



**ILLUSTRIERENDE PRÜFUNGSAUFGABEN  
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**  
**grundlegendes Anforderungsniveau**

**Arbeitszeit: 255 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.

- 1 Skizzieren Sie den Aufbau einer PEM-Elektrolysezelle. Erklären Sie die Bedeutung der Protonenaustauschmembran für die Funktion der Zelle. (M 1)
- 2 Erklären Sie anhand von Abbildung 1 die photokatalytische Wasserspaltung. Beurteilen Sie auf Basis des jeweiligen Stoff- und Energiebedarfs der elektrochemischen und der photokatalytischen Wasserstoffgewinnung deren technische Einsetzbarkeit. (M 1)
- 3 Berechnen Sie für den Modellreaktor die bei der RWGS-Reaktion im Gleichgewicht vorliegende Konzentration an Kohlenstoffmonoxid. Erklären Sie anhand des Prinzips von Le Chatelier sowie Tabelle 1 zwei Möglichkeiten, um die Ausbeute von Kohlenstoffmonoxid zu erhöhen. (M 2)
- 4 Bewerten Sie die drei in Tabelle 2 dargestellten Methoden der Wasserstoffspeicherung hinsichtlich der Kriterien Wirtschaftlichkeit, Sicherheit und Energieeffizienz. (M 3)

**BE**

6

6

8

10

**30**

## Material 1: Wasserstofferzeugung

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 diesem Verfahren wird Wasser an einer Iridiumelektrode vorbeigeleitet. Die Wasser-Moleküle geben hier ihre Protonen ab und es bilden sich Sauerstoff-Moleküle. Die abgegebenen Protonen wandern erst durch die Iridiumelektrode, danach durch die PEM und dann durch eine Kohlenstoffelektrode und reagieren an der Platinbeschichtung dieser Kohlenstoffelektrode mit Elektronen zu Wasserstoff.

Eine weitere Möglichkeit zur Gewinnung von Wasserstoff stellt die photokatalytische Spaltung von Wasser dar, bei der Wasserstoff direkt mithilfe von Licht erzeugt wird.

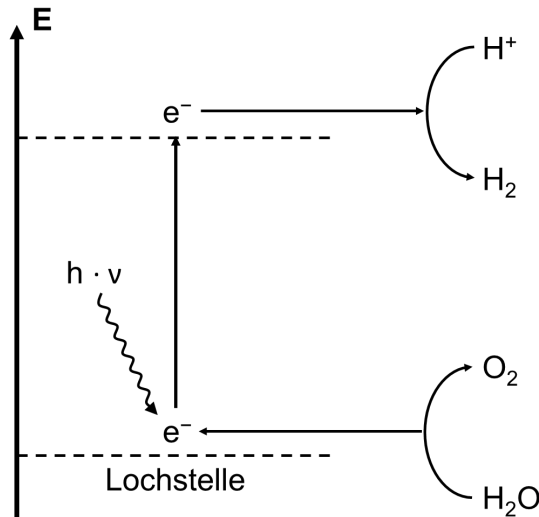


Abb. 1: Schema zur photokatalytischen Wasserspaltung

## 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

In einem kleinen Modellreaktor wird die RWGS-Reaktion bei 850 °C durchgeführt. Eingeleitet wird ein Eduktgemisch aus Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid. Im Gleichgewicht beträgt die Wasserstoffkonzentration 11,6 mmol/L und die Kohlenstoffdioxidkonzentration 2,7 mmol/L. Zu Beginn liegen weder Kohlenstoffmonoxid noch Wasser vor. Die Gleichgewichtskonstante der Reaktion beträgt 1,1.

(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>

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

#### Quellen:

<sup>1</sup> [https://elib.dlr.de/114888/1/Adelung\\_WCCE10\\_Experimental%20investigation%20of%20the%20reverse%20water-gas%20shift%20reaction%20at%20high%20temperature%20and%20elevated%20pressure.pdf](https://elib.dlr.de/114888/1/Adelung_WCCE10_Experimental%20investigation%20of%20the%20reverse%20water-gas%20shift%20reaction%20at%20high%20temperature%20and%20elevated%20pressure.pdf)

<sup>2</sup> [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)

<sup>3</sup> Aakko-Saksä, 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>1</b> | Erklären Sie unter Verwendung eines Energiestufenschemas die Ursache für die Farbigkeit von Stoffen. Beschreiben Sie das dargestellte Absorptionsspektrum (Abb. 3) und leiten Sie daraus die Farben von Indigo und Leukoindigo ab. (M 1) | <b>6</b> |
| <b>2</b> | Begründen Sie, dass es sich bei der Reaktion von Indigo zu Leukoindigo um eine Redoxreaktion handelt. Erklären Sie anhand der Löslichkeiten von Indigo und Leukoindigo das Vorgehen beim Färben. (M 1)                                   | <b>7</b> |
| <b>3</b> | Leiten Sie den Reaktionstyp sowie die notwendigen Monomere zur Synthese des angegebenen Aramids (Abb. 6) ab. Begründen Sie anhand des Struktur-Eigenschafts-Prinzips die thermischen Eigenschaften der beiden Kunststoffe. (M 2)         | <b>7</b> |
| <b>4</b> | Planen Sie ein Experiment, mit dem Sie die Hypothese zur Adsorption von Säurerot 73 überprüfen können, und begründen Sie Ihre Vorgehensweise. (M 2)                                                                                      | <b>5</b> |
| <b>5</b> | Bewerten Sie die beiden Verfahren zur Entfernung von Säurerot aus Färbereiabwässern unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit. (M 2)                                                                                                           | <b>5</b> |

