

## IN DIESEM KAPITEL

Was sind Kunststoffe im Vergleich zu anderen Werkstoffen

Wie sind Kunststoffe chemisch aufgebaut

Was hat es mit der Taktizität auf sich

Wie können Kunststoffe teilkristallin sein und sind die nicht alle amorph

Wie kann man Kunststoffe herstellen

# Kapitel 1

# Hier stimmt die Chemie

Es ist Samstagvormittag und der Wochenendeinkauf steht an. Sie ziehen Ihre Gore-Tex®-Jacke an, schnappen sich ein paar Einkaufstüten und setzen sich ins Auto. Auf der Fahrt ins Einkaufszentrum halten Sie das mit Kunststoff umschäumte Lenkrad fest in Ihren Händen. Im Treppenhaus des Einkaufszentrums hängen Leuchtkörper von der Decke. Die sollen auch aus »Plastik« sein. Im Baumarkt kaufen Sie ein paar Dübel. Auf dem Parkplatz kommen Sie an einer Mülltonne vorbei, die überquillt von Plastikbechern, Plastikfolie, Styroporschälchen.

Und die ganze Zeit müssen Sie an die Aufgabe denken, die Ihnen Ihr Chef gegeben hat: das xy-Bauteil, welches bislang aus Metall gefertigt wird, geht das nicht billiger aus Kunststoff? Und leichter wäre es auch noch. Und es bräuchte keinen Rostschutz. Aber aus welchem Kunststoff fertigt man das Teil am besten?

Was sind Kunststoffe überhaupt? Im Vergleich zu anderen Feststoffen wie zum Beispiel Metalle. Oder auch Stein, Beton, Glas?

## Einstieg in die Welt der Kunststoffe

Für einen ersten Überblick können Sie die Welt der Kunststoffe grob in drei Schichten einteilen. Da ist zuerst mal – die Plastiktüte. Also die Kunststoffe im Alltag. Außer der Plastiktüte auch die Styropor-Verpackung, die Lego-Steine, der Kochlöffel oder der Plastikstuhl im Garten.

Das alles sind aber nur die äußersten Erscheinungsformen der zweiten Schicht. In dieser finden Sie die Kunststoffe in der technischen Anwendung. Nicht nur die Stoßfänger, auch die Kotflügel am Auto sind aus Kunststoff. Ebenso die Dachfolie des größten Zeltes der Welt. Waren Sie mal zur Vorsorgeuntersuchung? Das Blut, das man Ihnen abgenommen hat, könnte gar nicht korrekt analysiert werden, wenn es nicht in Röhrchen aus Spezial-Kunststoff gehandhabt würde.

Und wenn Sie noch tiefer schürfen, dann stoßen Sie auf Hightech. Kunststoffe, die leuchten wie eine Glühbirne. Kunststoffe, die nur eine bestimmte Sorte Gas durchlassen, Kunststoffe, die sich in der Natur wieder zersetzen. Kunststoffe, die wie Medikamente wirken. Kunststoffe, die gar nicht aus »Kunststoff« im landläufigen Sinne, nämlich aus Kohlenwasserstoff, aufgebaut sind.

Es ist der alltägliche Kontakt mit immer wieder denselben Kunststoff-Sorten, der den Blick auf diese tieferen Schichten verstellt (mir ging es wenigstens so).

Um diese Vielfalt besser zu verstehen, möchte ich in diesem Buch die folgenden Fragen beantworten:

- ✓ Was sind Kunststoffe überhaupt?
- ✓ Wie kann man sie verarbeiten?
- ✓ Wie werden Kunststoffe untersucht, geprüft, vermessen? Was halten sie aus?
- ✓ Welche Kunststoffsorten gibt es denn konkret?
- ✓ Wer hat sich das alles ausgedacht?
- ✓ Und was ist mit der Umwelt? Wo bleibt das Zeug, wenn ich es weggeschmissen habe?

Mit diesem Buch möchte ich Ihnen zeigen, was alles mit Kunststoffen möglich ist, was noch möglich sein wird und wie sehr unser Leben inzwischen von Kunststoffen geprägt ist.

## Kunststoffe und der Rest der Werkstoff-Welt

Kunststoffe sind ganz allgemein Substanzen mit technisch verwertbaren Eigenschaften. Solche Substanzen werden als Werkstoffe bezeichnet.



