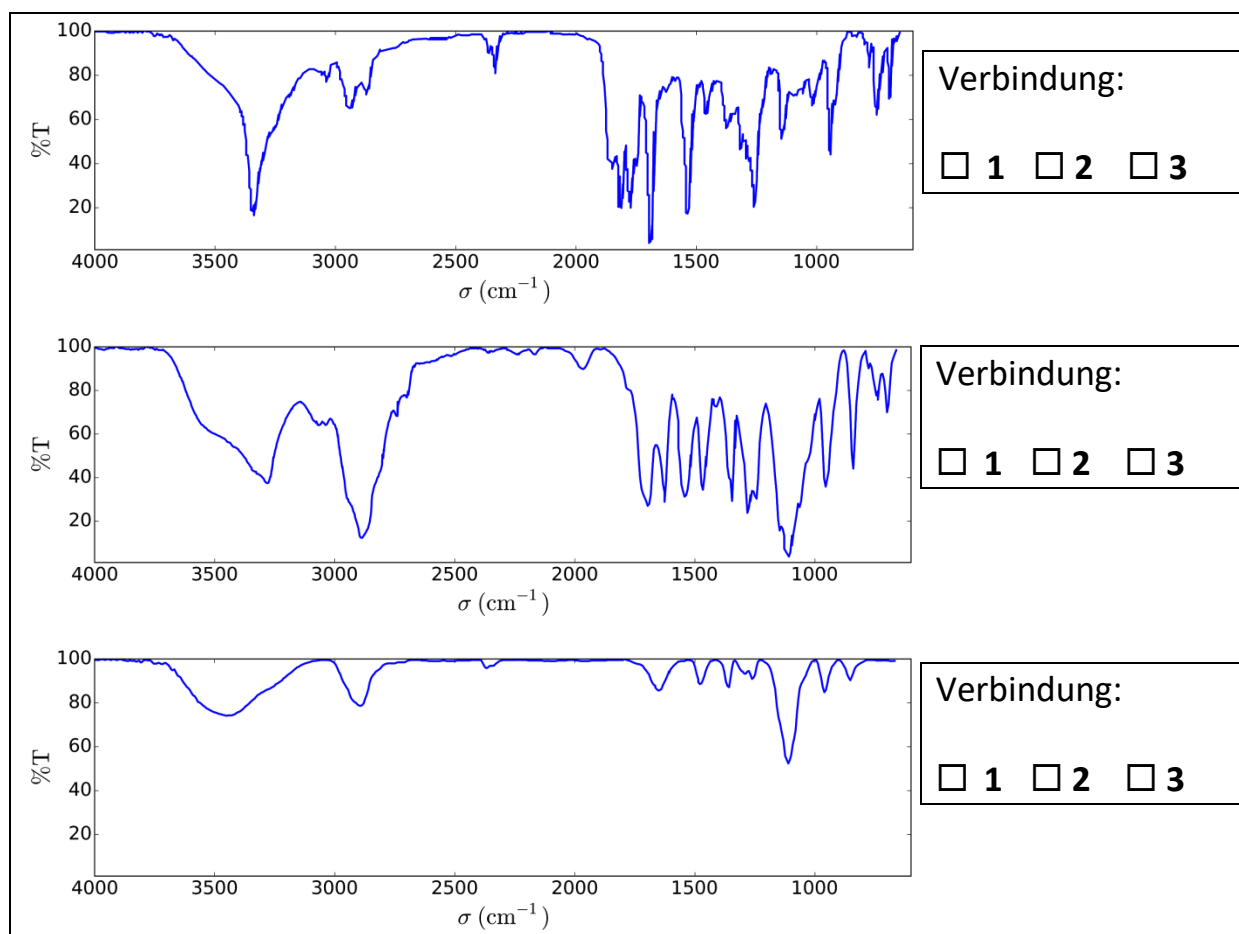
3. **Zeichnen** Sie die Struktur der Zwischenstufe, die im ersten Schritt der Addition von **1** zu **2** gebildet wird. Der zweite Schritt des Reaktionsmechanismus führt zu der Bildung eines Gases, **G**. **Zeichnen** Sie seine Struktur.





G:

4. Infrarotspektroskopische Messungen (IR) wurden durchgeführt, um die Verbindungen zu charakterisieren. **Ordnen** Sie den drei IR-Spektren die Verbindungen **1**, **2** und **3** zu.



5. Das  $^1\text{H-NMR}$ -Spektrum des Copolymers **3** (in  $\text{DMSO-}d_6$ , bei  $60\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $500\text{ MHz}$ ) ist in Abb. 1 dargestellt. **Berechnen** Sie das Zahlenmittel der Molmasse  $M_n$  mit Hilfe von  $n$  aus Aufgabe 2, sowie den Integralen einiger oder aller NMR Signale (siehe Tabelle 2). **Zeichnen** Sie einen Kreis um die Gruppe(n) der Atome, die Sie in Ihre Berechnungen einbezogen haben und **schreiben** Sie die entsprechenden Symbole ( $\alpha, \beta, \dots$ ) dazu.

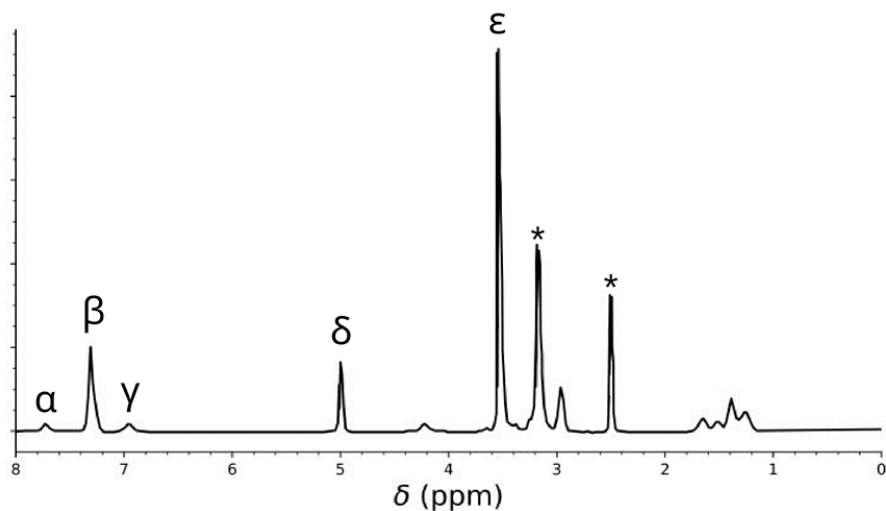
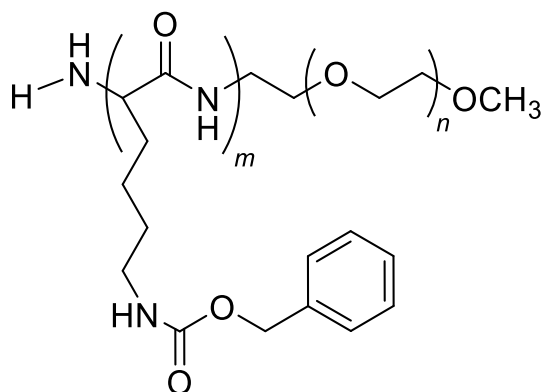


Tabelle 2

Signal	Integral
$\alpha$	22.4
$\beta$	119
$\gamma$	23.8
$\delta$	47.6
$\epsilon$	622

Abb. 1 – Signale markiert mit \* entsprechen dem Lösungsmittel und Wasser.



$$M_n = \quad \text{kg mol}^{-1}$$

Geben Sie ihre Antwort auf zwei Dezimalstellen genau an.

