



AUFGABEN



Aufgabe 1

„Polyethylen (PE) ist der am meisten verwendete Kunststoff überhaupt. [...] HDPE (High Density PE) ist wegen seiner hohen Dichte extrem robust und deshalb ideal für Flaschen, Verschlüsse, Kanister oder Fässer. Die flexiblere LDPE-Variante eignet sich für Folien, Tragetaschen oder Säcke. LDPE (Low Density PE) wird durch radikalische Polymerisation, HDPE durch katalytische Insertionspolymerisation von Ethylen hergestellt.“ (Techmax 38 > QR, S. 1f)



1.1 Formulieren Sie den Reaktionsmechanismus für die Bildung von LDPE.

1.2 Bearbeiten Sie folgende LearningApp (Link oder > QR)
<https://learningapps.org/watch?v=pehgo4hx525>



1.3 Begründen Sie die Dichteunterschiede von HDPE und LDPE auf Teilchenebene.



Aufgabe 2

„Im Jahr 2023 fielen in Deutschland 5,58 Millionen Tonnen Kunststoffabfälle von gewerblichen und privaten Endverbrauchern an.“ (Techmax 38, S. 1):

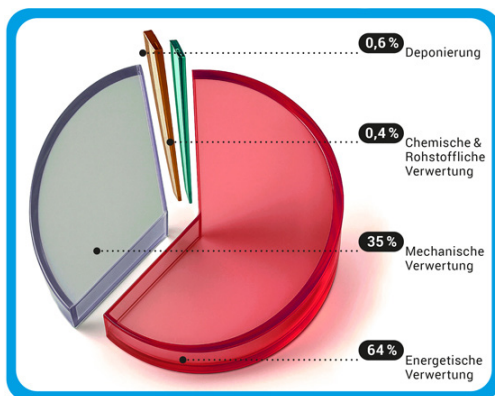


Abb. A im Techmax 38: © Quelle Zahlen: Conversio, Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2023, 2024; Grafik: HNBM

Ordnen Sie den Anteilen im Diagramm die Begriffe rohstoffliche, werkstoffliche und thermische Verwertung von Kunststoffabfall zu.



Aufgabe 3

„Eine Alternative für das mechanische Recycling ist das chemische Recycling. Dabei werden die Polymerketten wieder zu kleinen Molekülen gespalten, welche sich viel besser auftrennen und reinigen lassen. Das ist bei klassischen Polymeren wie PE aber sehr energieaufwändig: Um die stabilen Polymerketten zu spalten, muss das Material auf bis zu 700 °C erhitzt werden. Dabei entsteht eine komplexe Mischung, sogenanntes Pyrolyseöl, das dem ursprünglichen Erdöl ähnelt, und dadurch erst wieder die petrochemische Aufreinigung durchlaufen muss.“ (Techmax 38, S. 2)

Bewerten Sie, ggf. nach kurzer Recherche, die Möglichkeiten der Verwertung von Kunststoffabfall hinsichtlich ihrer ökologischen und wirtschaftlichen Bedeutung.



Aufgabe 4

„Polyethylene ähneln natürlichen Fettsäuren, die typischerweise zwölf oder mehr Kohlenstoffatome besitzen. Oxidiert zu Dicarbonsäuren (DCAs) wären sie perfekt, um etwa mit Diolen durch Polykondensation zu PE-artigen Polymerketten verestert zu werden. Wenn es gelänge, damit vergleichbare Kettenlängen aufzubauen wie beim klassischen PE, müssten auch die Eigenschaften ähnlich sein. Anders als Polyethylen ließen sich diese Kunststoffe aber nach Gebrauch einfach hydrolisieren und die langkettigen kohlenstoffreichen Monomere in den Kreislauf zurückführen. Gedacht, getan: Als Rohstoff setzte Häußlers Team Pflanzenöl ein, das großtechnisch raffiniert wurde, um damit 1,18-Octadecandisäure herzustellen. Aus dieser entsteht durch Veresterung mit einem langkettigen 1,18-Octadecandiol und anschließender Polykondensation der Polyester-18,18.“ (Techmax 38, S. 2)

4.1 Formulieren Sie den allgemeinen Reaktionsmechanismus für die in Abb. B schematisch dargestellte Polykondensation von Octadecandisäure mit Octadecan-1,18-diol.

