

KLAUSUR – POLYMERE (Mischthema PET + PLA + PE)

Material M1–M4 + Aufgaben 1–5
ca. 6 Seiten Material

M1 – Material 1: Kunststoffverbrauch und neue Trends

Weltweit steigt der Bedarf an Verpackungsmaterialien weiter an. Kunststoffe wie PET, PE und zunehmend auch PLA prägen den Markt. Während PET vor allem für Getränkeverpackungen eingesetzt wird, dominiert PE im Bereich der Folien und Behälter. Gleichzeitig wird PLA, ein Polymer auf Basis nachwachsender Rohstoffe, als Alternative für bestimmte Anwendungen diskutiert.

[Abbildung 1 – Entwicklung des globalen Kunststoffverbrauchs 1990–2025 (PET, PE, PLA getrennt dargestellt)]

In vielen Ländern wird derzeit untersucht, wie biologisch basierte Kunststoffe zur Reduktion von Kunststoffabfällen beitragen können. Die Marktdurchdringung hängt von Faktoren wie Kosten, Materialeigenschaften, Recyclingfähigkeit und Verfügbarkeit der Rohstoffe ab. Einige Hersteller werben damit, PLA sei vollständig biologisch abbaubar. In der Fachliteratur wird jedoch darauf hingewiesen, dass der Abbau stark von Temperatur und Feuchtigkeit abhängt und in Haushaltsumgebungen nur eingeschränkt stattfindet.

M2 – Material 2: Eigenschaften und Verwendungsbereiche

Die folgenden Polymere werden in unterschiedlichen technischen Bereichen eingesetzt. Die Eigenschaften sind entscheidend für die Auswahl in Verpackung, Technik und Konsumgütern.

Tabelle 1 – Physikalische und thermische Daten

Polymer	Dichte (g/cm ³)	Schmelzpunkt (°C)	Glasübergang (°C)	Kristallinität (%)
PET	1,34	255–260	70–80	30–40
PE-HD	0,95	130	—	60–80
PLA	1,24	150–170	55–60	10–30

[Diagramm 1 – Vergleich der Glasübergangstemperaturen PET, PLA, PE-HD]

Weitere charakteristische mechanische Eigenschaften wurden experimentell ermittelt:

Tabelle 2 – Mechanische Kennwerte

Polymer	Zugfestigkeit (MPa)	Elastizitätsmodul (GPa)	Bruchdehnung (%)
PET	55–75	2,5–3,0	50–150
PE-HD	20–35	0,8–1,5	300–1000
PLA	50–70	2,8–3,5	5–10

[Diagramm 2 – Spannungs-Dehnungs-Kurven PET, PE-HD, PLA]

PET zeichnet sich durch hohe Festigkeit aus und wird deshalb vor allem für druckstabile Verpackungen genutzt. PE-HD besitzt hohe Dehnfähigkeit und wird häufig für Behälter und Folien verwendet. PLA zeigt hohe Steifigkeit, ist aber deutlich spröder als PET und PE-HD.

M3 – Material 3: Recycling, Abbauverhalten und CO₂-Bilanzen

Tabelle 3 – Recyclingquoten und Abbauverhalten

Polymer	Recyclingquote (%)	Abbauzeit in Umwelt	industrieller Kompost	CO ₂ -Emissionen Herstellung (kg/kg)
PET	55	>400 Jahre	nein	3,0
PE-HD	30	>500 Jahre	nein	2,0
PLA	15	>400 Jahre	ja, bei >55 °C	1,8

[Abbildung 2 – Recyclingcodes für PET (1), PE-HD (2), PLA (7)]

Tabelle 4 – Energieaufwand bei Herstellung und Verarbeitung

Polymer Primärenergiebedarf (MJ/kg) typische Verarbeitungstemperatur (°C)

PET	80	260–280
PE-HD	70	180–220
PLA	55	160–190

[Diagramm 3 – Vergleich CO₂-Emissionen und Energieaufwand PET/PE-HD/PLA]

M4 – Material 4: Molekülstrukturen und Wiederholeinheiten

Die folgenden Strukturabbildungen zeigen die Monomere und Repeat-Units dreier Polymere.

