

AUT-1 C-0 C-1

**AUT-1 C-0 C**  
Maciej Swiatek

**ICHO**  
**General instructions**  
**Cover sheet**

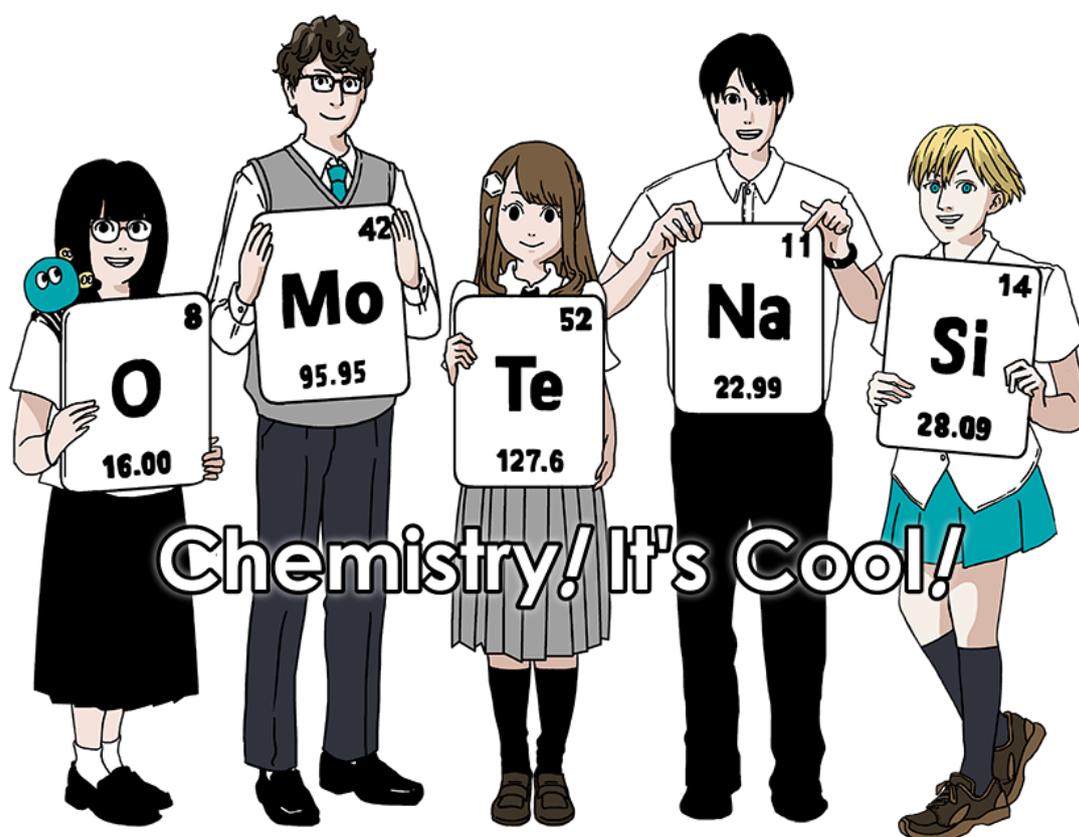
Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

Internationale Chemieolympiade 2021 Japan

53. IChO 2021 Japan

25. Juli – 2. August 2021

<https://www.icho2021.org>





## Allgemeine Hinweise

- Antworten sind mit Kugelschreiber oder Füllfeder zu schreiben.
- Es sind ausschließlich nicht-programmierbare Taschenrechner zugelassen.
- Diese Klausur besteht aus **9 Aufgaben**.
- Sie können die Aufgaben in beliebiger Reihenfolge bearbeiten.
- Sie haben **5 Stunden** Zeit, um alle Aufgaben zu bearbeiten.
- Sie dürfen erst beim Startsignal mit der Arbeit beginnen.
- Alle Ergebnisse müssen in die entsprechenden Felder auf den **Antwortblättern** eingetragen werden. Verwenden Sie die Rückseiten dieser Angabezettel als Konzeptpapier. Bedenken Sie, dass Antworten außerhalb der Antwortfelder nicht gewertet werden.
- Schreiben Sie relevante Rechenschritte in die entsprechenden Kästchen auf den Antwortblättern. Auch für korrekte Antworten kann die volle Punktzahl nur bei nachvollziehbarem Rechenweg erreicht werden.
- Die Aufsicht wird **30 Minuten** vor Ende einen Hinweis geben.
- Beim Stoppsignal müssen Sie sämtliche Arbeiten sofort einstellen. Wenn Sie nicht aufhören zu schreiben, wird Ihre Klausur für ungültig erklärt werden.
- Die offizielle englische Version der Angabe kann ausschließlich zu Klarstellungszwecken auf Anfrage eingesehen werden.
- Es ist Ihnen nicht gestattet, Ihren Arbeitsplatz ohne Erlaubnis zu verlassen. Wenn Sie Hilfe benötigen (defekter Taschenrechner, der Gang auf's Örtchen o.Ä.), heben Sie die Hand und warten Sie auf die Aufsicht.

Viel Erfolg!

## Aufgaben und Bewertung

	Titel	Gesamtpunktzahl	Prozentsatz
1	Wasserstoff an einer Metalloberfläche	24	11
2	Eine Isotopen-Zeitkapsel	35	11
3	Lambert-Beersches Gesetz?	22	8
4	Die Redoxchemie von Zink	32	11
5	Mysteriöses Silicium	60	12
6	Festkörperchemie von Übergangsmetallen	45	13
7	Aromatizität jenseits von Benzen	36	13
8	Dynamische organische Moleküle und ihre Chiralität	26	11
9	Eigenschaften kapselförmiger Verbindungen	23	10
	<b>Gesamt</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

## Formeln und Konstanten

### Konstanten

Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
Plancksches Wirkungsquantum	$h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J s}$
Elementarladung	$e = 1.602176634 \times 10^{-19} \text{ C}$
Masse eines Elektrons	$m_e = 9.10938370 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Elektrische Feldkonstante (Dielektrizitätskonstante des Vakuums)	$\epsilon_0 = 8.85418781 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$
Avogadro-Konstante	$N_A = 6.02214076 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Boltzmann-Konstante	$k_B = 1.380649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
Faraday-Konstante	$F = N_A \times e = 9.64853321233100184 \times 10^4 \text{ C mol}^{-1}$
Universelle Gaskonstante	$R = N_A \times k_B = 8.31446261815324 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ $= 8.2057366081 \times 10^{-2} \text{ L atm K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
Atomare Masseneinheit	$u = 1 \text{ Da} = 1.66053907 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Standarddruck	$p = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
Atmosphärendruck	$p_{\text{atm}} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$
Celsius-Temperatur	$0^\circ \text{C} = 273.15 \text{ K}$
Ångström	$1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$
Picometer	$1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$
Elektronenvolt	$1 \text{ eV} = 1.602176634 \times 10^{-19} \text{ J}$
Parts per Million	$1 \text{ ppm} = 10^{-6}$
Parts per Billion	$1 \text{ ppb} = 10^{-9}$
Parts per Trillion	$1 \text{ ppt} = 10^{-12}$
Pi	$\pi = 3.141592653589793$
Eulersche Zahl (Basis des natürlichen Logarithmus)	$e = 2.718281828459045$

## Formelsammlung

Ideales Gasgesetz	$PV = nRT$ , wobei $P$ den Druck, $V$ das Volumen, $n$ die Stoffmenge und $T$ die absolute Temperatur des idealen Gases beschreiben.
Coulombsches Gesetz	$F = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2}$ , wobei $F$ die elektrostatische Kraft, $k_e (\approx 9.0 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2})$ die Coulomb-Konstante, $q_1$ und $q_2$ die Beträge der jeweiligen Ladungen und $r$ den Abstand zwischen den Ladungen beschreiben.
Erster Hauptsatz der Thermodynamik	$\Delta U = q + w$ , wobei $\Delta U$ die Änderung der Inneren Energie, $q$ die übertragene Wärme und $w$ die verrichtete Arbeit beschreiben.
Enthalpie $H$	$H = U + PV$
Entropie nach Boltzmann	$S = k_B \ln W$ , wobei $W$ die Zahl der Mikrozustände beschreibt.
Entropieänderung $\Delta S$	$\Delta S = \frac{q_{\text{rev}}}{T}$ , wobei $q_{\text{rev}}$ die reversibel übertragene Wärme bezeichnet.
Gibbs-Energie $G$	$G = H - TS$ $\Delta_r G^\circ = -RT \ln K = -zFE^\circ$ , wobei $K$ die Gleichgewichtskonstante, $z$ die Zahl übertragener Elektronen und $E^\circ$ das Standardelektrodenpotential beschreiben.
Reaktionsquotient $Q$	$\Delta_r G = \Delta_r G^\circ + RT \ln Q$ Für eine Reaktion $aA + bB \rightleftharpoons cC + dD$ $Q = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b}$ , wobei $[A]$ die Konzentration von Spezies A beschreibt.

Wärmeübertragung $\Delta q$	$\Delta q = nc_m \Delta T$ , wobei $c_m$ die temperaturunabhängige molare Wärmekapazität beschreibt.
Nernst-Gleichung für Redoxreaktionen	$E = E^\circ + \frac{RT}{zF} \ln \frac{C_{\text{ox}}}{C_{\text{red}}}$ , wobei $C_{\text{ox}}$ die Konzentration(en) der oxidierten und $C_{\text{red}}$ die Konzentration(en) der reduzierten Spezies beschreiben.
Arrhenius-Gleichung	$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$ , wobei $k$ die Geschwindigkeitskonstante, $A$ einen prä-exponentiellen Faktor sowie $E_a$ die Aktivierungsenergie bezeichnen. $\exp(x) = e^x$
Lambert-Beersches Gesetz	$A = \varepsilon lc$ , wobei $A$ die Absorbanz, $\varepsilon$ den molaren Extinktionskoeffizienten, $l$ die Schichtdicke und $c$ die Konzentration des Analyten in Lösung beschreiben.
Henderson-Hasselbalch-Gleichung	Für ein Protolysegleichgewicht $\text{HA} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{A}^-$ , bei dem die Gleichgewichtskonstante als $K_a$ gegeben ist, berechnet sich der $\text{pH}$ -Wert als: $\text{pH} = \text{p}K_a + \log\left(\frac{[\text{A}^-]}{[\text{HA}]}\right)$
Energie eines Photons	$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$ , wobei $\nu$ die Frequenz und $\lambda$ die Wellenlänge des Lichts beschreibt.
Geometrische Reihe	Wenn $x \neq 1$ , dann gilt für die Summe der Potenzen einer Zahl $x$ $1 + x + x^2 + \dots + x^n = \sum_{i=0}^n x^i = \frac{1 - x^{n+1}}{1 - x}$
Näherungsgleichung	Für kleine Werte von $x$ (also für $x \ll 1$ ) gilt näherungsweise: $\frac{1}{1-x} \simeq 1 + x$

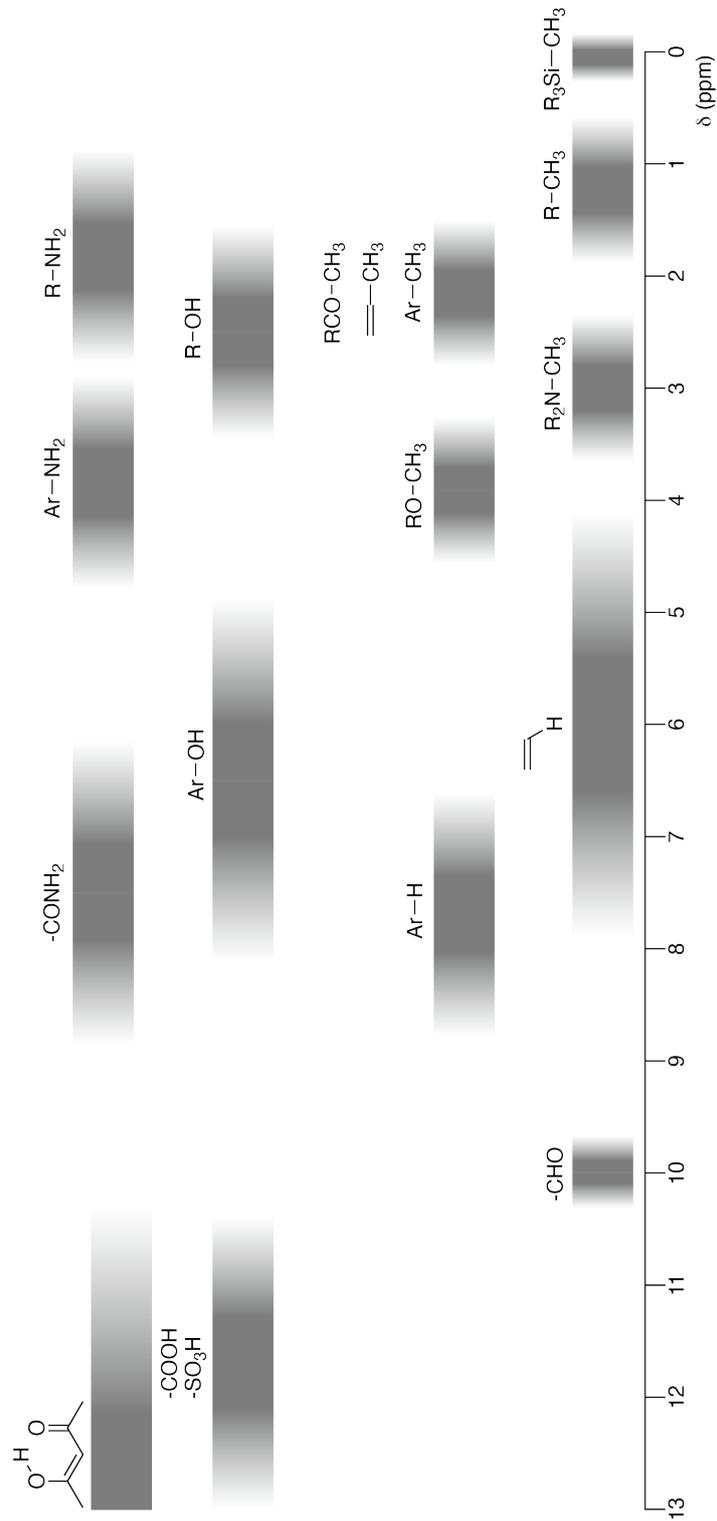
## Periodensystem der Elemente

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	1	H Hydrogen 1.008																	2 He Helium 4.003
	3	Li Lithium 6.968	4 Be Beryllium 9.012															9 F Fluorine 18.998	10 Ne Neon 20.180
	11	Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.306															17 Cl Chlorine 35.452	18 Ar Argon 39.948
	19	K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.693	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.630	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.971	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798
	37	Rb Rubidium 85.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.95	43 Tc Technetium [99]	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.906	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.868	48 Cd Cadmium 112.414	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.904	54 Xe Xenon 131.293
	55	Cs Caesium 132.905	56 Ba Barium 137.327	57-71 La-Lu Lanthanoids	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.217	78 Pt Platinum 195.084	79 Au Gold 196.967	80 Hg Mercury 200.592	81 Tl Thallium 204.384	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98	84 Po Polonium [210]	85 At Astatine [210]	86 Rn Radon [222]
	87	Fr Francium [223]	88 Ra Radium [226]	89-103 Ac-Lr Actinoids	104 Rf Rutherfordium [267]	105 Db Dubnium [268]	106 Sg Seaborgium [271]	107 Bh Bohrium [272]	108 Hs Hassium [277]	109 Mt Meitnerium [276]	110 Ds Darmstadtium [281]	111 Rg Roentgenium [280]	112 Cn Copernicium [285]	113 Nh Nihonium [288]	114 Fl Flerovium [289]	115 Mc Moscovium [289]	116 Lv Livermorium [293]	117 Ts Tennessine [293]	118 Og Oganesson [294]
	57-71	La-Lu Lanthanoids	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium [145]	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.045	71 Lu Lutetium 174.967			
	89-103	Ac-Lr Actinoids	90 Th Thorium 232.038	91 Pa Protactinium 231.036	92 U Uranium 238.029	93 Np Neptunium [237]	94 Pu Plutonium [239]	95 Am Americium [243]	96 Cm Curium [247]	97 Bk Berkelium [247]	98 Cf Californium [252]	99 Es Einsteinium [252]	100 Fm Fermium [257]	101 Md Mendelevium [258]	102 No Nobelium [259]	103 Lr Lawrencium [262]			

Key:

113	Nh	atomic number
Symbol	name	atomic weight (in parenthesis for the radioactive element)
Nihonium	[278]	

Chemische Verschiebungen im  $^1\text{H-NMR}$





AUT-1 C-0 G-8

**G0-8**  
AUT German (Austria)

---

Änderung der chemischen Verschiebung  $\Delta\delta$  bei Substitution mit einer Alkylgruppe: *ca.* +0.4 ppm

AUT-1 C-1 C-1

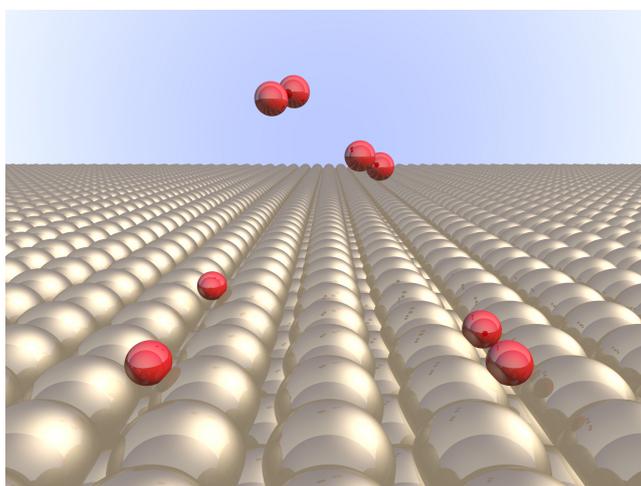
**AUT-1 C-1 C**  
Maciej Swiatek

**ICHO**  
**Problem 1**  
Cover sheet

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

## Wasserstoff an einer Metalloberfläche

11 % des Wettbewerbs							
Frage	A.1	A.2	B.1	B.2	B.3	B.4	Gesamt
Punkte	6	4	5	3	3	3	24
erreicht							



Von fossilen Brennstoffen unabhängiger Wasserstoff kann ein Energieträger der Zukunft sein. Hier wird der Vorgang der Wasserstoffspeicherung in einem Metall betrachtet, der zur Technologie des Wasserstofftransports und der Wasserstoffspeicherung gehört.