Diese Reaktion von **1** mit **2** führte zu den Copolymeren **3a** nach 20 h, **3b** nach 25 h und **3c** nach 30 h Reaktionszeit bei 40 °C. Die Ergebnisse der Größenausschlusschromatographie (size-exclusion chromatography, SEC) sind in Abb. 2 dargestellt.

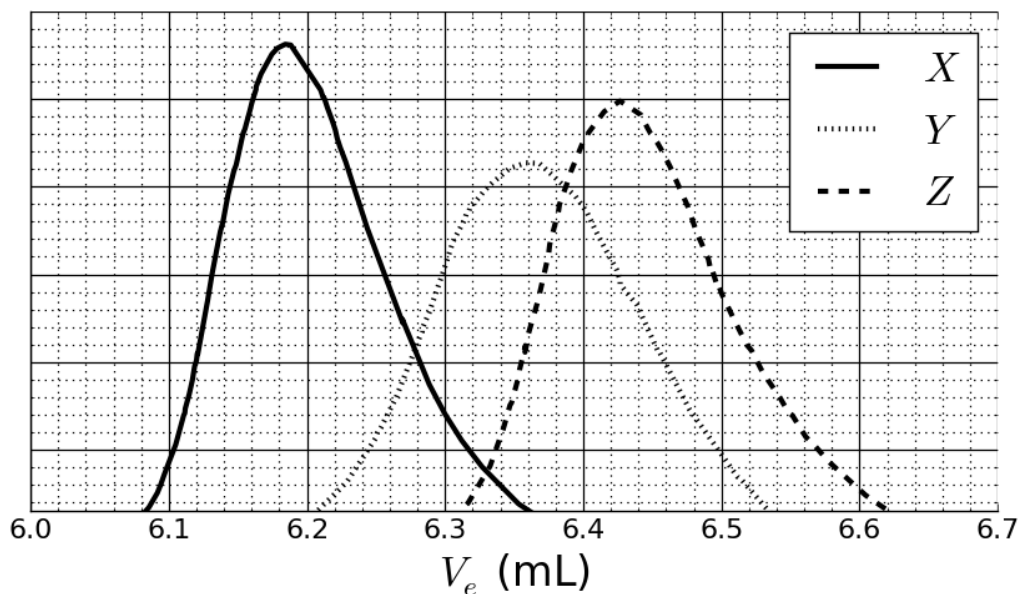


Abb. 2 – SEC-Chromatogramme von **3a**, **3b** und **3c** als Funktion des Elutionsvolumens  $V_e$ .

6. **Ordnen** Sie die Signale in Abb. 2 den Copolymeren **3a**, **3b** und **3c** zu.

<b>3a:</b>	<input type="checkbox"/> X	<input type="checkbox"/> Y	<input type="checkbox"/> Z
<b>3b:</b>	<input type="checkbox"/> X	<input type="checkbox"/> Y	<input type="checkbox"/> Z
<b>3c:</b>	<input type="checkbox"/> X	<input type="checkbox"/> Y	<input type="checkbox"/> Z

Für die Kalibrierung wurde eine Mischung von Standardpolymeren mit bekannten Massen (3, 30, 130, 700 und 7000  $\text{kg mol}^{-1}$ ) verwendet (Abb. 3).

Der logarithmische Wert der Molaren Masse ist eine lineare Funktion des Elutionsvolumens  $V_e$ .

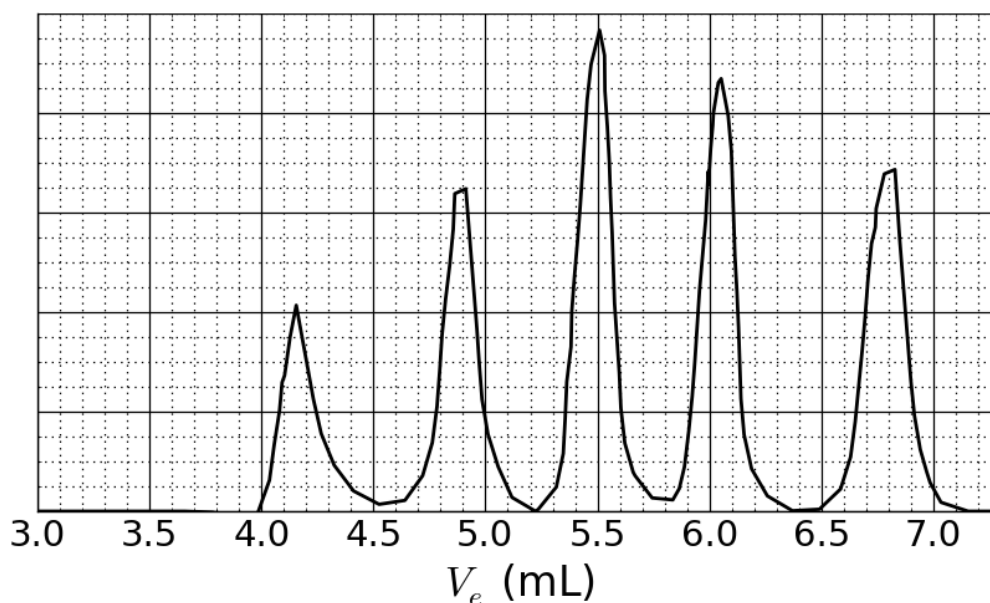
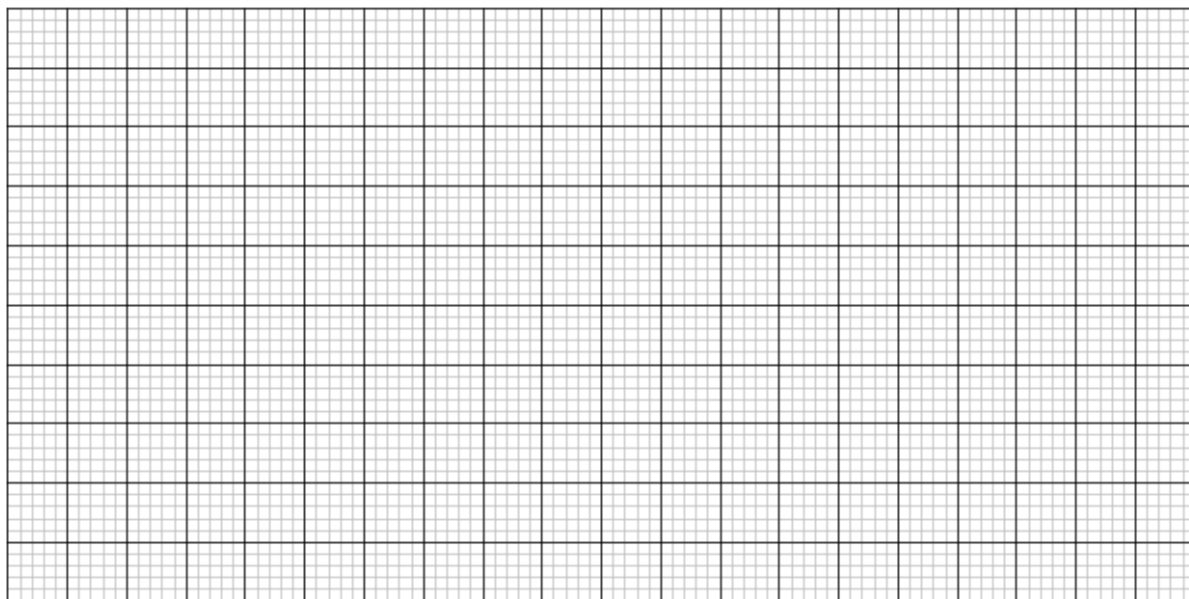


Abb. 3 – SEC Chromatogramm der Mischung der Standardpolymere.