Werkstoffe müssen bei Raumtemperatur nicht fest sein. Auch Flüssigkeiten und Gase sind Werkstoffe. Falls Sie es schaffen, weit genug in diesem Buch zu lesen, werden Ihnen auch Kunststoffe begegnen, die bei Raumtemperatur flüssig sind.

Werkstoffe kann man unterteilen in drei große Gruppen:

1. Metallische Werkstoffe,
2. nichtmetallische, anorganische Stoffe (Keramik, Glas, Stein, Beton) und

- die anderen, die nicht in eine der beiden ersten Gruppen passen. Diese werden Polymere genannt. Darunter fallen auch die Kunststoffe.

Manche Werkstoff-Techniker definieren noch die Verbundwerkstoffe als eigene Gruppe. Verbundwerkstoffe sind zusammengesetzt aus Werkstoffen der drei genannten Gruppen.



Was ist mit Holz? Auch aus diesem Material werden seit Jahrtausenden Gegenstände hergestellt.

Der Naturstoff Holz setzt sich zusammen aus mikroskopisch kleinen Zellen. Und diese sind aufgebaut aus Cellulose und ähnlichen Stoffen. Und weil diese Stoffe Polymere sind, werden Naturstoffe wie Holz, aber beispielsweise auch Wolle, Seide oder Leder ebenfalls den Polymeren zugerechnet. Zur genaueren Abgrenzung werden diese Naturstoffe Biopolymere genannt.

Metalle finden Sie im Periodensystem der Elemente. Die sind halt einfach da in unserer Welt. Und die anorganischen Stoffe, wie Ton, Steine, Scherben sind gar nicht Thema dieses Buches.

Und was sind nun Polymere?

## Aus vielen eines

Das Wort Polymer ist zusammengesetzt aus den altgriechischen Wörtern *poly* = viel und *meros* = Teil. Ein Polymer ist also etwas, was aus vielen Teilen besteht.

Haha, das hilft jetzt aber nicht weiter, denn alle Stoffe bestehen aus vielen kleinen chemischen Teilchen. Das können Atome sein oder Ionen oder Moleküle. Aber bei Polymeren haben wir eine besondere Form von Molekülen, die sogenannten Makromoleküle. Und *die* bestehen aus vielen Teilchen! Die Makromoleküle in Polymeren sind Ketten von einzelnen Molekülen. Es sind dabei durchaus einige tausende Moleküle in einer einzigen solchen Kette anzutreffen. Weil die Moleküle in dieser Kette die Eigenschaft besitzen, miteinander verbunden werden zu können, haben sie auch eine extra Bezeichnung. Der Chemiker nennt so ein Molekül **Monomer**.



Ein Monomer ist also ein Molekül, das fähig ist, sich mit anderen Monomeren chemisch zu verbinden. Und ein Polymer ist so eine Verbindung, die aus mindestens einigen tausend Monomeren besteht. Gibt es auch etwas dazwischen? Ja, gibt es. Makromoleküle, die nur aus »ein paar« Monomeren bestehen, nennt man **Oligomere**. Es geht noch detaillierter: zwei Einheiten = **Dimer**, drei Einheiten = **Trimer**, vier Einheiten = **Tetramer**. Unterschieden wird danach, ob das Hinzufügen eines weiteren Monomers schon eine deutliche Änderung der Eigenschaften bewirkt.

Die Monomere sind in der Kette kovalent miteinander verbunden. Die einzelnen Atome im Monomer sind ebenfalls kovalent miteinander verbunden.

## 36 TEIL I Und jedem Zauber wohnt ein Anfang inne

Die kovalente Bindung ist so ziemlich die stärkste Bindung, welche die Chemie anzubieten hat. Hierbei teilen sich die miteinander verbundenen Atome die äußeren Elektronen. Die schwirren nicht mehr um »ihre eigenen« Atomkerne herum, sondern um den kompletten Verbund. Von außen sieht es (fast) aus wie ein Atom.

Hierin finden Sie schon einen Hinweis darauf, warum Kunststoffe im Allgemeinen viel höhere chemische Beständigkeit haben als zum Beispiel Metalle.