4.2 Formulieren Sie den Reaktionsmechanismus für die Hydrolyse von Polyester-18,18 mit Wasser zur Depolymerisation während des Recyclings (vgl. auch Kasten auf S. 4).

4.3 Ordnen Sie die Hydrolyse des Polyesters-18,18 begründet einer der Verwertungsmöglichkeiten von Kunststoffabfall zu. Erläutern Sie, ob diese Verwertungsmöglichkeit die ressourcenschonendste ist.



Aufgabe 5

„Inzwischen nimmt das Forschungsteam als Rohstoff buchstäblich Müll: Kleingehäckselte, auch minderwertige Kunststoffabfälle und Lebensmittelreste werden oxidiert und dann mithilfe bestimmter Hefen zu langkettigen Dicarbonsäuren fermentiert. Denn die Verwendung von Pflanzenölen ist zwar nachhaltig, aber auch kritisch zu sehen, weil sie als Speiseöle der Welternährung dienen.“ (Techmax 38, S. 3)

Formulieren Sie je ein dreistufiges Argument für und gegen die Verwendung von Pflanzenöl mit Bezug auf Werte wie z. B. Gemeinwohl, Umweltschutz, Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit, soziale Gerechtigkeit, Gesundheit oder Klima.



Aufgabe 6

„Die thermischen und mechanischen Eigenschaften des Polyesters-18,18 sind HDPE verblüffend ähnlich“, sagt Häußler. Speziell, was Verformbarkeit, Zugfestigkeit und Kristallinität angeht.“ (Techmax 38, S. 3)

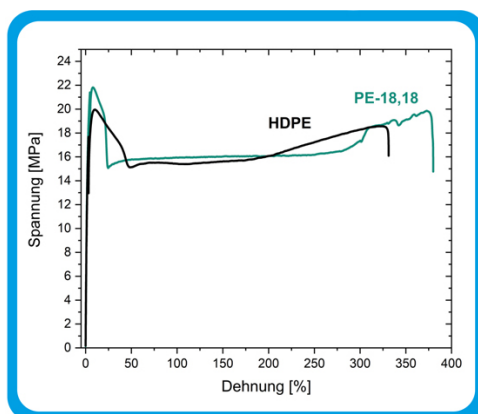


Abb. C im Techmax 38: © M. Häußler, MPI für Kolloid- und Grenzflächenforschung / CC BY-NC-SA 4.0

Stellen Sie eine Hypothese auf, die die in der Abb. C (Techmax 38) dargestellte leicht höhere Reißfestigkeit von PE-18,18 bei ca. 380 % Dehnung im Vergleich zu HDPE bei ca. 330 % Dehnung erklären kann.



Aufgabe 7

„Die Monomere können entweder sortenrein oder in bestimmten Mischungsverhältnissen eingesetzt werden. Ändert man die Verbindungsstellen, etwa indem auch Diamine verwendet werden und damit zufällig die eine oder andere Estergruppe durch eine Amidgruppe ausgetauscht wird, entstehen viele weitere Kombinationsmöglichkeiten.“ (Techmax 38, S. 3)

Erstellen Sie die Repetiereinheit für PE-18,18, welches aus den Monomeren Octadecandisäure und Octadecan-1,18-diamin hergestellt wird.



