

Gemeinsame Aufgabenpools der Länder

Pool für das Jahr 2025

Aufgaben für das Fach Chemie

Kurzbeschreibung

Aufgabentitel	Flammschutzmittel in Wärmedämmplatten aus Polystyrol
Anforderungsniveau	erhöht
Inhaltsbereiche	♦ Stoffe, Struktur, Eigenschaften ♦ Verbindungen mit funktionellen Gruppen ♦ Mehrfachbindungen ♦ aromatisches System ♦ Chemische Reaktionen ♦ Reaktionsmechanismen in der organischen Chemie ♦ elektrophile Addition ♦ elektrophile Substitution ♦ Lebenswelt und Gesellschaft ♦ Ökonomische und ökologische Aspekte der Chemie ♦ Recycling ♦ Wertstoffkreisläufe
Materialien	♦ M 1 Brandschutz bei Polystyrol-Wärmedämmplatten ♦ M 2 Bromierte Kohlenwasserstoffe als Flammschutzmittel ♦ M 3 Umweltproblematik und Recycling von flammschutzmittelhaltigen Polystyrol-Wärmedämmplatten
Quellenangaben	♦ M 1 ♦ <i>Flammschutzmittel</i> (2023, 07. Oktober). Wikipedia. https://de.wikipedia.org/wiki/Flammschutzmittel (Zugriff am: 24.03.2024) ♦ Neufingerl, F., Urban, O. & Viehauser, M. (2006). <i>Chemie 1 - Allgemeine und anorganische Chemie</i>. Jugend & Volk. ♦ eigene Berechnungen anhand: <i>Bindungsenergie (Chemie)</i> (2024, 31. Januar). Wikipedia. https://de.wikipedia.org/wiki/Bindungsenergie_(Chemie) (Zugriff am: 24.03.2024) ♦ M 2 ♦ Corvini, P., Ji, R., Wang, L., Wang, W., Yao, Y., Zhou, D. & Zhou, Y. (2020, 15. Juni). Fate of lower-brominated diphenyl ethers (LBDEs) in a red soil – Application of ¹⁴C-labelling.

	Science of the Total Environment, 721. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720312468 (Zugriff am: 24.03.2024) ♦ 1,2,5,6,9,10-Hexabromcyclododecan (2023, 27. Dezember). Wikipedia. https://de.wikipedia.org/wiki/1,2,5,6,9,10-Hexabromcyclododecan#Darstellung_und_GewinnungG (Zugriff am: 24.03.2024) ♦ Huiling, L., Skalvoll, A., Reijerink, G., Luthe, G. & Johansen, J. (2006, Juni). Synthesis of fluorinated polybrominated diphenyl ethers (F-PBDEs) as internal standards for environmental analysis. <i>Chemosphere</i>, 64, S. 250-255. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653505014384 (Zugriff am: 24.03.2024) ♦ M 3 Wie werden HBCD-haltige Dämmstoffe entsorgt und können sie recycelt werden? (2026, 25. Juli). UMWELTBUNDESAMT. https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/wie-werden-hbcd-haltige-daemmstoffe-entsorgt (Zugriff am: 24.03.2024)
Hilfsmittel	♦ digitales Hilfsmittel, das mindestens die Funktionalität eines WTR hat ♦ mathematisch-naturwissenschaftliche Formelsammlung
fachpraktischer Anteil	nein

1 Aufgabe

Flammschutzmittel in Wärmedämmplatten aus Polystyrol

Zur Wärmeisolierung werden an Gebäudefassaden unter anderem Wärmedämmplatten aus Polystyrolschaum angebracht. Diese werden mit bromierten Kohlenwasserstoffen als Flammschutzmittel behandelt, um im Brandfall eine Entzündung der Platten zu verhindern bzw. zu verzögern.

