



**ILLUSTRIERENDE PRÜFUNGS-AUFGABEN  
FÜR DIE SCHRIFTLICHE ABITURPRÜFUNG**

**Teil 1: Beispielaufgaben**

Die Illustrierenden Prüfungsaufgaben (Teil 1: Beispielaufgaben, Teil 2: Lösungsvorschläge, Teil 3: Erläuterungen) dienen der einmaligen exemplarischen Veranschaulichung von Struktur, Anspruch und Niveau der Abiturprüfung auf grundlegendem bzw. erhöhtem Anforderungsniveau im neunjährigen Gymnasium in Bayern.

**Chemie**  
**erhöhtes Anforderungsniveau**

**Arbeitszeit: 300 Minuten**

Bearbeiten Sie drei der vier Aufgaben.

Als Hilfsmittel dürfen ein zugelassener Taschenrechner und die genehmigte, unveränderte mathematisch-naturwissenschaftliche Formelsammlung verwendet werden.

## A 1 Wasserstoff zur Energiespeicherung

Der Einsatz von Wasserstoff als Energiespeicher wird intensiv erforscht. Elektrische Energie lässt sich durch Elektrolyse von Wasser in chemische Energie umwandeln. Die Energie kann auf diese Weise zur späteren Verwendung gespeichert werden.

- |  | <b>BE</b> |
|--|-----------|
| <b>1</b> Berechnen Sie die mindestens notwendige Stromstärke, mit der die Anlage in Bécancour betrieben werden muss. (M 1)   | 4         |
| <b>2</b> Begründen Sie die Unterschiede zwischen der rechnerischen und der realen Zellspannung bei der Elektrolyse von Wasser unter Verwendung einer Skizze. Leiten Sie her, ob die Zersetzungsspannung bei der Elektrolyse von Wasser vom pH-Wert der Lösung abhängt. (M 1) | 8         |
| <b>3</b> Leiten Sie unter Angabe der Kästchenschreibweise die Geometrie der beiden Platinkomplexe ab. Beschreiben Sie den Unterschied zwischen den Bindungen in den Platinkomplexen und einer Elektronenpaarbindung. (M 1)   | 6         |
| <b>4</b> Berechnen Sie für den Modellreaktor die bei der RWGS-Reaktion im Gleichgewicht vorliegende Konzentration an Wasserstoff. Erläutern Sie unter Verwendung von Tabelle 1 und Abbildung 2 zwei Möglichkeiten, um den Verbrauch von Wasserstoff zu erhöhen. (M 2)        | 12        |
| <b>5</b> Bewerten Sie die vier dargestellten Methoden der Wasserstoffspeicherung hinsichtlich dreier Kriterien. (M 2, M 3)   | 10        |

**40**

## Material 1: Wasserstofferzeugung

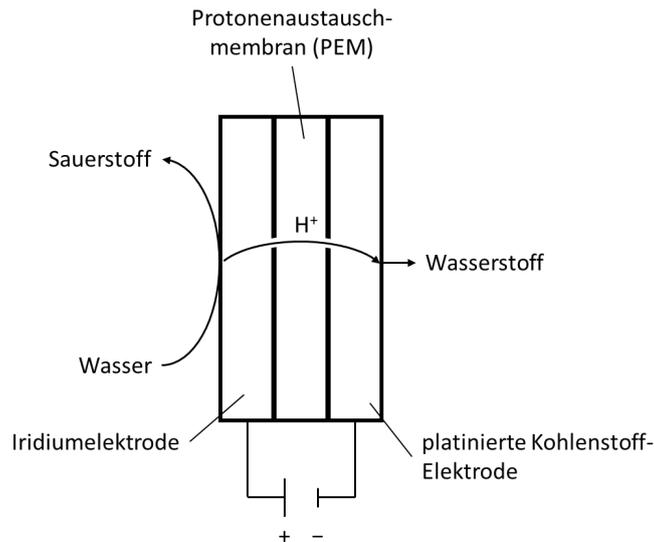
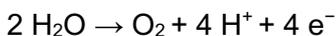


Abb. 1: Aufbau einer PEM-Elektrolysezelle

Wasserstoff für den Betrieb von Brennstoffzellen kann durch Elektrolyse von Wasser erzeugt werden. Ein Beispiel dafür ist die sogenannte PEM-Elektrolyse, deren Besonderheit die Verwendung einer Protonenaustauschmembran (proton exchange membrane = PEM) ist. Bei dieser Elektrolyse wird Wasser an einer Iridiumelektrode vorbeigeleitet. Die Moleküle geben dabei ihre Protonen ab, die durch die PEM fließen und an einer platinbeschichteten Kohlenstoffelektrode zu Wasserstoff umgesetzt werden.

In einer PEM-Zelle laufen folgende Prozesse ab:



Die Platinierung der Kohlenstoffelektrode lässt sich u. a. durch die Reduktion von Tetrachloridoplatinat(II)-Ionen und Hexachloridoplatinat(IV)-Ionen auf der Elektrode erzeugen. Bei beiden Komplexen werden die d-Elektronen nicht nach der Hundschen Regel verteilt.

Beim PEM-Verfahren nutzt man Zellspannungen zwischen 1,75 V und 2,20 V. Die rechnerische Zersetzungsspannung liegt bei nur 1,23 V.

Eine großtechnische Anlage zur PEM-Elektrolyse des französischen Unternehmens Air Liquide in Bécancour (Kanada) kann pro Tag bis zu 8,2 Tonnen Wasserstoff produzieren.

(Fortsetzung nächste Seite)

## Material 2: Power-to-gas

Der erzeugte Wasserstoff kann zur weiteren Verwendung mit einer Kohlenstoffverbindung zu Methan umgesetzt werden. Eine Möglichkeit ist die Methanisierung von Kohlenstoffdioxid, die in zwei Reaktionsschritten abläuft (Tab. 1).

Tab. 1: Methanisierung von Kohlenstoffdioxid<sup>1</sup>

	Reaktionsgleichung	Reaktionsenthalpie in kJ/mol
Reverse Wassergas-Shift-Reaktion (RWGS)	$\text{H}_2 (\text{g}) + \text{CO}_2 (\text{g}) \rightleftharpoons \text{CO} (\text{g}) + \text{H}_2\text{O} (\text{g})$	+ 41,2
Sabatier-Prozess	$3 \text{H}_2 (\text{g}) + \text{CO} (\text{g}) \rightarrow \text{CH}_4 (\text{g}) + \text{H}_2\text{O} (\text{g})$	- 206,0
Gesamtreaktion	$4 \text{H}_2 (\text{g}) + \text{CO}_2 (\text{g}) \rightarrow \text{CH}_4 (\text{g}) + 2 \text{H}_2\text{O} (\text{g})$	- 164,8

Die Gleichgewichtskonstante bei der RWGS-Reaktion hängt wie in Abbildung 2 dargestellt von der Reaktionstemperatur ab:

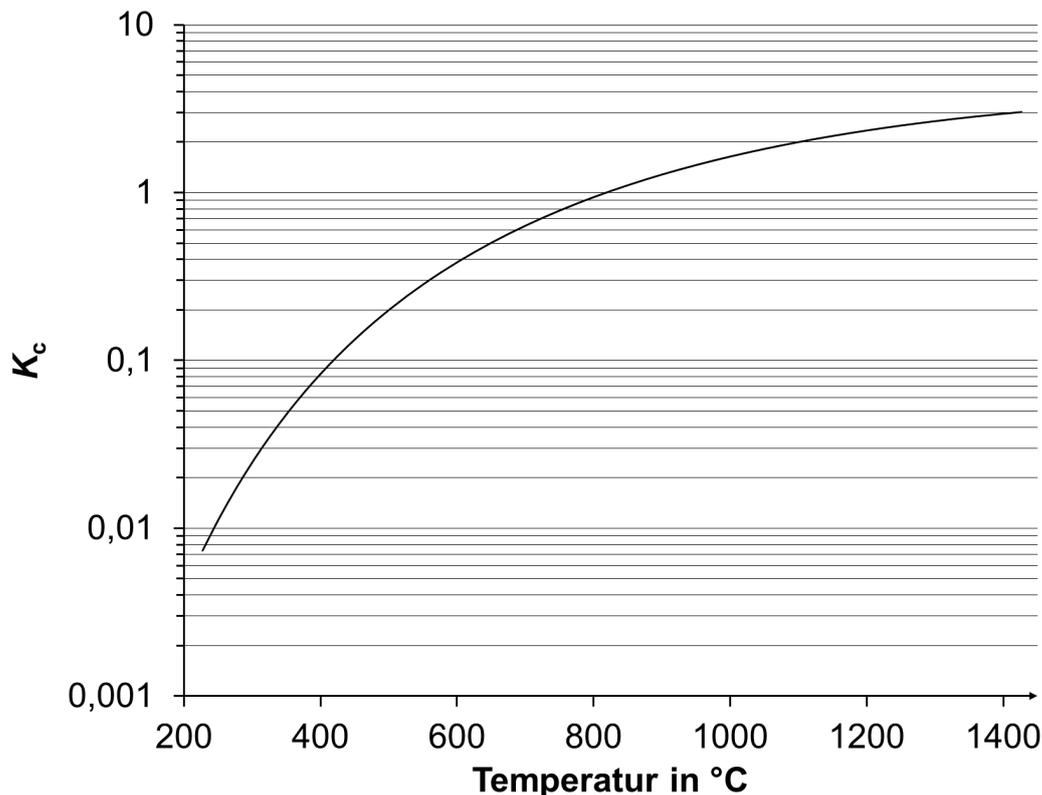


Abb. 2: Temperaturabhängigkeit der Gleichgewichtskonstanten bei der RWGS-Reaktion<sup>1</sup>