Aufgabe 8

„Um zukunftsfähig zu sein, müssen neue Kunststoffe aus Häußlers Sicht vier Kriterien erfüllen: „Erstens: Herstellung aus unkritischen Rohstoffen. Zweitens: Vielseitigkeit in der Anwendung. Drittens: Abbaubarkeit in der Umwelt zur Vermeidung von Mikroplastik. Und viertens: vollständige Rezyklierbarkeit.“ Alle bisherigen Ansätze scheitern mindestens an einem Kriterium. Die PE-Alternativen erfüllen hingegen alle Kriterien in einem molekularen Konzept und erreichen dabei die Leistung herkömmlicher Kunststoffe.“ (Techmax 38, S. 4)

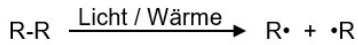
Vergleichen Sie Polyethen (PE) und Polyester-18,18 (PE-18,18) in jedem der vier von Manuel Häußler aufgestellten Kriterien für einen zukunftsfähigen Kunststoff. Belegen Sie Ihre Ausführungen durch Zitate aus dem Text.



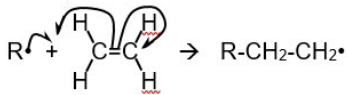
LÖSUNGEN

Lösung 1.1

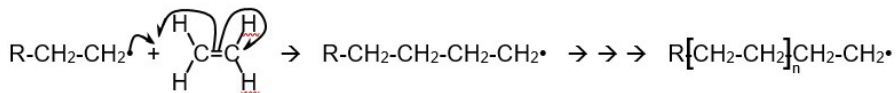
Radikalbildung:



Startreaktion:

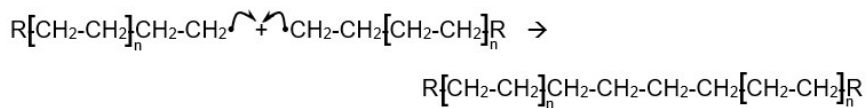


Kettenreaktion:

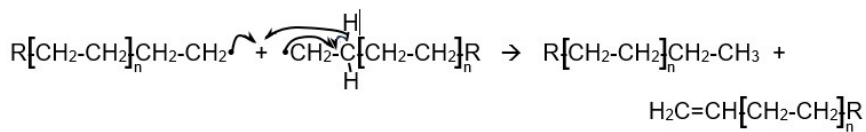


Kettenabbruch:

- durch Rekombination:

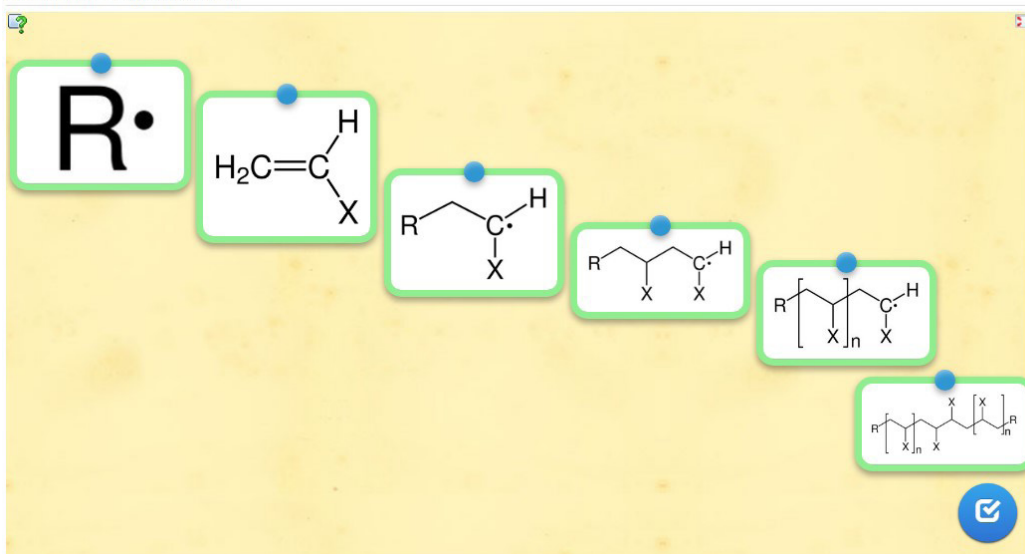


- durch Disproportionierung:



Lösung 1.2

radikalische Polymerisation



Lösung 1.3

HDPE wird durch Insertionspolymerisation hergestellt. Im Idealfall entsteht aus den verwendeten Monomeren eine einzige, unverzweigte Polymerkette. LDPE entsteht durch radikalische Polymerisation. Dabei kommt es zu intramolekularen Kettenübertragungsreaktionen, die eine Verzweigung zur Folge haben. Je weniger Verzweigungen es gibt, desto enger können sich parallele Polymere aneinanderlagern, desto höher ist die Dichte.