### Teil A

Da Wasserstoff bei der Absorption in das Innere eines Metalls durch dessen Oberfläche treten muss, betrachten wir zuerst den Prozess der Adsorption an eben dieser Oberfläche  $\text{H}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}(\text{ad})$ , wobei wir den Zustand des Wasserstoffs als gasförmig (g) oder adsorbiert (ad) bezeichnen. Wasserstoffmoleküle ( $\text{H}_2$ ) dissoziieren beim Erreichen der Metalloberfläche (M) und werden als H-Atome adsorbiert (Abb. 1).

Die potentielle Energie von  $\text{H}_2$  wird hier durch zwei Variablen ausgedrückt: Den Bindungsabstand  $d$  und die Höhe  $z$  gemessen von den Oberflächenatomen. Es wird angenommen, dass die Bindungsachse der beiden H-Atome parallel zur Oberfläche verläuft und dass der Massenschwerpunkt stets auf der vertikalen gestrichelten Linie in Abb. 1 liegt.

Abb. 2 zeigt in einer Konturliniendarstellung die potentielle Energie des Dissoziationsvorgangs an der Oberfläche. Die Zahlen geben die potentielle Energie in  $\text{kJ/mol H}_2$  an. Durchgezogene Linien haben einen Abstand von  $20 \text{ kJ mol}^{-1}$ , gestrichelte einen von  $100 \text{ kJ mol}^{-1}$ , der Abstand zwischen durchgezogen und gestrichelt ist  $80 \text{ kJ mol}^{-1}$ . Die Nullpunkts-Schwingungsenergie wird vernachlässigt.

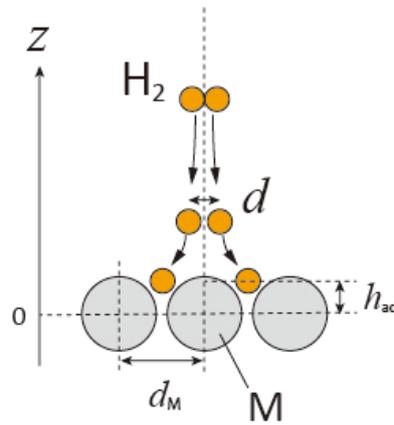


Abb. 1: Definition der Variablen - nicht maßstäblich.

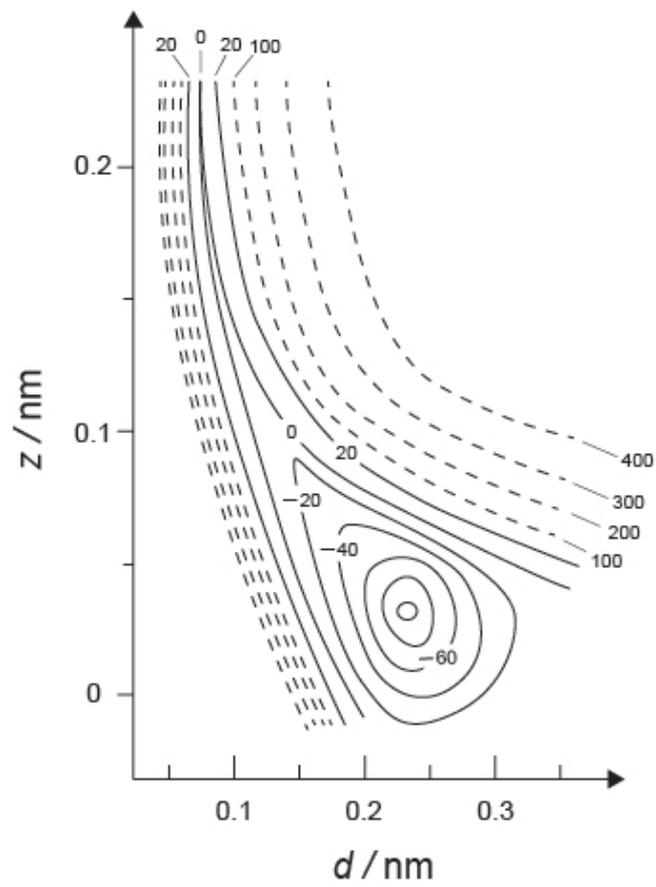


Abb. 2

- A.1** **Wählen** Sie für jeden der folgenden Abstände (i) - (iii) den nächstgelegenen Wert aus der Liste A-G. 6pt
- (i) Den Bindungsabstand im gasförmigen  $H_2$  Molekül.  
(ii) Den Abstand zwischen benachbarten Metallatomen ( $d_M$  in Abb. 1)  
(iii) Den Abstand adsorbierter H-Atome von der Oberfläche ( $h_{ad}$  in Abb. 1)

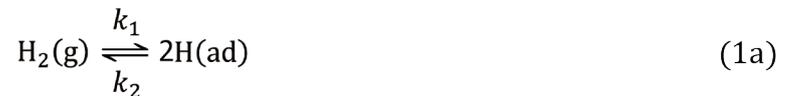
A. 0.03 nm   B. 0.07 nm   C. 0.11 nm   D. 0.15 nm  
E. 0.19 nm   F. 0.23 nm   G. 0.27 nm

- A.2** **Wählen** Sie für jede der folgenden Energien (i), (ii) den nächstgelegenen Wert aus der Liste A-H. 4pt
- (i) Die Energie zum Spalten von gasförmigem  $H_2$  in gasförmiges H  
[ $H_2(g) \rightarrow 2H(g)$ ]  
(ii) Die Energie, die bei der Adsorption von gasförmigem  $H_2$  frei wird [  $H_2(g) \rightarrow 2H(ad)$  ]

A. 20  $\text{kJ mol}^{-1}$    B. 40  $\text{kJ mol}^{-1}$    C. 60  $\text{kJ mol}^{-1}$    D. 100  $\text{kJ mol}^{-1}$   
E. 150  $\text{kJ mol}^{-1}$    F. 200  $\text{kJ mol}^{-1}$    G. 300  $\text{kJ mol}^{-1}$    H. 400  $\text{kJ mol}^{-1}$

## Teil B

Die adsorbierten H-Atome werden entweder in das Innere absorbiert oder rekombinieren und desorbieren wieder in die Gasphase, wie in Reaktionen (1a) und (1b) gezeigt. H(ab) bezeichnet ein in das Innere absorbiertes H-Atom



Für eine Adsorptionsstelle an der Oberfläche sind die Reaktionsgeschwindigkeiten für Adsorption  $r_1[\text{s}^{-1}]$ , Desorption  $r_2[\text{s}^{-1}]$  und Absorption  $r_3[\text{s}^{-1}]$ . Sie werden folgendermaßen ausgedrückt:

$$r_1 = k_1 P_{\text{H}_2} (1 - \theta)^2 \quad (2)$$

$$r_2 = k_2 \theta^2 \quad (3)$$

$$r_3 = k_3 \theta \quad (4)$$

darin sind  $k_1 [\text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}]$ ,  $k_2 [\text{s}^{-1}]$  und  $k_3 [\text{s}^{-1}]$  die Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten und  $P_{\text{H}_2}$  der Druck von  $\text{H}_2$ . Für die Oberflächenplätze (Adsorptionsstellen) gibt  $\theta$  ( $0 \leq \theta \leq 1$ ) den Bruchteil der von H besetzten Plätzen an. Es wird angenommen, dass Adsorption und Desorption schnell sind gegenüber der Absorption ( $r_1, r_2 \gg r_3$ ) und dass  $\theta$  konstant bleibt.

**B.1**  $r_3$  kann ausgedrückt werden als:

5pt

$$r_3 = \frac{k_3}{1 + \sqrt{\frac{1}{P_{\text{H}_2} C}}} \quad (5)$$

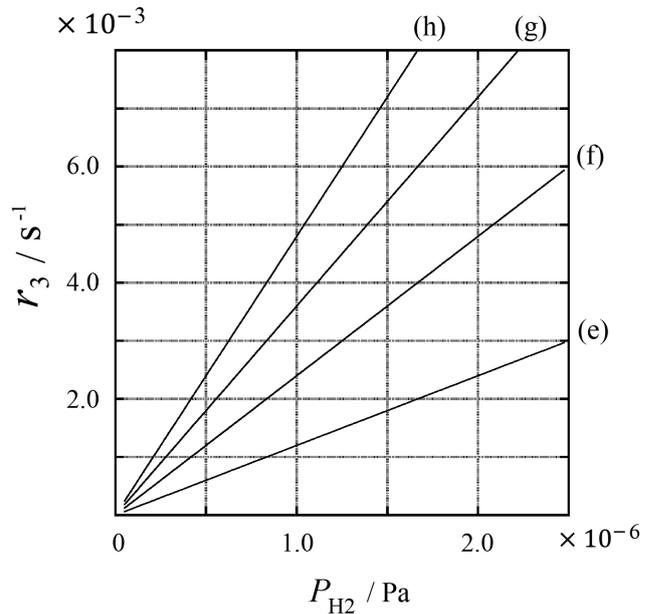
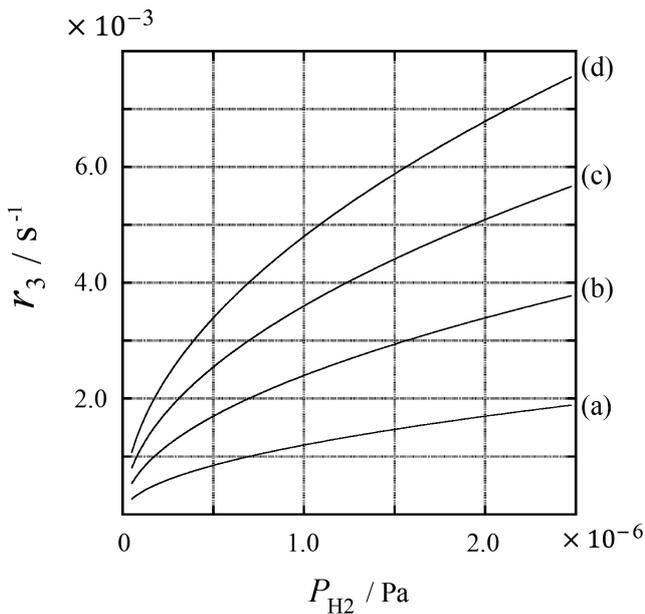
**Drücken** Sie  $C$  durch  $k_1$  und  $k_2$  aus.

Eine Metallprobe mit einer Oberfläche  $S = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2$  wurde in einen Behälter ( $1\text{L} = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ) mit  $\text{H}_2$  ( $P_{\text{H}_2} = 1.0 \times 10^2 \text{ Pa}$ ) gegeben. Die Dichte der Oberflächenplätze für die H-Adsorption betrug  $N = 1.3 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}$ . Die Oberflächentemperatur wurde bei  $T = 400 \text{ K}$  gehalten. Mit fortschreitender Reaktion (1) nahm  $P_{\text{H}_2}$  mit der konstanten Rate  $v = 4.0 \times 10^{-4} \text{ Pa s}^{-1}$  ab. Betrachten Sie  $\text{H}_2$  als ideales Gas und das Volumen der Metallprobe als vernachlässigbar.

**B.2** Berechnen Sie die Menge  $A$  [ $\text{mol s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ] der pro Flächen- und Zeiteinheit adsorbierten H-Atome. 3pt

**B.3** Bei  $T = 400 \text{ K}$  beträgt  $C$   $1.0 \times 10^2 \text{ Pa}^{-1}$ . Berechnen Sie  $k_3$  bei  $400 \text{ K}$ . Wenn Sie bei **B.2** keine Antwort erhalten haben, rechnen Sie mit  $A = 3.6 \times 10^{-7} \text{ mol s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ . 3pt

**B.4** Bei einer anderen Temperatur  $T$  seien  $C = 2.5 \times 10^3 \text{ Pa}^{-1}$  und  $k_3 = 4.8 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  gegeben. Wählen Sie aus (a) bis (h) die Kurve **aus**, die  $r_3$  als Funktion von  $P_{\text{H}_2}$  bei dieser Temperatur korrekt darstellt. 3pt





AUT-1 C-1 A-1

**A1-1**  
AUT German (Austria)

## Wasserstoff an einer Metalloberfläche

### Teil A

**A.1** (6 pt)

(i)	(ii)	(iii)

**A.2** (4 pt)

(i)	(ii)



AUT-1 C-1 A-2

**A1-2**  
AUT German (Austria)

**Teil B**

**B.1** (5 pt)

$C =$  \_\_\_\_\_

**B.2** (3 pt)

$A =$  \_\_\_\_\_  $\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$



AUT-1 C-1 A-3

**A1-3**  
AUT German (Austria)

**B.3** (3 pt)

$k_3 =$  \_\_\_\_\_  $s^{-1}$

**B.4** (3 pt)

\_\_\_\_\_

AUT-1 C-2 C-1

**AUT-1 C-2 C**  
Maciej Swiatek

**ICHO**  
**Problem 2**  
Cover sheet

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

## Eine Isotopen-Zeitkapsel

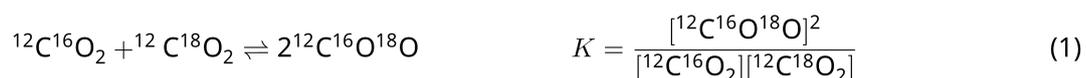
11 % des Wettbewerbs					
Frage	A.1	A.2	A.3	A.4	Total
Punkte	8	8	10	9	<b>35</b>
erreicht					



Moleküle, die sich nur in der Isotopenzusammensetzung unterscheiden, wie z. B.  $\text{CH}_4$  und  $\text{CH}_3\text{D}$ , werden als Isotopologe bezeichnet. Es wird davon ausgegangen, dass Isotopologe dieselben chemischen Eigenschaften haben. In der Natur gibt es jedoch einen feinen Unterschied.

Gehen Sie davon aus, dass sich alle in dieser Aufgabe behandelten Stoffe in der Gasphase befinden.

Betrachten wir folgendes Gleichgewicht:

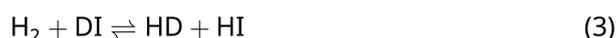


Die Entropie  $S$  nimmt mit der Anzahl  $W$  der möglichen Mikrozustände eines Systems zu:

$$S = k_B \ln W \quad (2)$$

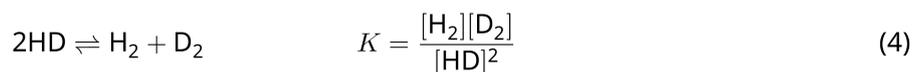
Für  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$  und  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}_2$  ist  $W = 1$ . Hingegen ist  $W = 2$  für ein Molekül  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ , denn hier sind die O-Atome unterscheidbar. Da auf der rechten Seite des Gleichgewichts (1) zwei Moleküle  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$  stehen, ist  $W = 2^2 = 4$ .

**A.1** Die Enthalpieänderung  $\Delta H$  für Gleichung (3) ist bei jeder Temperatur positiv. 8pt



**Berechnen** Sie die Gleichgewichtskonstanten  $K$ , für Gl. (3) bei sehr niedrigen (denken Sie  $T \rightarrow 0$ ) und sehr hohen (denken Sie  $T \rightarrow +\infty$ ) Temperaturen. Nehmen Sie an, dass die Reaktion bei diesen Temperaturen unverändert bleibt und dass  $\Delta H$  bei hohen Temperaturen zu einem konstanten Wert strebt.

$\Delta H$  der folgenden Reaktion kann durch Molekülschwingungen erklärt werden.