In einem kleinen Modellreaktor mit einem Volumen von 1,0 L wird die RWGS-Reaktion bei einem Druck von 25 bar und 600 °C durchgeführt. Eingeleitet wird ein Eduktgemisch aus Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid im Verhältnis 2:1. Die Wasserstoffkonzentration beträgt dabei 17,8 mmol/L.

(Fortsetzung nächste Seite)

### Material 3: Wasserstoffspeicher

Wasserstoff weist eine relativ geringe Dichte auf. Zur technischen Nutzung ist es nötig, ihn platzsparend speichern zu können. Tabelle 2 stellt verschiedene Möglichkeiten gegenüber.

Tab. 2: Möglichkeiten der Wasserstoffspeicherung <sup>2,3</sup>

	Dibenzyltoluol	Verflüssigung	Kompression	Power-to-gas
volumetrische Lagerungskapazität in kg H <sub>2</sub> pro m <sup>3</sup>	ca. 64	ca. 40	ca. 30	ca. 108
Betriebstemperatur des Systems	Lagerung: Raumtemperatur  Wasserstoff-Freisetzung: 250-320 °C	-253 °C	Raumtemperatur	Lagerung: -162 °C  Wasserstoff-Freisetzung: 200-350 °C
Lagerdruck in bar	1	1	350-700	1
Nutzung vorhandener Infrastruktur	ja	nein	nein	ja
Energieverlust durch Lagerung und Freisetzung	32 %	30 %	26 %	26 %

Mithilfe von Dibenzyltoluol wird Wasserstoff wie in Abbildung 3 dargestellt gespeichert und freigesetzt:

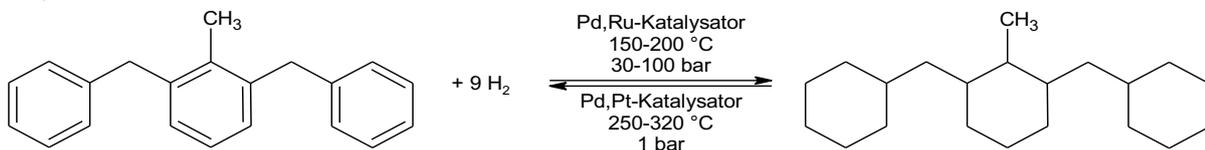


Abb. 3: Reaktion zur Wasserstoffspeicherung und -freisetzung mithilfe von Dibenzyltoluol<sup>3</sup>

#### Quellen:

- Adelung, S., Ascher, T., Klein, F., & Dietrich, R. (2017). Experimental investigation of the reverse water-gas shift reaction at high temperature and elevated pressure. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/321427571\\_Experimental\\_investigation\\_of\\_the\\_reverse\\_water-gas\\_shift\\_reaction\\_at\\_high\\_temperature\\_and\\_elevated\\_pressure](https://www.researchgate.net/publication/321427571_Experimental_investigation_of_the_reverse_water-gas_shift_reaction_at_high_temperature_and_elevated_pressure)
- [https://www.researchgate.net/figure/Overview-of-selected-materials-and-their-volumetric-and-gravimetric-hydrogen-density-The\\_fig2\\_312870399](https://www.researchgate.net/figure/Overview-of-selected-materials-and-their-volumetric-and-gravimetric-hydrogen-density-The_fig2_312870399)
- Aakko-Saksa, P., Cook, C., Kiviaho, J., & Repo, T. (2018). Liquid organic hydrogen carriers for transportation and storing of renewable energy – Review and discussion. Journal of Power Sources, 396, 803–823. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.04.011>

## A 2 Textilfärbung

Bei der Herstellung von gefärbten Textilien entstehen erhebliche Mengen an Abwasser. Diese können bei nicht fachgerechter Entsorgung zu Umwelt- und Gesundheitsschäden führen.

	<b>BE</b>
<b>1</b> Beschreiben Sie das Prinzip der Küpenfärbung am Beispiel von Indigo. Erklären Sie das Vorgehen beim Aufbringen des Farbstoffs und dessen Haftung an der Kleidungsfasern unter Verwendung von Reaktionsgleichungen. (M 1)	10
<b>2</b> Interpretieren Sie die Absorptionsspektren von Indigo und Leukoindigo (Abb. 3). Beurteilen Sie, ob sich die beiden MO-Schemata (Abb. 4) mit den Absorptionsspektren decken. (M 1)	8
<b>3</b> Werten Sie die Ergebnisse der fotometrischen Eichreihe von Säurerot aus (Tab. 2). Bestimmen Sie den molaren Extinktionskoeffizienten von Säurerot. (M 2)	7
<b>4</b> Leiten Sie den Typ der Polyreaktion sowie die für die Synthese des angegebenen Aramids (Abb. 7) notwendigen Monomere ab. Vergleichen Sie den Molekülbau und die thermischen Eigenschaften ausgehend vom Struktur-Eigenschafts-Prinzip der beiden Kunststoffe. (M 2)	7
<b>5</b> Bewerten Sie die beiden Verfahren zur Entfernung von Säurerot sowie die ungefilterte Einleitung von Färbereiabwässern in Flüsse unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit. (M 2)	8

40

## Material 1: Indigo

Indigo ist eines der ältesten bekannten Pigmente und wird häufig zum Färben von Jeans eingesetzt. Das Färbeverfahren bei Indigo (Abb. 1) ist eine sogenannte Küpenfärbung, bei der in basischer Lösung Natriumdithionit ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ) zu Schwefeldioxid reagiert. Dabei bildet sich Leukoindigo (Abb. 2).

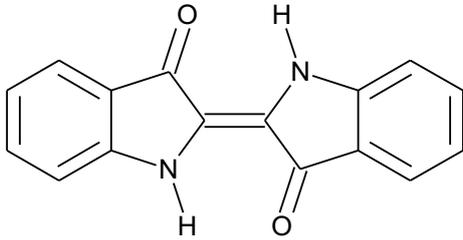


Abb. 1: Strukturformel von Indigo

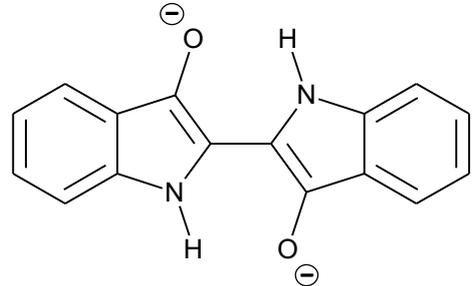


Abb. 2: Strukturformel von Leukoindigo

Um Absorptionsspektren von Farbstoffen erstellen zu können, müssen Stoffe in gelöster Form vorliegen. Indigo löst sich nur schlecht in Wasser, aber gut in Dimethylformamid. Dieses Lösemittel verschiebt das Absorptionsspektrum (Abb. 3) im Vergleich zu Wasser um einige Nanometer hin zu größeren Wellenlängen.