- Monomer PET: Terephthalsäure + Ethandiol
- Monomer PLA: Milchsäure
- Monomer PE: Ethylen

Repeat-Units:

- RU-PET: $-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}-$
- RU-PE: $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$
- RU-PLA: $-\text{O}-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CO}-$

[Abbildung 3 – Strukturabbildungen zu PET, PE, PLA: Monomer und Wiederholeinheit]

AUFGABEN

Aufgabe 1 (9 BE)

Geben Sie einen strukturierten Überblick über die in den Materialien dargestellten Polymere PET, PE-HD und PLA.

Beziehen Sie dabei Herkunft, typische Eigenschaften und wesentliche Einsatzbereiche ein.

Aufgabe 2 (12 BE)

Werten Sie die physikalischen und mechanischen Daten aus M2 aus.

a) Vergleichen Sie die thermischen Eigenschaften der drei Polymere.

b) Ordnen Sie die mechanischen Kennwerte den beobachteten Struktureigenschaften zu.

Aufgabe 3 (12 BE)

Untersuchen Sie das Abbau- und Recyclingverhalten der Polymere nach M3.

- a) Vergleichen Sie die angegebenen Recyclingquoten und Abbauzeiten.
 - b) Leiten Sie mögliche Gründe für die Unterschiede im Kompostierverhalten ab.
-

Aufgabe 4 (14 BE)

Nutzen Sie die Strukturangaben in M4.

- a) Beschreiben Sie die strukturellen Unterschiede der Repeat-Units.
 - b) Erläutern Sie aus den Daten der Materialien, wie sich diese Unterschiede auf Materialeigenschaften auswirken können.
 - c) Treffen Sie eine Zuordnung zwischen Stabilität und Struktur.
-

Aufgabe 5 (13 BE)

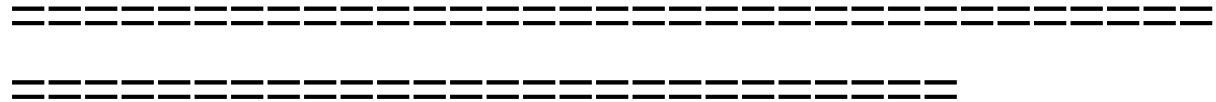
Beurteilen Sie auf Grundlage aller Materialien, welches der drei Polymere sich am besten für ein nachhaltiges Verpackungskonzept eignet.

Berücksichtigen Sie dabei Materialeigenschaften, Energieaufwand und Umweltfaktoren.

GESAMT: 60 BE

AUFGABE 1 (9 BE)

Strukturierter Überblick: PET, PE-HD, PLA **Pädagogisch ausführlich, mit klaren Vergleichsstrukturen**



Die Materialien stellen drei technisch und ökologisch relevante Polymere vor: **PET, PE-HD** und **PLA**.

Im Folgenden werden **Herkunft**, **Materialeigenschaften** und **Einsatzbereiche** übersichtlich und verständlich zusammengefasst.

☐ 1. PET – Polyethylenterephthalat

Herkunft

- auf **Erdölbasis** hergestellt
- Monomere aus M4:
 - Terephthalsäure
 - Ethandiol

➔ [JPG 1 hier einfügen: PET Monomer + PET Wiederholeinheit aus Material M4]

Eigenschaften

- relativ hohe **Schmelztemperatur** (255–260 °C)
- **Glasübergang bei ca. 70–80 °C** → oberhalb davon wird PET weich
- **hohe mechanische Festigkeit** (Zugfestigkeit 55–75 MPa)
- **mittlere Dehnung** (50–150 %)
- teilkristallin (30–40 %)

Einsatzbereiche

- druckstabile **Getränkeflaschen**
- Folien und technische Fasern (z. B. Polyester-Textilien)
- Lebensmittelverpackungen
- technische Bauteile (stabil + formbeständig)