### Was es braucht, um ein Kunststoff zu sein

Mit den Atomen sind wir wieder beim Periodensystem der Elemente. Da sind zwar über 100 Elemente verzeichnet, aber um Kunststoffe zu erzeugen, reicht eine Handvoll davon aus.

Die Kernforderung, nämlich dass die Moleküle miteinander verbunden werden können, können die Chemiker (bislang) nur mit drei Elementen erfüllen:

- ✓ Kohlenstoff,
- ✓ Silicium und
- ✓ Phosphor (dieser zusammen mit Stickstoff).

In der Praxis spielen zurzeit allerdings nur Kohlenstoff und Silicium eine Rolle.

Des Weiteren benötigt ein Polymer-Designer in seinem Labor in der Hauptsache nur

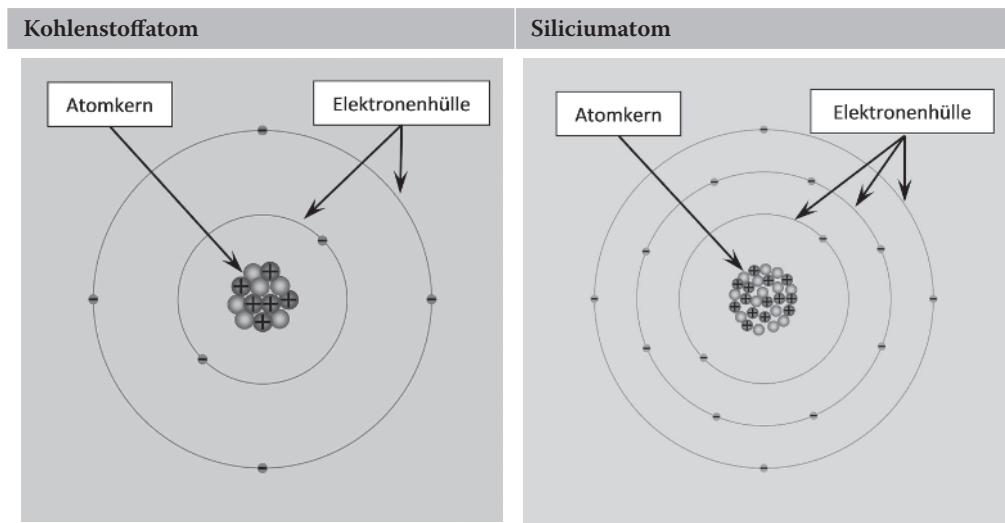
- ✓ Wasserstoff,
- ✓ Sauerstoff,
- ✓ Stickstoff,
- ✓ Schwefel,
- ✓ Chlor und
- ✓ Fluor,

um die große Vielfalt an Polymeren zu erschaffen.

Kohlenstoff ist der »Multifunktions-Baustein« für die synthetische Chemie, weil er gleich vier freie Elektronen in seiner äußersten Elektronenhülle hat. Dieses Atom kann also mit bis zu vier weiteren Atomen verbunden werden. Das Siliciumatom verfügt ebenso über vier freie Elektronen.

Das sind also die beiden Stars der Kunststoffindustrie. Diese beiden schaffen hunderttausende Arbeitsplätze und Milliarden Euro Umsatz.

Wie Sie in Tabelle 1.1 sehen können, besitzt das Siliciumatom eine Elektronenhülle mehr als das Kohlenstoffatom. Dadurch wird die äußerste Hülle größer, die Elektronen sind hier auf einer größeren Fläche verteilt. Mit der Folge, dass die Siliciumverbindungen in der Regel schwächer sind als die Kohlenstoffverbindung. Mit Kohlenstoff können Sie beständigere Kunststoffe erzeugen als mit Silicium.



**Tabelle 1.1:** Prinzipskizze Kohlenstoff- und Siliciumatom

Verbindungen mit Kohlenstoff nennt man organische Verbindungen. Und das Gebiet der Chemie, das sich mit Kohlenstoffverbindungen beschäftigt, nennt man Organische Chemie. Organisch deshalb, weil lebende Organismen aus Kohlenstoffverbindungen aufgebaut sind.

Polymere, die aus Silicium aufgebaut sind, kann man somit nicht zu den organischen Verbindungen zählen. Zur genaueren Abgrenzung werden solche Polymere als »siliziumorganische Verbindungen« oder auch »Organosilicium-Verbindungen« bezeichnet.