**BE**

6

7

7

5

5

**30**

## Material 1: Indigo

Indigo ist eines der ältesten bekannten Pigmente und wird häufig zum Färben von Jeans verwendet. Um den Feststoff Indigo auf die Kleidungsstücke aufzubringen, wird wie folgt vorgegangen: In basischer wässriger Lösung reagieren Indigo-Moleküle (Abb. 1) mit Dithionit-Ionen ( $S_2O_4^{2-}$ ). Dabei bildet sich Leukoindigo (Abb. 2) und Schwefeldioxid. In die Leukoindigo enthaltende Lösung wird die Jeans getaucht. Beim anschließenden Trocknen an der Luft reagiert das Leukoindigo mit Sauerstoff zu Indigo zurück.

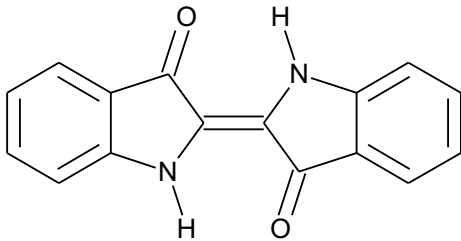


Abb. 1: Strukturformel von Indigo

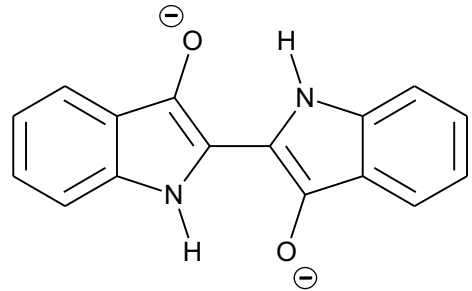


Abb. 2: Strukturformel von Leukoindigo

Um Absorptionsspektren von Farbstoffen erstellen zu können, müssen Stoffe in gelöster Form vorliegen. Indigo löst sich nur schlecht in Wasser, aber gut in Dimethylformamid. Das Lösemittel hat kaum Einfluss auf das Absorptionsspektrum. Abbildung 3 zeigt die Absorptionsspektren von Indigo und Leukoindigo in Dimethylformamid.

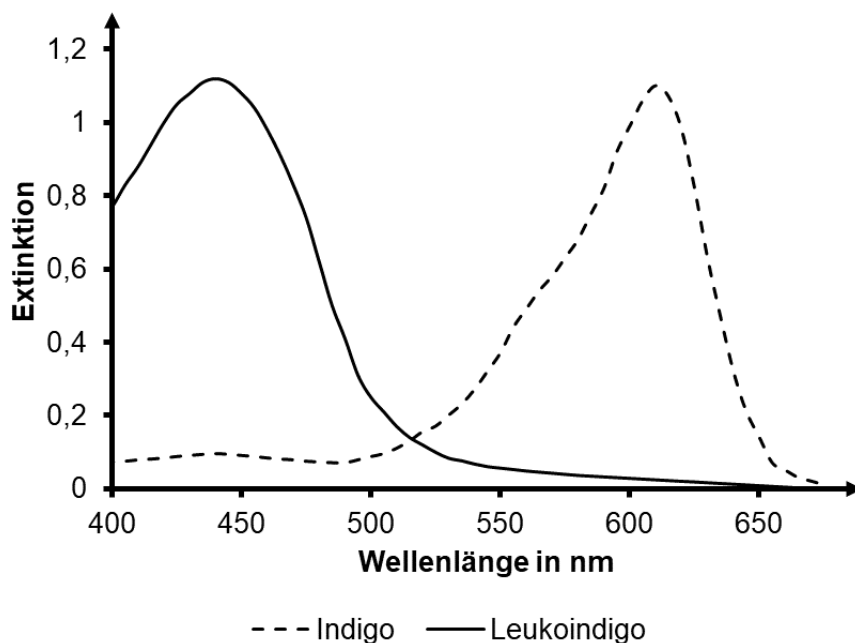


Abb. 3: Absorptionsspektren von Indigo und Leukoindigo in Dimethylformamid<sup>1</sup>

## 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. In neutraler Lösung liegt Säurerot 73 fast ausschließlich als Anion vor.