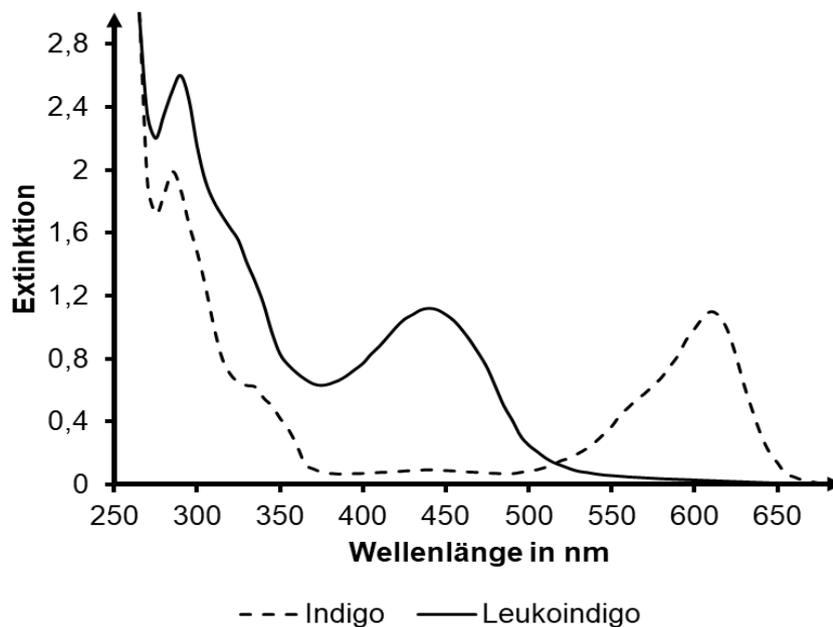


Abb. 3: Absorptionsspektren von Indigo und Leukoindigo in Dimethylformamid<sup>1</sup>

(Fortsetzung nächste Seite)

Zur Erklärung der Farbunterschiede von Indigo und Leukoindigo können folgende Molekülorbital-Schemata (Abb. 4) herangezogen werden.

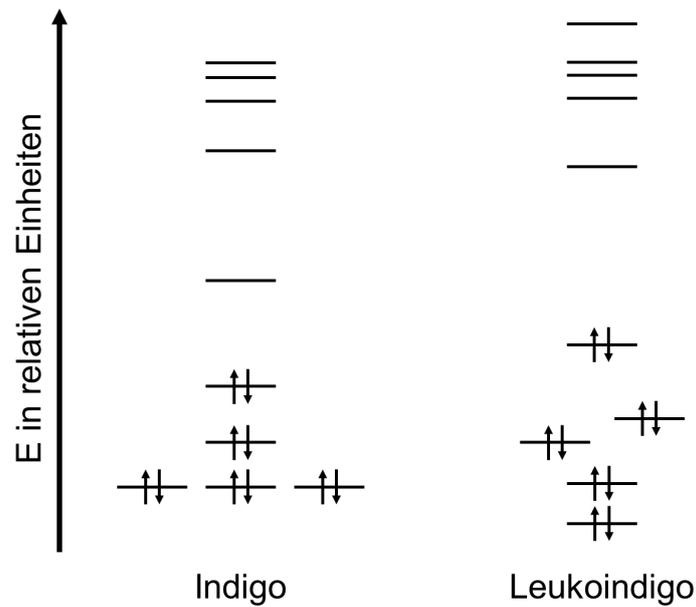


Abb. 4: Ausschnitte aus den MO-Schemata von Indigo und Leukoindigo<sup>2,3</sup>

## Material 2: Säurerot

Bei Säurerot handelt es sich um eine Klasse von Farbstoffen, die bei niedrigen pH-Werten auf Fasern aufgetragen werden. So lassen sich mit z. B. Säurerot 73, einem Vertreter dieser Farbstoffklasse, u. a. Wolle, Seide oder Polyamidfasern färben.

Tab. 1: GHS-Gefahrstoffkennzeichnung von Säurerot 73

	Signalwort: Achtung
<p>H315: Verursacht Hautreizungen.  H319: Verursacht schwere Augenreizung.  H335: Kann die Atemwege reizen.</p>	

In einer Versuchsreihe wird bestimmt, welche Mengen an Säurerot 73 durch verschiedene Verfahren aus Färbereiabwässern entfernt werden können. Dazu wird zuerst eine fotometrische Eichreihe angelegt, die im Anschluss dazu verwendet wird, die Konzentrationen an Säurerot 73 bei den einzelnen Verfahren zu messen. Im eingesetzten Fotometer wurden Küvetten mit einer Schichtdicke der Lösung von 10 mm verwendet.

Tab. 2: Messergebnisse für eine fotometrische Eichreihe mit Säurerot 73

Konzentration von Säurerot in mg/L	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Konzentration von Säurerot in $\mu\text{mol/L}$	14,4	28,7	43,1	57,4	71,8	86,1	100,5	114,8	129,1
Extinktion	0,3	0,26	0,84	1,2	1,24	1,22	1,59	2,39	2,43

Zur Entfernung von Säurerot 73 aus Färbereiabwässern stehen zwei Verfahren zur Verfügung:

1) Nanofiltration:

Hierbei wird Abwasser durch eine spiralförmig gewundene Membran mit sehr feinen Poren gepresst. Wasser-Moleküle können im Gegensatz zu Farbstoff-Molekülen die Membran passieren. Je weiter die Lösung durch die Spirale strömt, desto weniger Lösungsmittel ist in ihrem Inneren vorhanden, wodurch die Konzentration der gelösten Stoffe ansteigt (Abb. 5).

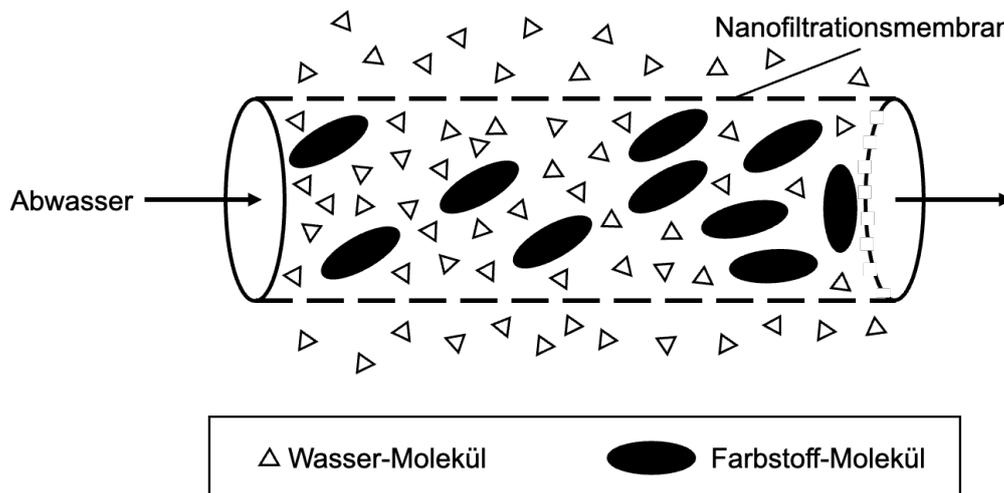


Abb. 5: schematische Darstellung der Nanofiltration<sup>4</sup>

Die Nanofiltrationsmembran hat eine Haltbarkeit von mehreren Jahren und besteht aus mehreren Schichten. Enthaltene Kunststoffe werden meist auf Erdölbasis hergestellt. Zwei Beispiele sind in den Abbildungen 6 und 7 dargestellt:

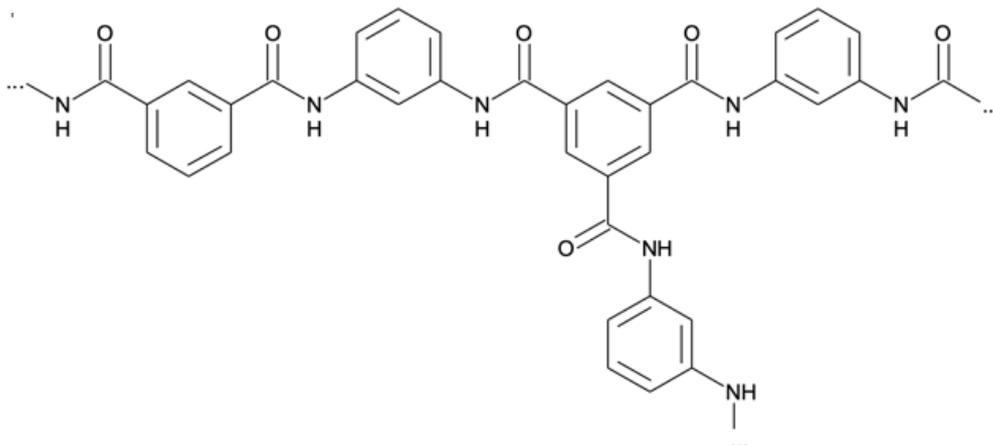


Abb. 6: Ausschnitt aus einem Aramid-Molekül

(Fortsetzung nächste Seite)

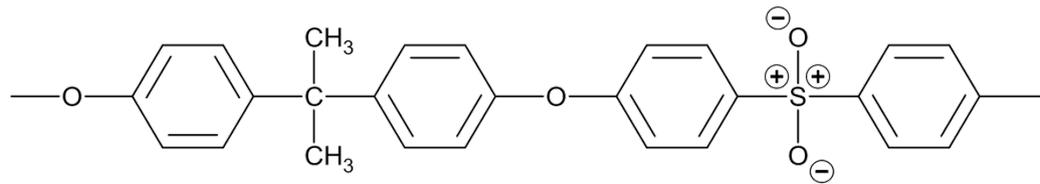


Abb. 7: Ausschnitt aus einem Polysulfon-Molekül

Der entfernte Farbstoffanteil bei Anwendung dieses Verfahrens ist in Abbildung 8 dargestellt.