Lösung 2

- rohstoffliche Verwertung: 0,4 %
- werkstoffliche Verwertung: 35%
- thermische Verwertung: 64 %

Lösung 3

Bewertung nach dem Waage^R-Modell (Literatur siehe MNU (Hrsg.): Themenreihe Bildungsstandards - Bewertungskompetenz in den Naturwissenschaften, 2022; ISBN 978-3-940516-29-9; > PDF online: https://www.mnu.de/images/publikationen/Bewertungskompetenzen/Bildungsstandards_Bewertungskompetenz.pdf)

Wahrnehmen:

Jährlich fallen Millionen Tonnen Kunststoffabfälle an, von denen der Großteil verbrannt wird. Aus Klima- und Umweltschutzsicht ist es wichtig, die Kreislaufwirtschaft zu verbessern und mehr Kunststoffabfälle werk- oder rohstofflich zu verwerten.

Analysieren:

Ideal, aber illusorisch ist die Abfallvermeidung. Seit Jahrzehnten erforscht werden biologisch abbaubare Kunststoffe mit aktuell deutlich weniger Einsatzmöglichkeiten als Kunststoffe auf Erdölbasis. Im Sinn einer Ressourcenschonung kommt man um ein Recycling nicht herum.

Argumentieren:

Rohstoffliche Verwertung:

- ökologisch pro: Es werden fossile Rohstoffe eingespart, da zurückgewonnene Monomere / Öle wieder in der Kunststoffproduktion eingesetzt werden können (Wert: Ressourcenverbrauch).
- ökologisch contra: Der Energieaufwand für die Wärmezufuhr ist hoch, so dass es je nach Art der Energieerzeugung zu CO₂-Emissionen kommen kann (Wert: Umwelt).
- wirtschaftlich pro: Es existiert durch Forschung das Potenzial zur Erschließung bislang nicht verwertbarer Abfallströme (Wert: Fortschritt).
- wirtschaftlich contra: Die Betriebskosten sind durch komplexe Technik recht hoch (Wert: Wirtschaftlichkeit).

Werkstoffliche Verwertung:

- ökologisch pro: Der Energieaufwand ist gering (Wert: Ressourcenverbrauch).
- ökologisch contra: Nach mehreren Recyclingzyklen kommt es zu Qualitätseinbußen des Materials (Downcycling). Das Rezyklat muss mit Neuware gemischt werden (Wert: Nachhaltigkeit).
- wirtschaftlich pro: Das Rezyklat ist bei sauberen Edukten kostengünstig (Wert: Wohlstand).
- wirtschaftlich contra: Der Wert des Rezyklats schwankt je nach Nachfrage, Qualität und Preis für Neuware. (Wert: Wirtschaftlichkeit).

Thermische Verwertung:

- ökologisch pro: Das Abfallvolumen wird stark reduziert, so dass Deponieressourcen für kommende Generationen erhalten bleiben (Wert: Verantwortung).
- ökologisch contra: Es entstehen zusätzliche CO₂-Emissionen (Wert: Umwelt).
- wirtschaftlich pro: Die Verbrennung liefert planbare Energie (Wert: Verantwortung).

- wirtschaftlich contra: Die durch EU-Gesetzgebung verursachten steigenden Kosten für CO₂-Emissionen verschlechtern die Rentabilität (Wert: Wirtschaftlichkeit).