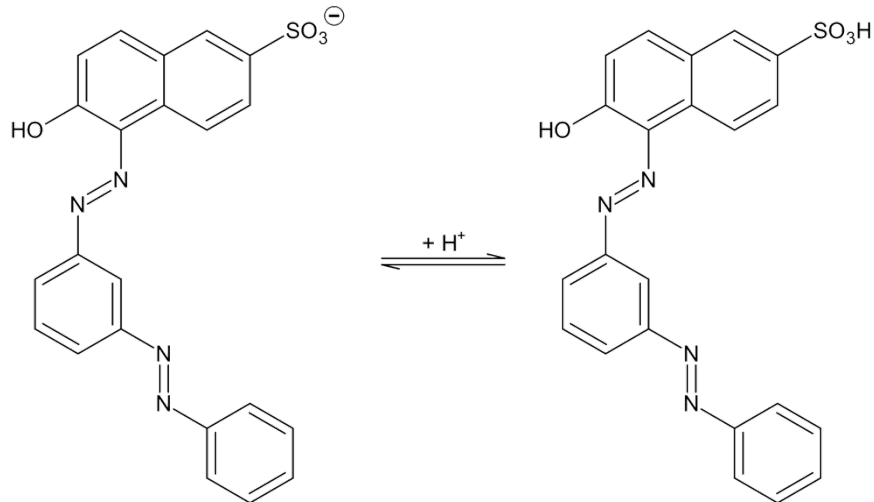


Abb. 4: Säure-Base-Gleichgewicht bei Säurerot 73

Um eine unerwünschte Verschmutzung von Gewässern durch Färbereiabwässer, die Säurerot-Farbstoffe enthalten, zu verhindern, gibt es mehrere Verfahren wie z. B.:

### 1) Nanofiltration:

Hierbei wird Abwasser durch eine spiralförmig gewundene Membran mit sehr feinen Poren gepresst. Wasser-Moleküle können die Membran im Gegensatz zu Farbstoff-Molekülen 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). Über 90 % des gelösten Säurerots kann so abgetrennt werden. Die verwendete Membran hat eine Haltbarkeit von mehreren Jahren und besteht aus verschiedenen Schichten.

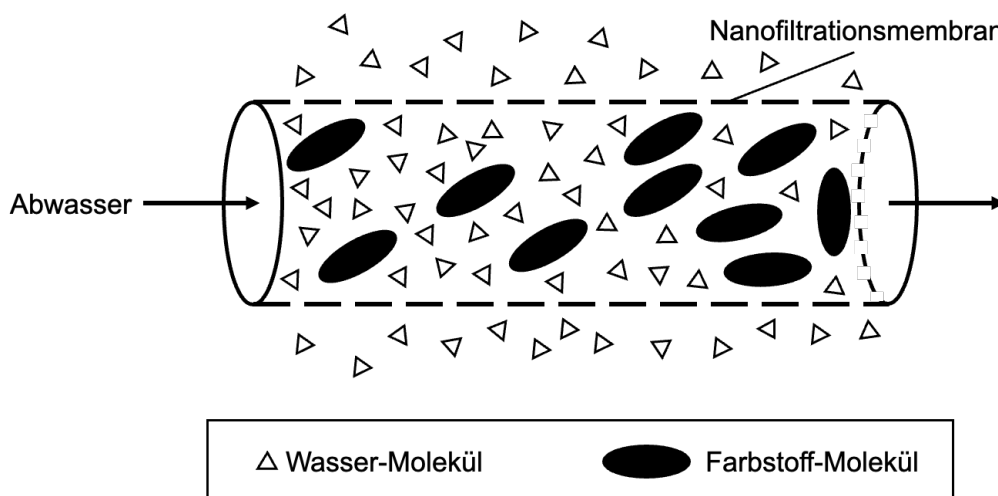


Abb. 5: schematische Darstellung der Nanofiltration<sup>2</sup>

(Fortsetzung nächste Seite)

Bei den in der Membran eingesetzten Kunststoffen handelt es sich zum einen um ein Aramid (Abb. 6), das duroplastische Eigenschaften aufweist, zum anderen um ein thermoplastisches Polysulfon (Abb. 7).