	BE
1 Formulieren Sie eine Reaktionsgleichung für die vollständige Verbrennung eines Polystyrol-Monomers (M 1).	2
2 Vergleichen Sie die Ringsysteme der beiden Edukt-Moleküle aus Tabelle 2 hinsichtlich der Bindungswinkel und Bindungslängen zwischen den Kohlenstoff-Atomen. Erklären Sie die Unterschiede (M 2).	10
3 Formulieren Sie die Reaktionsmechanismen für die Bildung der angegebenen Zwischenprodukte bei der Synthese von Deca-BDE und HBCD (M 2). Geben Sie zwei Gemeinsamkeiten der beiden Reaktionsmechanismen an (M 2).	12
4 Stellen Sie anhand von Abbildung 1 eine Hypothese auf, warum PolyFR – im Gegensatz zu HBCD – nicht so leicht in die Umwelt entweichen kann (M 2, M 3). Beurteilen Sie den Einsatz von HBCD und PolyFR als Flammschutzmittel in Polystyrol-Wärmedämmplatten hinsichtlich der Aspekte Sicherheit, Umweltschutz und Nachhaltigkeit (M 3).	10
5 Erklären Sie anhand von drei Faktoren den Einfluss bromierter Flammschutzmittel auf die Verbrennung (M 1).	6

Quellen (ggf. verändert):

- [1] *Flammschutzmittel* (2023, 07. Oktober). Wikipedia. <https://de.wikipedia.org/wiki/Flammschutzmittel> (Zugriff am: 24.03.2024)
- [2] Neufingerl, F., Urban, O. & Viehauser, M. (2006). *Chemie 1 - Allgemeine und anorganische Chemie*. Jugend & Volk.
- [3] eigene Berechnungen anhand: *Bindungsenergie (Chemie)* (2024, 21. Januar). Wikipedia. [https://de.wikipedia.org/wiki/Bindungsenergie_\(Chemie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Bindungsenergie_(Chemie)) (Zugriff am: 24.03.2024)
- [4] Corvini, P., Ji, R., Wang, L., Wang, W., Yao, Y., Zhou, D. & Zhou, Y. (2020, 15. Juni). Fate of lower-brominated diphenyl ethers (LBDEs) in a red soil – Application of ¹⁴C-labelling. *Science of the Total Environment*, 721. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720312468> (Zugriff am: 24.03.2024)
- [5] *1,2,5,6,9,10-Hexabromcyclododecan* (2023, 27. Dezember). Wikipedia. https://de.wikipedia.org/wiki/1,2,5,6,9,10-Hexabromcyclododecan#Darstellung_und_GewinnungG (Zugriff am: 24.03.2024)
- [6] Huiling, L., Skalvoll, A., Reijerink, G., Luthe & G., Johansen, J. (2006, Juni). Synthesis of fluorinated polybrominated diphenyl ethers (F-PBDEs) as internal standards for environmental analysis. *Chemosphere*, 64, S. 250-255. Science Direct. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653505014384> (Zugriff am: 24.03.2024)
- [7] *Wie werden HBCD-haltige Dämmstoffe entsorgt und können sie recycelt werden?* (2026, 25. Juli). UMWELTBUNDESAMT. <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/wie-werden-hbcd-haltige-daemmstoffe-entsorgt> (Zugriff am: 24.03.2024)

2 Material

Material 1: Brandschutz bei Polystyrol-Wärmedämmplatten [1], [2]

Polystyrol-Wärmedämmplatten (Summenformel des Monomers: C_8H_8) sind leicht entflammbar und gut brennbar.

Verbrennungen sind häufig Radikalkettenreaktionen, bei der eine Vielzahl an reaktiven Teilchen, wie z. B. Hydroxyl-Radikale ($\cdot OH$) oder Sauerstoff-Atome, auftreten. Diese reagieren in exothermen Reaktionen weiter und liefern so die Energie für die Bildung weiterer Radikale.