7. **Bestimmen** Sie  $V_e$  des Signals von Polymer X basierend auf den SEC Chromatogrammen (siehe Abb. 2 und 3) und benutzen Sie es, um den Polymerisationsgrad  $m$  des zweiten Blocks **abzuschätzen**. **Geben** Sie Ihre Berechnungen genau an; Sie dürfen einen Taschenrechner benutzen oder ein Diagramm zeichnen.

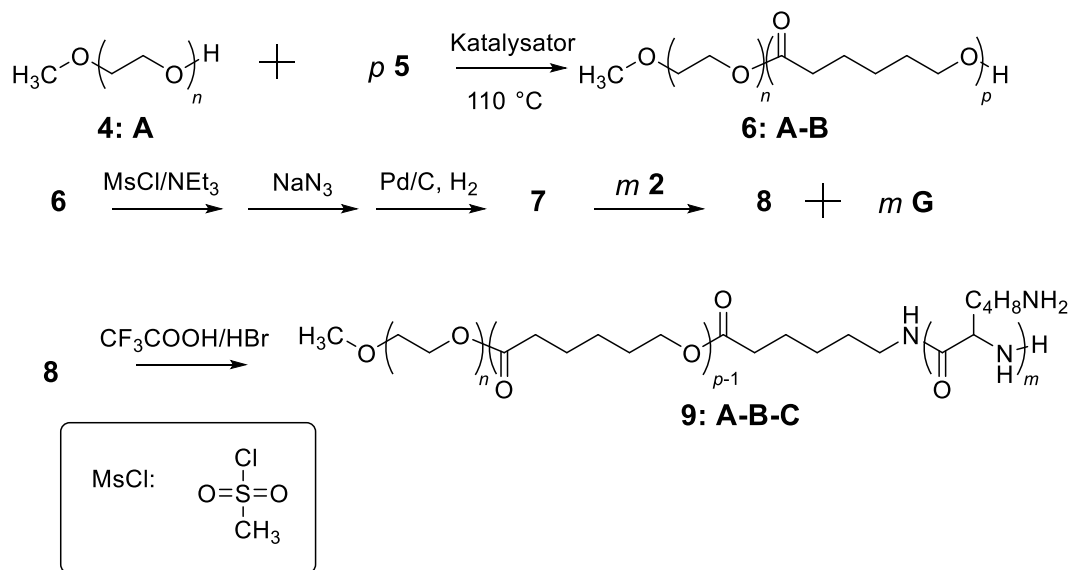
$V_e =$                       mL



$m =$

### Synthese des Triblock-Copolymers:

Für biologische Anwendungen in denen Mizellen gebildet werden, kann ein Triblock-Copolymer **9** durch die Einführung eines mittleren Polymerblocks, **B**, mit Monomer **5** synthetisiert werden.



8. **Zeichnen** Sie die Strukturen von **5**, **7** und **8**.

**5** (keine Produkte außer **6**: **A-B** werden erhalten)

**7** (im letzten Schritt wird ein Gas gebildet)

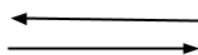
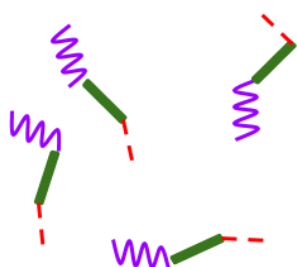
**8**

9. Amphiphile Block-Copolymere, wie **9**: **A-B-C**, können für medizinische Anwendungen gebraucht werden, da sie in Wasser (pH = 7) Mizellen bilden, welche als Wirkstoffträger (drug carrier) benutzt werden können. **Ordnen** Sie jedem Block des Block-Copolymers einer Eigenschaft zu. **Zeichnen** Sie eine Skizze solch einer Mizelle bestehend aus 4 Polymerketten.

**A:**             hydrophob                                     hydrophil

**B:**             hydrophob                                     hydrophil

**C:**             hydrophob                                     hydrophil



Aufgabe T7 6% der Gesamtpunkte	Frage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Gesamt	
	Max. Punkte	4	12	2	2	2	5	5	8	4	5	5		54
	Punkte													

## Aufgabe T7: Ringrotation in einem [2]Catenan

Der Nobelpreis für Chemie 2016 wurde J.-P. Sauvage, Sir J. F. Stoddart und B. L. Feringa "for the design and synthesis of molecular machines" verliehen. Ein Beispiel für solch ein System ist ein [2]Catenan, ein Molekül welches aus zwei mechanisch verknüpften (interlocked) Ringen besteht. In dieser Aufgabe betrachten wir solch ein System in dem einer der Macrocyklen (macrocycle) nur einen zweizähligen Phenanthrolin-Liganden besitzt. Der zweite Macrocyclus beinhaltet zwei Liganden: einen Phenanthrolin- sowie einen Terpyridin-Liganden (dreizähliger). Ein Ligand von jedem Macrocyclus koordiniert zu einem zentralen Kupfer-Ion. Abhängig vom Oxidationszustand des Kupfer-Ions (+I oder +II) liegen zwei unterschiedliche Konfigurationen vor (siehe Abb. 1).

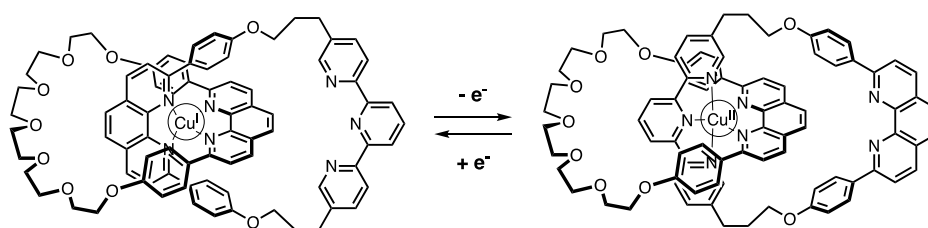
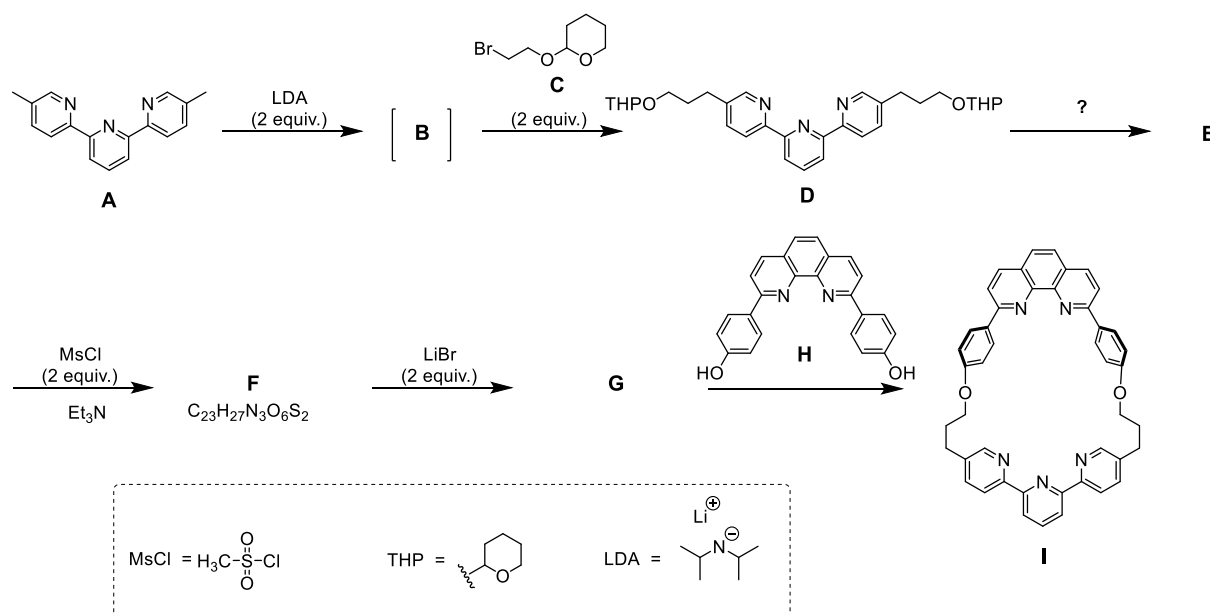


Abb. 1 – Ringkonfigurationen in einem [2]Catenan.