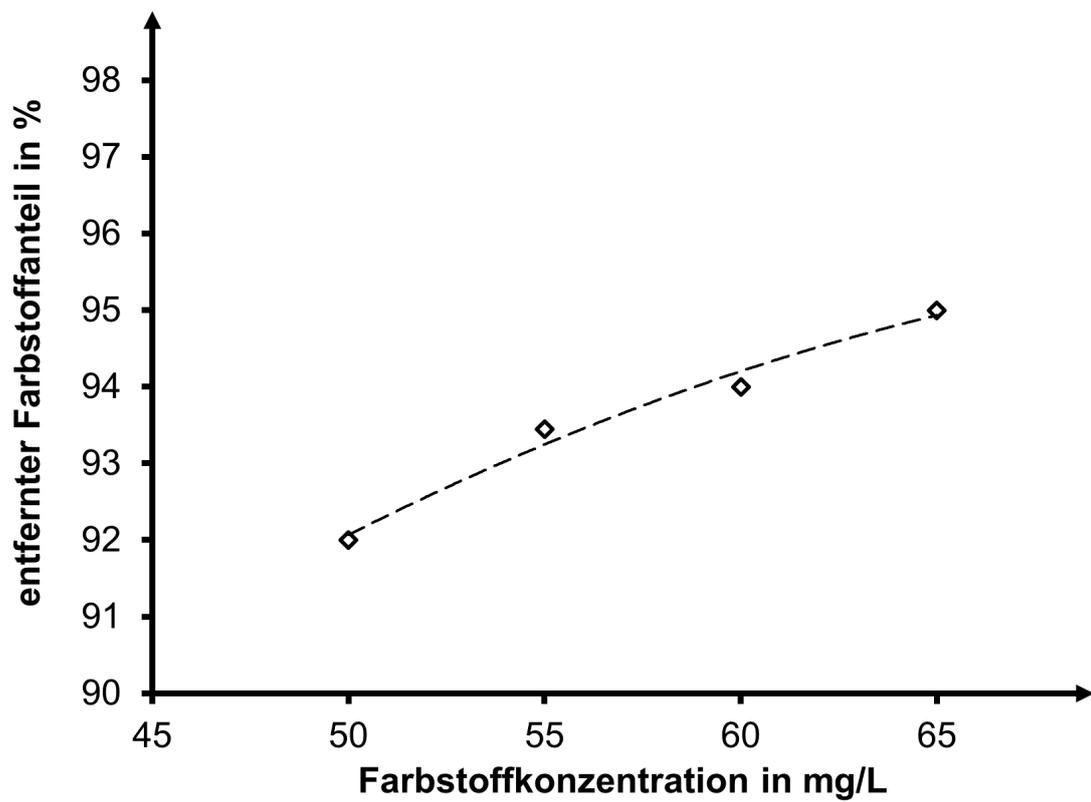


Abb. 8: durch Nanofiltration an einer Membran entfernter Farbstoffanteil von Säurerot 73<sup>4</sup>

(Fortsetzung nächste Seite)

## 2) Adsorption:

Das Abwasser wird z. B. durch organisches Material wie den als Abfallprodukt bei der Herstellung von Reiswein anfallenden Bodensatz geleitet. Dabei lagert sich der Farbstoff an die Oberfläche des Adsorptionsmittels an und wird so gebunden. Abhängig von verschiedenen Faktoren können so pro Gramm Adsorptionsmittel ca. 18 mg Farbstoff gebunden werden. Das Material mit dem gebundenen Farbstoff muss anschließend entsorgt werden. Abbildung 9 zeigt den durch Adsorption entfernten Anteil an Säurerot 73.

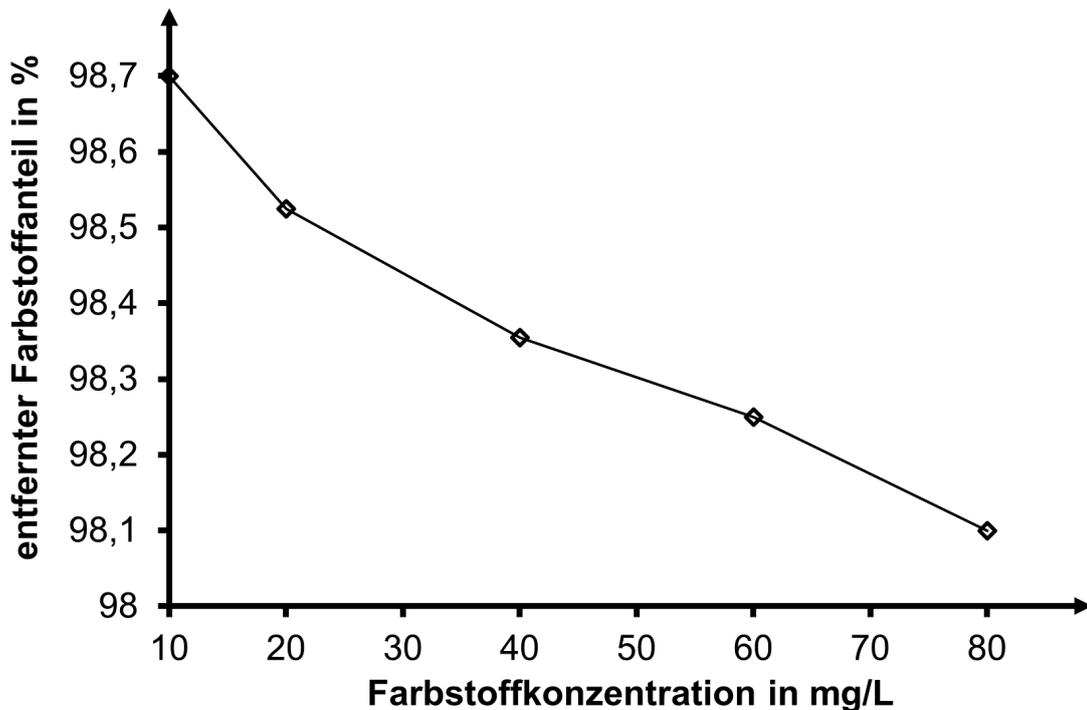


Abb. 9: durch Adsorption an den Bodensatz aus der Reisweinproduktion entfernter Farbstoffanteil von Säurerot 73<sup>5</sup>

### Quellen:

- <sup>1</sup> De Melo, J. S. S., Moura, A. a. P., & Melo, M. J. (2004). Photophysical and spectroscopic studies of indigo derivatives in their keto and leuco forms. *Journal of Physical Chemistry A*, 108(34), 6975–6981.
- <sup>2</sup> <https://molvis.cup.uni-muenchen.de/site/assets/files/1048/leuko-indigoshmo.pdf>
- <sup>3</sup> <https://molvis.cup.uni-muenchen.de/site/assets/files/1048/indigoshmo.pdf>
- <sup>4</sup> Abid, M. F., Zablouk, M. A., & Abid-Alameer, A. M. (2012). Experimental study of dye removal from industrial wastewater by membrane technologies of reverse osmosis and nanofiltration. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 9(1).
- <sup>5</sup> Wang, Q., Liang, L., Xi, F., Tian, G., Mao, Q., & Meng, X. (2020). Adsorption of Azo Dye Acid Red 73 onto Rice Wine Lees: Adsorption Kinetics and Isotherms. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 1–8.

### A 3 Polyglycine

Glycin wird oft als einfachste Aminosäure bezeichnet. Seine Moleküle lassen sich wie bei allen anderen Aminosäuren zu Peptid-Molekülen kondensieren.