☐ 2. PE-HD – Polyethylen hoher Dichte

Herkunft

- vollständig **erdölbasiert**
- Monomer: Ethylen

➔ [JPG 2 hier einfügen: PE Monomer + Repeat-Unit $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$]

Eigenschaften

- **niedrige Dichte** (0.95 g/cm³)
- **Schmelzpunkt ca. 130 °C**, kein klarer Tg → „weich“ über großen Temperaturbereich
- **sehr hohe Dehnfähigkeit** (300–1000 %)
- relativ geringe Festigkeit (20–35 MPa)
- hoher Kristallinitätsgrad (60–80 %)

Einsatzbereiche

- Folien, Müllsäcke
- Flaschen, Kanister, Rohre
- robuste Alltagskunststoffe (geringe Kosten, gute chemische Beständigkeit)

□ 3. PLA – Polylactid (Polymilchsäure)

Herkunft

- **biobasiert**, aus fermentierten pflanzlichen Rohstoffen (Mais, Zuckerrohr)
 - Monomer: Milchsäure
- ➔ [JPG 3 hier einfügen: PLA Monomer + Repeat-Unit $-O-CH(CH_3)-CO-$]

Eigenschaften

- **mittlere Dichte (1.24 g/cm³)**
- **Schmelzpunkt 150–170 °C**
- **Glasübergang 55–60 °C**
- hohe Steifigkeit (E-Modul 2.8–3.5 GPa)
- **spröde** → **Bruchdehnung nur 5–10 %**
- geringe Kristallinität (10–30 %)

Einsatzbereiche

- 3D-Druck-Filamente
- Verpackungen, Schalen, Becher
- medizinische Anwendungen (resorbierbare Implantate)
- biobasierte Einwegprodukte

★ Strukturierter Vergleich:

Polymer	Herkunft	Eigenschaften	Einsatz
PET	erdölbasiert	stark, formstabil	Flaschen, Fasern
PE-HD	erdölbasiert	zäh, dehnbar	Folien, Kanister
PLA	biobasiert	steif, spröde	Einwegartikel, Kompostierbares

➔ **Lösung Aufgabe 1 ist damit vollständig.**

AUFGABE 2 (12 BE)

Thermische & mechanische Daten auswerten

a) Vergleich der thermischen Eigenschaften

Zur Orientierung:

➔ [JPG 4 hier einfügen: Diagramm 1 – Glasübergangstemperaturen PET, PLA, PE-HD]

PET

- $T_g = 70\text{--}80\text{ }^\circ\text{C}$, $T_m = 255\text{--}260\text{ }^\circ\text{C}$
→ hohe Formbeständigkeit und Temperaturfestigkeit

PE-HD

- kein klarer T_g (amorpher Anteil klein)
- $T_m = 130\text{ }^\circ\text{C}$
→ wird früher weich, leichter formbar, weniger hitzebeständig

PLA

- $T_g = 55\text{--}60\text{ }^\circ\text{C}$, $T_m = 150\text{--}170\text{ }^\circ\text{C}$
→ weich bei niedrigen Temperaturen (z. B. im Sommer), nicht geeignet für heiße Getränke

b) Mechanische Werte richtig zuordnen

→ [JPG 5 hier einfügen: Diagramm 2 - Spannungs-Dehnungs-Kurven PET, PLA, PE-HD]

PE-HD

- niedrigster E-Modul → **am flexibelsten**
- höchste Bruchdehnung → **extrem dehnbar/zäh**
→ linearer Kohlenwasserstoff – keine polaren Gruppen → Molekülbeweglichkeit hoch

PET

- hoher E-Modul + hohe Festigkeit
- mittlere Bruchdehnung
→ starke Dipolwechselwirkungen (Estergruppen) → stärkere zwischenmolekulare Kräfte

PLA

- hoher E-Modul → **steif**
- extrem niedrige Bruchdehnung → **spröde**
→ wegen Seitenmethylgruppe eingeschränkte Beweglichkeit, geringere Zähigkeit