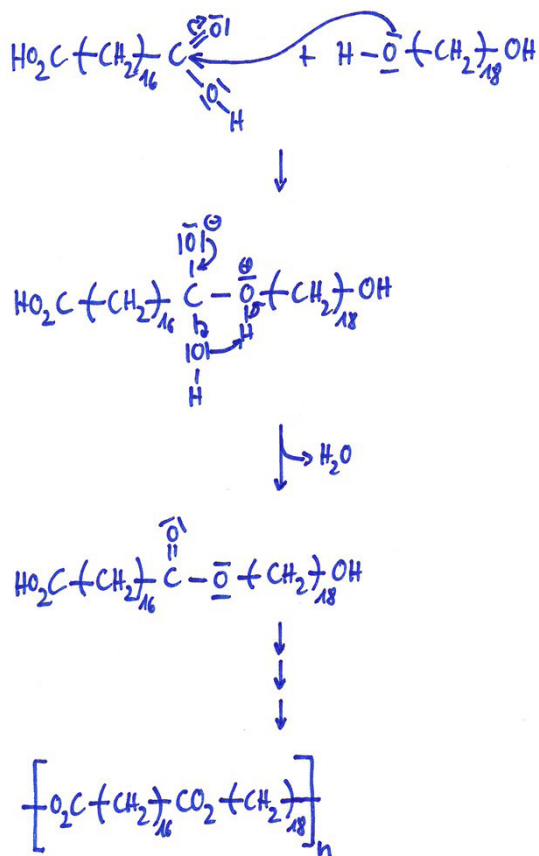
Gewichten:

Ökologisch kommt der Ressourcen- und Energieeinsparung die größte Bedeutung zu. Wirtschaftlich ist der Kostenaspekt am relevantesten.

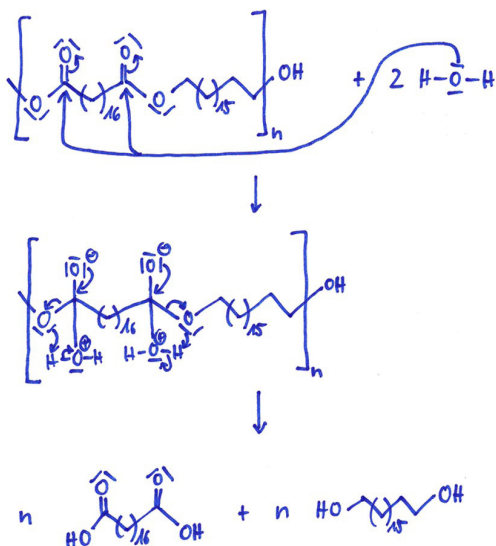
Entscheiden:

Ökologisch und wirtschaftlich am geeignetsten ist die Reihung werkstoffliche Verwertung – rohstoffliche Verwertung – thermische Verwertung

Lösung 4.1



Lösung 4.2



Lösung 4.3

Die Hydrolyse des Polesters-18,18 ist eine rohstoffliche Verwertung.

Stofflich ist sie maximal ressourcenschonend, weil die langkettigen kohlenstoffreichen Monomere in den Kreislauf zurückgeführt werden. Energetisch ist sie hingegen nicht ressourcenschonend, weil der Energieaufwand für die Hydrolyse, bei der Elektronenpaarbindungen zu dissoziieren sind, höher ist als bei der werkstofflichen Verwertung, bei der nur schwächere zwischenmolekulare Wechselwirkungen überwunden werden.

Lösung 5

Pro Verwendung von Pflanzenöl:

Die Verwendung biobasierter Kunststoffe ist CO₂-neutral. Denn aus nachwachsenden Rohstoffen kann nur so viel Öl produziert werden, wie zuvor mittels Pflanzen-Fotosynthese an Kohlenstoffdioxid assimiliert wurde. Der Klimawandel wird durch CO₂-Emissionen, auch aus der thermischen Verwertung von Kunststoffen fossiler Provenienz, massiv vorangetrieben und verändert weltweit wichtige Ökosysteme zum Negativen. Beispielsweise nimmt die Artenvielfalt ab (Wert: Umweltschutz). Daher muss die Verwendung biobasierter Kunststoffe aus Pflanzenölen forciert werden.