- |   | <b>BE</b> |
|---|-----------|
| <b>1</b> Formulieren Sie die Strukturformelgleichungen für die beiden genannten Möglichkeiten zur Bildung eines drei Glycin-Bausteine umfassenden Tripeptids. Leiten Sie jeweils den Typ der Polyreaktion ab. (M 1)   | 7         |
| <b>2</b> Leiten Sie für das Aminoketen-Molekül die räumliche Lage der beiden Orbitalpaare zueinander ab, in denen sich die mit 1 und 2 markierten Elektronenpaare mit höchster Wahrscheinlichkeit aufhalten (Abb.1). Begründen Sie die Unterschiede in den Bindungslängen zwischen den Kohlenstoff-Atomen bei Buta-1,3-dien und Aminoketen unter Mitverwendung mesomerer Grenzstrukturen. (M 1) | 10        |
| <b>3</b> Beschreiben Sie die Wirkungsweise der PETase auch unter Verwendung einer Skizze. Stellen Sie eine Hypothese auf, die sich mit der angegebenen Versuchsreihe stützen lässt. Erklären Sie die Bedeutung von Ansatz 2 in Tabelle 2 im angegebenen Versuchsdesign. (M 2)   | 9         |
| <b>4</b> Stellen Sie auf Basis der Stoßtheorie eine Hypothese zu den Versuchsergebnissen der Ansätze 1 bis 5. (M 2)   | 8         |
| <b>5</b> Beurteilen Sie die Bedeutung des beschriebenen Abbauprozesses von PET für die zukünftige Lösung des Plastikmüllproblems. (M 2, M3)   | 6         |

**40**

## Material 1: Makromoleküle als Vorstufen der Bausteine des Lebens im Weltall

Bei der Suche nach Leben im Weltall geht man davon aus, dass als Voraussetzung für die Entstehung von Lebewesen organische, reaktive Verbindungen entstehen müssen, die bei der Synthese von Biomolekülen eine Rolle spielen. So können beispielsweise Polyglycin-Moleküle durch Reaktion von mehreren Molekülen Glycin (2-Aminoethansäure) unter Abspaltung von Wasser entstehen.

Kürzlich konnte jedoch auch gezeigt werden, dass sich aus Kohlenstoff, Kohlenstoffmonooxid und Ammoniak unter Bedingungen, wie sie im Weltall herrschen, Polyglycine bilden können. Als reaktives Zwischenprodukt entsteht aus den drei Edukten zunächst Aminoketen (Abb. 1), das leicht zu einem Polyglycin weiter reagieren kann. Bei dieser Polyreaktion wird neben Aminoketen rechnerisch pro Tripeptid ein Molekül Wasser benötigt.

Man vermutet, dass Buta-1,3-dien (Abb. 2) als reaktive ungesättigte Verbindung auf dem Saturnmond Titan vorkommt. Auch Buta-1,3-dien ist unter bestimmten Bedingungen in der Lage zu Makromolekülen zu polymerisieren. Die Bindungslängen der Moleküle Aminoketen und Buta-1,3-dien sind in Tab. 1 angegeben.

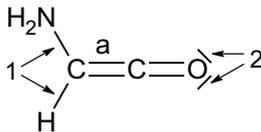


Abb. 1: Strukturformel von Aminoketen

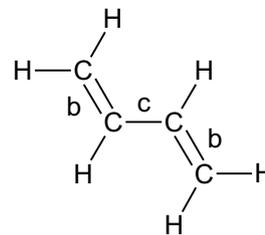


Abb. 2: Strukturformel von Buta-1,3-dien

Tab. 1: Vergleich ausgewählter Bindungslängen in Aminoketen- bzw. Buta-1,3-dien-Molekülen

Bindung	Bindungslänge in pm
a	132
b	134
c	145

(Fortsetzung nächste Seite)

## Material 2: Lösungen für das Plastikmüllproblem

Kunststoffe stellen auf unserem Planeten trotz vieler Vorteile in zunehmendem Maße ein Problem dar. Bei diesen Materialien ist folgender Nachteil offenkundig: die langsame Abbaubarkeit und die damit einhergehende Anreicherung von Plastikmüll in der Umwelt. Getränkeflaschen bestehen oft aus PET (Polyethylenterephthalat), das aus zwei verschiedenen Monomeren synthetisiert wird. Derzeit wird intensiv nach Möglichkeiten gesucht, um den Abbau von PET zu beschleunigen.

2016 entdeckte man erstmals ein Bakterium (*Ideonella sakaiensis*), das PET mithilfe zweier Enzyme in seine Monomere abbauen kann (Abb. 3) und diese für den eigenen Stoffwechsel nutzt:

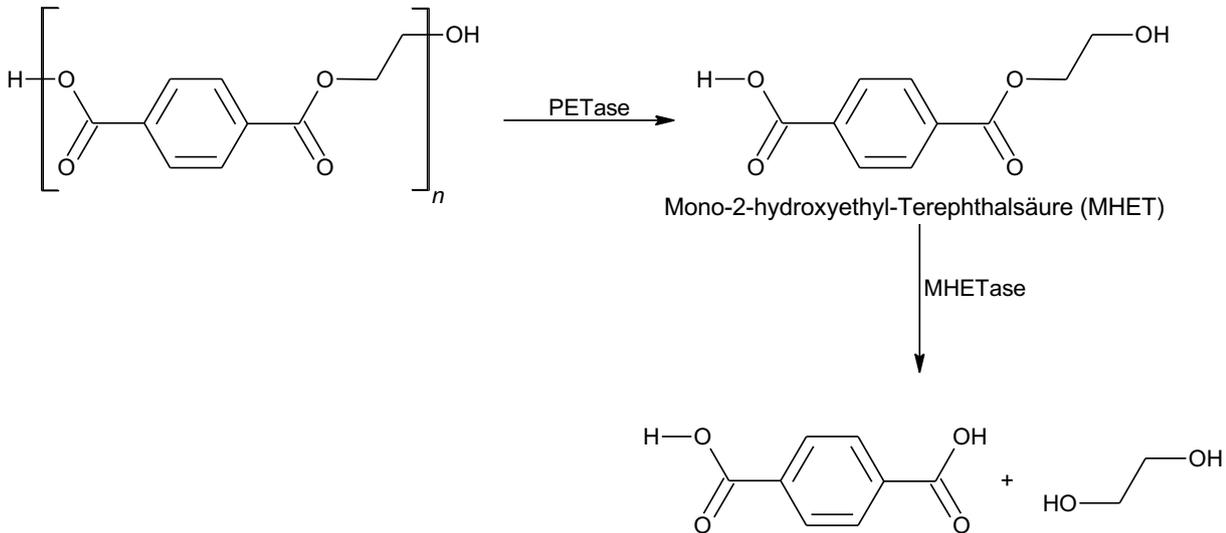


Abb. 3: Reaktionsschema des PET-Abbaus in *Ideonella sakaiensis*<sup>1</sup>

Beide Enzym-Moleküle können über verschieden lange Oligopeptide aus Glycin- und Serin-Bausteinen (Abb. 4) verknüpft werden. In einer Versuchsreihe (Tab. 2) wird die Aktivität der PETase-MHETase-Dimere mit der Aktivität freier Enzym-Moleküle verglichen. Dazu wird die Terephthalsäure-Konzentration jeweils nach einer bestimmten Zeit gemessen (Abb. 5).

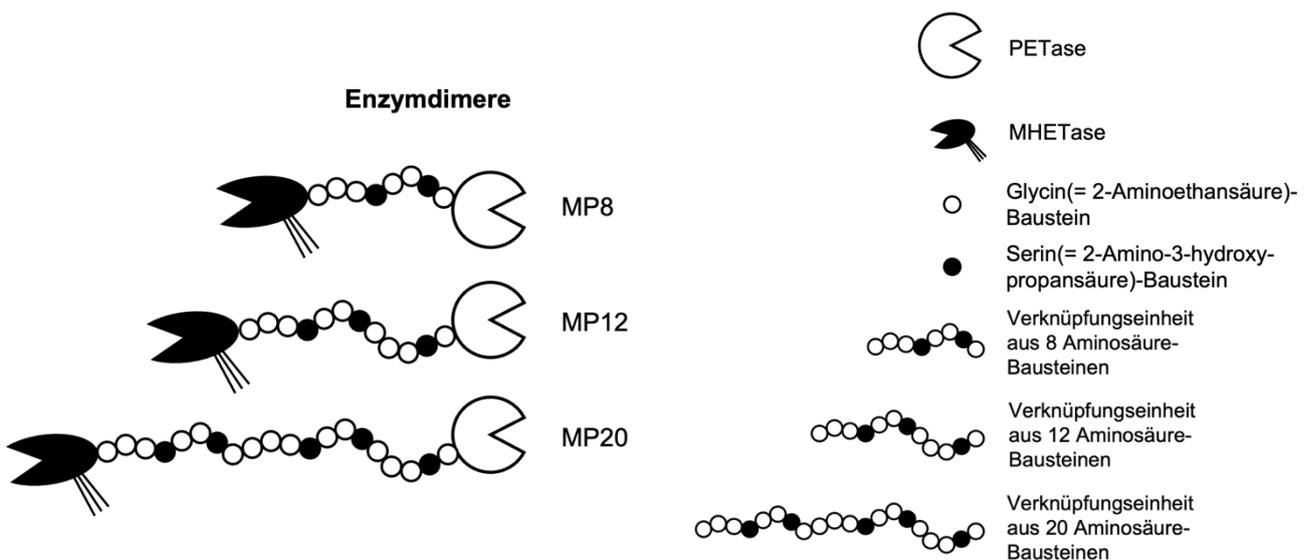


Abb. 4: Untersuchte Enzym-Dimere mit unterschiedlich langen Polypeptiden-Ketten<sup>1</sup>