Mit der Erzeugung von Polymeren, organisch oder anorganisch, beschäftigt sich die Polymerchemie. Diese beschäftigt sich aber auch mit natürlichen Polymeren, wie Stärke oder Zellulose. Die Herstellung, also das Zusammensetzen von Monomeren aus den chemischen Elementen und von Polymeren aus den Monomeren, nennt der Chemiker **Synthese**.

Mit den physikalischen Eigenschaften der Polymere beschäftigt sich die Polymerphysik.

## Synthese von Polymeren

Und wie erzeugt man die langen Molekülketten? Dafür wurden (bislang) vier Verfahren entwickelt, und zwar die

- ✓ Polymerisation,
- ✓ Polyaddition,
- ✓ Polykondensation,
- ✓ Polyinsertion.

## Polymerisation

Bei der Polymerisation oder korrekter »Kettenpolymerisation« liegt als Ausgangsstoff ein Monomer vor, dessen Kohlenstoffatome per Doppelbindung miteinander verbunden sind, beispielsweise Ethylen.

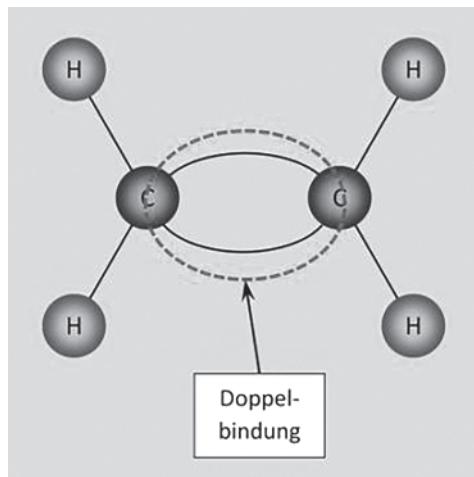


Abbildung 1.1: Ethylen-Monomer

Wie Sie in Abbildung 1.1 erkennen können, ist eine Doppelbindung nicht etwa doppelt so fest wie eine Einfachbindung, sondern im Gegenteil, weil die beiden Elektronenpaare sich aneinander vorbei quetschen müssen, steht diese Bindung unter Spannung und kann leichter aufgebrochen werden als eine Einfachbindung. Aufgebrochen wird diese Doppelbindung mithilfe eines **Initiators**. Als Initiatoren können unter anderem Peroxide verwendet werden. Das Besondere an ihnen ist: sie haben ein bis zwei Elektronen zu viel und sind somit negativ geladen. Diese »Kontaktstellen« sind quasi auf der Suche nach ihrer elektrochemischen Neutralisation, somit wirken die Peroxide sehr reaktionsfreudig auf andere Stoffe. Im Gegensatz zu **Katalysatoren**, die ebenfalls eine chemische Reaktion überhaupt erst ermöglichen, werden die Initiatoren bei der Reaktion verbraucht. Die Katalysatoren selber bleiben bei der Reaktion unbeteiligt.

Ein Peroxid-Molekül bricht also die Doppelbindung eines Ethylen-Moleküls auf. Sein einzelnes freies Elektron bildet mit *einem* Elektron eines Paares der Doppelbindung ein stabiles Elektronenpaar. Und was macht das andere Elektron? Das sucht sich das nächste Monomer und bricht dort die Doppelbindung auf und so weiter. Somit kommt die Reaktion theoretisch erst zum Stillstand, wenn keine Monomere mit Doppelbindungen mehr vorhanden sind.

Der Fachmann spricht hier von einer Kettenwachstums-Reaktion, da an die schon bestehenden Ketten die noch freien Monomere angehängt werden.

Nachteil dieses Verfahrens: Die schon bald entstehenden langen Makromoleküle behindern sich gegenseitig im Wachstum und schirmen gegenseitig die noch freien Monomere ab.

Die Reaktion kommt zum Stillstand, obwohl noch beträchtliche Mengen an freien Monomeren vorhanden sind. Da dies äußerst unpraktisch ist, wenn man wirtschaftlich, also mit hoher Ausbeute einen Kunststoff synthetisieren will, wurde ein anderes Verfahren entwickelt, nämlich die:

## Polyaddition

Hier verbinden sich im ersten Schritt nur zwei Monomere zu einem Dimer. Und an dieses Dimer hängt sich noch ein weiteres Monomer und es entsteht ein Trimer. Erst wenn sich mehr als drei Viertel der anfangs vorhandenen Monomere zu Trimeren verbunden haben, setzen sich diese zu den langen Polymerketten zusammen. Dabei kann es auch vorkommen, dass sich zwei schon gebildete längere Polymerketten zu einer noch längeren verbinden.