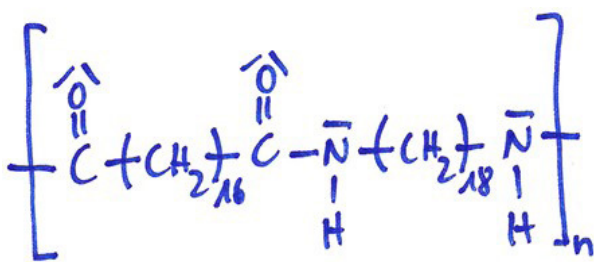
Contra Verwendung von Pflanzenöl:

Der Anbau von Pflanzen zur Ölgewinnung erfolgt in der Regel in Monokultur auf gerodeten Flächen, die zuvor, wenn auch in weit zurückliegender Vergangenheit, unberührte Natur war. Die Umnutzung eines Naturraumes in eine Wirtschaftsfläche führt zu einer Artenverarmung (Wert: Umweltschutz). Daher muss die Verwendung von Pflanzenöl zur Kunststoffgewinnung eingestellt werden.

Lösung 6

HDPE-Moleküle sind ausschließlich über zahlreiche, aber singulär sehr schwache London-Dispersionswechselwirkungen miteinander verbunden. PE-18,18-Moleküle bilden neben den London-Dispersionswechselwirkungen zusätzlich Dipol-Dipol-Wechselwirkungen im Bereich der Ester-Gruppen aus. Diese Dipol-Dipol-Wechselwirkungen sind nur mit höherem Energieaufwand zu überwinden, so dass bei vergleichbarer Polymerkettenlänge mehr Kraft zum Zerreißen der Stoffproben aufzuwenden ist.

Lösung 7



Lösung 8

Kriterien	PE	PE-18,18
Herstellung aus unkritischen Rohstoffen	Nein: „aus Erdöl hergestellt“ (S. 1)	Ja: „Als Rohstoff setzte Häußlers Team Pflanzenöl ein“ (S. 2)
Vielseitigkeit in der Anwendung	Ja: „Durch Zusatz von Prozesshilfen, Farbstoffen oder anderen Additiven lassen sich PE-Produkte in fast beliebiger Konsistenz, Optik und Größe herstellen.“ (S. 1)	Ja: „Die Eigenschaften des neuen Materials lassen sich über die Kettenlängen der Monomere gezielt steuern.“ [...] „Ändert man die Verbindungsstellen, etwa indem auch Diamine verwendet werden und damit zufällig die eine oder andere Estergruppe durch eine Amidgruppe ausgetauscht wird, entstehen viele weitere Kombinationsmöglichkeiten.“ (S. 3)
Abbaubarkeit in der Umwelt zur Vermeidung von Mikroplastik	Nein: „[I]n diesen Ketten steckt das große Manko von PE. Denn einmal verknäult und im Spritzgussverfahren zu einer Plastiktüte oder -schale geformt, bieten sie Enzymen keinerlei Angriffspunkte, sind deshalb für Mikroorganismen unverdaulich. Gelangt Plastikmüll in die Umwelt, zerfällt er durch Einfluss von UV-Strahlung und Sauerstoff nur unendlich langsam in Mikro- und schließlich Nanoplastik.“ (S. 2)	Ja: „Gelangen die neuen Polymere in die Umwelt, kann daraus kein schädliches Mikroplastik entstehen, da sich schnell Biofilme aus verschiedensten Mikroben bilden, deren Enzyme die Ester spalten.“ (S. 3)
vollständige Rezyklierbarkeit	Jein: „[Es gibt] erhebliche Unterschiede zwischen PE für technische Anwendungen und Lebensmittelverpackungen. Die Additive und Farbstoffe lassen sich beim mechanischen Recycling nicht abtrennen, ...“ (S. 2)	Ja: „Anders als PE mit seiner reinen Kohlenwasserstoffkette besitzen die langkettigen PE-artigen Polyester klar definierte „Sollbruchstellen“ – die Estergruppen – die das Polymer vollständig rezyklierbar machen.“ (S. 3)

Der Text wird unter [CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) veröffentlicht.

Stand: 08/2025; Text: A. Wöhl; Layout und Redaktion: max-wissen-Team