

# Klausuraufgabe – Polymere: Nylon-6,6 (Thermoplast) und Bakelit

## Überarbeitete, längere, inhaltlich vertiefte Materialbasis

Kunststoffe gehören zu den zentralen Werkstoffen der modernen Industrie. Ihre unterschiedlichen Eigenschaften – von flexibel bis extrem hart – entstehen aus der chemischen Struktur ihrer Makromoleküle. Besonders wichtig sind dabei:

- die **Art der Monomere**,
- die **chemische Bindung zwischen den Monomeren**,
- die **Vernetzungsdichte** der Polymerkette,
- und die **Beweglichkeit der Ketten** im Festkörper.

Um diese Zusammenhänge zu verdeutlichen, werden im Folgenden zwei Kunststoffe betrachtet, die **historisch bedeutend, chemisch unterschiedlich aufgebaut und technisch äußerst wichtig** sind: **Nylon-6,6** und **Bakelit**.

## Nylon-6,6 – ein Klassiker der Thermoplaste

Nylon-6,6 ist eines der ersten großtechnisch hergestellten synthetischen Polyamide und wurde Anfang der 1930er Jahre in den USA in der Forschungsgruppe um **Wallace H. Carothers** (DuPont) entwickelt. Der Kunststoff war ein Meilenstein in der Materialwissenschaft und gilt als Grundstein der modernen Kunststoffchemie.

Chemisch handelt es sich um ein **Polyamid**, das durch **Polykondensation** gebildet wird. Dabei reagieren:

- die **Dicarbonsäure Adipinsäure** (Hexandisäure) mit zwei Carboxygruppen
- das **Diamin 1,6-Diaminohexan** mit zwei Aminogruppen

Bei ihrer Reaktion entstehen **Amidbindungen** ( $-\text{CO}-\text{NH}-$ ) unter **Abspaltung von Wasser**, sodass sich lange lineare Polymerketten bilden. Die Monomerstrukturen sind in Abb. 1 und Abb. 2 dargestellt:

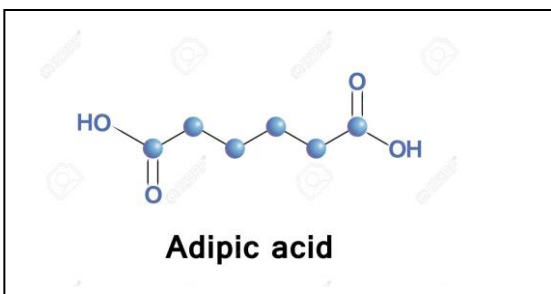


Abb. 1: Strukturformel von Adipinsäure  
 $\text{HOOC}-(\text{CH}_2)_4-\text{COOH}$

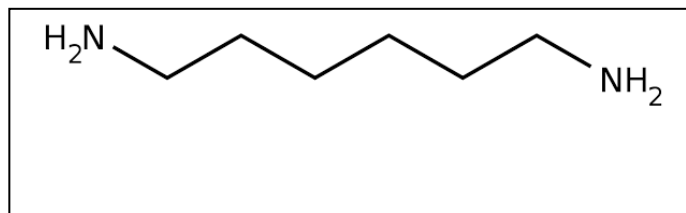


Abb. 2: Strukturformel von 1,6-Diaminohexan –  
 $\text{H}_2\text{N}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}_2$

Die Kettenanordnung in Nylon-6,6 zeigt sowohl amorphe als auch teilkristalline Bereiche. Diese bieten dem Material:

- hohe mechanische Festigkeit,
- gute Abrieb- und Schlagbeständigkeit,
- Wärmeformbeständigkeit,
- und typische Thermoplast-Eigenschaften: **Weichwerden bei Erwärmung** und **Schmelzbarkeit**.