Bei  $T = 0$  K ist die Schwingungsenergie eines zweiatomigen Moleküls mit der Schwingungsfrequenz  $\nu$  [ $\text{s}^{-1}$ ] gegeben durch:

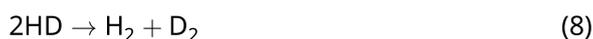
$$E = \frac{1}{2} h\nu \quad (5)$$

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}} \quad (6)$$

Dabei ist  $k$  die Kraftkonstante und  $\mu$  die reduzierte Masse. Mit den Atommassen  $m_1$  und  $m_2$  der beteiligten Atome ist diese gegeben als:

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (7)$$

**A.2** Die  $\text{H}_2$ -Schwingung tritt bei der Wellenzahl  $4161.0 \text{ cm}^{-1}$  auf. . **Berechnen** Sie 8pt für folgende Reaktion  $\Delta H$  bei  $T = 0$  K in  $\text{J mol}^{-1}$ .



Nehmen Sie an, dass...

- nur die Schwingungsenergien zu  $\Delta H$  beitragen.
- der Wert von  $k$  für  $\text{H}_2$ ,  $\text{HD}$ , und  $\text{D}_2$  derselbe ist.
- die Masse von H 1 Da und die von D 2 Da beträgt.



Die Stoffmengenverhältnisse von  $\text{H}_2$ , HD, und  $\text{D}_2$  im Gleichgewicht hängen von der Temperatur ab. Wir definieren  $\Delta_{\text{D}_2}$  als relative Stoffmengenänderung von  $\text{D}_2$ .

$$\Delta_{\text{D}_2} = \frac{R_{\text{D}_2}}{R_{\text{D}_2}^*} - 1 \quad (9)$$

Dabei ist  $R_{\text{D}_2}$  das Verhältnis  $\frac{[\text{D}_2]}{[\text{H}_2]}$  in der Probe und  $R_{\text{D}_2}^*$  das Verhältnis  $\frac{[\text{D}_2]}{[\text{H}_2]}$  bei  $T \rightarrow +\infty$ . Beachten Sie, dass bei  $T \rightarrow +\infty$  die Verteilung der Isotope völlig zufällig wird.

- A.3** **Berechnen** Sie  $\Delta_{\text{D}_2}$  mit der natürlichen Häufigkeit von D, wenn sich der Isotopenaustausch bei einer Temperatur im Gleichgewicht befindet, bei der  $K$  in Gleichung (4) den Wert 0.300 annimmt. Gehen Sie vom natürlichen Häufigkeitsverhältnis aus - D:  $1.5576 \times 10^{-4}$  und H:  $1 - 1.5576 \times 10^{-4}$ . 10pt

Im Allgemeinen steigt das Stoffmengenverhältnis eines doppelt substituierten Isotopologen mit zwei schweren Isotopen in einem Molekül mit abnehmender Temperatur.

Betrachten wir das Stoffmengenverhältnis von zwei CO<sub>2</sub>-Molekülen mit Molmassen 44 und 47, die wir im Folgenden als CO<sub>2</sub>[44] und CO<sub>2</sub>[47] bezeichnen. Δ<sub>47</sub> wird definiert als:

$$\Delta_{47} = \frac{R_{47}}{R_{47}^*} - 1 \quad (10)$$

$R_{47}$  steht für  $\frac{[\text{CO}_2[47]]}{[\text{CO}_2[44]]}$  in der Probe und  $R_{47}^*$  für  $\frac{[\text{CO}_2[47]]}{[\text{CO}_2[44]]}$  bei  $T \rightarrow +\infty$ .

Die natürlichen Häufigkeiten von Kohlenstoff- und Sauerstoffatomen sind unten angegeben. Ignorieren Sie alle Isotope, die nicht hier aufscheinen.

	<sup>12</sup> C	<sup>13</sup> C
natürliche Häufigkeit	0.988888	0.011112

	<sup>16</sup> O	<sup>17</sup> O	<sup>18</sup> O
natürliche Häufigkeit	0.997621	0.0003790	0.0020000

Die Temperaturabhängigkeit von Δ<sub>47</sub> ist durch folgenden Ausdruck gegeben, in den die absolute Temperatur  $T$  in K eingeht.

$$\Delta_{47} = \frac{36.2}{T^2} + 2.920 \times 10^{-4} \quad (11)$$

- A.4** In fossilem Plankton auf antarktischem Meeresboden wurde  $R_{47} = 4.50865 \times 10^{-5}$  gefunden. **Ermitteln** Sie unter Verwendung dieses  $R_{47}$  die Temperatur. Sie wird interpretiert als Lufttemperatur, die zu Lebzeiten des Planktons geherrscht hat. Berücksichtigen Sie für Ihre Berechnungen nur das häufigste Isotopologe von CO<sub>2</sub>[47]. 9pt



AUT-1 C-2 A-1

**A2-1**  
AUT German (Austria)

## Eine Isotopen-Zeitkapsel

**A.1** (8 pt)

$T \rightarrow 0 : K =$  \_\_\_\_\_ ,  $T \rightarrow +\infty : K =$  \_\_\_\_\_



AUT-1 C-2 A-2

**A2-2**  
AUT German (Austria)

**A.2** (8 pt)

$\Delta H =$  \_\_\_\_\_  $\text{J mol}^{-1}$



AUT-1 C-2 A-3

# A2-3

AUT German (Austria)

**A.3** (10 pt)

$\Delta_{D_2} =$  \_\_\_\_\_



AUT-1 C-2 A-4

**A2-4**  
AUT German (Austria)

**A.4** (9 pt)

$T =$  \_\_\_\_\_  $K$

AUT-1 C-3 C-1

**AUT-1 C-3 C**  
Maciej Swiatek

**ICHO**  
**Problem 3**  
Cover sheet

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

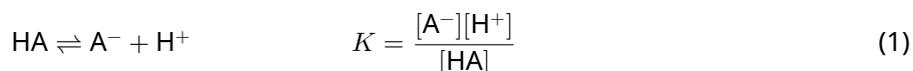
## Lambert-Beersches Gesetz?

8 % des Wettbewerbs				
Frage	A.1	B.1	B.2	<b>Gesamt</b>
Punkte	10	6	6	<b>22</b>
erreicht				

In dieser Aufgabe sollen die Absorption der Küvette und des Lösungsmittels vernachlässigt werden. Die Temperaturen aller Lösungen und Gase werden bei 25 °C konstant gehalten.

### Teil A

Aus HA und NaA wurde eine wässrige Lösung **X** bereitet. Die Konzentrationen von  $[A^-]$ ,  $[HA]$ , und  $[H^+]$  in der Lösung **X** sind  $1.00 \times 10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$ ,  $1.00 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$ , bzw.  $1.00 \times 10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$ , die durch das folgende Säure-Base-Gleichgewicht gegeben sind:



In Teil A ist die optische Weglänge  $l$ . Die Änderung der Dichte durch Verdünnung wird hier vernachlässigt. Nehmen Sie an, dass keine Reaktionen außer (1) stattfinden.

- |  |             |
|--|-------------|
| <p><b>A.1</b> Die Absorbanz von <b>X</b> bei der Wellenlänge <math>\lambda_1</math> betrug <math>A_1</math>. Die Lösung <b>X</b> wurde dann mit Salzsäure (<math>pH = 2.500</math>) auf das Doppelte ihres ursprünglichen Volumens verdünnt. Nach Verdünnung betrug die Absorbanz bei <math>\lambda_1</math> immer noch <math>A_1</math>. <b>Bestimmen</b> Sie das Verhältnis <math>\varepsilon_{HA}/\varepsilon_{A^-}</math>, wobei <math>\varepsilon_{HA}</math> und <math>\varepsilon_{A^-}</math> die Absorptionskoeffizienten von HA bzw. <math>A^-</math> bei <math>\lambda_1</math> sind.</p> | <p>10pt</p> |
|--|-------------|

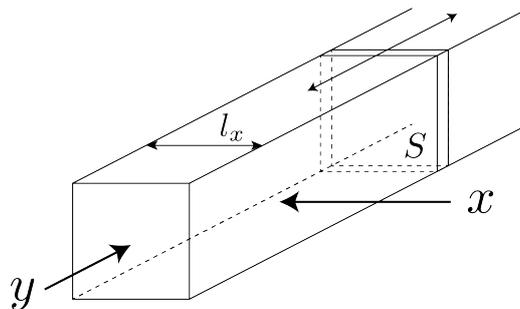
## Teil B

Wir betrachten folgendes Gasgleichgewicht:



Reines Gas D mit dem Druck  $P$  wird in einen transparenten quaderförmigen Behälter mit einer beweglichen Wand mit der Querschnittsfläche  $S$  (vgl. Abbildung unten) gefüllt. Der Druck wird bei  $P$  gehalten und das Gleichgewicht stellt sich ein.

Die Absorbanz des Gases ist  $A = \varepsilon(n/V)l$ , wobei  $\varepsilon$  der Absorptionskoeffizient,  $n$  die Stoffmenge des Gases in Mol,  $V$  das Gasvolumen und  $l$  die Schichtdicke sind. Die Gasmischung kann als ideales Gas behandelt werden.



Benutzen Sie die folgenden Definitionen:

	Anfangszustand		Gleichgewichtszustand	
	D	M	D	M
Partialdruck	$P$	0	$p_D$	$p_M$
Stoffmenge in mol	$n_0$	0	$n_D$	$n_M$
Volumen	$V_0$		$V$	

**B.1** Die Absorbanz des Gases bei  $\lambda_{B1}$ , gemessen in  $x$ -Richtung ( $l = l_x$ ), betrug sowohl im Anfangs- als auch im Gleichgewichtszustand  $A_{B1}$ . **Bestimmen** Sie das Verhältnis  $\varepsilon_D/\varepsilon_M$  bei  $\lambda_{B1}$ , wobei  $\varepsilon_D$  und  $\varepsilon_M$  die Absorptionskoeffizienten von D bzw. M sind. 6pt

**B.2** Die Absorbanz des Gases bei der Wellenlänge  $\lambda_{B2}$ , gemessen in  $y$ -Richtung, betrug sowohl im Anfangs- ( $l = l_{y0}$ ) als auch im Gleichgewichtszustand ( $l = l_y$ )  $A_{B2}$ . **Bestimmen** Sie das Verhältnis  $\varepsilon_D/\varepsilon_M$  bei  $\lambda_{B2}$ . 6pt



AUT-1 C-3 A-1

**A3-1**  
AUT German (Austria)

## Lambert-Beersches Gesetz?

### Teil A

**A.1** (10 pt)

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)



AUT-1 C-3 A-2

**A3-2**  
AUT German (Austria)

A.1 (cont.)

$\epsilon_{\text{HA}}/\epsilon_{\text{A}^-} =$   
\_\_\_\_\_



AUT-1 C-3 A-3

**A3-3**  
AUT German (Austria)

**Teil B**

**B.1** (6 pt)

$\epsilon_D/\epsilon_M =$  \_\_\_\_\_



AUT-1 C-3 A-4

**A3-4**  
AUT German (Austria)

**B.2** (6 pt)

$\epsilon_D/\epsilon_M =$   
\_\_\_\_\_

AUT-1 C-4 C-1

**AUT-1 C-4 C**  
Maciej Swiatek

**ICHO**  
**Problem 4**  
**Cover sheet**

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

## Die Redoxchemie von Zink

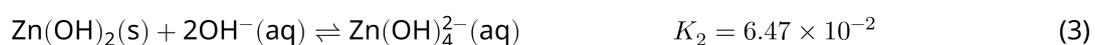
11 % des Wettbewerbs							
Frage	A.1	A.2	B.1	B.2	B.3	B.4	Gesamt
Punkte	6	5	4	3	5	9	32
erreicht							



Zink wird schon lange in verschiedenen Legierungen für Messing und Stähle eingesetzt. Aus Industrieabwässern wird Zink durch Fällung abgetrennt, um diese zu entgiften. Der dabei erhaltene Niederschlag wird reduziert, um das metallische Zink wiederzuverwerten.

### Teil A

Die für das Lösen von Zinkhydroxid  $\text{Zn(OH)}_2(\text{s})$  bei 25 °C relevanten Gleichgewichtskonstanten sind in den Gleichungen (1) bis (4) gegeben.



Die Löslichkeit  $S$  von Zink (die Konzentration von Zink in gesättigter wässriger Lösung) wird durch Gleichung (5) beschrieben.

$$S = [\text{Zn}^{2+}(\text{aq})] + [\text{Zn}(\text{OH})_2(\text{aq})] + [\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}(\text{aq})] \quad (5)$$

**A.1** **Berechnen** Sie den pH-Bereich, in dem - nach Einstellung der Gleichgewichte (1) bis (4) -  $[\text{Zn}(\text{OH})_2(\text{aq})]$  den größten Wert von  $[\text{Zn}^{2+}(\text{aq})]$ ,  $[\text{Zn}(\text{OH})_2(\text{aq})]$  und  $[\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}(\text{aq})]$  hat. 6pt

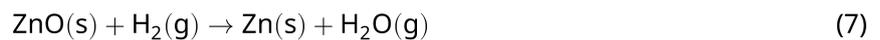
**A.2** Eine gesättigte Lösung von  $\text{Zn}(\text{OH})_2(\text{s})$  mit  $\text{pH} = 7.00$  wurde hergestellt und filtriert. Durch Zugabe von  $\text{NaOH}$  zum Filtrat wurde der  $\text{pH}$  auf  $12.00$  erhöht. **Berechnen** Sie den molaren Prozentsatz des Zinks, das bei der Erhöhung des  $\text{pH}$ -Werts von  $7.00$  auf  $12.00$  ausfällt. Vernachlässigen Sie dabei Volums- und Temperaturänderungen. 5pt

## Teil B

Als nächstes wird das wiedergewonnene Zinkhydroxid nach Gl. (6) erhitzt, um Zinkoxid zu erhalten.



Das Zinkoxid wird dann mit Wasserstoff zu metallischem Zink reduziert (7):



**B.1** Damit Reaktion (7) bei einem Wasserstoffpartialdruck von 1 bar stattfinden kann, muss der Partialdruck des entstehenden Wasserdampfs verringert werden. **Berechnen** Sie den maximalen Wasserdampfpartialdruck, bei dem Reaktion (7) bei  $300^\circ\text{C}$  noch stattfinden kann. Die Bildungs-Gibbs-Energien von Zinkoxid und Wasserdampf bei  $300^\circ\text{C}$  und 1 bar (für alle gasförmigen Spezies) sind  $\Delta G_{\text{ZnO}}(300^\circ\text{C}) = -2.90 \times 10^2 \text{ kJ mol}^{-1}$   $\Delta G_{\text{H}_2\text{O}}(300^\circ\text{C}) = -2.20 \times 10^2 \text{ kJ mol}^{-1}$ . 4pt

Metallisches Zink wird als Anodenmaterial für Metall-Luft-Batterien verwendet. Die Elektrode besteht aus  $\text{Zn}$  und  $\text{ZnO}$ . Zur Erzeugung von Elektrizität wird folgende Redoxreaktion mit der elektromotorischen Kraft (EMK)  $E^\circ$  bei  $25^\circ\text{C}$  und einem Druck von 1 bar verwendet.



**B.2** Eine Zink-Luft-Batterie wurde mit 20 mA für 24 Stunden entladen. **Berechnen** Sie den Massenverlust der Anode dieser Batterie. 3pt



Auch in Japan gibt es Berge: Der Vulkan Fuji

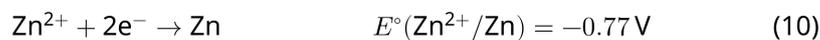
**B.3** Betrachten wir nun die Veränderung der EMK einer Zink-Luft-Batterie abhängig von äußeren Bedingungen. 5pt

**Berechnen** Sie die EMK am Gipfel des Fuji bei einer Temperatur von  $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Februar) und einer Seehöhe von 3776 m. Der Luftdruck bei der Höhe  $h$  [m] und der Temperatur  $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] wird mit Formel (9) berechnet.

$$P \text{ [bar]} = 1.013 \times \left( 1 - \frac{0.0065h}{T + 0.0065h + 273.15} \right)^{5.257} \quad (9)$$

Der Stoffmengenanteil von Sauerstoff in der Atmosphäre beträgt 21%. Die Gibbs-Energie von Reaktion (8) bei  $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$  und 1 bar beträgt  $\Delta G_{\text{ZnO}}(-38\text{ }^{\circ}\text{C}) = -3.26 \times 10^2 \text{ kJ mol}^{-1}$ .

