

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:

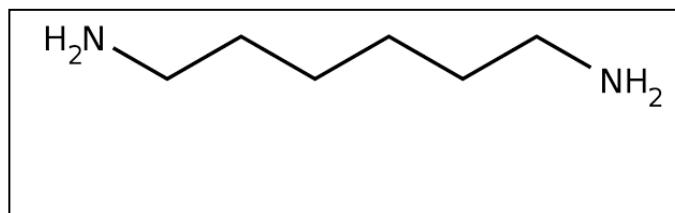
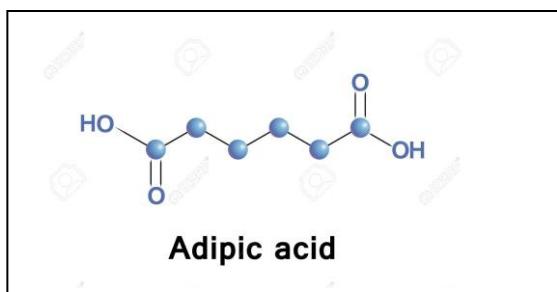


Abb. 1: Strukturformel von Adipinsäure
HOOC-(CH₂)₄-COOH

Abb. 2: Strukturformel von 1,6-Diaminohexan –
H₂N-(CH₂)₆-NH₂

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:

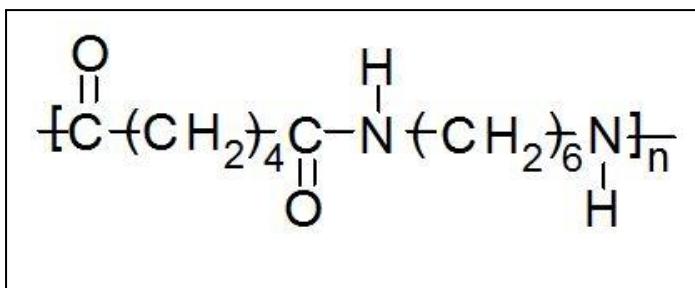


Abb. 3: Nylon-6,6-Kettenausschnitt mit mehreren Wiederholungseinheiten

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

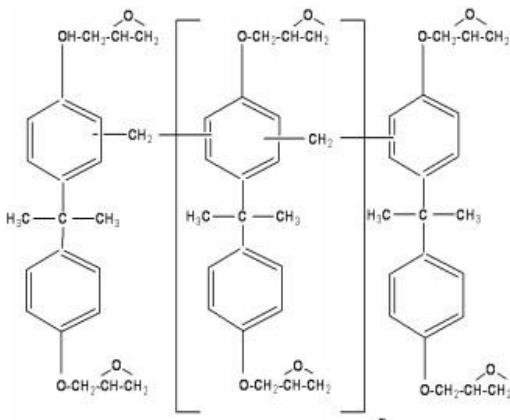


Abb. 4: stark vernetztes Bakelit-Netzwerk aus Phenol und Formaldehyd

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 → bifunktionell

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

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

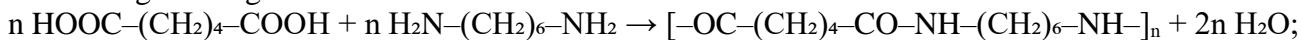
Aufgabe 2 – Erwartet wird:

Carboxygruppe ($-\text{COOH}$) reagiert mit Aminogruppe ($-\text{NH}_2$) zu Amidbindung ($-\text{CO}-\text{NH}-$); pro Verknüpfung entsteht 1 Molekül Wasser → Kondensation; viele Wiederholungen → 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 → 1 H_2O ; 3 Wiederholungseinheiten → 3 H_2O ; 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 → starr

Zusatz: Erwähnung von Methylen-/Etherbrücken

Aufgabe 5.2 – Erwartet wird:

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

Bakelit: schmilzt nicht, zersetzt sich bei Hitze; nicht recycelbar 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 → starke H-Brücken; teilkristalline Struktur; 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 –OH; Formaldehyd: Aldehydgruppe –CHO

Zusatz: ortho-/para-Reaktivität am Aromaten

Aufgabe 7.2 – Erwartet wird:

Formaldehyd addiert an Phenol erzeugt Hydroxymethylgruppen –CH₂OH; diese kondensieren zu Methylen–(–CH₂–) oder Etherbrücken (–CH₂–O–CH₂–); mehrere Reaktionsstellen → 3D-Netzwerk

Zusatz: Hinweis auf stufenweise Vernetzung

Aufgabe 7.3 – Erwartet wird:

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

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

Zusatz: richtige Unterscheidung Schmelzen vs. thermische Zersetzung