Ein Ausschnitt einer Polyamidkette mit mehreren Wiederholungseinheiten ist in Abb. 3 illustriert:

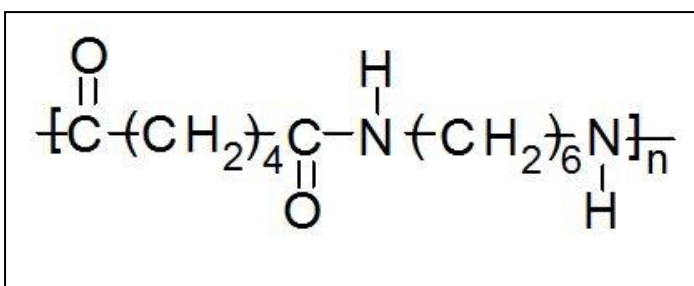


Abb. 3: Nylon-6,6-Kettenausschnitt mit mehreren Wiederholungseinheiten

# Bakelit – der erste industriell bedeutende Duroplast

Als Kontrast zu Nylon-6,6 steht Bakelit, der erste großtechnisch produzierte **Duroplast**, der Anfang des 20. Jahrhunderts von **Leo Baekeland** entwickelt wurde. Bakelit entsteht aus einer Reaktion von **Phenol** und

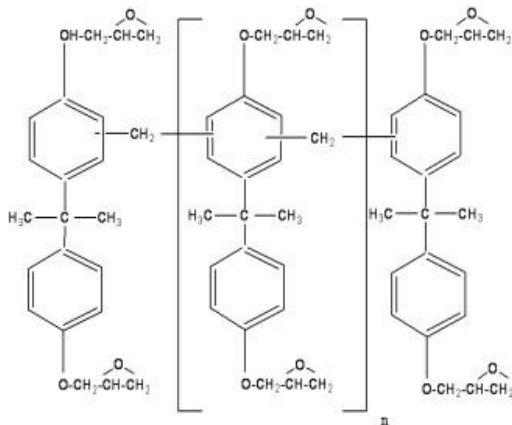


Abb. 4: stark vernetztes Bakelit-Netzwerk aus Phenol und Formaldehyd

**Formaldehyd** und bildet ein stark vernetztes **dreidimensionales Polymernetzwerk**.

Im Gegensatz zu thermoplastischen Polymeren, deren Ketten linear und schmelzbar bleiben, **vernetzt Bakelit irreversibel**: Die Polymerketten werden dauerhaft über **Methylol- und Methylenbrücken** miteinander verbunden.

Diese feste Vernetzung erklärt die typischen Eigenschaften:

- extreme **Hitzebeständigkeit**,
- hohe **Formstabilität** und **Härte**,
- sehr gute **elektrische Isolation**,
- Unmöglichkeit des Schmelzens → Stoff **zersetzt** sich statt zu fließen.

Dadurch eignet sich Bakelit für Anwendungen wie:

- Griffe von Kochtöpfen,
- Elektroisolatoren,
- Schaltergehäuse,
- Gehäuse historischer Telefone.



Produkte aus Nylon



Produkte aus Bakelit

## Zusammenhang der Strukturen

Nylon-6,6 besitzt **lineare, unvernetzte Ketten**, während Bakelit ein **räumlich ausgedehntes Netzwerk** bildet. Diese Unterschiede im molekularen Aufbau bestimmen die völlig unterschiedlichen makroskopischen Eigenschaften:

- Thermoplast vs. Duroplast
- schmelzbar vs. nicht schmelzbar
- flexibel vs. spröde
- recycelbar vs. irreversibel

Im Folgenden sollen diese strukturellen Zusammenhänge systematisch untersucht werden.