**B.4** **Berechnen** Sie die Reaktions-Gibbs-Energie von Reaktion (6) bei  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Die Standardreduktionspotentiale  $E^{\circ}(\text{Zn}^{2+}/\text{Zn})$  und  $E^{\circ}(\text{O}_2/\text{H}_2\text{O})$  bei  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  und 1 bar sind in Gl. (10) und (11) gegeben. 9pt





AUT-1 C-4 A-1

**A4-1**  
AUT German (Austria)

## Die Redoxchemie von Zink

### Teil A

**A.1** (6 pt)

\_\_\_\_\_ < pH < \_\_\_\_\_



AUT-1 C-4 A-2

**A4-2**  
AUT German (Austria)

**A.2** (5 pt)

\_\_\_\_\_ %



AUT-1 C-4 A-3

**A4-3**  
AUT German (Austria)

**Teil B**

**B.1** (4 pt)

$p_{\text{H}_2\text{O}} =$  \_\_\_\_\_ bar

**B.2** (3 pt)

\_\_\_\_\_ g



AUT-1 C-4 A-4

**A4-4**  
AUT German (Austria)

**B.3** (5 pt)

\_\_\_\_\_ v



AUT-1 C-4 A-5

**A4-5**  
AUT German (Austria)

**B.4** (9 pt)

$\Delta G^\circ =$  \_\_\_\_\_  $\text{J mol}^{-1}$

AUT-1 C-5 C-1

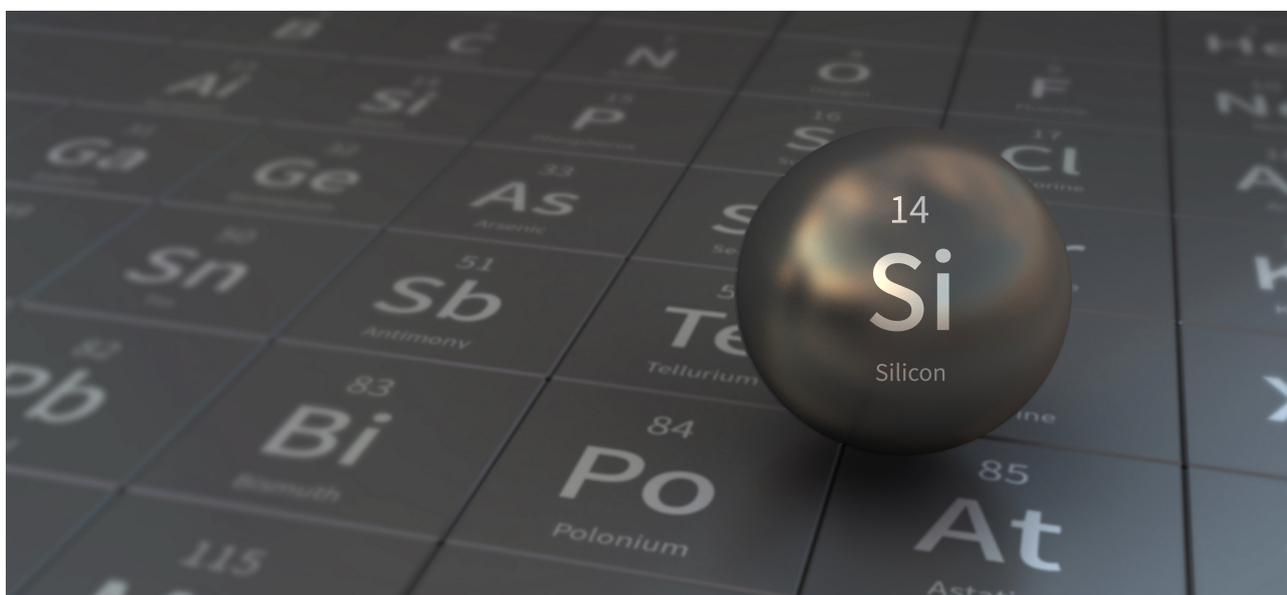
**AUT-1 C-5 C**  
Maciej Swiatek

**ICHO**  
**Problem 5**  
Cover sheet

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

## Mysteriöses Silizium

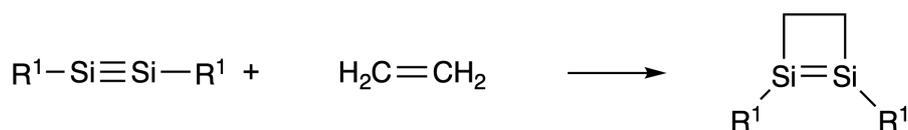
12 % des Wettbewerbs								
Frage	A.1	A.2	A.3	A.4	B.1	B.2	B.3	Gesamt
Punkte	9	7	6	10	5	15	8	<b>60</b>
erreicht								



Obwohl Silizium wie Kohlenstoff ebenfalls ein Element der Gruppe 14 ist, verhalten sie sich signifikant unterschiedlich.

### Teil A

Im Gegensatz zu C-C-Dreifachbindungen sind Si-Si-Dreifachbindungen, geschrieben als  $R^1-Si \equiv Si-R^1$  (R: organischer Substituent), äußerst reaktiv. Beispielsweise reagiert es mit Ethen zu einem cyclischen Produkt, das einen viergliedrigen Ring enthält.



Bei der Reaktion von  $R^1-Si \equiv Si-R^1$  mit einem Alkin ( $R^2-C \equiv C-R^2$ ) entsteht die viergliedrige Cycloverbindung **A** als erstes Zwischenprodukt. Die Reaktion eines weiteren Moleküls von  $R^2-C \equiv C-R^2$  mit **A** liefert die Isomere **B** und **C**. Sowohl **B** als auch **C** zeigen eine konjugierte cyclische Struktur ähnlich dem Benzen.

Diese Isomere sind als "Disilabenzene" bekannt, enthalten einen sechsgliedrigen Ring und können als  $(R^1-Si)_2(R^2-C)_4$  geschrieben werden.



Die  $^{13}C$ -NMR-Spektren der sechsgliedrigen  $Si_2C_4$  Ringgerüste zeigen zwei Signale für **B** und ein Signal für **C**.

**A.1** **Zeichnen** Sie die Strukturformeln der Verbindungen **A**, **B** und **C** unter Verwendung der Symbole  $R^1$ ,  $R^2$ , Si und C. Sie brauchen lediglich eine Resonanzstruktur zeigen. 9pt

**A.2** **Berechnen** Sie die aromatische Stabilisierungsenergie (ASE) von Benzen und von **C** (für die Substituenten  $R^1 = R^2 = H$ ) als positive Werte. Verwenden Sie dazu die Enthalpieänderungen der Hydrierungen verschiedener ungesättigter Verbindungen, welche in Abb. 1 gezeigt sind. 7pt

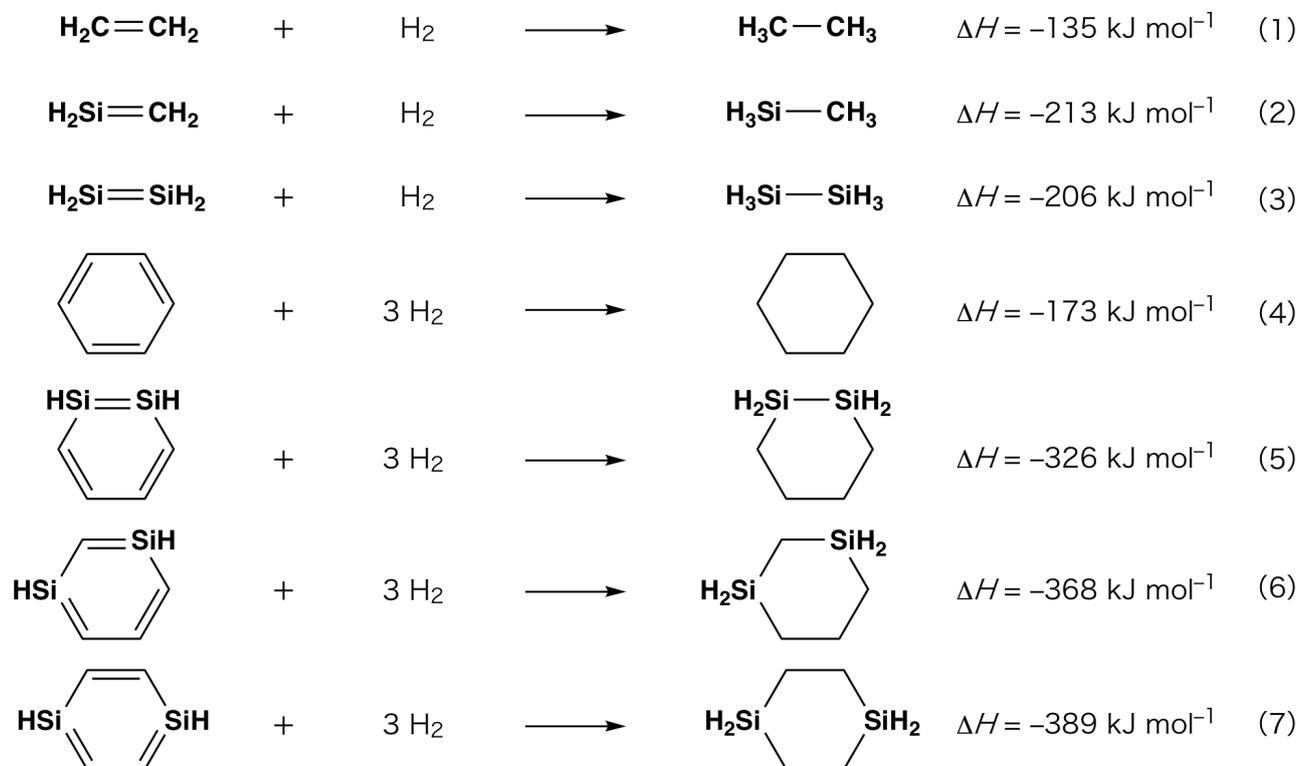


Abb. 1

Beim Erhitzen einer Xylenlösung von **C** isomerisiert diese zu einem Gleichgewichtsgemisch der Verbindungen **D** und **E**. Das molare Verhältnis ist **D** : **E** = 1 : 40.0 bei 50.0 °C und **D** : **E** = 1 : 20.0 bei 120.0 °C.

**A.3** **Berechnen** Sie  $\Delta H$  für die Reaktion von **D** zu **E**. Nehmen Sie an, dass  $\Delta H$  nicht von der Temperatur abhängt. 6pt

Bei der Isomerisierung von **C** zu **D** und **E** werden  $\pi$ -Bindungen in  $\sigma$ -Bindungen umgewandelt, wobei keine vorhandenen  $\sigma$ -Bindungen gebrochen werden. Eine  $^{13}\text{C}$ -NMR Analyse zeigte ein Signal für das  $\text{Si}_2\text{C}_4$ -Gerüst von **D** und zwei Signale für jenes von **E**. Das Gerüst von **D** enthält keine dreigliedrigen Ringe. Verbindung **E** enthält zwei dreigliedrige Ringe, welche sich eine gemeinsame Kante teilen.

**A.4** **Zeichnen** Sie die Strukturformeln von **D** und **E** unter Verwendung der Symbole  $\text{R}^1$ ,  $\text{R}^2$ , Si und C. 10pt

## Teil B

Silizium kann mit elektronegativen Elementen wie Fluor hoch koordinierte Verbindungen (> vier Substituenten) eingehen. Da Metallfluoride häufig als Fluorierungsreagenzien verwendet werden, wirken auch hoch koordinierte Siliziumfluoride als Fluorierungsreagenzien.

Die Fluorierung von  $\text{CCl}_4$  mittels  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  wurde wie folgt durchgeführt.

- **Herstellung der  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ -Standardlösung:**

- Herstellung

Wässrige Lösung **F**: 0.855 g  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  ( $188.053 \text{ g mol}^{-1}$ ) werden in Wasser gelöst (Gesamtvolumen: 200 mL).

Wässrige Lösung **G**: 6.86 g  $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3$  ( $568.424 \text{ g mol}^{-1}$ ) werden in Wasser gelöst (Gesamtvolumen: 200 mL).

- Verfahren

Fällungstitration der Lösung **F** (50.0 mL) durch tropfenweise Zugabe von Lösung **G**. Xylenorange, das an  $\text{Ce}^{3+}$  koordiniert, wird als Indikator verwendet. Nach Zugabe von 18.8 mL der Lösung **G** wird ein Farbumschlag von Gelb nach Magenta beobachtet. Der erzeugte Niederschlag ist eine binäre Verbindung, die  $\text{Ce}^{3+}$  enthält.  $\text{Si}(\text{OH})_4$  ist das einzige Produkt, welches Silizium enthält.

**B.1** **Formulieren** Sie die ausgeglichene Reaktionsgleichung für die Reaktion von  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  mit  $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3$ . 5pt

- **Reaktion von  $\text{CCl}_4$  mit  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ :**

(Materialverluste, z. B. durch Verdunstung sind im Folgenden vernachlässigbar.)

$\text{Na}_2\text{SiF}_6(x \text{ [g]})$  wurde zusammen mit  $\text{CCl}_4$  (500.0 g) in einem verschlossenen Druckreaktor auf 300 °C erhitzt. Nicht-umgesetztes  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  und gebildetes  $\text{NaCl}$  wurden durch Filtration abgetrennt. Das Filtrat wurde mit  $\text{CCl}_4$  auf ein Gesamtvolumen von 1.00 L verdünnt (Lösung **H**). Die  $^{29}\text{Si}$ - und  $^{19}\text{F}$ -NMR-Spektren von Lösung **H** zeigten  $\text{SiF}_4$  als einzige Siliziumverbindung. Im  $^{19}\text{F}$ -NMR-Spektrum wurden neben dem Signal von  $\text{SiF}_4$  weitere Signale beobachtet, welche den Verbindungen  $\text{CFCl}_3$ ,  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{CF}_3\text{Cl}$ , and  $\text{CF}_4$  zugeordnet werden konnten (vgl. Tabelle 1). Die Integrationsverhältnisse im  $^{19}\text{F}$ -NMR-Spektrum sind proportional zur Anzahl der Fluorkerne.

Tabelle 1

<sup>19</sup> F-NMR Daten	CFCl <sub>3</sub>	CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	CF <sub>3</sub> Cl	CF <sub>4</sub>
Integrationsverhältnisse	45.0	65.0	18.0	2.0

SiF<sub>4</sub> wird gemäß Gleichung 8 zu H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> hydrolysiert:



Lösung **H** (10 mL) wurde zu einem Überschuss an Wasser gegeben, was zur vollständigen Hydrolyse von SiF<sub>4</sub> führte. Nach der Abtrennung wurde das bei der Hydrolyse in der wässrigen Lösung erzeugte H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> neutralisiert und vollständig in Na<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> umgewandelt (wässrige Lösung **J**).

Der Niederschlag von nicht umgesetztem Na<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> und NaCl, der im ersten Schritt durch Filtration entfernt wurde (unterstrichen), wurde vollständig in Wasser gelöst (wässrige Lösung **K**; 10.0 L).

Anschließend wurden weitere Fällungstitrations mit Lösung **G** durchgeführt. Die Endpunkte der Titrations mit **G** wurden wie folgt protokolliert:

•Für Lösung **J** (Gesamtmenge): 61.6 mL.

•Für 100 mL von Lösung **K**: 44.4 mL.

Es ist zu beachten, dass die Koexistenz von NaCl oder SiO<sub>2</sub> die Fällungstiteration nicht beeinflusst.

**B.2** **Berechnen** Sie die Masse des im Reaktionsgefäß produzierten NaCl (Information unterstrichen) und **berechnen** Sie die Masse ( $x$  [g]) des als Ausgangsmaterial verwendeten Na<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>. 15pt

**B.3** 77.8% des als Ausgangsmaterial eingesetzten CCl<sub>4</sub> haben nicht reagiert. **Berechnen** Sie die Menge an gebildetem CF<sub>3</sub>Cl. 8pt



AUT-1 C-5 A-1

**A5-1**  
AUT German (Austria)

## Mysteriöses Silizium

### Teil A

**A.1** (9 pt)

**A** (3 pt)

**B** (3 pt)

**C** (3 pt)

**A.2** (7 pt)

$C_6H_6$  : \_\_\_\_\_  $\text{kJ mol}^{-1}$ , **C** : \_\_\_\_\_  $\text{kJ mol}^{-1}$



AUT-1 C-5 A-2

**A5-2**  
AUT German (Austria)

**A.3** (6 pt)

$\Delta H =$  \_\_\_\_\_  $\text{kJ mol}^{-1}$

**A.4** (10 pt)

**D** (5 pt)

**E** (5 pt)



AUT-1 C-5 A-3

**A5-3**  
AUT German (Austria)

**Teil B**

**B.1** (5 pt)

---

**B.2** (15 pt)

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)



AUT-1 C-5 A-4

**A5-4**  
AUT German (Austria)

**B.2 (cont.)**

NaCl : \_\_\_\_\_ g, Na<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> : \_\_\_\_\_ g



AUT-1 C-5 A-5

**A5-5**  
AUT German (Austria)

**B.3** (8 pt)

$\text{CF}_3\text{Cl}$  : \_\_\_\_\_ g

AUT-1 C-6 C-1

**AUT-1 C-6 C**  
Maciej Swiatek

**ICHO**  
**Problem 6**  
Cover sheet

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

## Festkörperchemie von Übergangsmetallen

13 % des Wettbewerbs											
Frage	A.1	A.2	A.3	B.1	B.2	B.3	B.4	C.1	C.2	C.3	Gesamt
Punkte	6	3	3	6	4	4	4	5	5	5	<b>45</b>
erreicht											



Vulkan auf der Insel Sakurajima

### Teil A

Japan ist eines der Länder mit der größten Anzahl aktiver Vulkane weltweit. Wenn Silikat-Mineralien aus Magma kristallisieren, wird ein Teil der im Magma enthaltenen Übergangsmetall-Ionen ( $M^{n+}$ ) in die Silikat-Mineralien eingebaut.