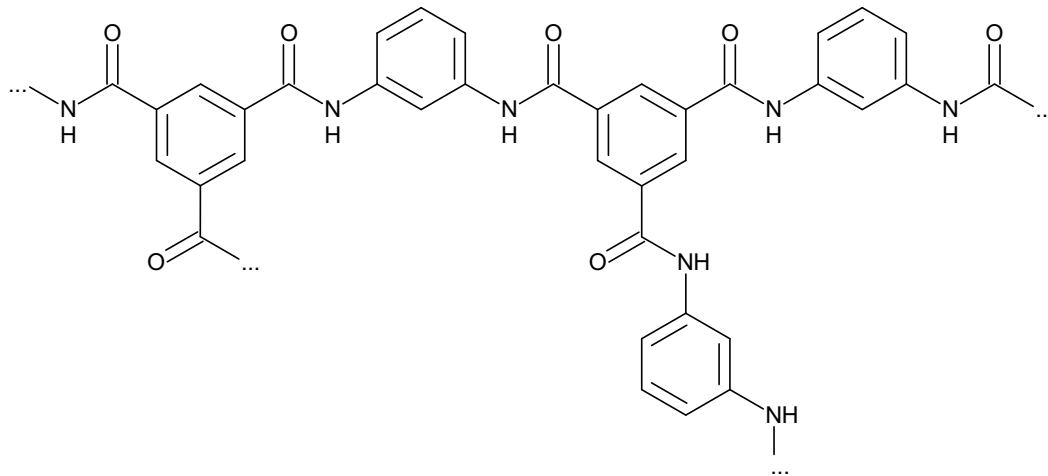


Abb. 6: Ausschnitt aus einem Aramid-Molekül

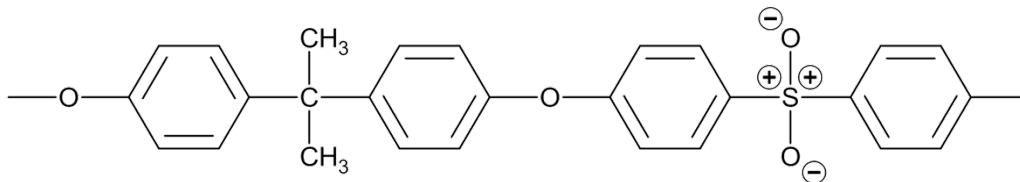


Abb. 7: Ausschnitt aus einem Polysulfon-Molekül

## 2) Adsorption<sup>3</sup>:

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 über Wechselwirkungen an die Oberfläche des Adsorptionsmittels an und wird so gebunden. Experimente zeigen, dass man bei ausreichenden Mengen Adsorptionsmittel über 98 % des im Abwasser gelösten Farbstoffs binden kann. Pro Gramm Adsorptionsmittel lassen sich bis zu 18 mg Farbstoff aufnehmen. Das Material mit dem gebundenen Farbstoff muss anschließend entsorgt werden.

Zur Anlagerung von Säurerot 73 an den Reisweibodensatz gibt es die Hypothese, dass positiv geladene Teilchen auf der Oberfläche des Adsorptionsmittels für die Fixierung des Farbstoffs verantwortlich sind.

### 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. <https://doi.org/10.1021/jp049076y>
- <sup>2</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). <https://doi.org/10.1186/1735-2746-9-17>
- <sup>3</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. <https://doi.org/10.1155/2020/3469579>



### A 3 Polyethylenterephthalat

Polyethylenterephthalat (PET) ist ein vielfältig einsetzbares Material, aus dem unter anderem Kunststoffflaschen hergestellt werden.

- 1 Formulieren Sie die in Abbildung 2 schematisch dargestellten Reaktionen des PET-Abbaus als Strukturformelgleichungen. Beschreiben Sie die Eigenschaften enzymatischer Katalyse. (M1, M2)
- 2 Beschreiben Sie die Durchführung der Versuchsreihe, die zu den in Abbildung 3 dargestellten Ergebnissen führt. Leiten Sie aus Abbildung 3 grafisch das Enzym ab, das sich wegen seiner höheren Substrataffinität zum Abbau von PET besser eignet. (M2, M3)
- 3 Zeichnen Sie den in Abbildung 4 markierten Bereich des Verknüpfungspeptids als Strukturformelausschnitt. Vergleichen Sie die Verknüpfung der Aminosäure-Bausteine mit dem in Abbildung 1 markierten Ausschnitt hinsichtlich des räumlichen Baus. (M1, M4)
- 4 Stellen Sie die dem Experiment (Tab.) zugrundeliegende Hypothese auf. Erklären Sie die Bedeutung von Ansatz 1 im angegebenen Versuchsaufbau. Deuten Sie das Versuchsergebnis mit Hilfe der Stoßtheorie. (M4)

**BE**

8

8

7

7

**30**

## Material 1: PET- ein häufig verwendeter Kunststoff

Getränkeflaschen bestehen oft aus dem Kunststoff Polyethylenterephthalat (PET, Abb.1), der aus zwei verschiedenen Monomeren, Terephthalsäure und Ethandiol, synthetisiert wird.

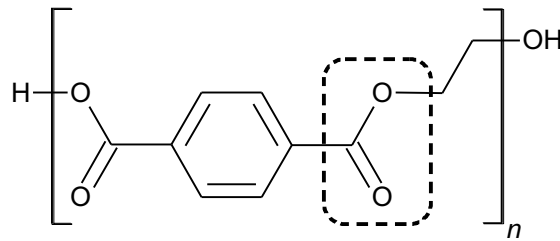


Abb. 1: Strukturformelausschnitt von PET

Trotz vieler Vorteile dieses Materials ist folgender Nachteil offenkundig: die langsame Abbaubarkeit und die damit einhergehende Anreicherung von Plastikmüll in der Umwelt. Derzeit wird intensiv nach Möglichkeiten gesucht, um den Abbau von PET zu beschleunigen.