(Fortsetzung nächste Seite)

Tab. 2: Versuchsreihe zur Untersuchung der Aktivität verschiedener PETase-MHETase-Dimere und nicht verbundener Enzym-Molekülen<sup>2</sup>

Ansatz	1	2	3	4	5
PET	+	+	+	+	+
PETase + MHETase	+				
MP8			+		
MP12				+	
MP20					+

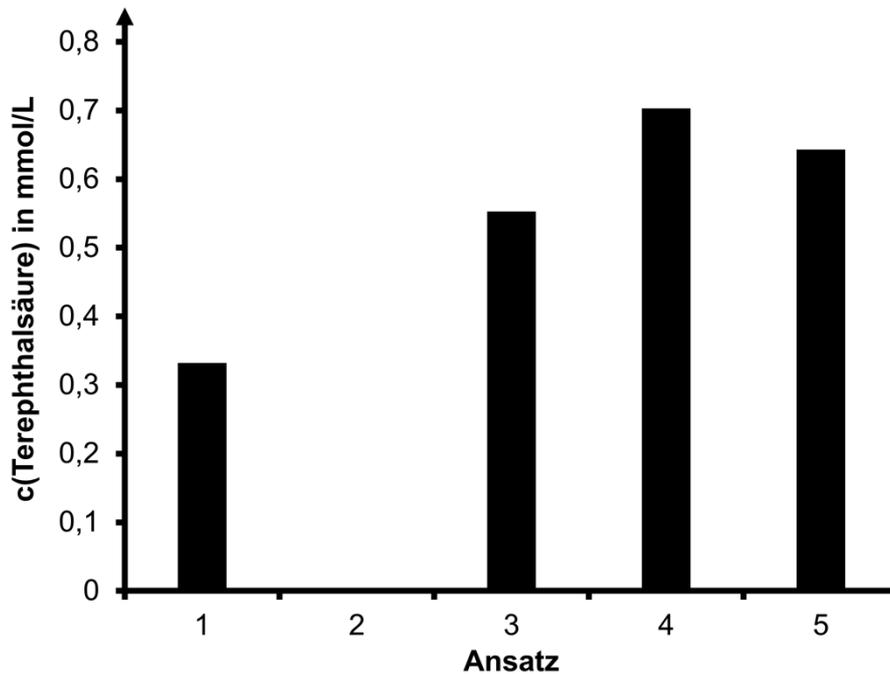


Abb. 5: Ergebnisse der Versuchsreihe<sup>2</sup>

### Material 3: Müllproblematik verschiedener Kunststoffsorten

Diese von den Forschern gewonnenen Erkenntnisse gelten nur für den Kunststoff PET.

Die Müllproblematik wird durch die vielen unterschiedlichen Kunststoffsorten verschärft (Abb. 6), welche zudem industriell in sehr unterschiedlichen Mengen eine Rolle spielen. Für jeden Kunststoff müssen eigene effiziente Abbaumechanismen erforscht werden. Bis diese etabliert sind, ist es wichtig, sinnvolle Alternativen zu finden. Abbildung 7 zeigt, welcher Anteil der unterschiedlichen Kunststoffe aktuell in den Vereinigten Staaten recycelt wird.

(Fortsetzung nächste Seite)

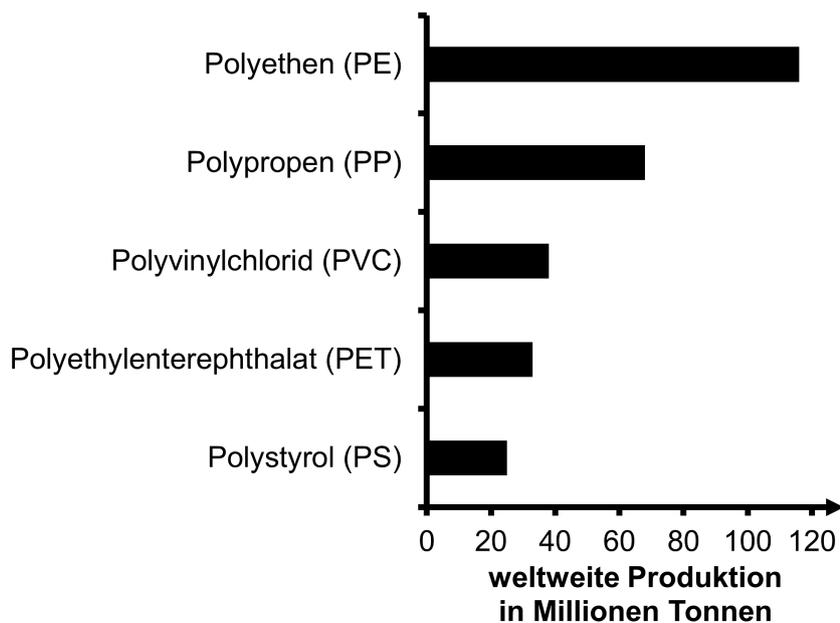


Abb. 6: weltweite Kunststoffproduktion getrennt nach Sorte im Jahr 2015<sup>3</sup>

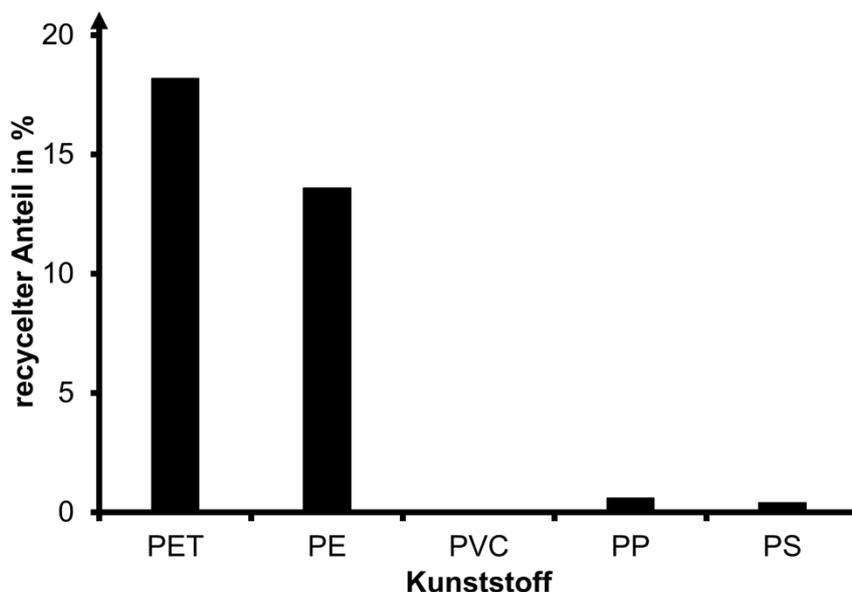


Abb. 7: Recyclinganteil verschiedener Kunststoffe in den Vereinigten Staaten im Jahr 2017<sup>4</sup>

Quellen:

- <sup>1</sup> Knott, B. C., Erickson, E., Allen, M. D., Gado, J. E., Graham, R., Kearns, F. L., Pardo, I., Topuzlu, E., Anderson, J. J., Austin, H. P., Dominick, G., Johnson, C. W., Rorrer, N. A., Szostkiewicz, C. J., Copié, V., Payne, C. M., Woodcock, H. L., Donohoe, B. S., Beckham, G. T., & McGeehan, J. (2020). Characterization and engineering of a two-enzyme system for plastics depolymerization. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(41), 25476–25485. <https://doi.org/10.1073/pnas.2006753117>
- <sup>2</sup> Austin, H. P., Allen, M. D., Donohoe, B. S., Rorrer, N. A., Kearns, F. L., Silveira, R. L., Pollard, B. C., Dominick, G., Duman, R., Omari, K. E., Mykhaylyk, V., Wagner, A., Michener, W. E., Amore, A., Skaf, M. S., Crowley, M. F., Thorne, A. W., Johnson, C. W., Woodcock, H. L., . . . Beckham, G. T. (2018). Characterization and engineering of a plastic-degrading aromatic polyesterase. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(19). <https://doi.org/10.1073/pnas.1718804115>
- <sup>3</sup> Primary plastic production by polymer type. (n.d.). Our World in Data. <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-production-polymer>
- <sup>4</sup> A plastic economy: Is recycling broken? – Sustainability. (2022, February 2). <https://sustainability.colostate.edu/humannature/plastic-economy-is-recycling-broken/>

#### A 4 Einflüsse von Kohlenwasserstoffen auf Umwelt und Atmosphäre

Die Verwendung von Kohlenwasserstoffen und von ihnen abgeleiteten Verbindungen beeinflusst das Klima und kann auch Schäden bei Organismen hervorrufen.