Die in dieser Aufgabe betrachteten Übergangsmetall-Ionen  $M^{n+}$  werden durch Oxid-Ionen ( $O^{2-}$ ) koordiniert und liegen im Magma in einer vierfach-koordinierten tetraederischen Geometrie ( $T_d$ ) vor, in den Silikatmineralien hingegen in einer sechsfach-koordinierten oktaedrischen ( $O_h$ ). In beiden Fällen besitzen die Ionen high-spin-Elektronenkonfiguration.

Der Verteilungskoeffizient von  $M^{n+}$  zwischen Silikatmineralien und Magma,  $D$ , wird folgendermaßen ausgedrückt:

$$D = \frac{[M]_s}{[M]_l}$$

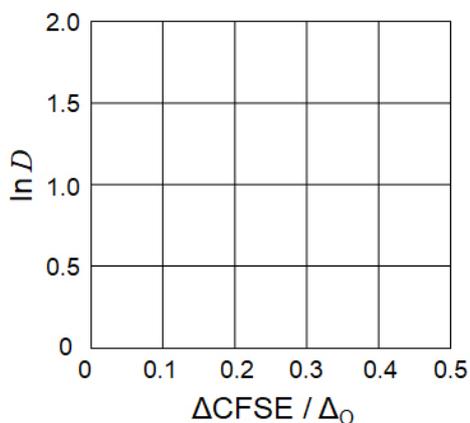
Dabei sind  $[M]_s$  und  $[M]_l$  die Konzentrationen von  $M^{n+}$  in Silikatmineralien (s) und Magma (l). Nachfolgende Tabelle zeigt beispielsweise die Werte von  $D$  von  $Cr^{2+}$  and  $Mn^{2+}$ .

	Cr <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>
<i>D</i>	7.2	1.1

$\Delta_O$  ist die Ligandenfeldaufspaltung der d-Orbitale von  $M^{n+}$ ,  $CFSE^O$  ist die Kristallfeldstabilisierungsenergie in einem  $O_h$ -Feld.  $\Delta_T$  und  $CFSE^T$  sind die entsprechenden Größen in einem  $T_d$ -Feld.

**A.1** **Berechnen** Sie  $|CFSE^O - CFSE^T| = \Delta CFSE$  in Einheiten von  $\Delta_O$  für Cr<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> und Co<sup>2+</sup>; Verwenden Sie dabei  $\Delta_T = 4/9\Delta_O$ . 6pt

**A.2** Trägt man in einem kartesischen Koordinatensystem  $\ln D$  gegen  $\Delta CFSE / \Delta_O$  auf, ergibt sich ein linearer Zusammenhang. **Ermitteln** Sie *D* von Co<sup>2+</sup>. 3pt



Metalloxide MO (M: Ca, Ti, V, Mn oder Co) kristallisieren in einem Kochsalz-Gitter wobei  $M^{n+}$  in einer  $O_h$ -Geometrie mit high-spin Elektronenkonfiguration vorliegt. Die Gitterenthalpie dieser Oxide wird größtenteils von Coulombwechselwirkungen (basierend auf Radius und Ladung der Ionen) sowie in kleinerem Maße von der CFSE der  $M^{n+}$  im  $O_h$ -Feld beeinflusst.

**A.3** **Wählen** Sie einen passenden Satz an Gitterenthalpien [ $\text{kJ mol}^{-1}$ ] aus den Zeilen (a) bis (f) aus.

3pt

	CaO	TiO	VO	MnO	CoO
(a)	3460	3878	3913	3810	3916
(b)	3460	3916	3878	3810	3913
(c)	3460	3913	3916	3810	3878
(d)	3810	3878	3913	3460	3916
(e)	3810	3916	3878	3460	3913
(f)	3810	3913	3916	3460	3878

**Teil B**

Ein Mischoxid **A**, das  $\text{La}^{3+}$  und  $\text{Cu}^{2+}$  enthält, kristallisiert in einer tetragonalen Elementarzelle (Abb. 1). Bei den  $[\text{CuO}_6]$ -Oktaedern ist der Cu-O-Abstand entlang der z-Achse ( $l_z$ ) länger als der entlang der x-Achse ( $l_x$ ). Diese gegenüber dem regelmäßigen Oktaeder verzerrte Geometrie von  $[\text{CuO}_6]$  hebt die Entartung der  $e_g$ -Orbitale ( $d_{x^2-y^2}$  und  $d_{z^2}$ ) auf.

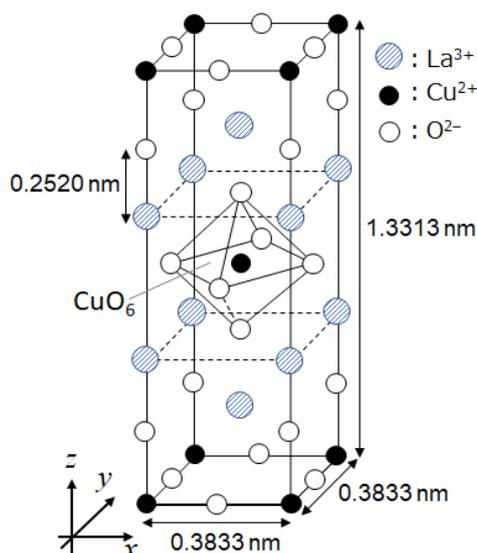


Abb. 1

**A** kann durch thermische Zersetzung (Pyrolyse) von Komplex **B** synthetisiert werden. Komplex **B** wird durch Mischen von Metallchloriden mit einer verdünnten, wässrigen Ammoniak-Lösung, die die Quatrat-säure  $\text{C}_4\text{H}_2\text{O}_4$  (eine Disäure), enthält, gewonnen.

Bei Pyrolyse von **B** in trockener Luft tritt bis  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  ein Masseverlust von  $29.1 \%$  durch den Verlust von Kristallwasser auf. Anschließend erfolgt bis  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  Masseverlust durch die Freisetzung von  $\text{CO}_2$ . Der gesamte Masseverlust während der Herstellung von **A** aus **B** beträgt  $63.6 \%$ . Nur Wasser und  $\text{CO}_2$  werden während der Pyrolyse freigesetzt.

**B.1 Geben** Sie die chemischen Formeln von **A** und **B** an. 6pt

**B.2 Berechnen** Sie  $l_x$  und  $l_z$  unter Verwendung von Abb. 1. 4pt

**B.3 Schreiben** Sie die Bezeichnungen ( $d_{x^2-y^2}$  und  $d_{z^2}$ ) der in den verzerrten  $[\text{CuO}_6]$ -Oktaedern aufgespaltenen  $e_g$ -Orbitale der  $\text{Cu}^{2+}$ -Ionen in **A** (Abb. 1) zu (i) und (ii). 4pt  
**Tragen** Sie die Elektronenkonfiguration in die gepunktete Box am Antwortblatt ein.

**A** ist ein Isolator. Wenn ein  $\text{La}^{3+}$  durch ein  $\text{Sr}^{2+}$  substituiert wird, entsteht ein Defektelektron im Kristallgitter, welches Strom leiten kann. Deshalb besitzt  $\text{Sr}^{2+}$ -dotiertes **A** supraleitende Eigenschaften unterhalb von 38 K. Nach einer Substitutionsreaktion von **A** entstanden  $2.05 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$  derartiger Defektelektronen.

**B.4 Berechnen** Sie den Prozentsatz der  $\text{Sr}^{2+}$ -Ionen, die anstelle von  $\text{La}^{3+}$  eingebaut wurden, basierend auf dem stöchiometrischen Verhältnis der Substitutionsreaktion. Beachten Sie, dass die Valenzen der ionischen Bestandteile und die Kristallstruktur durch die Substitutionsreaktion nicht verändert werden. 4pt

### Teil C

$\text{Cu}_2(\text{CH}_3\text{CO}_2)_4$  besteht aus vier  $\text{CH}_3\text{CO}_2^-$ -Ionen, die zwei  $\text{Cu}^{2+}$ -Ionen koordinieren (Abb. 2A).  $\text{Cu}_2(\text{CH}_3\text{CO}_2)_4$  besitzt eine hohe strukturelle Symmetrie. Die zwei Achsen durch die Kohlenstoffatome der vier  $\text{CH}_3\text{CO}_2^-$ -Ionen und die Achse durch die beiden  $\text{Cu}^{2+}$ -Ionen liegen orthogonal zueinander.

Wenn als Ligand statt  $\text{CH}_3\text{CO}_2^-$  ein Dicarboxylat verwendet wird, wird ein sogenannter "Käfig-Komplex" gebildet. Der Käfig-Komplex  $\text{Cu}_4(\text{L1})_4$  besteht aus dem planaren Dicarboxylat **L1** (Abb. 2B) und  $\text{Cu}^{2+}$  (Abb. 2C).

Der Winkel  $\theta$  zwischen den Koordinationsrichtungen der beiden Carboxylate, in Abb. 2B durch Pfeile dargestellt, bestimmt die Struktur des Käfig-Komplexes.  $\theta$  beträgt  $0^\circ$  für **L1**. (In Abb. 2 sind die Wasserstoffatome weggelassen.)

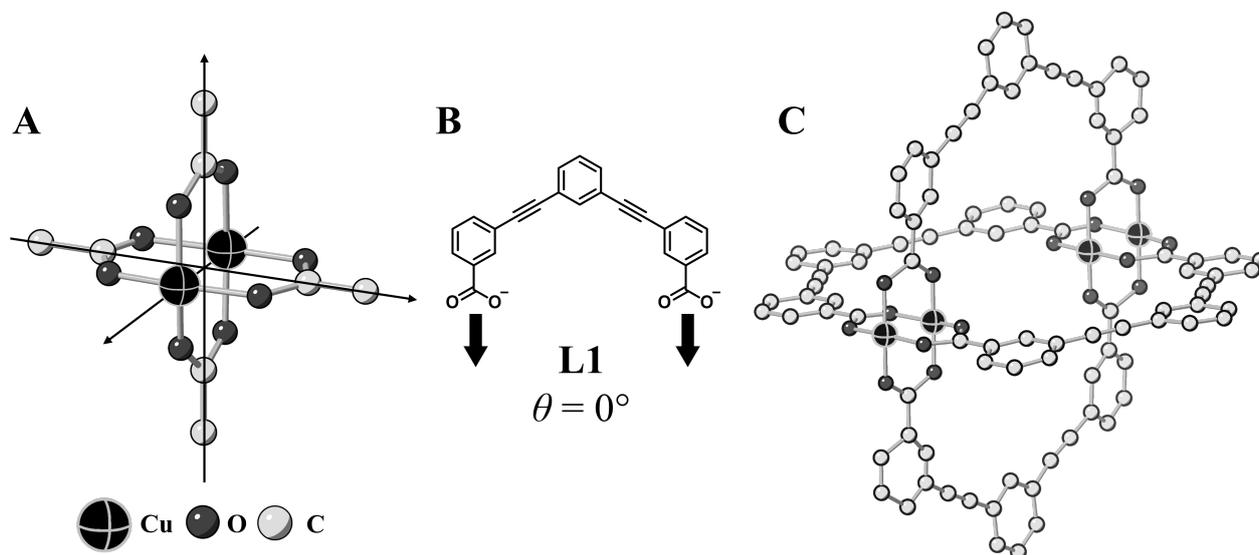
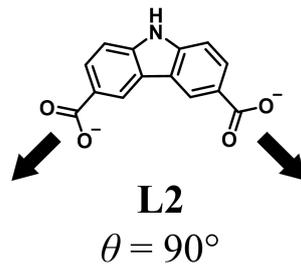


Abb. 2

- C.1 Der Winkel  $\theta$  des planaren Dicarboxylats **L2** (unten) beträgt  $90^\circ$ . Der aus **L2** und  $\text{Cu}^{2+}$  gebildete Käfigkomplex hat die Zusammensetzung  $\text{Cu}_n(\text{L2})_m$ . 5pt  
**Geben** Sie die kleinste ganzzahlige Kombination von  $n$  und  $m$  an. Nehmen Sie an, dass nur die  $\text{CO}_2^-$ -Gruppen von **L2** mit den  $\text{Cu}^{2+}$ -Ionen koordinieren.



Der Zinkkomplex  $\text{Zn}_4\text{O}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_6$ , enthält vier tetraedrische  $\text{Zn}^{2+}$ , sechs  $\text{CH}_3\text{CO}_2^-$  und ein  $\text{O}^{2-}$ . Im  $\text{Zn}_4\text{O}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_6$ , sitzt  $\text{O}^{2-}$  im Ursprung und die drei Achsen, die durch die Kohlenstoffatome der  $\text{CH}_3\text{CO}_2^-$ -Ionen verlaufen, liegen rechtwinkelig aufeinander (Abb. 3A).

Wenn *p*-Benzendicarboxylat (Abb. 3B, **L3**,  $\theta = 180^\circ$ ) anstelle von  $\text{CH}_3\text{CO}_2^-$  verwendet wird, sind die  $\text{Zn}^{2+}$  Cluster miteinander verbunden und bilden so einen kristallinen Feststoff (**X**), der als "poröses Koordinationspolymer" bezeichnet wird (Abb. 3C). **X** hat die Zusammensetzung  $[\text{Zn}_4\text{O}(\text{L3})_3]_n$  und eine kubische Kristallstruktur mit Nanoporen.

Eine solche Pore ist als Kugel in Abb. 3D dargestellt. Jeder tetraedrische  $\text{Zn}^{2+}$ -Cluster wird in Abb. 3C und 3D als dunkelgraues Polyeder dargestellt. In Abb. 3 werden keine Wasserstoffatome abgebildet.

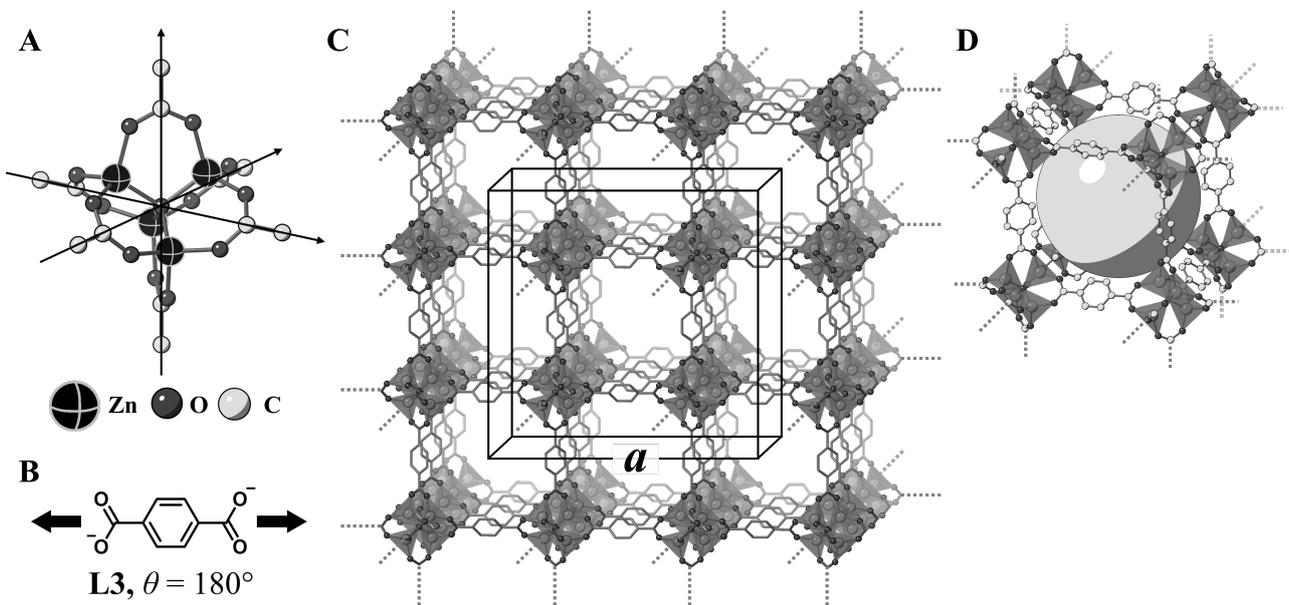


Abb. 3

**C.2** **X** hat eine kubische Elementarzelle mit einer Kantenlänge  $a$  (Abb. 3C) und einer Dichte von  $0.592 \text{ g cm}^{-3}$ . **Berechnen** Sie  $a$  in [cm]. 5pt

**C.3** **X** enthält eine signifikante Zahl von Poren. 1 g von **X** kann bei 1 bar und  $25^\circ\text{C}$  in den Poren  $3.0 \times 10^2 \text{ mL CO}_2$ -Gas aufnehmen. **Berechnen** Sie die durchschnittliche Anzahl von  $\text{CO}_2$ -Molekülen pro Pore. 5pt