## Material 2: Abbau von PET durch Bakterien

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

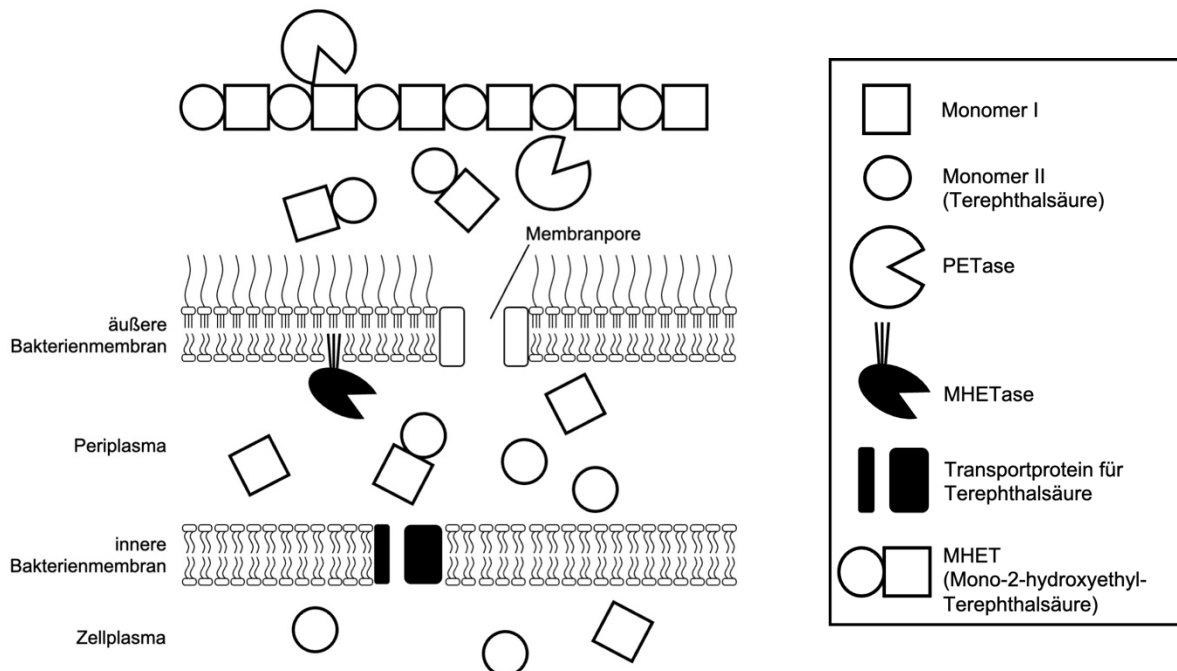


Abb. 2: schematische Darstellung des bakteriellen Abbaus von PET (ohne Berücksichtigung von Wasser-Molekülen)<sup>1</sup>

(Fortsetzung nächste Seite)

### Material 3: Aktivität der MHETase

Um einen schnelleren Abbau von PET zu erreichen, versucht man auf verschiedenen Wegen, die Aktivität der beiden Enzyme zu erhöhen.

In einer Versuchsreihe wurde die Aktivität der MHETase aus *Ideonella sakaiensis* mit der einer durch künstliche Mutation entstandenen MHETase verglichen.

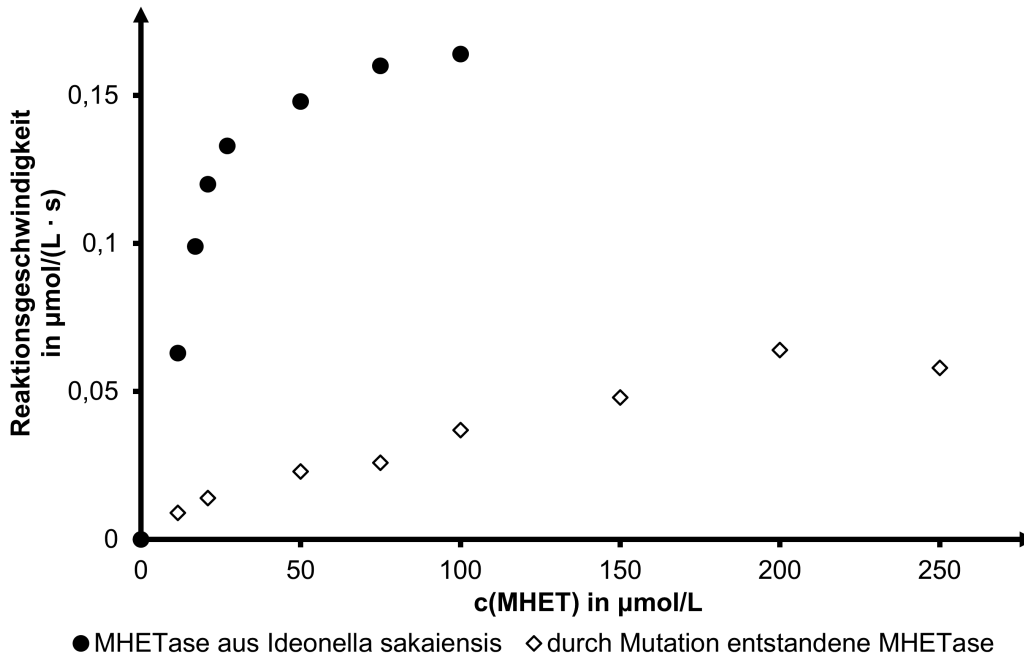


Abb. 3: Reaktionsgeschwindigkeit des MHET-Abbaus durch zwei MHETasen in Abhängigkeit von der MHET-Konzentration<sup>1</sup>