Der Macrocyclus wird wie folgt synthetisiert:



1. **Zeichnen** Sie die Struktur von **B**.

**B**



2. **Zeichnen** Sie die Strukturen von **E**, **F** und **G**.

**E**

**F**

**G**

3. **Wählen** Sie aus der folgenden Liste welche der Reaktionsbedingung(en) zu der Bildung von **E** aus **D** verwendet werden können.

- $\text{H}^+$ ,  $\text{H}_2\text{O}$
- $\text{OH}^-$ ,  $\text{H}_2\text{O}$
- $\text{NaBH}_4$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$
- $\text{H}_2$ , Pd/C, THF

4. In der Synthese führt Einsatz von MsCl zur Bildung von:

- einer Abgangsgruppe
- einer Schutzgruppe
- einer deaktivierenden Gruppe
- einer dirigierenden Gruppe

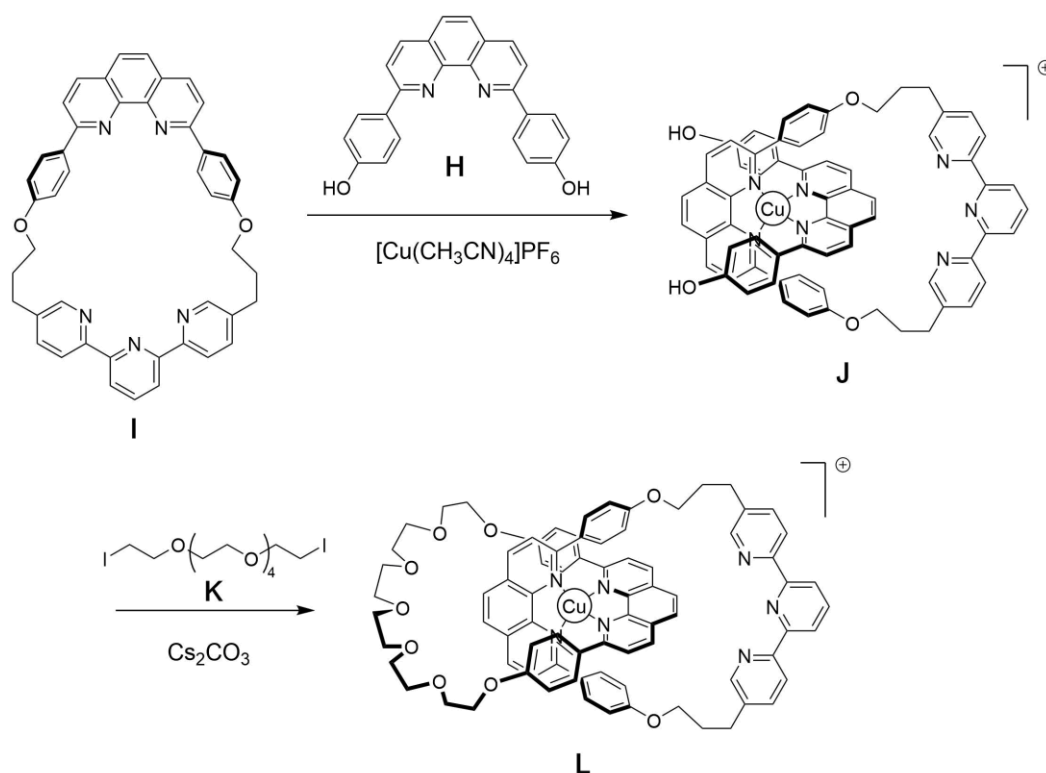
5. **G** wird in der Reaktion zwischen **F** und LiBr in Aceton gebildet. Diese Reaktion ist eine:

- elektrophile aromatische Substitution  
 nucleophile aromatische Substitution  
 S<sub>N</sub>1  
 S<sub>N</sub>2

6. **Zeichnen** Sie den Übergangszustand (in 3D; Keil-Strich-Formel) des geschwindigkeitsbestimmenden Schrittes der Reaktion von **F** → **G**. Zeigen Sie nur ein Reaktionszentrum. Die Kohlenstoffhauptkette kann mit R abgekürzt werden.

Übergangszustand:

Die Synthese des [2]Catenans **L** beruht auf dem Templat-Effekt (template effect) eines Kupferkomplexes.



7. **Schreiben** Sie die vollständige Elektronenkonfiguration von Cu(0) im Grundzustand auf. Geben Sie die Oxidationszahl von Cu im Komplex **J** an und schreiben Sie die Elektronenkonfiguration vom freien Kupferion (aus **J**) auf.

Elektronenkonfiguration von Cu(0):

Oxidationszahl von Cu in **J**:

Elektronenkonfiguration von Cu in **J**:

8. **Wählen** Sie die Geometrie um das Kupferion in **L** aus. **Zeichnen** Sie die Energieniveaus des Kupferzentrums im Kristallfeld unter Annahme einer idealen Geometrie der Liganden. **Befüllen** Sie das Orbitaldiagramm. **Geben** Sie den Maximalwert des Spins ( $S$ ) dieses Komplexes an.

Die Geometrie um Cu in **L** ist:

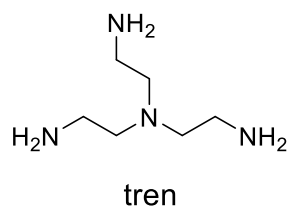
- oktaedrisch  
 tetraedrisch  
 quadratisch planar  
 trigonal bipyramidal

Aufspaltung und Füllung der d-Orbitale:

$S =$

9. **Wählen** Sie aus der folgenden Liste welche Verbindung(en) das Kupferion in **L** entfernen können um das freie [2]Catenan zu erhalten:

- CH<sub>3</sub>CN  
 NH<sub>4</sub>PF<sub>6</sub>  
 KCN  
 tren



Im [2]Catenan **L**, kann das Kupferion in zwei verschiedenen Oxidationszuständen (+I oder +II) vorliegen, wobei jeweils eine unterschiedliche Koordinationsgeometrie ausgebildet wird (jeweils vier- oder fünffach-koordiniert für +I oder +II).