AUT-1 C-6 A-1

**A6-1**  
AUT German (Austria)

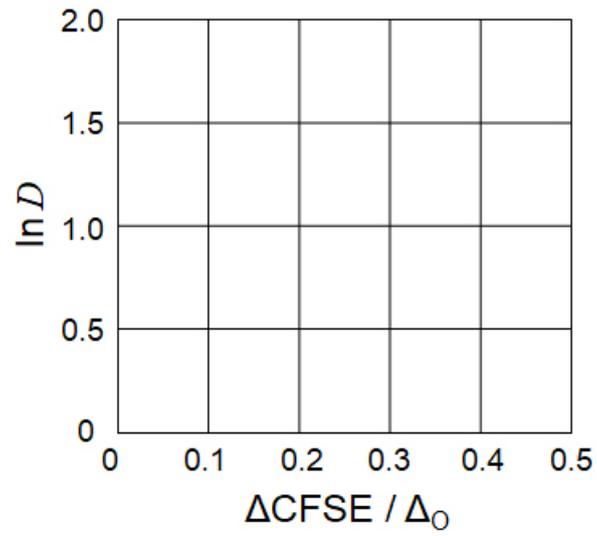
## Festkörperchemie von Übergangsmetallen

### Teil A

**A.1** (6 pt)

$\text{Cr}^{2+}$  : \_\_\_\_\_  $\Delta_o$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  : \_\_\_\_\_  $\Delta_o$ ,  $\text{Co}^{2+}$  : \_\_\_\_\_  $\Delta_o$

**A.2** (3 pt)



$D$ : \_\_\_\_\_

**A.3** (3 pt)

\_\_\_\_\_



AUT-1 C-6 A-3

**A6-3**  
AUT German (Austria)

**Teil B**

**B.1** (6 pt)

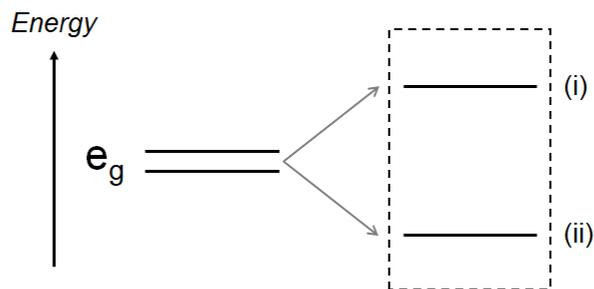
A : \_\_\_\_\_, B : \_\_\_\_\_

**B.2** (4 pt)

$l_x =$  \_\_\_\_\_ nm,  $l_z =$  \_\_\_\_\_ nm

**B.3** (4 pt)

(i) : \_\_\_\_\_ , (ii) : \_\_\_\_\_



**B.4** (4 pt)

\_\_\_\_\_ %



AUT-1 C-6 A-5

**A6-5**  
AUT German (Austria)

**Teil C**

**C.1** (5 pt)

$n =$  \_\_\_\_\_,  $m =$  \_\_\_\_\_

**C.2** (5 pt)

$a =$  \_\_\_\_\_ cm



AUT-1 C-6 A-6

**A6-6**  
AUT German (Austria)

**C.3** (5 pt)

---

AUT-1 C-7 C-1

**AUT-1 C-7 C**  
Maciej Swiatek

**ICHO**  
**Problem 7**  
**Cover sheet**

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

## Aromatizität jenseits von Benzen

13 % des Wettbewerbs					
Frage	A.1	A.2	A.3	B.1	<b>Gesamt</b>
Punkte	5	2	19	10	<b>36</b>
erreicht					

Prof. Nozoe (1902-1996) eröffnete das Gebiet der nicht-benzenoiden aromatischen Verbindungen, welche mittlerweile allgegenwärtig in der organischen Chemie sind.



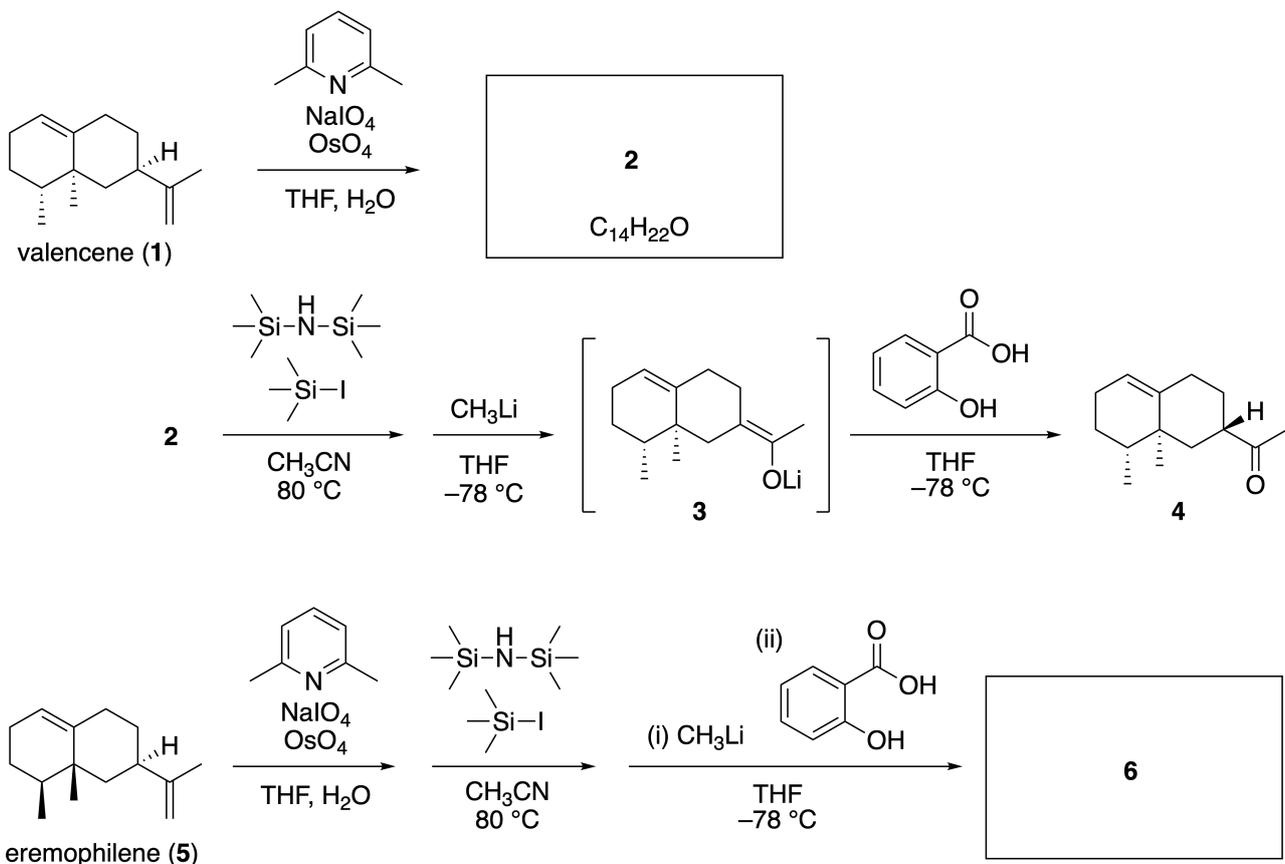
Prof. Nozoe. Mit freundlicher Genehmigung der Tohoku Univ.

### Teil A

Lineariifolianon ist ein Naturprodukt mit einer einzigartigen Struktur und wurde von *Inula liniariifoliaa* isoliert. Ausgehend von Valencen (**1**) ergibt eine einstufige Umsetzung Verbindung **2**. Anschließend liefert eine dreistufige Umsetzung über **3** das Keton **4**. Eremophilen (**5**) wird über dieselbe vierstufige Umwandlung in **6** umgewandelt.



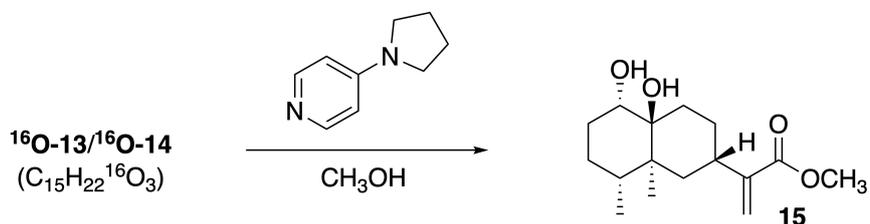
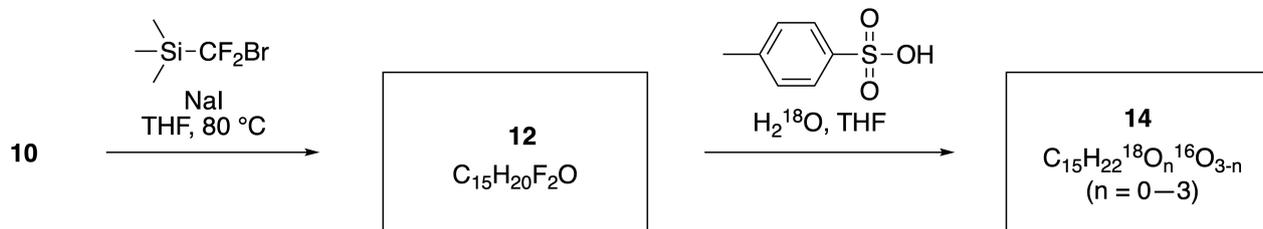
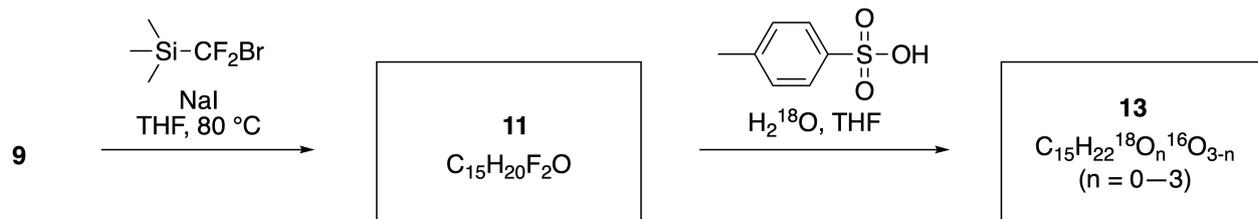
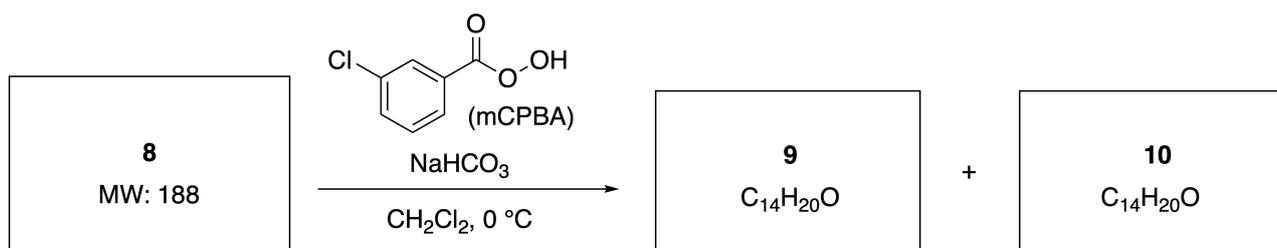
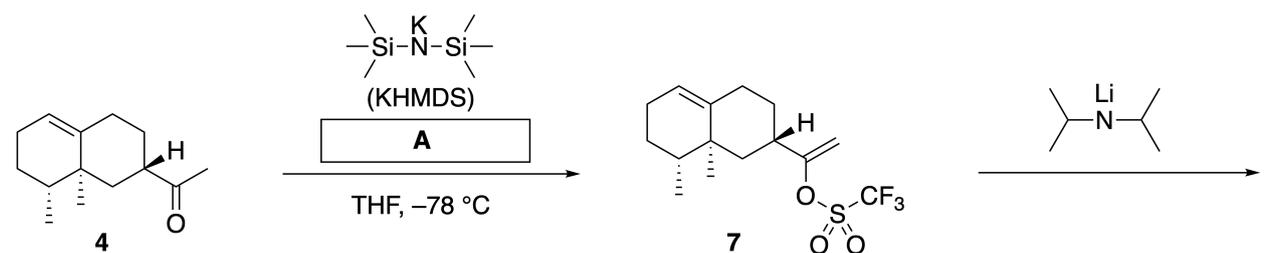
*Inula linariifolia*



**A.1 Zeichnen** Sie die Strukturen der Verbindungen **2** und **6** und kennzeichnen Sie, wo nötig, die Stereochemie. 5pt

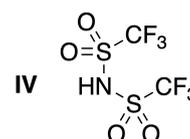
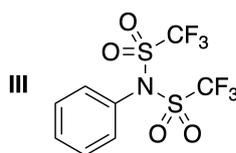
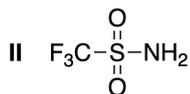
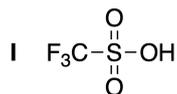
Anschließend wird Keton **4** in den Ester **15** umgewandelt. Verbindung **8** (Molekulargewicht: 188) behält alle Stereozentren der Verbindung **7**. Die Verbindungen **9** und **10** besitzen fünf Stereozentren und keine

Kohlenstoff-Kohlenstoff Doppelbindungen. Nehmen Sie an, dass  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  anstelle von  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  für die Synthese der  $^{18}\text{O}$ -markierten Lineariifolianeone **13** und **14**, ausgehend von **11** bzw. **12**, verwendet wird. Die Verbindungen **13** und **14** sind  $^{18}\text{O}$ -markierte Isotopomere. Unter Vernachlässigung der Isotopenmarkierung liefern sowohl **13** als auch **14** das selbe Produkt **15** mit identischer Stereochemie.



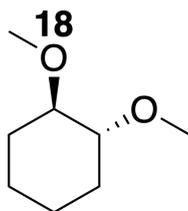
**A.2** **Wählen** Sie die passende Struktur für **A**.

2pt



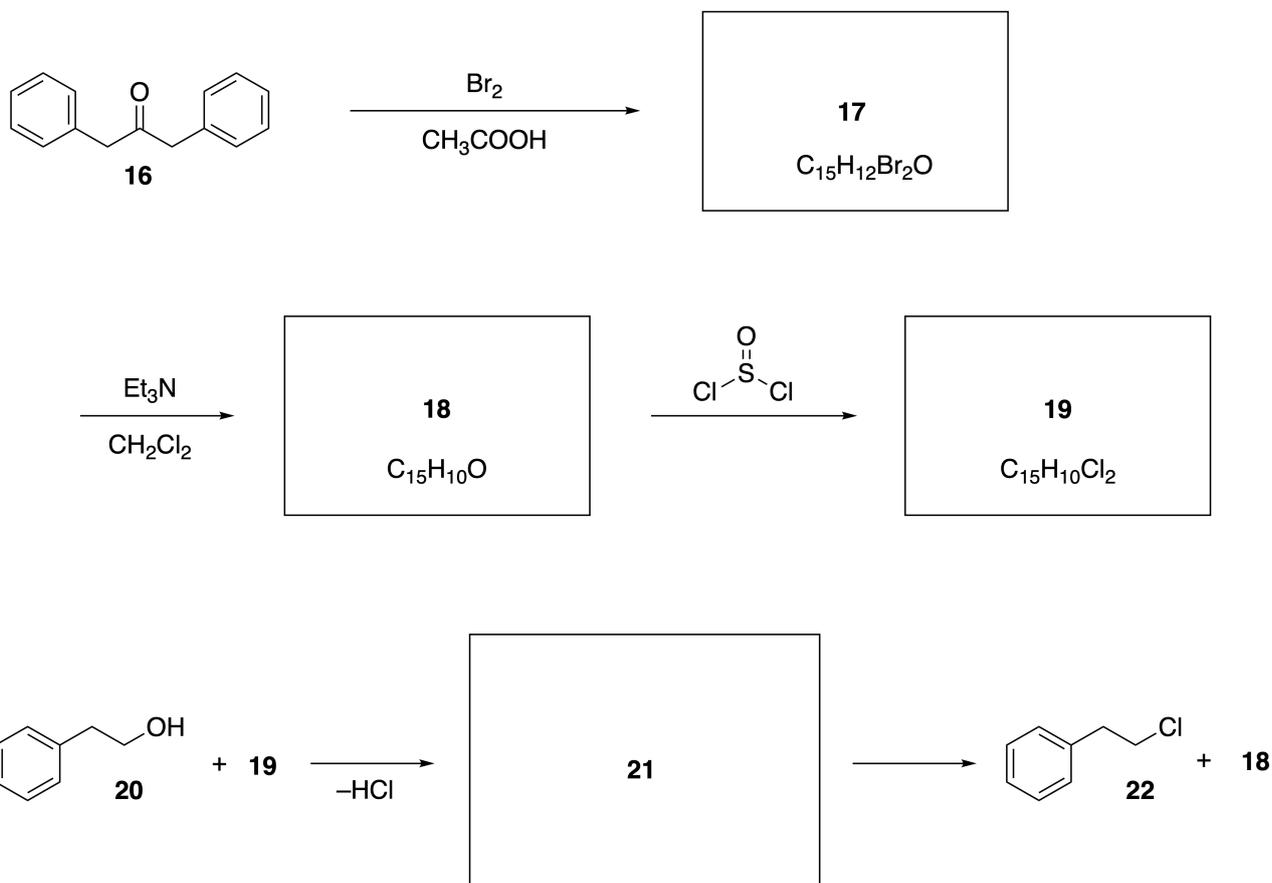
**A.3** **Zeichnen** Sie die Strukturen von **8-14** und kennzeichnen Sie, wo nötig, die Stereochemie. Kennzeichnen Sie auch die eingeführten  $^{18}\text{O}$ -Atome für **13** und **14**, wie im Beispiel unten gezeigt.