### Material 4: Enzymdimere aus PETase und MHETase

Für eine andere Versuchsreihe wurden PETase und MHETase mithilfe eines Peptid-Moleküls aus den Aminosäure-Bausteinen Glycin und Serin (Abb. 4) verknüpft:

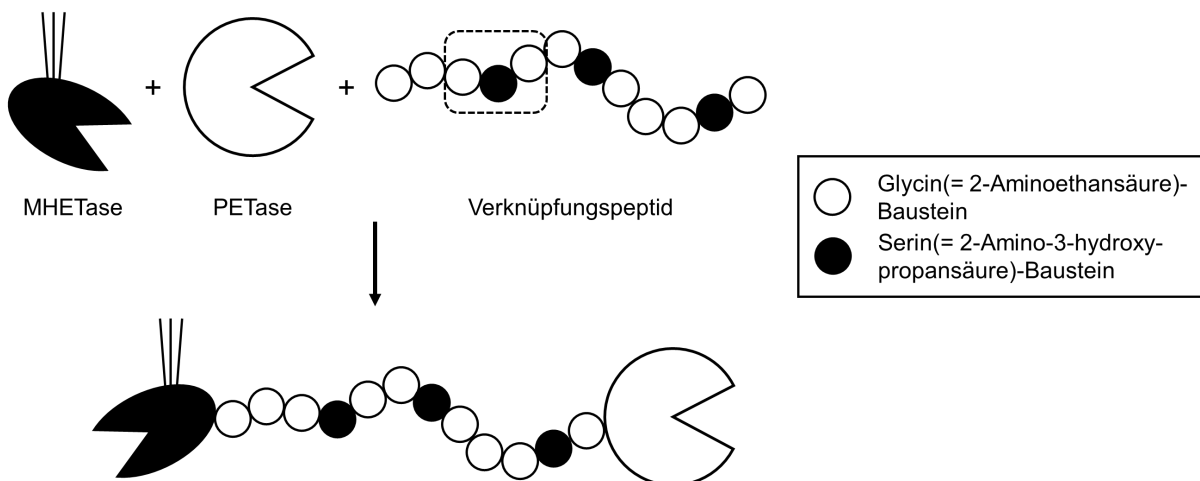


Abb. 4: Syntheschema für das untersuchte Enzym-Dimer aus PETase und MHETase mit Verknüpfungspeptid<sup>1</sup>

(Fortsetzung nächste Seite)

Um die Aktivität dieses Enzym-Dimers mit der Aktivität nicht verbundener Enzyme zu vergleichen, wurde in einem Experiment die in der Tabelle angegebene Versuchsreihe durchgeführt. Es wurde jeweils nach einer bestimmten Zeit die Konzentration an entstandener Terephthalsäure gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt.

Tab.: Versuchsreihe zur Untersuchung der Aktivität des PETase-MHETase-Dimers im Vergleich zur Aktivität nicht verbundener Enzyme<sup>2</sup>

Ansatz	1	2	3
PET	+	+	+
PETase		+	
MHETase		+	
PETase-MHETase-Dimer			+

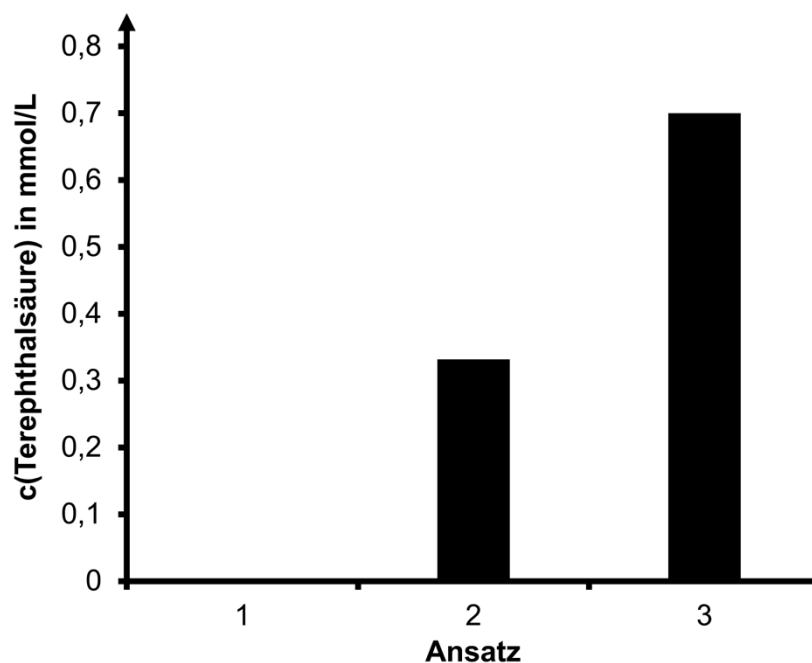


Abb. 5: Ergebnisse der in der Tabelle beschriebenen Versuchsreihe<sup>2</sup>

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>

## A 4 Einflüsse von Kohlenwasserstoffen auf die Atmosphäre

Gewisse Kohlenwasserstoffe und von ihnen abgeleitete Verbindungen können Auswirkungen auf die Zusammensetzung der Atmosphäre haben.