Polystyrol-Wärmedämmplatten, die zur Isolierung von Gebäuden verwendet werden, müssen Brandschutzrichtlinien erfüllen. Zur Einhaltung dieser Vorschriften werden den Platten bei der Produktion bromierte Kohlenwasserstoffe als Flammenschutzmittel zugesetzt. Diese erschweren Entzündung und Verbrennung der Platten.

Als Flammenschutzmittel lassen sich verschiedene bromierte Kohlenwasserstoffe (vereinfacht R-Br) einsetzen. Trotz ihrer großen strukturellen Vielfalt besitzen sie dieselbe Wirkungsweise: Bei Hitzeeinwirkung kommt es zur Freisetzung von Brom-Radikalen, die dann ihrerseits Einfluss auf die Verbrennungsvorgänge nehmen (Tab. 1).

Tab. 1: Auswahl an Reaktionen, die unter Beteiligung von bromierten Kohlenwasserstoffen als Flammenschutzmittel während der Verbrennung auftreten können [3]

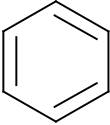
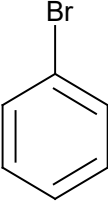
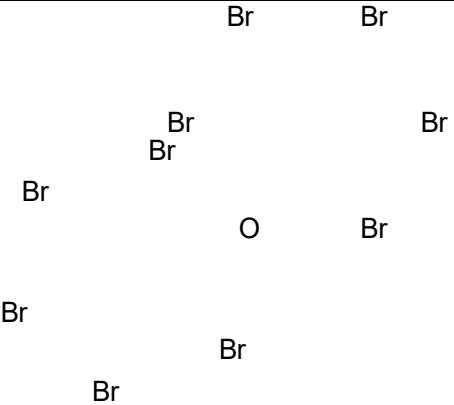
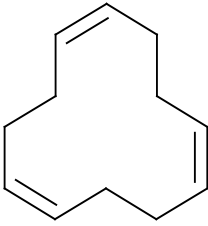
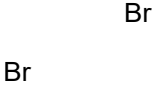
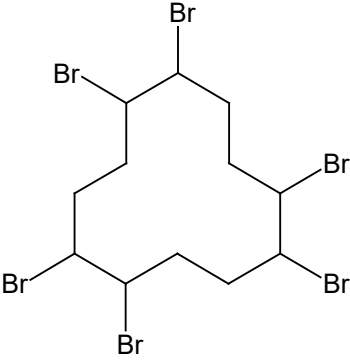
Reaktion	Änderung der Enthalpie ΔH in kJ
$R-Br \rightarrow R\cdot + Br\cdot$	+285
$R-H + Br\cdot \rightarrow R\cdot + H-Br$	+47
$Br\cdot + \cdot O-O\cdot \rightarrow Br-O\cdot + \cdot O\cdot$	+264
$Br\cdot + \cdot O\cdot \rightarrow Br-O\cdot$	-234
$\cdot O\cdot + H-Br \rightarrow \cdot OH + Br\cdot$	-97
$Br-O\cdot + H-Br \rightarrow 2 Br\cdot + \cdot OH$	+137
$H-Br + \cdot OH \rightarrow H_2O + Br\cdot$	-97

Anmerkung: Für die Kohlenwasserstoff-Verbindungen sind exemplarische Werte angegeben.

Material 2: Bromierte Kohlenwasserstoffe als Flammenschutzmittel [4]

Zwei bromierte Kohlenwasserstoffe, die bis zum Jahr 2015 sehr häufig bei Kunststoffprodukten als Flammenschutzmittel eingesetzt wurden, waren Decabromdiphenylether (Deca-BDE) und Hexabromcyclododecan (HBCD). Diese Stoffe waren einfach und kostengünstig zu synthetisieren (Tab. 2).