19pt



**Teil B**

Verbindung **19** wird, wie unten gezeigt, synthetisiert. In Bezug auf die nicht-benzenoide Aromatizität kann **19** als Aktivator für Alkohole verwendet werden. Verbindung **20** wird über das Ionenpaar-Zwischenprodukt **21** in **22** umgewandelt. Obwohl die Bildung von **21** mittels NMR beobachtet wurde, zersetzt sich **21** allmählich zu **18** und **22**.



$^1\text{H NMR}$  ( $\text{CD}_3\text{CN}$ , ppm) **20**:  $\delta$  7.4–7.2 (5H), 3.7 (2H), 2.8 (2H), 2.2 (1H)

**21**:  $\delta$  8.5–7.3 (15H), 5.5 (2H), 3.4 (2H)

**B.1** **Zeichnen** Sie die Strukturen von **17–19** sowie von **21**. Kennzeichnung der Stereochemie ist nicht erforderlich. 10pt



AUT-1 C-7 A-1

**A7-1**  
AUT German (Austria)

## Aromatizität jenseits von Benzen

### Teil A

**A.1** (5 pt)

**2** (2 pt)

**6** (3 pt)

**A.2** (2 pt)



**A.3** (19 pt)

**8** (3 pt)



**9** (2 pt)

**10** (2 pt)



**11** (2 pt)

**12** (2 pt)



**13** (4 pt)

**14** (4 pt)



AUT-1 C-7 A-3

**A7-3**  
AUT German (Austria)

**Teil B**

**B.1** (10 pt)

**17** (2 pt)

**18** (2 pt)

**19** (3 pt)

**21** (3 pt)

AUT-1 C-8 C-1

**AUT-1 C-8 C**  
Maciej Swiatek

**ICHO**  
**Problem 8**  
**Cover sheet**

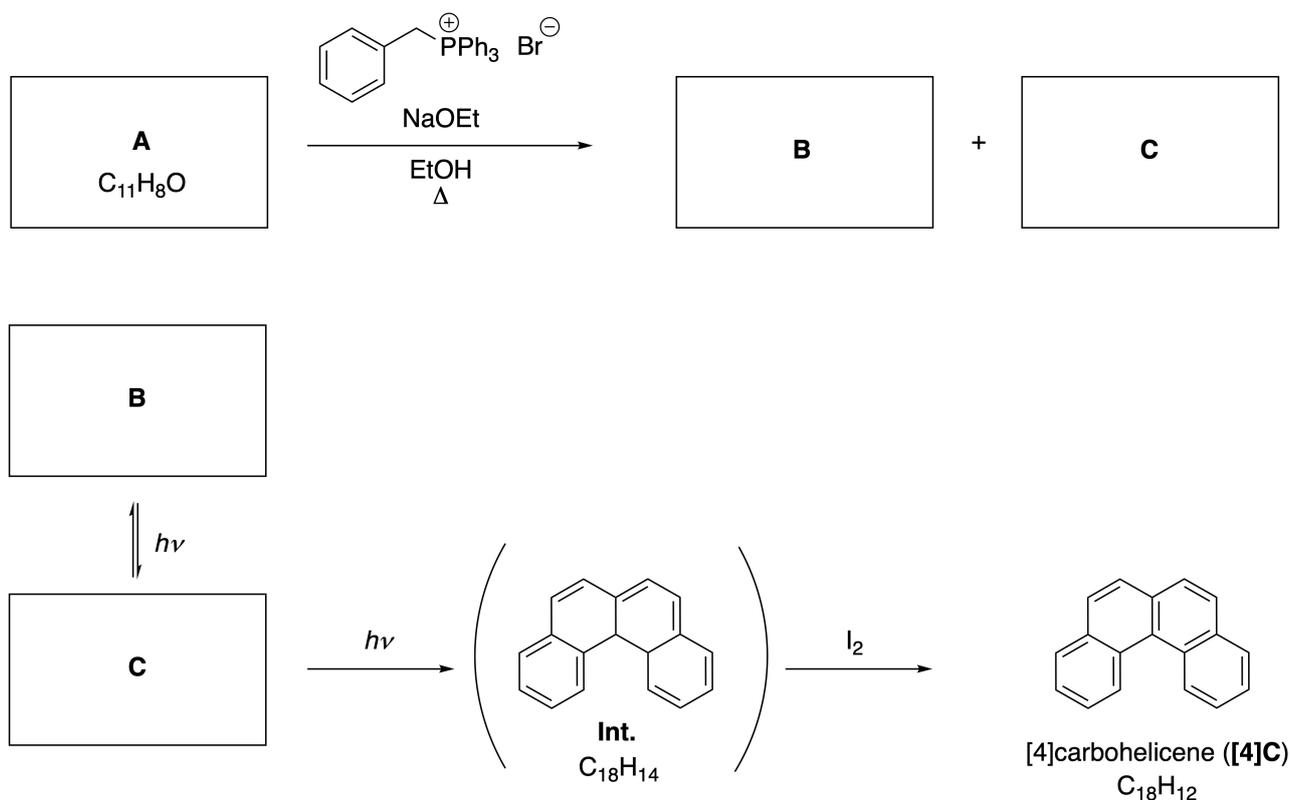
Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

## Dynamische organische Moleküle und ihre Chiralität

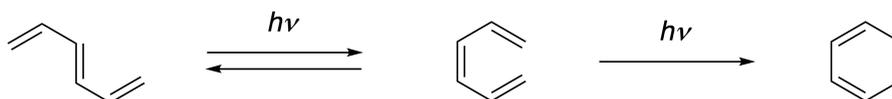
11 % des Wettbewerbs						
Frage	A.1	A.2	A.3	B.1	B.2	Gesamt
Punkte	9	3	7	3	4	<b>26</b>
erreicht						

### Teil A

Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe mit aufeinanderfolgenden ortho-Verbindungen werden als [n]Carbohelicene bezeichnet, wobei n für die Anzahl an Sechseringen steht (siehe unten). [4]Carbohelicene (**[4]C**) wird durch die unten gezeigte Photoreaktion über ein Intermediat (**Int.**) hergestellt. Dieses kann mit Iod oxidiert werden.



Die Photoreaktion verläuft analog zu folgendem Beispiel:

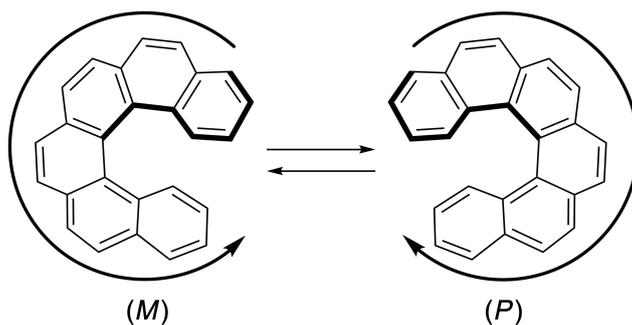


**Hinweis:** Zeichnen Sie aromatische  $\pi$ -Systeme in der gesamten Aufgabe 8 mit alternierenden Doppel- und Einfachbindungen (wie in den Beispielen von Carbohelicen gezeigt). Verwenden Sie keine Kreise für die Darstellung konjugierter  $\pi$ -Systeme.

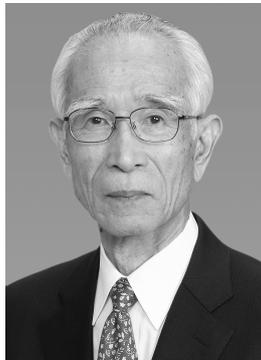
**A.1** **Zeichnen** Sie die Strukturen von **A-C**. Stereoisomere sollen unterschieden werden. 9pt

**A.2** Versuche, [5]Carbohelicen aus demselben Phosphoniumsalz und einem entsprechenden Edukt zu synthetisieren, ergaben nur kleine Mengen an [5]Carbohelicen. Stattdessen wurde Verbindung **D** mit einer um 2 Da geringeren Molekülmasse im Vergleich zu [5]Carbohelicen gebildet. Die  $^1\text{H-NMR}$ -Verschiebungen von **D** sind unten angegeben. **Zeichnen** Sie die Struktur von **D**.  
[**D** ( $\delta$ , ppm in  $\text{CS}_2$ , bei Raumtemperatur), 8.85 (2H), 8.23 (2H), 8.07 (2H), 8.01 (2H), 7.97 (2H), 7.91 (2H)] 3pt

[5]- und größere [n]Carbohelicene zeigen helikale Chiralität, wobei die Umwandlung von einem Enantiomer zum anderen bei Raumtemperatur signifikant langsam abläuft. Die Chiralität der [n]Carbohelicene wird, wie in diesem Beispielen gezeigt, mit (M) oder (P) gekennzeichnet:

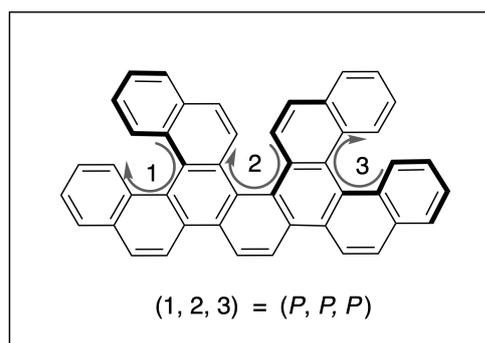
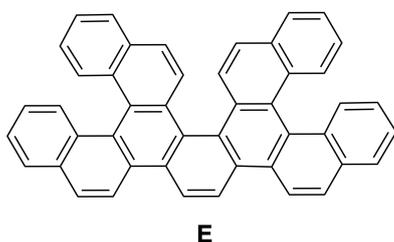


Die Enantiomere von chiralen [n]Carbohelicenen mit  $n > 4$  können mithilfe einer chiralen Säulenchromatographie getrennt werden. Dieses Verfahren wurde von Prof. Yoshio Okamoto entwickelt.

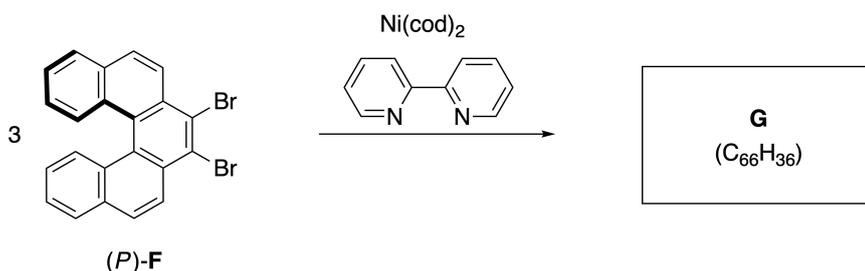
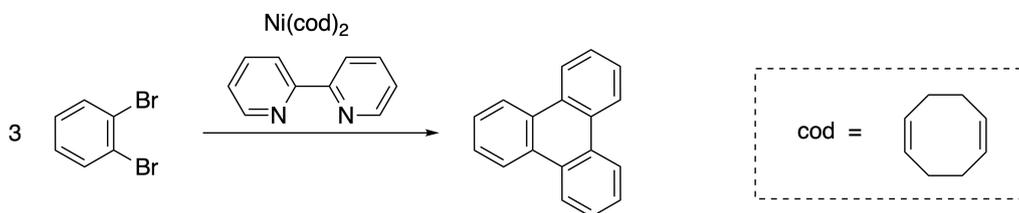


Prof. Yoshio Okamoto, mit freundlicher Genehmigung der Japan Prize Foundation

Multiple Helicene sind Moleküle, die zwei oder mehrere helikale Strukturelemente enthalten. Unter Berücksichtigung der helikalen Chiralität gibt es mehrere Stereoisomere eines multiplen Helicens. Ein Beispiel ist Verbindung **E**, die drei [5]Carbohelicene-artige Elemente in einem Molekül enthält. Das unten gezeigte Stereoisomer wird mit den Stereodeskriptoren (*P,P,P*) bezeichnet.



- A.3** Die Nickel-katalysierte Trimerisierung von 1,2-Dibrombenzen führt zur Bildung von Triphenylen (siehe Abbildung). Wird dieselbe Reaktion mit einem Enantiomer von **F**, (*P*)-**F**, durchgeführt, wird das multiple Helicen **G** ( $C_{66}H_{36}$ ) gebildet. **Identifizieren** Sie alle bei dieser Reaktion gebildeten Stereoisomere von **G**. Geben Sie keine Duplikate an und nehmen Sie an, dass während der Reaktion keine Umwandlungen zwischen den Stereoisomeren stattfinden. **Hinweis:** Zeichnen Sie als Referenz *ein* Isomer mit allen stereochemischen Informationen wie in obigem Beispiel. Kennzeichnen Sie die einzelnen chiralen Einheiten mit Nummern und ordnen Sie den Nummern die Stereodeskriptoren *P* und *M* zu. Die weiteren Stereoisomere von **G** sollen als Liste der Nummern sowie der entsprechenden Stereodeskriptoren *P* und *M* angegeben werden. Die Stereoisomere von **E** wären beispielweise so aufzulisten: (1, 2, 3) = (*P, M, P*), (*P, M, M*), (*P, P, M*), (*M, M, M*), (*M, M, P*), (*M, P, P*) und (*M, P, M*).
- 7pt





AUT-1 C-8 Q-5

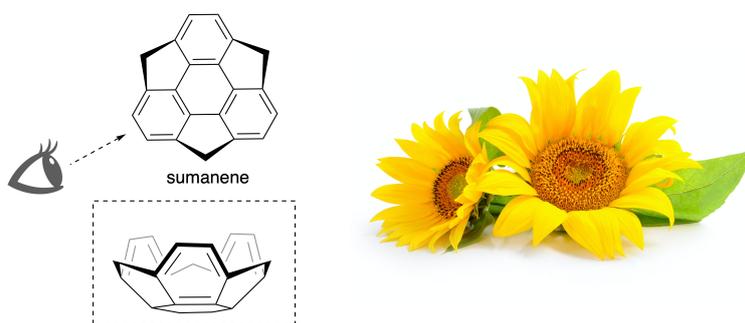
**Q8-5**  
AUT German (Austria)

---

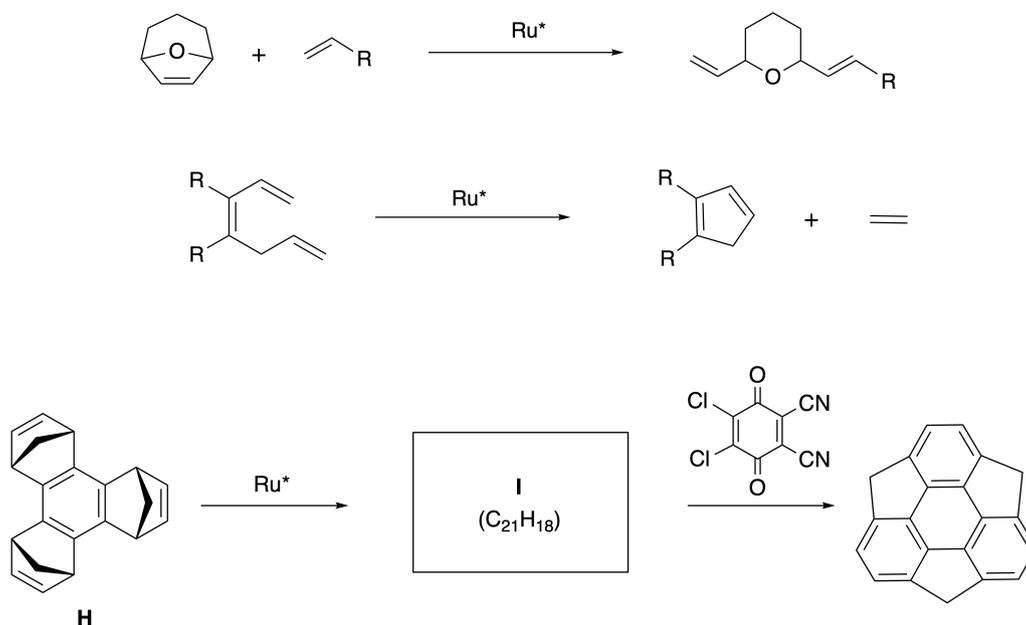
Teil B

Sumanen ist ein schalenförmiger Kohlenwasserstoff, der erstmals 2003 in Japan beschrieben wurde. Der Name "Sumanen" leitet sich von Sanskrit-Hindi "suman" für Sonnenblume ab.

Die Synthese von Sumanen gelang durch eine Abfolge von Ringöffnungs- und Ringschluss-Metathesereaktionen.

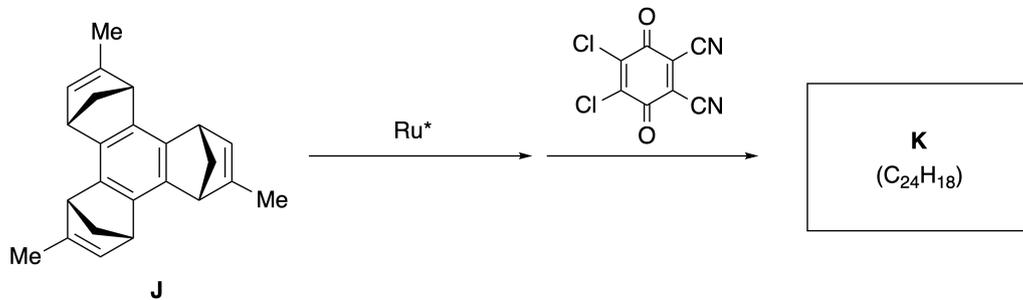


Untenstehend sind repräsentative Beispiele für Ringöffnungs- und Ringschluss-Metathese mit einem Rutheniumkatalysator ( $\text{Ru}^*$ ) gezeigt.