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| <p><b>1</b> Erklären Sie jeweils die Ergebnisse der Bromwasserprobe mit Isopren und Methan. Formulieren Sie für die positive Nachweisreaktion den Reaktionsmechanismus unter Verwendung von Strukturformeln und Benennung der Reaktionsschritte. (M 1)</p> <p><b>2</b> Berechnen Sie mithilfe der Reaktionsgleichungen jeweils die Standardreaktionsenthalpie <math>\Delta_r H^\circ</math> der Verbrennungsreaktionen von Methan und Propan. Erklären Sie den Zusammenhang zwischen den berechneten Standardreaktionsenthalpien und den in Tab. 2 angegebenen Brennwerten. (M 2)</p> <p><b>3</b> Stellen Sie die Modellvorstellung in Abbildung 4 als Reaktionsgleichungen in Valenzstrichformelschreibweise dar. Vergleichen Sie die beiden Darstellungsweisen hinsichtlich ihrer Aussagekraft bezüglich des räumlichen Baus der Teilchen. (M 3)</p> <p><b>4</b> Interpretieren Sie für den Zeitraum von 1980 bis 2020 das Diagramm zur Entwicklung der globalen Emission von Trichlorfluormethan unter Zuhilfenahme von M 3.</p> | <p><b>BE</b></p> <p>10</p> <p>9</p> <p>7</p> <p>4</p> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|

**30**

## 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 abgegeben.

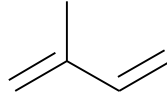


Abb. 1: Strukturformel von Isopren

Methan wird z. B. von Bakterien in den Mägen von Wiederkäuern produziert und von den Tieren in die Atmosphäre abgegeben.

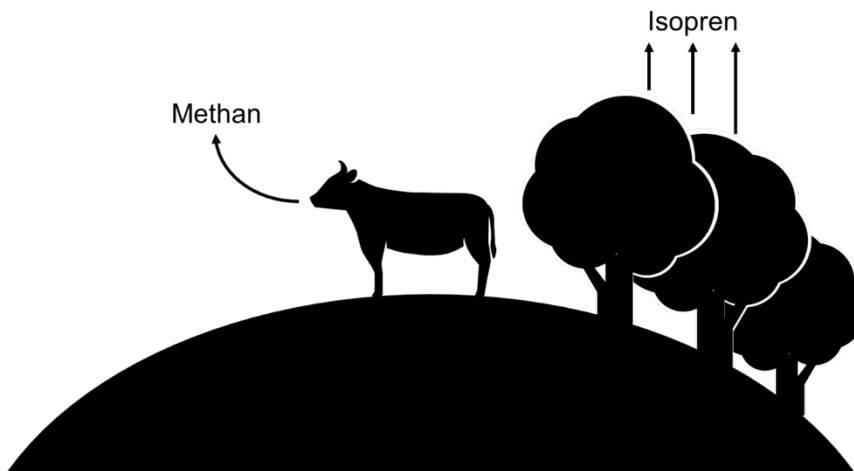


Abb. 2: Freisetzung von Isopren und Methan in die Atmosphäre

Die beiden Gase können mithilfe der Bromwasserprobe untersucht werden.

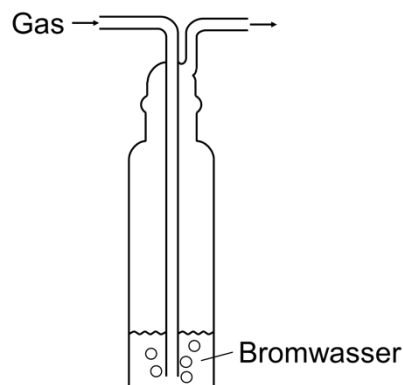


Abb. 3: Bromwasserprobe mit Gasen

(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 für diese Anwendungen 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

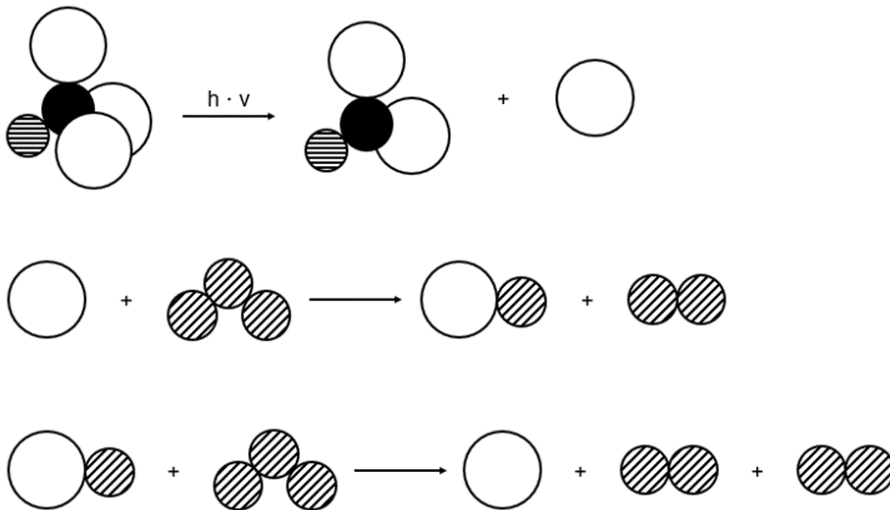
Tab. 2: Brennwerte gasförmiger Brennstoffe bei einer Temperatur von 25 °C<sup>1</sup>