	<b>BE</b>
1 Beschreiben Sie die Durchführung der Bromwasserprobe mit Isopren und Methan unter Verwendung einer Skizze. Erklären Sie jeweils die Beobachtungen. Begründen Sie anhand des Reaktionsmechanismus die Bildung des Nebenprodukts. (M 1).	10
2 Berechnen Sie mithilfe der Reaktionsgleichungen jeweils die Standardreaktionsenthalpie $\Delta_r H^\circ$ der Verbrennungsreaktionen von Methan und Propan. Erklären Sie den Zusammenhang zwischen den berechneten Standardreaktionsenthalpien und den in Tab. 2 gegebenen Brennwerten. (M 2)	7
3 Interpretieren Sie die Abbildungen 3 und 4 unter Zuhilfenahme des Textes. (M 3)	6
4 Stellen Sie die Modellvorstellung in Abbildung 5 als Reaktionsgleichungen in Valenzstrichformelschreibweise dar. Geben Sie je einen Vorteil der beiden Darstellungsweisen an. Beurteilen Sie, inwieweit die Modellvorstellung durch die Messwerte in Abbildung 3 und 4 gestützt wird. (M 3)	7
5 Beurteilen Sie, ob sich mit den angegebenen Stoffen 4-Chlortoluol herstellen lässt. Leiten Sie jeweils die für die Herstellung von 4-Chlortoluol sowie Benzylchlorid notwendigen Reaktionsbedingungen unter Angabe der Reaktionsgleichungen ab. Nennen Sie die Namen der entsprechenden Reaktionsmechanismen. (M 4)	10
	<b>40</b>

## Material 1: Kohlenwasserstoffe – von der Erde in die Atmosphäre

In der Atmosphäre reagiert eine Vielzahl von Stoffen mit Ozon. Zwei Kohlenwasserstoffe, die unter anderem durch natürliche Quellen freigesetzt werden, sind Isopren und Methan. In der Natur wird Isopren (2-Methylbuta-1,3-dien) von grünen Pflanzen freigesetzt. Methan wird z. B. von Bakterien in den Mägen von Wiederkäuern produziert und von den Tieren in die Atmosphäre abgegeben.

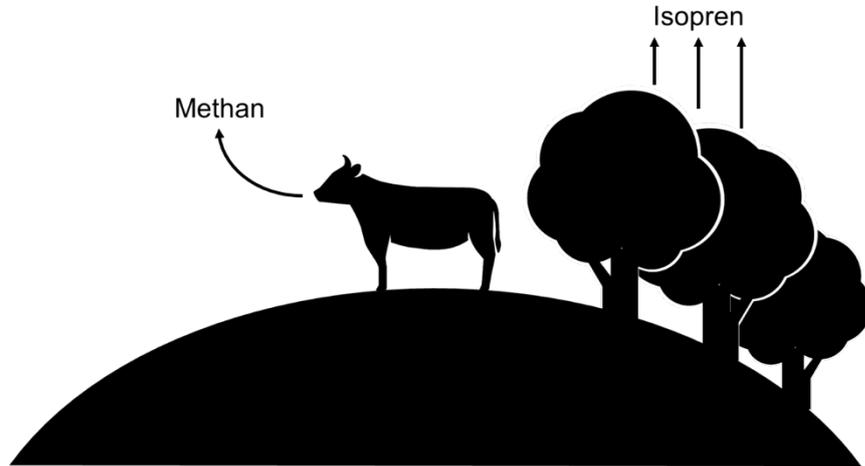


Abb. 1: Freisetzung von Isopren und Methan in die Atmosphäre

Sowohl mit Isopren als auch mit Methan wird die Bromwasserprobe durchgeführt. Mit Isopren entsteht als Nebenprodukt u. a. die in Abb. 2 dargestellte Verbindung:

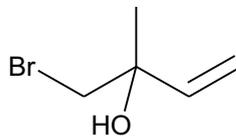


Abb. 2: Strukturformel des Nebenprodukts

(Fortsetzung nächste Seite)

## Material 2: Heizen und Bewegen mit Kohlenwasserstoffen

Die Verbrennung von Kohlenwasserstoffen hat einen wesentlichen Einfluss auf die Atmosphäre. Erdgas, dessen Hauptbestandteil Methan ist (im Nordsee-Erdgas 89 %), wird u. a. zum Heizen von Wohnungen oder zum Antrieb von Pkw genutzt.

Anstelle von Erdgas wird vermehrt auch Flüssiggas sowohl beim Heizen als auch in Pkw eingesetzt. Flüssiggas ist ein Gemisch aus unter hohem Druck verflüssigtem Propan (95 %), Butan (4 %) und weiterer Kohlenwasserstoffe (1 %).

Tab. 1: Standardbildungsenthalpien ausgewählter Verbindungen<sup>1</sup>

Verbindung	molare Standardbildungsenthalpie $\Delta_f H_m^\circ$ in kJ/mol
Methan	-74,8
Wasser	-241,8
Propan	-103,9
Kohlenstoffdioxid	-393,5

Tab. 2: Brennwerte gasförmiger Brennstoffe bei einer Temperatur von 25 °C<sup>1</sup>

Brennstoff	Brennwert in MJ/kg
Methan	55,498
Ethan	51,877
Propan	50,345
Butan	49,500

(Fortsetzung nächste Seite)

### Material 3: Trichlorfluormethan – ein CFKW

Neben Methan sind Chlorfluorkohlenwasserstoffe (CFKW) für den Abbau der Ozonschicht verantwortlich. Ein Vertreter dieser Gruppe ist Trichlorfluormethan, das früher als Kältemittel in Kühlschränken sowie als Treibgas für Spraydosen verwendet wurde. Freigesetztes Trichlorfluormethan verbleibt Jahrzehnte in der Atmosphäre und kann dort seine chemische Wirkung auf die Ozonschicht entfalten. Dieser Effekt wurde bereits in den 1980er Jahren erkannt.

Die Ozonschicht schwächt die für Organismen schädliche UV-Strahlung aus dem Weltall um ein Vielfaches ab. 1987 wurden im sogenannten Protokoll von Montreal internationale Vereinbarungen zum Schutz der Ozonschicht getroffen. Dabei verpflichteten sich die unterzeichnenden Staaten u. a. den Einsatz von Trichlorfluormethan zu verbieten. Seit dem Jahr 1991 wurde in der Bundesrepublik Deutschland die Verwendung von Trichlorfluormethan rechtlich stark eingeschränkt und der Stoff nach Möglichkeit ersetzt. Seit 2009 ist die Herstellung und Verwendung von Trichlorfluormethan in allen 197 Unterzeichnerstaaten verboten.

In Abbildung 3 sind die weltweit jährlich gemessene Freisetzung von Trichlorfluormethan sowie eine Prognose der Emissionen bei Einhaltung des Montreal-Protokolls dargestellt. Abbildung 4 zeigt die dicke der Ozonschicht im zeitlichen Verlauf.

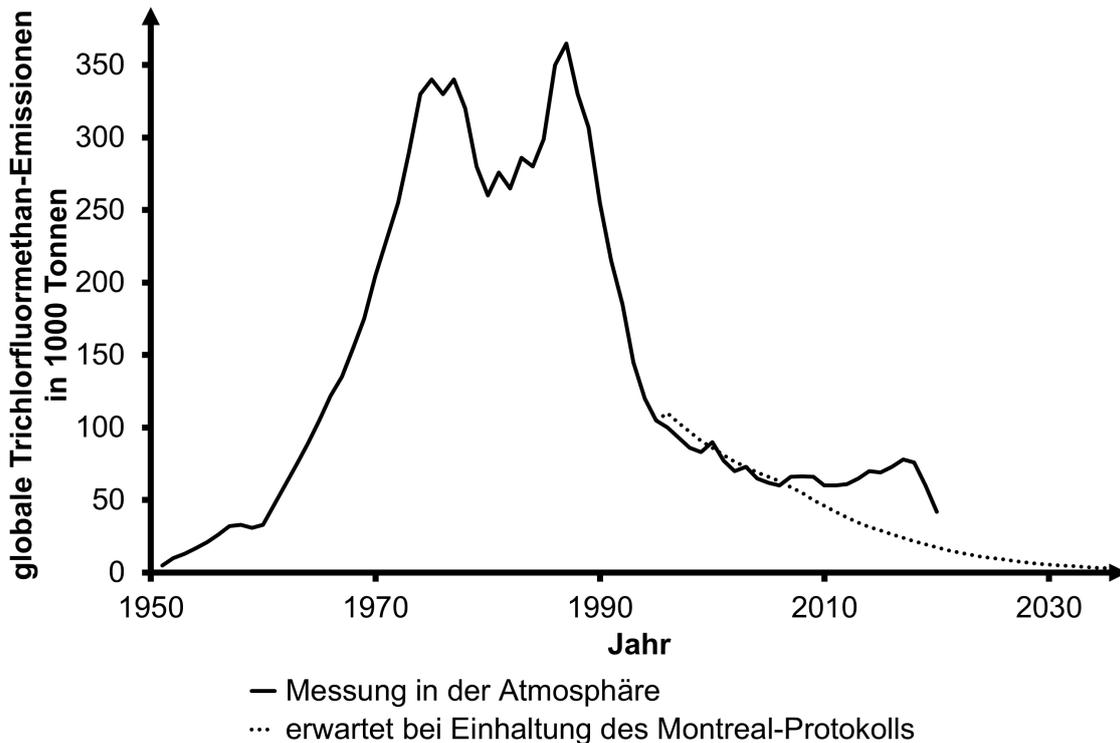


Abb. 3: zeitliche Entwicklung der globalen Emission von Trichlorfluormethan (gemessen in der Atmosphäre)<sup>2</sup>