B.1 **Zeichnen** Sie die Struktur von **I** ohne Berücksichtigung der Stereochemie.

3pt



- B.2** Ausgehend vom optisch aktiven Vorläufer **J** führt dieselbe Reaktionsfolge zum optisch aktiven Sumanen-Derivat **K**. Die Stereozentren in **J** zeigen dabei keinerlei Inversion während der Metathesereaktionen. 4pt  
**Zeichnen** Sie unter Berücksichtigung der Stereochemie die Struktur von **K**.



AUT-1 C-8 A-1

**A8-1**  
AUT German (Austria)

## Dynamische organische Moleküle und ihre Chiralität

### Teil A

**A.1** (9 pt)

**A** (3 pt)

**B** (3 pt)

**C** (3 pt)

**A.2** (3 pt)



AUT-1 C-8 A-2

**A8-2**  
AUT German (Austria)

**A.3** (7 pt)



AUT-1 C-8 A-3

**A8-3**  
AUT German (Austria)

**Teil B**

**B.1** (3 pt)

**B.2** (4 pt)

AUT-1 C-9 C-1

**AUT-1 C-9 C**  
Maciej Swiatek

**ICHO**  
**Problem 9**  
**Cover sheet**

Please return this cover sheet together with all the related question sheets.

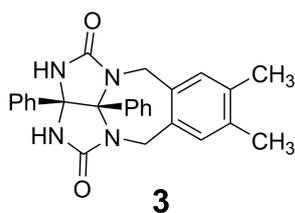
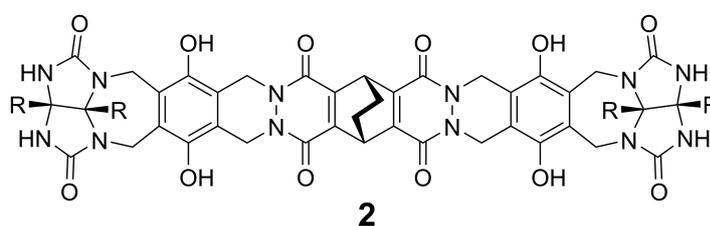
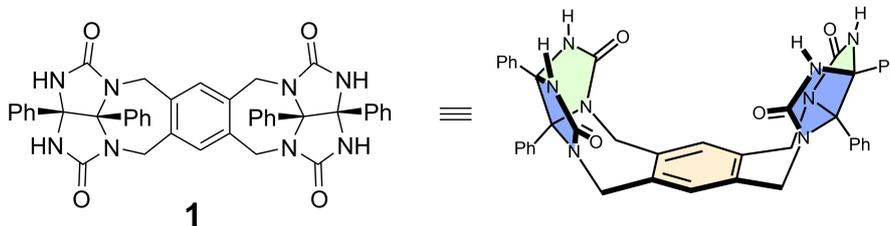
## Eigenschaften kapselförmiger Verbindungen

10 % des Wettbewerbs						
Frage	A.1	A.2	A.3	A.4	A.5	Gesamt
Punkte	13	2	2	3	3	<b>23</b>
erreicht						

Artige Kinder tun dies nicht, aber wenn man die Naht eines Tennisballs auftrennt, erhält man zwei U-förmige Teile.

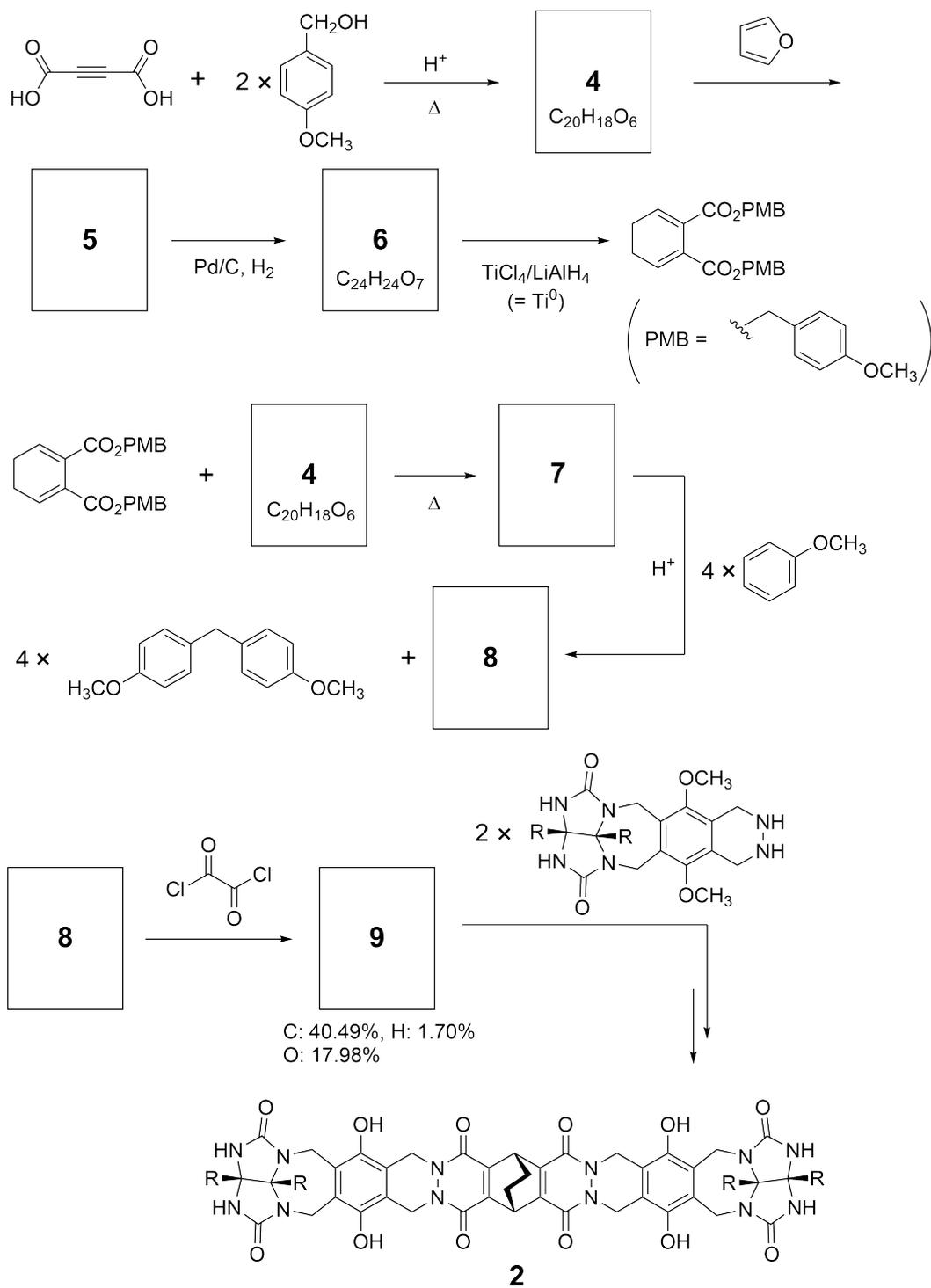


Die Verbindungen **1** und **2** wurden basierend auf dieser Idee als U-förmige Moleküle unterschiedlicher Größe synthetisiert. Als Vergleich zu **1** wurde Verbindung **3** hergestellt und das Verhalten beider bei Einkapselung wurde untersucht.



Die Synthese von **2** wird im Folgenden gezeigt.

Hinweis - Elementaranalyse von **9**: C: 40.49%, H: 1.70%, and O: 17.98% (*m/m*).



**A.1** **Zeichnen** Sie die Strukturen der Verbindungen **4-9**. Die Stereochemie muss nicht berücksichtigt werden. Verwenden Sie, wie im Reaktionsschema gezeigt, "PMB" für die p-Methoxybenzyl-Gruppe beim Zeichnen der Strukturen. 13pt



AUT-1 C-9 Q-4

# Q9-4

AUT German (Austria)

Im Massenspektrum von Verbindung **1** konnte der Molekül-Ionen-Peak zum zugehörigen Dimer ( $1_2$ ) gut beobachtet werden. Im Massenspektrum von **3** konnte hingegen kein Molekül-Ionen-Peak des Dimers  $3_2$  beobachtet werden.

Im  $^1\text{H}$ -NMR-Spektrum einer Lösung von  $1_2$  waren alle von **1** abgeleiteten NH-Protonen chemisch äquivalent. Ihre chemische Verschiebung war jedoch deutlich verschieden von jener der NH-Protonen von **3**.

Diese Daten zeigen die Ausbildung von Wasserstoffbrücken zwischen NH-Protonen von Verbindung **1** und Atomen **X** eines weiteren Moleküls von Verbindung **1**, wodurch die dimere Kapsel gebildet wird.

<b>A.2</b> <b>Kreisen</b> Sie die in Frage kommenden Atome <b>X</b> in der Struktur von <b>1</b> ein. 2pt
---

<b>A.3</b> <b>Schreiben</b> Sie die Anzahl der vorhandenen H-Brückenbindungen in einem dimeren Kapsel-Molekül ( $1_2$ ) auf. 2pt
--

Die dimere Kapsel von **1** ( $1_2$ ) hat einen Hohlraum im Inneren, in den ein geeignetes kleines Molekül Z eingekapselt werden kann. Dieser Vorgang wird durch folgende Gleichung beschrieben:



Die Gleichgewichtskonstante für die Verkapselung von Z in  $1_2$  wird wie folgt beschrieben:

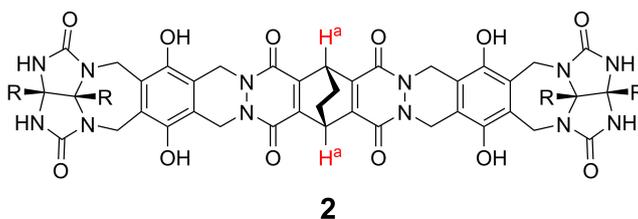
$$K_a = \frac{[Z@1_2]}{[Z][1_2]} \quad (2)$$

Der Vorgang der Verkapselung kann mit NMR-Spektroskopie verfolgt werden. Zum Beispiel zeigt  $1_2$  in  $C_6D_6$  im  $^1H$ -NMR-Spektrum vor der Zugabe von  $CH_4$  andere Signale als danach.

Verbindung **2** bildet ebenfalls ein rigides und größeres dimeres Kapsel-Molekül ( $2_2$ ). Das  $^1H$ -NMR-Spektrum von  $2_2$  wurde unter sonst gleichen Bedingungen in  $C_6D_6$ ,  $C_6D_5F$  und einer  $C_6D_6/C_6D_5F$ -Mischung gemessen.

Die chemischen Verschiebungen für das  $H^a$  Proton von **2** in den erwähnten Lösungsmitteln sind unten tabellarisch zusammengefasst. Außer diesen wurden vom  $H^a$  von **2** keine Signale beobachtet.

Nehmen Sie an, dass der Hohlraum im Inneren der Kapsel immer mit der größtmöglichen Zahl an Lösungsmittel-Molekülen besetzt wird und, dass jedes Signale zu einer Spezies der besetzten Kapsel gehört.



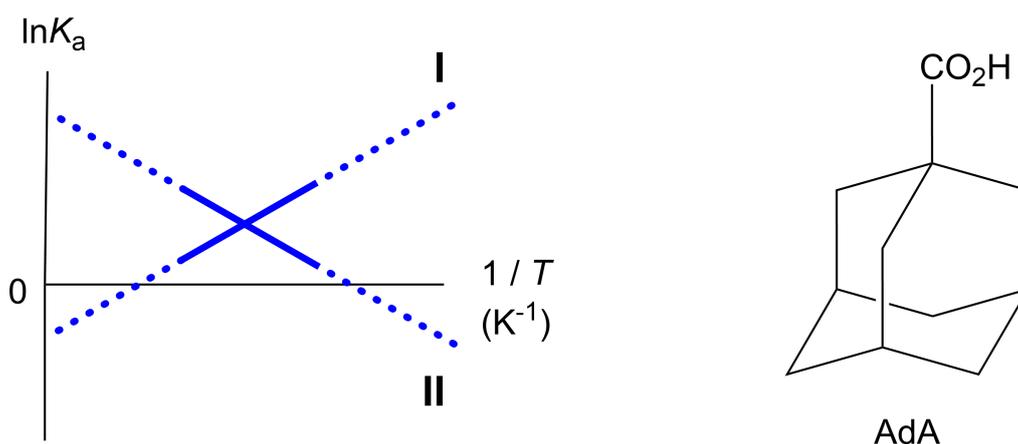
Lösungsmittel	$\delta$ (ppm) von $H^a$
$C_6D_6$	4.60
$C_6D_5F$	4.71
$C_6D_6 / C_6D_5F$	4.60, 4.71, 4.82

**A.4 Bestimmen** Sie die Anzahl an  $C_6D_6$  und  $C_6D_5F$  Molekülen, die in  $2_2$  eingeschlossen sind und jeweils ein  $H^a$  Signal liefern. 3pt

$^1\text{H-NMR}$  Messungen in  $\text{C}_6\text{D}_6$  zeigten, dass  $\mathbf{2}_2$  ein Molekül von 1-Adamantancarbonsäure (AdA) einschließen kann. Die Bildungskonstanten ( $K_a$ ) - siehe unten - wurden bei verschiedenen Temperaturen bestimmt.  $[\text{solvent@}\mathbf{2}_2]$  beschreibt eine Spezies, die ein oder mehrere Lösungsmittelmoleküle enthält.

$$K_a = \frac{[\text{Z@}\mathbf{2}_2]}{[\text{Z}][\text{solvent@}\mathbf{2}_2]} \quad (3)$$

Die  $K_a$  Werte für  $\text{CH}_4$  und  $\mathbf{1}_2$  bei verschiedenen Temperaturen in  $\text{C}_6\text{D}_6$ , definiert durch Gleichung (2), wurden ebenfalls mittels  $^1\text{H-NMR}$ -Messungen bestimmt. Die grafische Darstellung der beiden Bildungskonstanten (aufgetragen als  $\ln K_a$  vs  $1/T$ ) ist unten gezeigt.



Kein  $\text{C}_6\text{D}_6$  Molekül wurde in  $\mathbf{1}_2$  eingeschlossen. Für Gerade **II** ist die Entropieänderung ( $\Delta S$ ) ( 1 ) und die Enthalpieänderung ( $\Delta H$ ) ist ( 2 ). Das deutet darauf hin, dass die Triebkraft für die Verkapselung in Gerade **II** ( 3 ) ist. Deshalb gehört Gerade **I** zu ( 4 ) und Gerade **II** zu ( 5 ).

**A.5 Wählen** Sie für die Lücken ( 1 ) - ( 5 ) im voranstehenden Absatz jeweils die richtige Option A oder B aus. 3pt

	A	B
(1)	positiv	negativ
(2)	positiv	negativ
(3)	$\Delta S$	$\Delta H$
(4)	$\mathbf{1}_2$ und $\text{CH}_4$	$\mathbf{2}_2$ und AdA
(5)	$\mathbf{1}_2$ und $\text{CH}_4$	$\mathbf{2}_2$ und AdA



AUT-1 C-9 A-1

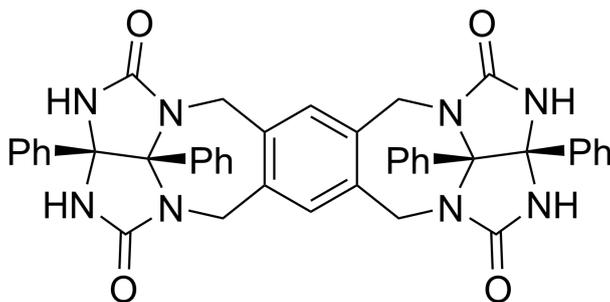
**A9-1**  
AUT German (Austria)

## Eigenschaften kapselförmiger Verbindungen

**A.1** (13 pt)

<b>4</b> (2 pt)	<b>5</b> (3 pt)
<b>6</b> (2 pt)	<b>7</b> (2 pt)
<b>8</b> (2 pt)	<b>9</b> (2 pt)

**A.2** (2 pt)



**A.3** (2 pt)

**A.4** (3 pt)

$\delta$ (ppm) von H <sup>a</sup>	Anzahl von C <sub>6</sub> D <sub>6</sub>	Anzahl von C <sub>6</sub> D <sub>5</sub> F
4.60 ppm		
4.71 ppm		
4.82 ppm		

**A.5** (3 pt)

(1) : \_\_\_\_\_ (2) : \_\_\_\_\_ (3) : \_\_\_\_\_

(4) : \_\_\_\_\_ (5) : \_\_\_\_\_