★ Zusammenfassung

Polymer	Struktur	Mechanische Wirkung
PET	aromatisch, polar	stabil + fest
PE-HD	reine CH_2 -Kette	zäh + dehnbar
PLA	Seitenkette CH_3 , Ester	steif, aber spröde

AUFGABE 3 (12 BE)

Recycling & Abbauverhalten

→ Zur Orientierung:

[JPG 6 hier einfügen: Recyclingcodes PET(1), PE-HD(2), PLA(7)]

a) Vergleich der Recyclingquoten & Abbauzeiten

Polymer Recyclingquote Abbauzeit Umwelt

PET	55 %	>400 Jahre
PE-HD	30 %	>500 Jahre
PLA	15 %	>400 Jahre (in Natur)

Interpretation:

- PET → hohe Recyclingquote dank Pfandsystem
- PE-HD → schwerer zu sortieren, weniger Recycling
- PLA → trotz „Biokunststoff“ kaum recycelt (Mischfraktionen)

Abbauzeiten:

Alle drei sehr lang, PLA in Natur kaum schneller.

b) Gründe für PLA-Kompostierung nur bei hoher Temperatur

PLA baut nur im **industriellen Kompost** ab (>55 °C), weil:

1. **Esterbindungen** benötigen Wärme + Feuchtigkeit für Hydrolyse
2. Mikroorganismen müssen PLA-spaltende Enzyme bilden
3. PLA ist teilweise kristallin → erschwert Wasserzugang
4. niedrige Umgebungstemperaturen → Reaktion läuft extrem langsam

➔ [JPG 7 hier einfügen: Schema Hydrolyse PLA-Esterbindung]

AUFGABE 4 (14 BE)

Struktur → Eigenschaften → Stabilität

a) Strukturelle Unterschiede der Repeat-Units

➔ [JPG 8 hier einfügen: Drei Repeat-Units PET, PE, PLA]

Polymer	Repeat-Unit	Hauptmerkmale
PET	$-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}-$	aromatisch + polar
PE-HD	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$	unpolar, flexibel
PLA	$-\text{O}-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CO}-$	polar + Seitenkette

b) Auswirkungen der Struktur

PET

- Aromaten → hohe Festigkeit
- Estergruppen → starke Dipolkräfte → höhere Tg + Tm

PE-HD

- reine CH₂-Kette → keine Dipole → große Beweglichkeit
→ hohe Dehnbarkeit + niedrige Tg

PLA

- Seitenmethylgruppe blockiert Beweglichkeit
→ steif, aber spröde
- Ester → wärmeempfindlich

c) Zuordnung Stabilität ↔ Struktur

Thermisch und mechanisch am stabilsten:

→ **PET** (Aromaten + starke Dipolkräfte)

Chemisch am stabilsten (gegen Hydrolyse):

→ **PE-HD** (keine hydrolysierbaren Gruppen)

Am wenigsten stabil gegen Wärme + Hydrolyse:

→ **PLA**

AUFGABE 5 (13 BE)

Welches Polymer ist am nachhaltigsten?

Nachhaltigkeit beurteilt aus:

1. **Materialeigenschaften**
 2. **Energieaufwand**
 3. **Recyclingfähigkeit**
 4. **CO₂-Bilanz**
 5. **Abbauverhalten**
-

PET

- sehr gut recycelbar (55 %)
- mechanisch hochwertig
 - hohe Herstellungsemissionen (3.0 kg CO₂/kg)
 - notwendige Sammelsysteme

PET ist gut im Kreislauf, aber nicht biologisch abbaubar.

PE-HD

- niedrige Herstellungsemissionen
 - geringe Recyclingquote (30 %)
 - extrem lange Lebensdauer
 - schwer zu sortieren

Ökologisch nur gut, wenn Recycling gesteigert wird.

PLA

- biobasiert
- niedrige CO₂-Emissionen
 - Kompostierung nur industriell (>55 °C)
 - sehr geringe Recyclingquote
 - spröde → nicht universal einsetzbar

PLA ist nur dann sinnvoll, wenn **Kompostieranlagen existieren**.