(Fortsetzung nächste Seite)

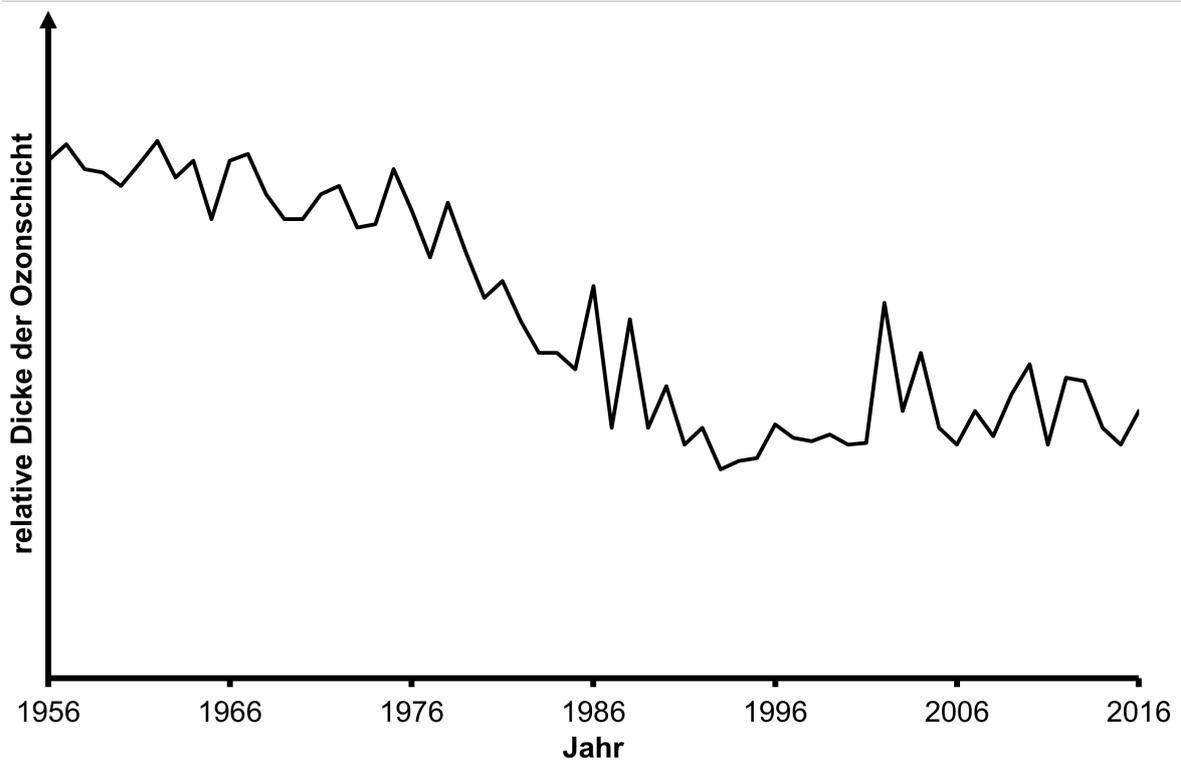


Abb. 4: zeitliche Entwicklung der Dicke der Ozonschicht<sup>3</sup>

Forscher haben den Zusammenhang zwischen Abbildung 3 und 4 auf Teilchenebene modelliert (Abb. 5).

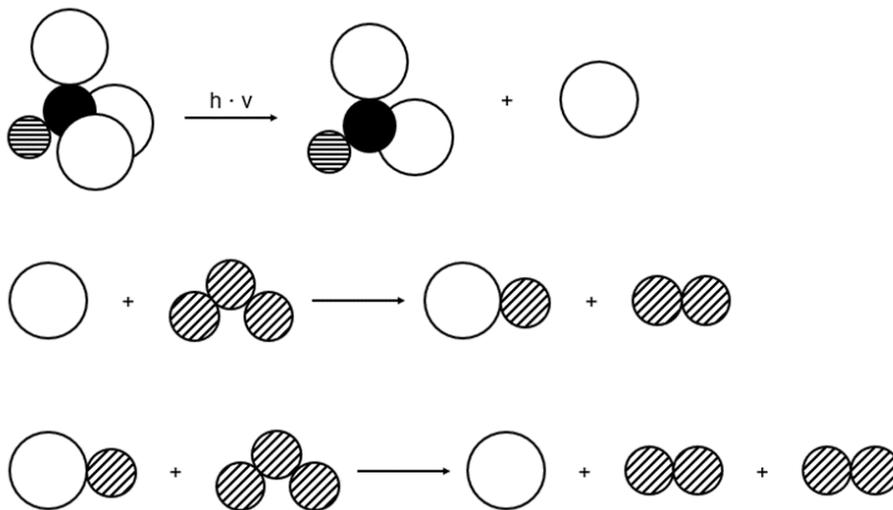


Abb. 5: Mechanismus zum Abbau von Ozon-Molekülen ( $O_3$ ) durch Trichlorfluormethan-Moleküle in einer Modellvorstellung<sup>4</sup>

(Fortsetzung nächste Seite)

#### Material 4: Toluol und chlorierte Aromaten

Weitere Beispiele für chlorierte Kohlenwasserstoffe, die Umweltschäden verursachen können, sind Chlortoluol und Benzylchlorid. Sie entstehen z. B. als Zwischenprodukte bei der Herstellung von Farbstoffen und Arzneimitteln.

Bei der Synthese bestimmter Farbstoffe reagiert Toluol mit Chlor. Je nach Reaktionsbedingungen und eingesetzten Edukten kann es zu 4-Chlortoluol oder Benzylchlorid (Abb. 6) umgesetzt werden.

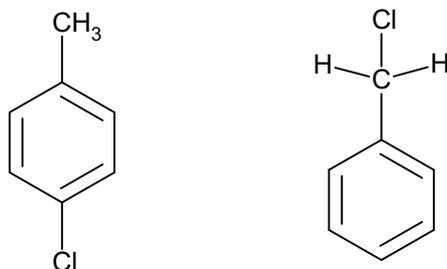


Abb. 6: Skelettforneln von 4-Chlortoluol (links) und Benzylchlorid (rechts)

Im Labor stehen für die Synthese neben Toluol und Chlor, Eisen(III)-chlorid und Wasserstoffchlorid als Chemikalien zur Verfügung.

#### Quellen:

- <sup>1</sup> Wikipedia-Autoren. (2003). Heizwert. de.wikipedia.org. <https://de.wikipedia.org/wiki/Heizwert>
- <sup>2</sup> Gerbing, C. (2021b, February 11). Global CFC emissions now declining again as expected under the Montreal Protocol - Atmospheric Composition & Chemistry. Atmospheric Composition & Chemistry. <https://research.csiro.au/acc/global-cfc-emissions-now-declining-again/>
- <sup>3</sup> Allin, S., Laube, J., Witrant, E., Kaiser, J., McKenna, E. J., Dennis, P. F., Mulvaney, R., Capron, E., Martinerie, P., Röckmann, T., Blunier, T., Schwander, J., Fraser, P. J., Langenfelds, R. L., & Sturges, W. T. (2015). Chlorine isotope composition in chlorofluorocarbons CFC-11, CFC-12 and CFC-113 in firn, stratospheric and tropospheric air. Atmospheric Chemistry and Physics, 15(12), 6867–6877. <https://doi.org/10.5194/acp-15-6867-2015>
- <sup>4</sup> <https://www.chemgeo.uni-jena.de/chegemedia/ituc/praktikum/ozonabbau.pdf>