# Aufgaben

**1. Benennen Sie die in den Monomeren von Nylon-6,6 (Abb. 1 und Abb. 2) enthaltenen funktionellen Gruppen und ordnen Sie sie jeweils dem passenden Monomer zu.**

*(Hinweis: pro Molekül sind es jeweils zwei gleiche Gruppen.)*

---

**2. Erläutern Sie, warum die Bildung von Nylon-6,6 aus Adipinsäure und 1,6-Diaminohexan eine Polykondensation ist. Gehen Sie dabei auf funktionelle Gruppen und Nebenprodukt ein.**

---

**3. Stellen Sie die Reaktionsgleichung zur Bildung von Nylon-6,6 aus den beiden Monomeren auf.**

- verwenden Sie vereinfachte Summenformeln
  - kennzeichnen Sie eine Wiederholungseinheit mit  $( \dots )_n$
  - geben Sie das Nebenprodukt Wasser an (*[Abb. 3].*)
- 

**4. Betrachten Sie Abb. 3.**

**4.1 Markieren Sie eine vollständige Wiederholungseinheit und schreiben Sie die Summenformel dieser Einheit darunter.**

**4.2 Berechnen Sie, wie viele Wassermoleküle bei der Bildung eines Kettenausschnitts mit drei Wiederholungseinheiten gebildet wurden. Beschreiben Sie Ihr Vorgehen in ganzen Sätzen.**

---

**5. Nylon-6,6 ist ein Thermoplast, Bakelit ein Duroplast.**

**5.1 Erklären Sie mithilfe der Strukturen (Abb. 3 und Abb. 4) den Unterschied im Vernetzungsgrad und der Beweglichkeit der Ketten.**

**5.2 Leiten Sie das unterschiedliche thermische Verhalten (Schmelzen / Erweichen / Zersetzen) ab und stellen Sie den Zusammenhang zur Recyclingfähigkeit her.**

---

**6. Anwendungsbezug**

**6.1 Nennen Sie zwei Eigenschaften von Nylon-6,6, die es für Zahnräder und Gleitlager geeignet machen, und erklären Sie diese auf molekularer Ebene.**

**6.2 Nennen Sie zwei Eigenschaften von Bakelit, die es für hitzebeständige, hochbelastete Bauteile geeignet machen, und erklären Sie diese anhand der Vernetzungsstruktur.**

---

**7. Herstellung von Bakelit**

**7.1 Benennen Sie die funktionellen Gruppen von Phenol und Formaldehyd, die für die Vernetzung verantwortlich sind.**

**7.2 Beschreiben Sie in Worten, wie durch Reaktionen dieser Gruppen ein 3D-Netzwerk entsteht.**

**7.3 Begründen Sie, warum Bakelit — im Gegensatz zu Nylon-6,6 — nicht schmelzbar und nicht recycelbar ist.**

---

# Erwartungshorizont

---

## Aufgabe 1 – Erwartet wird:

**Adipinsäure (Hexandisäure, [Abb. 1]):** funktionelle Gruppe: Carboxygruppe/Carboxylgruppe;

Schreibweise:  $-\text{COOH}$ ; Hinweis: 2 Carboxygruppen pro Molekül  $\rightarrow$  bifunktionell

**1,6-Diaminohexan ([Abb. 2]):** funktionelle Gruppe: Aminogruppe/primäre Aminogruppe; Schreibweise:  $-\text{NH}_2$ ; Hinweis: 2 Aminogruppen pro Molekül  $\rightarrow$  bifunktionell

**Zusatz:** Begriff „bifunktionelles Monomer“; Zuordnung zu Dicarbonsäure bzw. Diamin

---

## Aufgabe 2 – Erwartet wird:

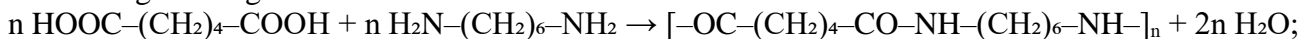
Carboxygruppe ( $-\text{COOH}$ ) reagiert mit Aminogruppe ( $-\text{NH}_2$ ) zu Amidbindung ( $-\text{CO}-\text{NH}-$ ); pro Verknüpfung entsteht 1 Molekül Wasser  $\rightarrow$  Kondensation; viele Wiederholungen  $\rightarrow$  Polykondensation; beide Monomere sind bifunktionell

**Zusatz:** Erwähnung der Peptidbindung; nukleophile Acylsubstitution

---

## Aufgabe 3 – Erwartet wird:

Reaktionsgleichung in vereinfachter Form:



Wiederholungseinheit korrekt markiert; Nebenprodukt Wasser angegeben

**Zusatz:** korrekte Stöchiometrie; richtige Amidbindung

---

## Aufgabe 4.1 – Erwartet wird:

Wiederholungseinheit:  $-\text{OC}-(\text{CH}_2)_4-\text{CO}-\text{NH}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-$ ; Summenformel:  $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{N}_2\text{O}_2$

**Zusatz:** richtige Berechnung der Summenformel

---

## Aufgabe 4.2 – Erwartet wird:

1 Wiederholungseinheit  $\rightarrow$  1  $\text{H}_2\text{O}$ ; 3 Wiederholungseinheiten  $\rightarrow$  3  $\text{H}_2\text{O}$ ; Begründung: jede Amidbindung entsteht durch Kondensation von  $-\text{COOH}$  und  $-\text{NH}_2$

**Zusatz:** klare Trennung von Wiederholungseinheit und Kondensationsschritt

---

## Aufgabe 5.1 – Erwartet wird:

Nylon-6,6: lineare unvernetzte Ketten; nur intermolekulare Kräfte (H-Brücken, Van-der-Waals); hohe Beweglichkeit der Ketten

Bakelit: stark vernetztes 3D-Netzwerk; kovalente Brücken zwischen Phenoleinheiten; kaum Beweglichkeit  $\rightarrow$  starr

**Zusatz:** Erwähnung von Methylen-/Etherbrücken

---

## Aufgabe 5.2 – Erwartet wird:

Nylon-6,6: erweicht/bewegt sich beim Erwärmen; schmilzt; ist schmelzrecyclbar

Bakelit: schmilzt nicht, zersetzt sich bei Hitze; nicht recyclbar durch Erwärmen

**Zusatz:** richtiger Einsatz der Begriffe Thermoplast/Duroplast

---

## Aufgabe 6.1 – Erwartet wird:

Nylon-6,6-Eigenschaften für Zahnräder/Gleitlager: hohe Zähigkeit/Festigkeit; gute Abriebfestigkeit;

Begründung: Amidgruppen  $\rightarrow$  starke H-Brücken; teilkristalline Struktur;  $\text{CH}_2$ -Kettenabschnitte geben Flexibilität

**Zusatz:** Verknüpfung Mikroskopie–Makroskopie

---

## **Aufgabe 6.2 – Erwartet wird:**

Bakelit-Eigenschaften: hohe Hitzebeständigkeit; hohe Härte/Formstabilität; gute elektrische Isolation;

Erklärung: stark vernetztes 3D-Netzwerk; aromatische Einheiten; keine Kettenbeweglichkeit

**Zusatz:** Erwähnung der Methylen-/Etherbrücken

---

## **Aufgabe 7.1 – Erwartet wird:**

Phenol: Hydroxylgruppe  $\text{-OH}$ ; Formaldehyd: Aldehydgruppe  $\text{-CHO}$

**Zusatz:** ortho-/para-Reaktivität am Aromaten

---

## **Aufgabe 7.2 – Erwartet wird:**

Formaldehyd addiert an Phenol erzeugt Hydroxymethylgruppen  $\text{-CH}_2\text{OH}$ ; diese kondensieren zu Methylen- ( $\text{-CH}_2\text{-}$ ) oder Etherbrücken ( $\text{-CH}_2\text{-O-CH}_2\text{-}$ ); mehrere Reaktionsstellen  $\rightarrow$  3D-Netzwerk

**Zusatz:** Hinweis auf stufenweise Vernetzung

---

## **Aufgabe 7.3 – Erwartet wird:**

Bakelit: irreversibel vernetztes 3D-Gerüst; kein Schmelzen möglich; Zersetzung bei Hitze  $\rightarrow$  nicht recycelbar

Nylon-6,6: lineare Ketten; schmelzbar; thermisch recycelbar

**Zusatz:** richtige Unterscheidung Schmelzen vs. thermische Zersetzung