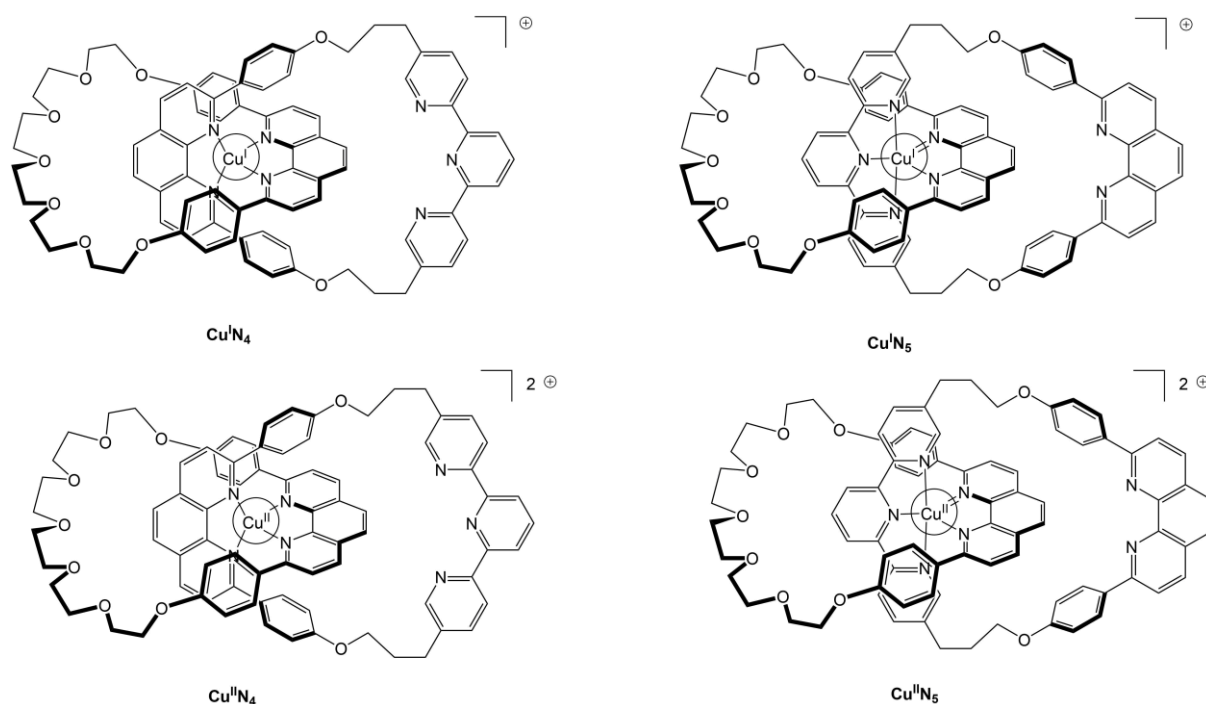


Abb. 2 – Verschiedene Konfigurationen des [2]Catenans **L**.

Die Stabilität von Cu(I)-Komplexen kann durch Vergleich ihrer Elektronenkonfiguration mit denen eines Edelgases abgeleitet werden.


10. **Füllen** Sie die Lücken mit Zahlen sowie ein Kästchen mit einem Kreuz:

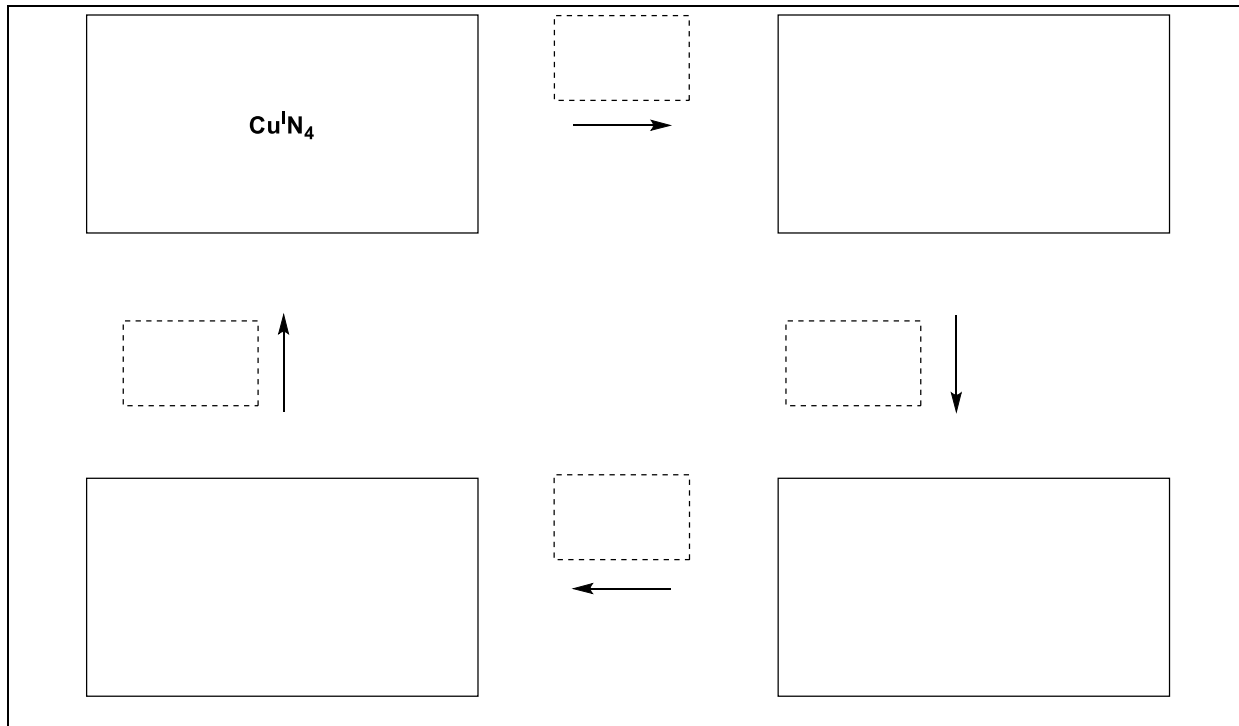
Der  $\text{Cu}^{\text{I}}\text{N}_4$  Komplex hat ... Elektronen in der Koordinationssphäre des Metalls.

Der  $\text{Cu}^{\text{I}}\text{N}_5$  Komplex hat ... Elektronen in der Koordinationssphäre des Metalls.

Der  $\text{Cu}^{\text{I}}\text{N}_4$  Komplex ist  mehr /  weniger stabil als der  $\text{Cu}^{\text{I}}\text{N}_5$  Komplex.

11. **Schreiben** Sie in die großen Kästen die Abkürzungen der relevanten Komplexe (siehe Abb. 2) und vervollständigen Sie die Sequenz in dem Sie die gestrichelten Kästen mit den folgenden Symbolen **ausfüllen**:

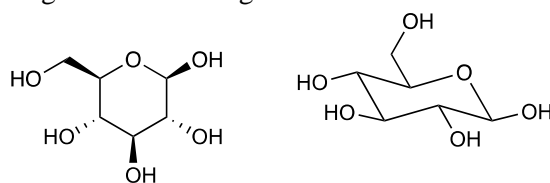
gestrichelte Kästen:  (Rotation); + e<sup>-</sup>; - e<sup>-</sup>.



Aufgabe T8	Frage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Gesamt
6% der Gesamtpunkte	max. Punkte	2	6	2	2	11	2	4	3	4	2	6	8	2	6	4	64
	Punkte																

## Aufgabe T8: Identifikation und Synthese von Inositolen

Für diese Aufgabe werden „Keilstrichformel“ und „Sesselkonformation“ wie folgt definiert, hier gezeigt für  $\beta$ -Glucose entsprechend folgender Abbildung:



Keilstrichformel und Sesselkonformation

Inositole sind Cyclohexan-1,2,3,4,5,6-hexaole. Einige dieser 6-gliedrigen Carbocyclen, insbesondere das *myo*-Inositol, sind in vielen biologischen Prozesse involviert.