Brennstoff	Brennwert in MJ/kg
Methan	55,498
Propan	50,345

(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. In Abbildung 4 ist eine Modelldarstellung dieser Reaktion gezeigt. Für einige der beteiligten Moleküle ist die Valenzstrichformel angegeben.



Legende:

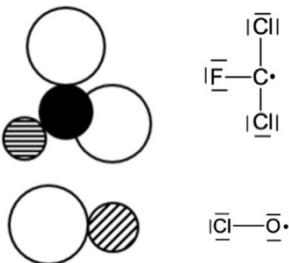


Abb. 4: Mechanismus zum Abbau von Ozon-Molekülen (O<sub>3</sub>) durch Trichlorfluormethan-Moleküle in einer Modellvorstellung<sup>2</sup>

(Fortsetzung nächste Seite)



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. Bis 2009 wurde das Protokoll von 197 Staaten unterzeichnet. 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 des Stoffes in allen 197 Unterzeichnerstaaten verboten. In Abbildung 6 sind die weltweit jährlich gemessene Freisetzung von Trichlorfluormethan sowie eine Prognose der Emissionen bei Einhaltung des Montreal-Protokolls dargestellt.

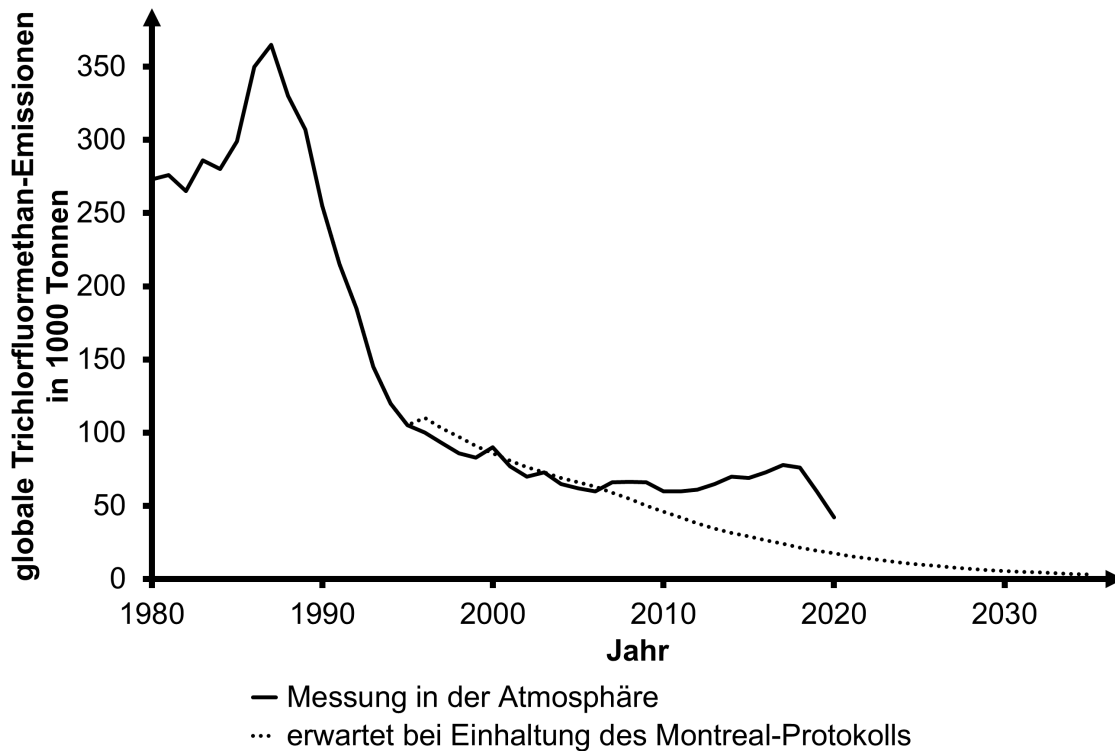


Abb. 6: Zeitliche Entwicklung der globalen Emission von Trichlorfluormethan (gemessen in der Atmosphäre)

Quellen:

- <sup>1</sup> Wikipedia-Autoren. (2003). Heizwert. de.wikipedia.org. <https://de.wikipedia.org/wiki/Heizwert>
- <sup>2</sup> verändert nach: <https://www.chemgeo.uni-jena.de/chegemedia/praktikum/ozonabbau.pdf>
- <sup>3</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/>