Tab. 2: Strukturformeln ausgewählter Moleküle bei der Synthese von Deca-BDE bzw. HBCD [5], [6]

	Edukt	Zwischenprodukt	Endprodukt
Deca-BDE			
HBCD			

Material 3: Umweltproblematik und Recycling von flammenschutzmittelhaltigen Polystyrol-Wärmedämmplatten [7]

Die Herstellung und Verwendung von HBCD wurde in der Europäischen Union 2015 verboten. Der Grund war dessen Einstufung als POP (engl. persistent organic pollutant). Das bedeutet, solche Stoffe können, wenn sie in die Umwelt freigesetzt werden, dort kaum abgebaut werden. Sie reichern sich bei Aufnahme in Organismen an und wirken giftig. In der Produktion von Polystyrolschaumplatten wurde HBCD daraufhin durch PolyFR (engl. flame retardant), ein bromiertes Styrol-Butadien-Copolymer ersetzt, das nicht als POP eingestuft wird und nicht so leicht aus den Dämmplatten entweicht (s. Abb. 1).

Allerdings sind noch viele HBCD-haltige Wärmedämmplatten in der Nutzung und müssen – wie auch die PolyFR-haltigen Wärmedämmplatten – irgendwann entsorgt werden. Dies gilt für alle Arten von Wärmedämmplatten. Bei der Entsorgung müssen die bromierten Kohlenwasserstoffe unschädlich gemacht werden, z. B. unumkehrbar umgewandelt werden. Deshalb wird der größte Teil der Wärmedämmplatten mit bromierten Kohlenwasserstoffen in herkömmlichen Müllverbrennungsanlagen thermisch verwertet. Die dabei entstehenden Bromsalze müssen durch Filteranlagen aus dem Abgasstrom entfernt und aufwendig endgelagert werden. Zudem können bei der Verbrennung hochgiftige Produkte entstehen, die ebenfalls aufwendig aus dem Abgasstrom abgetrennt werden müssen.

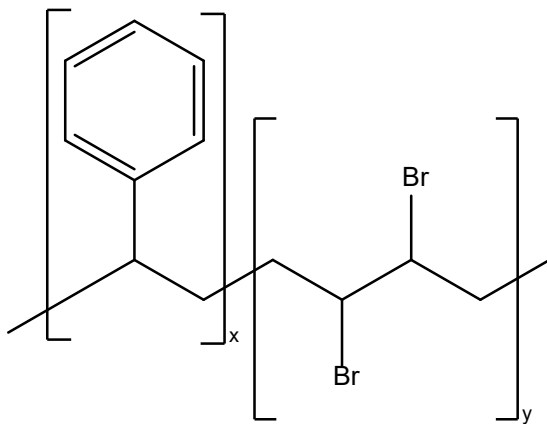
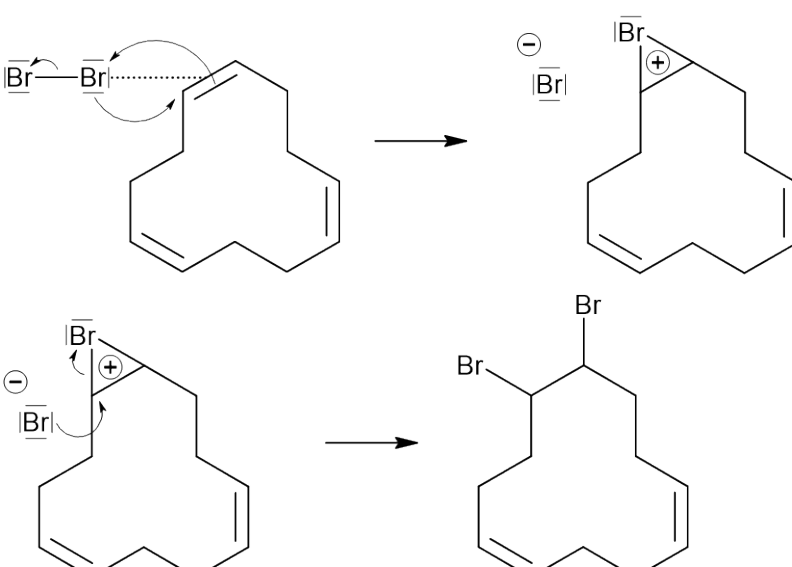
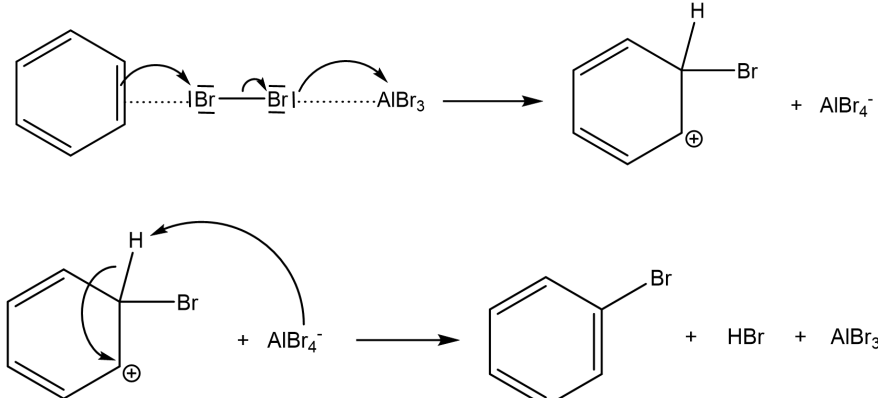