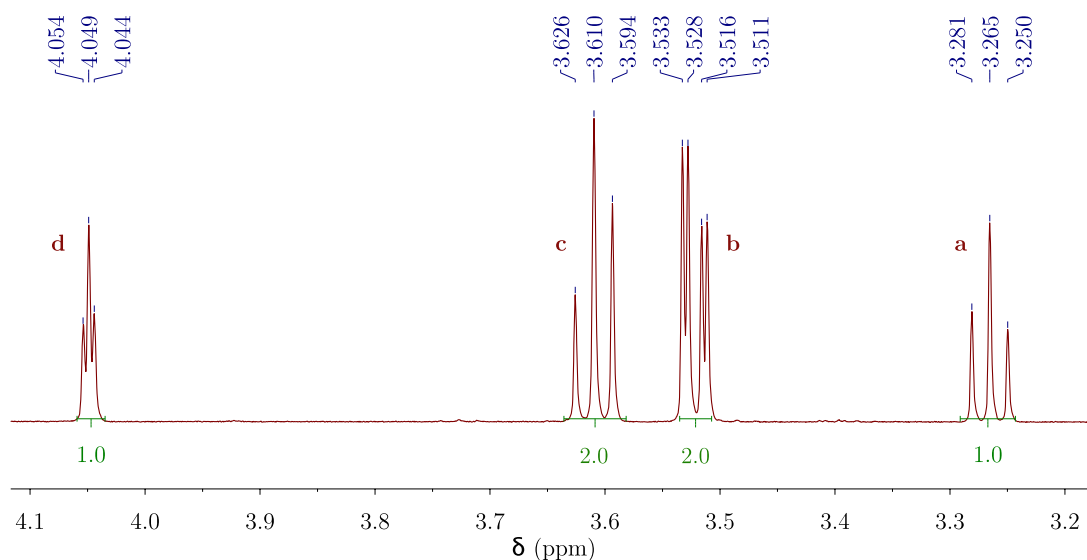
### Struktur von *myo*-Inositol

1. **Zeichnen** Sie die Strukturformel von einem Inositol, ohne Berücksichtigung der Stereochemie.

Die Inositol-Familie beinhaltet 9 unterschiedliche Stereoisomere, darunter auch Enantiomere.

2. **Zeichnen** Sie alle Keilstrichformeln der optisch aktiven Stereoisomere.

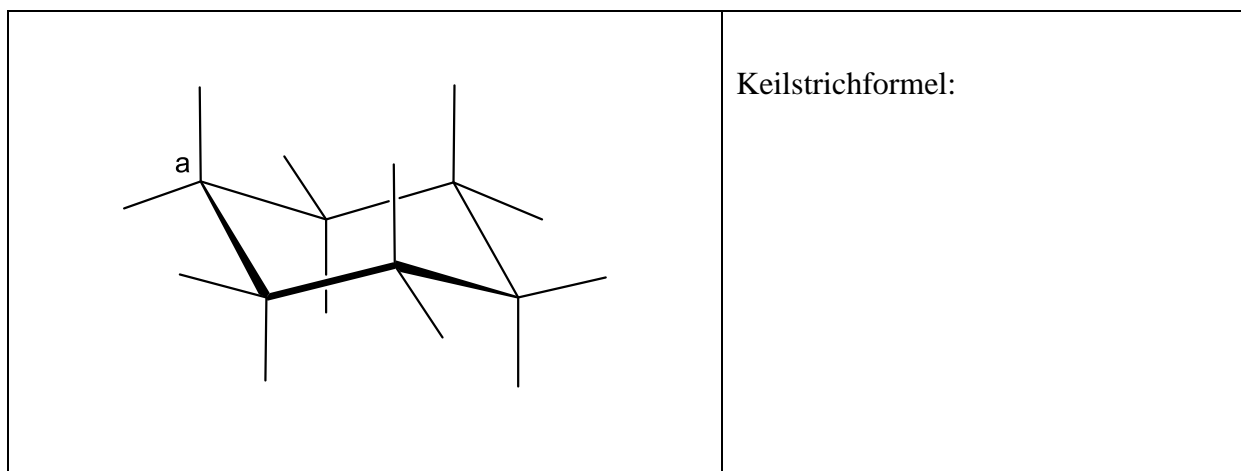
Im Folgenden wird die Struktur des so genannten *myo*-Inositols untersucht. Nur ein Sesselkonformer tritt hauptsächlich auf. Dessen Struktur kann mittels  $^1\text{H-NMR}$ -Spektroskopie abgeleitet werden. Das nachfolgende Spektrum wurde bei 600 MHz in  $\text{D}_2\text{O}$  gemessen. Außerhalb des gezeigten Bereichs wurden keine weiteren Signale gefunden. Die Integrale sind unterhalb des Spektrums angegeben.



3. Geben Sie die Summenformel der Hauptverbindung (abgeleitet von myo-Inositol) der Probe an, welche mit der Anzahl der gemessenen Protonen im  $^1\text{H-NMR}$ -Spektrum übereinstimmt.

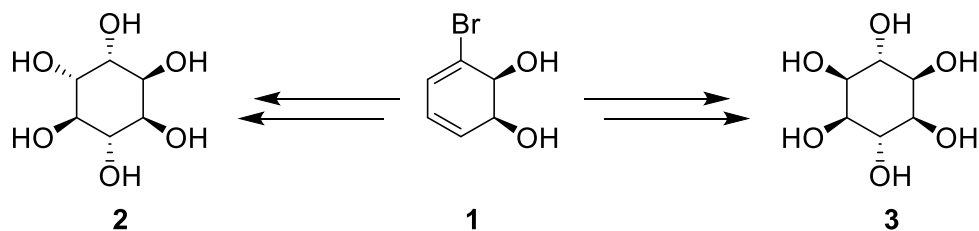
4. Geben Sie die Anzahl der Symmetrieebenen des Moleküls an, basierend auf der Anzahl und Integrale der Protonensignale.

5. **Vervollständigen** Sie die folgende Sesselkonformation der stabilsten Konformation des myo-Inositols. **Kennzeichnen** Sie anschließend jedes Proton mit dem zugehörigen Buchstaben (**a**, **b**, **c** oder **d**) in Übereinstimmung mit dem gegebenen NMR-Spektrum. Proton a muss am Kohlenstoff-Atom a in der folgenden Darstellung repräsentiert sein. **Zeichnen** Sie die Keilstrichformel.