Daher der Name: Ungefähr gleich große Moleküle setzen sich zusammen, sie addieren sich. Im Gegensatz zur Polymerisation, wo an eine schon bestehende Kette immer mehr angehängt wird. Hier spricht der Fachmann von einer Stufenwachstums-Reaktion. Erst wenn eine Stufe erreicht ist (von Monomer zu Dimer, von dort zu Trimer), springt die Reaktion weiter zur nächsten Stufe.

## Polykondensation

Bei manchen Polyadditionen werden noch Nebenprodukte, meistens Wasser, freigesetzt. In diesem Fall haben wir es mit einer sogenannten Gleichgewichtsreaktion zu tun. Das bedeutet, die Reaktion kann in beide Richtungen verlaufen, wie in Abbildung 1.2 dargestellt.

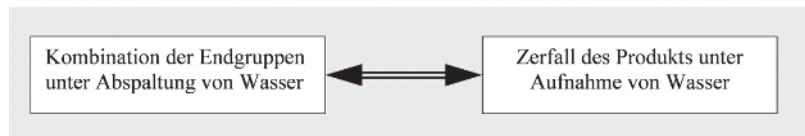


Abbildung 1.2: Gleichgewichtsreaktion

Da die Synthese des Polymers ja möglichst effektiv verlaufen soll, man will ja möglichst viel Kunststoff mit den eingesetzten Monomeren erzeugen, wird bei der Synthese das freigesetzte Wasser kontinuierlich entzogen, indem man es irgendwo außerhalb des Reaktors kondensieren lässt.



Aber später, beim Gebrauch des Kunststoffes in den unterschiedlichen Artikeln, kann es sein, dass dieser wieder dem Wasser oder, noch schlimmer, Wasserdampf ausgesetzt ist. Deswegen geben die Hersteller immer an, ob ihr Kunststoff wasser(-dampf)beständig ist oder nicht. Das Fachwort für die Auflösung oder Aufspaltung einer chemischen Verbindung mittels Wasser lautet **Hydrolyse**. Dementsprechend können Kunststoffe hydrolysebeständig sein oder eben nicht.

## Polyinsertion

Hier wird die Polymerkette mithilfe eines Katalysators gebildet. Dieser verbindet sich zunächst mit einem Monomer. Über eine weitere Reaktion schieben sich dann weitere Monomere in diese Verbindung hinein. Bekanntestes Beispiel dieser Methode ist das Ziegler-Natta-Verfahren zur Herstellung von Polyethylen und Polypropylen.

Polymere werden somit völlig zu Recht als *Kunststoffe* bezeichnet. Ausgehend von kleinsten Molekülen werden sie komplett künstlich hergestellt. Die Moleküle werden meistens aus Erdöl gewonnen.

## Aufbau der Polymerketten

Die Polymerketten können aus nur einem Typ Monomer aufgebaut sein. So ein Stoff wird **Homopolymer** bezeichnet.

Sie können aber auch aus zwei (oder noch mehr) verschiedenen Typen Monomer aufgebaut sein. Das wird dann als **Copolymer** oder **Heteropolymer** bezeichnet.



In der Kunststofftechnik ist eher der Begriff »Copolymer« geläufig. Handelt es sich um Biopolymere, beispielsweise Proteine oder auch die DNA, wird eher der Begriff »Heteropolymer« verwendet, um auf die Heterogenität der Zusammensetzung hinzuweisen.

Die Copolymere werden noch in verschiedene Klassen unterteilt. Hierzu eine kleine Übersicht:

Bei den Copolymeren ist auch eine Steigerung möglich, die Polymerketten können sogar aus drei unterschiedlichen Monomeren aufgebaut sein. Zur genaueren Abgrenzung werden solcherart aufgebaute Polymere als **Terpolymere** bezeichnet.