Abb. 1: Strukturformelausschnitt eines PolyFR-Moleküls

3 Erwartungshorizont

Der Erwartungshorizont stellt für jede Teilaufgabe eine mögliche Lösung dar. Nicht dargestellte korrekte Lösungen sind als gleichwertig zu akzeptieren.

		BE/AFB		
		I	II	III
1	<u>Formulieren der Reaktionsgleichung:</u> $\text{C}_8\text{H}_8 + 10 \text{O}_2 \rightarrow 8 \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2\text{O}$	1	1	
2	<u>Vergleich der Ringsysteme:</u> <u>Bindungslängen:</u> ◆ bei Cyclododeca-1,5,9-trien: Bindungslänge der C,C-Einfachbindungen größer als die der C,C-Doppelbindungen ◆ bei Benzol: alle C,C-Bindungen mit gleicher Bindungslänge; länger als C,C-Doppelbindung, aber kürzer als C,C-Einfachbindung <u>Bindungswinkel:</u> ◆ bei Cyclododeca-1,5,9-trien: bei Doppelbindungsbeteiligung 120°, ansonsten $109,5^\circ$ ◆ Benzol: alle C-C-C-Bindungswinkel 120° <u>Erklärung der Unterschiede:</u> <i>Hinweis: Es können unterschiedliche Modellvorstellungen zur Erklärung herangezogen werden, z. B.:</i> Cyclododeca-1,5,9-trien: ◆ Elektronenpaarbindungen zwischen C-Atomen kommen als Einfachbindungen und als Doppelbindungen vor. Durch die Vierbindigkeit des Kohlenstoff-Atom ergibt sich aus dem EPA-Modell bei einer Einfachbindung ein Tetraederwinkel durch die gleichmäßige Abstoßung der vier bindenden Elektronenpaare. ◆ Bei der Doppelbindung dagegen ergibt sich ein Winkel von 120° durch die räumliche Abstoßung der drei Bindungspartner. ◆ Die Bindungslänge bei der Doppelbindung ist durch Überlappung von vier statt nur zwei Kugelwolken bei der Einfachbindung verkürzt. Benzol: ◆ Der Ring bildet sich durch Überlappung von je zwei Kugelwolken zu einer C-C-Einfachbindung, bei nur drei Bindungspartnern ergibt sich ein Winkel von 120°. ◆ Im aromatischen System sind die Elektronen teilweise ober- und unterhalb der Bindungsebene delokalisiert. Die delokalisierten Elektronen leisten einen Beitrag zur Bindung, der aber geringer ist als in einer Doppelbindung. Die Bindungslänge liegt daher zwischen der Länge einer Einfach- und einer Doppelbindung.	1	1	
		1	2	
		1	2	
		2		