## Synthese von Inositolen

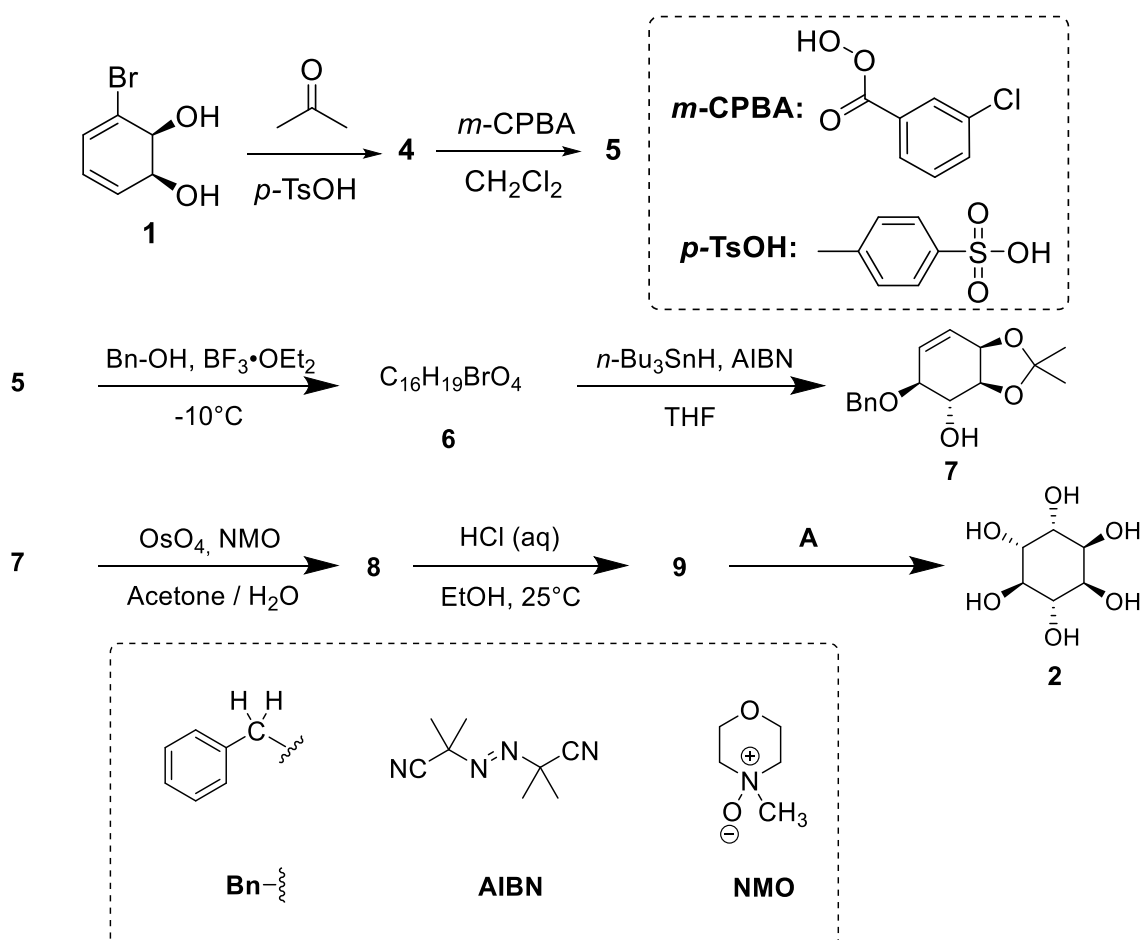
Für medizinische Anwendungen ist es erforderlich einige Inositol-Phosphate in größerer Menge zu synthetisieren. Wir untersuchen die Synthese von Inositol **2** ausgehend von Bromdiol **1**.



6. **Wählen** Sie die korrekte(n) stereochemische(n) Beziehung(en) zwischen Verbindung **2** und **3** aus.

- |                          |               |
|--------------------------|---------------|
| <input type="checkbox"/> | Enantiomere   |
| <input type="checkbox"/> | Epimere       |
| <input type="checkbox"/> | Diastereomere |
| <input type="checkbox"/> | Atropisomere  |

Inositol **2** kann in 7 Schritten aus Verbindung **1** hergestellt werden.

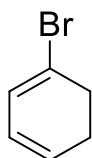




7. **Zeichnen** Sie die Keilstrichformel von Verbindung **4**.

4

8. Die Reaktion, die zu Verbindung **5** führt, findet an der Doppelbindung mit der höchsten Elektronendichte statt. Betrachten Sie die unten angegebene Struktur von 1-Bromcyclohexa-1,3-dien, die eine Teilstruktur von Verbindung **4** ist. **Kreisen** Sie jene Doppelbindung mit der höchsten Elektronendichte ein. **Stellen** Sie alle durch Brom verursachten elektronischen Effekte in eigenen Strukturen dar.



9. **Zeichnen** Sie die Keilstrichformel des hauptsächlich gebildeten Diastereomers **5**.

5

10. Geben Sie die Gesamtzahl an Stereoisomeren von **5** an, die aus enantiomerenreinem **1** durch diese Synthese zugänglich sind.

11. Für den Schritt **5** → **6**, kann ein weiteres Produkt (**6'**) mit gleicher Summenformel gebildet werden. Zeichnen Sie die Keilstrichformeln von **6** und **6'**.

<b>6</b>	<b>6'</b>
----------	-----------

12. **Zeichnen** Sie die Keilstrichformeln der hauptsächlich gebildeten Diastereomere **8** und **9**.

<b>8</b>	<b>9</b>
----------	----------

13. **Wählen** Sie die richtigen Bedingungen **A** aus, um Verbindung **2** zu erhalten.

- |  |
|--|
| <input type="checkbox"/> H <sub>2</sub> , Pd/C<br><input type="checkbox"/> K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , HF<br><input type="checkbox"/> HCOOH, H <sub>2</sub> O<br><input type="checkbox"/> BF <sub>3</sub> ·OEt <sub>2</sub> |
|--|

14. Wenn Verbindung **1** kein Brom enthält, führt die Synthese zu einem Stereoisomer von **2**. Zeichnen Sie die Keilstrichformel dieses Stereoisomers unter der Voraussetzung einer unveränderten Stereoselektivität aller Reaktionen und der Bildung nach dem gezeigten Syntheschema für Verbindung **2**. Geben Sie die stereochemische Beziehung zu **2** an.

- Enantiomere  
 Epimere  
 Diastereoisomere  
 Atropoisomere

15. **Wählen** Sie jene Schritte aus bei der während der Synthese von **2** aus **1** Schutzgruppen oder dirigierende Gruppen entfernt bzw. gespalten werden.

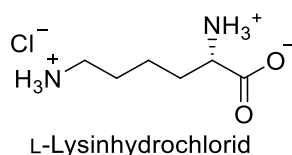
- 1** → **4**  
 **4** → **5**  
 **5** → **6**  
 **6** → **7**  
 **7** → **8**  
 **8** → **9**  
 **9** → **2**

Aufgabe T9	Frage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Gesamt
7% der Gesamtpunkte	max. Punkte	2	2	4	3	2	17	1	1	2	4	2	2	2	44
	Punkte														

## Aufgabe T9: Synthese von Levobupivacain

### Teil I.

Das Lokalanästhetikum Bupivacain (Handelsname Marcaine) wird von der Weltgesundheitsorganisation als essentielles Medikament geführt. Obwohl bewiesen ist, dass ein Enantiomer, das Levobupivacain, weniger kardiotoxisch und damit sicherer als das Racemat ist, wird das Medikament aktuell als Racemat eingesetzt. Levobupivacain kann ausgehend von der natürlichen Aminosäure *L*-Lysin hergestellt werden.



1. **Bestimmen** Sie die absolute Konfiguration des stereogenen Zentrums in *L*-Lysin und **begründen** Sie Ihre Antwort indem Sie die Substituenten nach ihrer Priorität ordnen.

Konfiguration:	Priorität 1 > 2 > 3 > 4:
<input type="checkbox"/> <i>R</i> <input type="checkbox"/> <i>S</i>	

2. Der Stereodeskriptor in *L*-Lysin-Hydrochlorid bezieht sich auf die relative Konfiguration. **Wählen** Sie alle korrekten Aussagen aus:

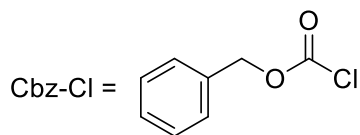
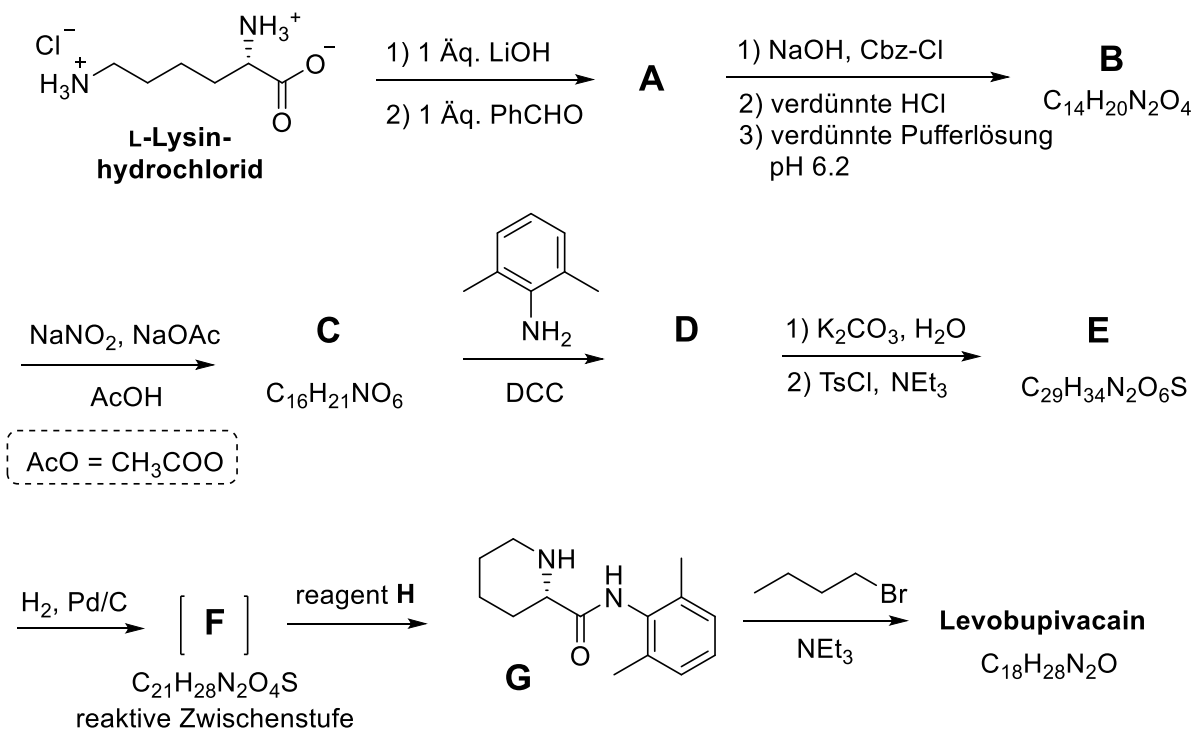
- |   |
|---|
| <input type="checkbox"/> Alle natürlichen <i>L</i> -Aminosäuren sind linksdrehend (levorotatory)<br><input type="checkbox"/> Natürliche <i>L</i> -Aminosäuren können linksdrehend (levorotatory) oder rechtsdrehend (dextrorotatory) sein<br><input type="checkbox"/> Alle natürlichen <i>L</i> -Aminosäuren sind ( <i>S</i> )<br><input type="checkbox"/> Alle natürlichen <i>L</i> -Aminosäuren sind ( <i>R</i> ) |
|---|

Häufig soll nur eine Aminogruppe in *L*-Lysin reagieren. Ein  $\text{Cu}^{2+}$ -Salz wird im wässrigen Überschuss mit Hydroxid-Ionen versetzt, um selektiv die Reaktivität einer Aminogruppe zu maskieren. Nachdem der Komplex gebildet wurde, steht nur die nicht komplexierte  $\text{NH}_2$ -Gruppe zur Reaktion zur Verfügung.

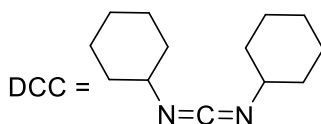
3. **Zeichnen** Sie die Struktur des Kupfer-Komplexes unter der Annahme, dass *L*-Lysin als zweizähliger Ligand agiert und 2 Moleküle von *L*-Lysin ein  $\text{Cu}^{2+}$ -Ion in der Anwesenheit von Hydroxid-Ionen komplexiert.

Komplex

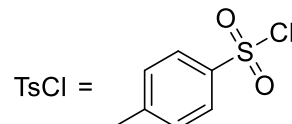
In der Synthese von Levobupivacain reagiert dieselbe Aminogruppe, auch ohne Verwendung des  $\text{Cu}^{2+}$ -Salzes.



(Benzyloxycarbonylchlorid)



(*N,N'*-Dicyclohexylcarbodiimid)



(*p*-Toluolsulfonsäurechlorid)

Ab hier können Sie die vorgeschlagenen Abkürzungen vom obigen Schema verwenden.

4. **Zeichnen** Sie die Strukturformel der Verbindung **A** unter Berücksichtigung der Stereochemie.

**A**

5. Wählen Sie die richtige(n) Antwort(en) aus – die Umsetzung von *L*-Lysin zu Verbindung **A** ist:

- eine enantioselektive Reaktion  
 eine enantiospezifische Reaktion  
 eine regioselektive Reaktion

6. **Zeichnen** Sie die Strukturformeln der Verbindungen **B-F** unter Berücksichtigung der korrekten Stereochemie.

<b>B</b> $C_{14}H_{20}N_2O_4$	<b>C</b> $C_{16}H_{21}NO_6$
<b>D</b>	<b>E</b> $C_{29}H_{34}N_2O_6S$
<b>F</b> $C_{21}H_{28}N_2O_4S$	

7. Was ist die Rolle von DCC in der Reaktion **C**  $\rightarrow$  **D**?

- |   |
|---|
| <input type="checkbox"/> Schutzgruppe des Amins<br><input type="checkbox"/> Schutzgruppe des Alkohols<br><input type="checkbox"/> Aktivierungsreagenz für Bildung des Amids |
|---|

8. TsCl ermöglicht in der Synthese eine:

- nukleophile Substitution einer Aminogruppe
- elektrophile Substitution einer Aminogruppe
- nukleophile Substitution einer Alkoholgruppe
- elektrophile Substitution einer Alkoholgruppe

9. **Kreuzen** Sie alle möglichen Reagenzien an, die als Reagenz **H** verwendet werden können.

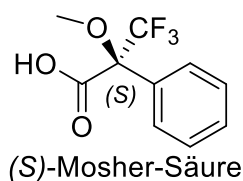
- |   |   |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> verd. HCl                      | <input type="checkbox"/> Zn/HCl                         |
| <input type="checkbox"/> K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | <input type="checkbox"/> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> |
| <input type="checkbox"/> verd. KMnO <sub>4</sub>        | <input type="checkbox"/> verd. NaOH                     |
| <input type="checkbox"/> SOCl <sub>2</sub>              | <input type="checkbox"/> PCl <sub>5</sub>               |

10. **Zeichnen** Sie die Struktur von Levobupivacain unter Berücksichtigung der korrekten Stereochemie.

Levobupivacain C<sub>18</sub>H<sub>28</sub>N<sub>2</sub>O

**Teil II.**

Die Synthese von Levobupivacain erfordert den Einsatz von enantiomerenreinem *L*-Lysin. Eine gängige Methode zur Überprüfung der Enantiomerenreinheit von Aminosäuren ist die Umsetzung zu Amiden mit Mosher-Säure (siehe Struktur unten).



11. **Zeichnen** Sie die Struktur des gebildeten Amids, das bei der Reaktion der  $\alpha$ -Aminogruppe von *L*-Lysin mit (S)-Mosher'säure, entsteht. Zeigen Sie eindeutig die Stereochemie der chiralen Zentren.

12. **Wie viele Produkte** werden bei der Umsetzung von racemischem Lysin und (S)-Mosher-Säure erwartet (nehmen Sie an, dass nur die  $\alpha$ -Amino-Gruppe des Lysins derivatisiert wird).

- zwei Diastereomere  
 vier Diastereomere  
 eine racemische Mischung aus zwei Enantiomeren  
 vier Verbindungen: zwei Enantiomere und zwei Diastereomere

13. Wählen Sie die Methode(n), die zur quantitativen Bestimmung der Enantiomerenreinheit von Lysin nach der Derivatisierung mit Mosher-Säure verwendet werden kann/können.

- NMR-Spektroskopie  
 Flüssigkeitschromatografie  
 Massenspektrometrie  
 UV-Vis-Spektroskopie