3	<u>Formulierung der Reaktionsmechanismen:</u> <u>Reaktionsmechanismus 1:</u>  <u>Reaktionsmechanismus 2:</u>  <u>Angabe von zwei Gemeinsamkeiten:</u> ◆ beide Mechanismen beruhen auf einem elektrophilen Angriff ◆ heterolytische Spaltung ◆ kationisches Zwischenprodukt	1 1 1 2	2 1 1 2	
4	<u>Hypothese zur Einstufung von PolyFR:</u> ◆ Aufgrund der größeren Oberfläche bilden PolyFR-Moleküle vermutlich deutlich stärkere Wechselwirkungen mit den Polystyrol-Molekülen aus als HBCD-Moleküle, so dass sie deutlich schlechter entweichen. <u>Beurteilung des Einsatzes von HBCD und PolyFR:</u> ◆ Beide Flammenschutzmittel sind bromiert und wirken effektiv bei der Verzögerung von Bränden. Somit erhöht sich durch den Einsatz die Sicherheit der Hausbewohner. ◆ Umweltschutzgründe: Probleme, die sich aus der Nutzung von HBCD ergeben, sind aufgrund der Persistenz noch kaum absehbar. Hier besitzt PolyFR den Vorteil, dass es nicht als POP eingestuft wird.	1 1	2 1 1	1 1 1

	♦ Nachhaltigkeit: Um die Stoffe unschädlich zu machen, ist eine Verbrennung erforderlich. Beim Verbrennen entstehen viele giftige Reaktionsprodukte, die aufwändig aus dem Abgasstrom entfernt und gelagert werden müssen. ♦ Sachurteil		1	1
5	<u>Erklärung des Einflusses bromierter Flammschutzmittel auf die Verbrennung:</u> ♦ Die aus dem Brandschutzmittel freigesetzten Bromradikale reagieren mit Sauerstoff-Teilchen und verringern so die für die Verbrennung zur Verfügung stehende Sauerstoffmenge. ♦ Die freigesetzten Bromradikale wirken allgemein als Radikalfänger und unterbrechen somit Kettenreaktionen bei der Verbrennung. ♦ Die überwiegend endothermen Reaktionen entziehen dem Reaktionsraum Wärme und verhindern so die Radikalbildung.	1	1	2 2
	Summe¹	11	20	9

¹ Bei jeder Aufgabe liegen die Anzahlen der Bewertungseinheiten – abhängig vom Anforderungsniveau – in den Bereichen, die der folgenden Tabelle zu entnehmen sind:

Anforderungsniveau	erhöht			grundlegend		
Anforderungsbereich	I	II	III	I	II	III
Anzahl der BE	11 - 13	17 - 21	8 - 10	10 - 12	13 - 16	4 - 6

4 Standardbezug²

Teilaufgabe	Kompetenzbereich			
	S	E	K	B
1	16			
2	13		10	
3	14			
4	2	3	2	10
5	2		10	

5 Bewertungshinweise

Die Bewertung der erbrachten Prüfungsleistungen hat sich für jede Teilaufgabe nach der am rechten Rand der Aufgabenstellung angegebenen Anzahl maximal erreichbarer Bewertungseinheiten (BE) zu richten.

Für die Bewertung der Gesamtleistung eines Prüflings ist ein Bewertungsraster³ vorgesehen, das angibt, wie die in den drei Prüfungsteilen insgesamt erreichten Bewertungseinheiten in Notenpunkte umgesetzt werden.

² Zu jeder Teilaufgabe sind zu jedem Kompetenzbereich die Nummern der Standards gemäß den Bildungsstandards im Fach Chemie für die Allgemeine Hochschulreife genannt, die zur Bearbeitung der Aufgabe erforderlich sind.

³ Das Bewertungsraster ist Teil des Dokuments „Beschreibung der Struktur“, das auf den Internetseiten des IQB zum Download bereitsteht.