Ob es ein Homo- oder ein Heteropolymer ist, hängt von der Kunststoffsorte ab. Beispielsweise liegen die Kunststoffe Polyethylen, Polypropylen und Polyvinylchlorid als Homopolymer vor, Acryl-Butadien-Styrol oder Styrol-Acrylnitril sind hingegen Copolymere.

Das letzte Bild in Tabelle 1.2 stellt es bereits dar: an der Polymerkette kann noch seitlich etwas dranhängen! Bei diesen Anhängseln kann es sich um

- ✓ Seitenketten oder um
- ✓ Seitengruppen

handeln.

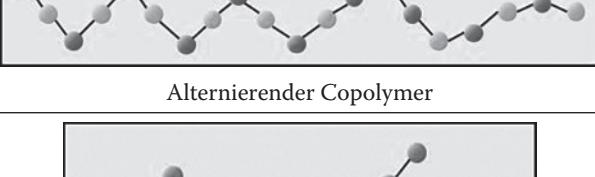
Bild + Bezeichnung	Beschreibung
	Die beiden Monomerarten sind unregelmäßig verteilt
	Entlang des Strangs nimmt die Anzahl der Monomere des einen Typs zu, die des anderen nimmt ab
	Jeder Typ Monomer bleibt unter sich, ein Streckenabschnitt nur der eine Typ, der andere Abschnitt nur der andere
	Die beiden Monomerarten sind gleichmäßig abwechselnd verteilt
	Der eine Typ Monomer ist aufgepropft und hängt als Verästelung an der Kette, die nur aus Monomeren des anderen Typs besteht (für sich genommen somit ein Homopolymer bildet)

Tabelle 1.2: Übersicht Copolymere

Die Polymere ohne Seitenketten werden auch **lineare Polymere** genannt. Und die Polymere mit Seitenketten werden auch als **verzweigte Polymere** bezeichnet.

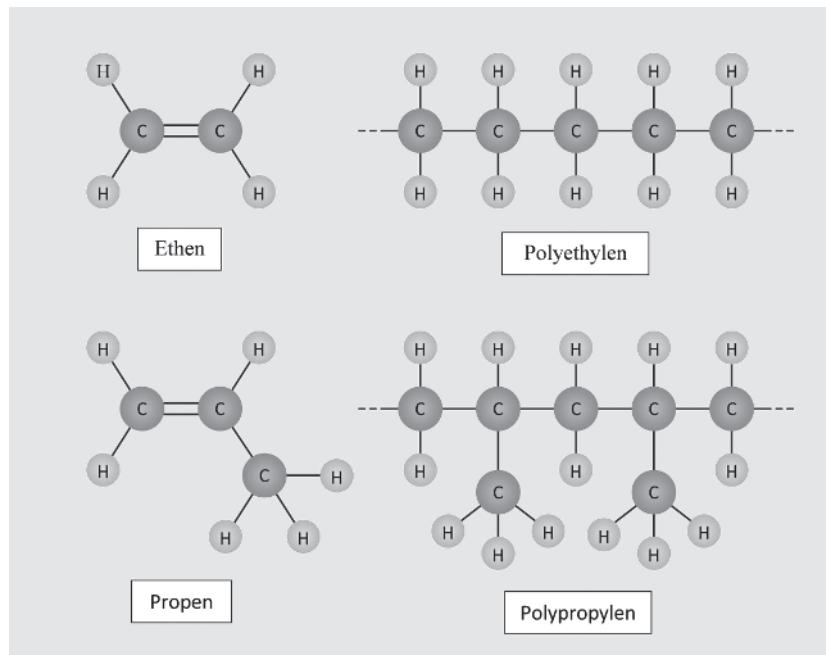
Und bei den Seitengruppen gibt es noch ein paar Fälle zu unterscheiden, die ich Ihnen im folgenden Unterpunkt vorstellen möchte.

## Eine Frage des Taktes

Zunächst ist danach zu unterscheiden, woher die Seitengruppen kommen. Entweder handelt es sich um ein anderes Monomer, das auf die Hauptkette aufgepropft wurde. Oder das Monomer, aus dem die Hauptkette aufgebaut ist, ist asymmetrisch. Wieso es dann

## 42 TEIL I Und jedem Zauber wohnt ein Anfang inne

Seitengruppen gibt, können Sie anschaulich am Beispiel Polypropylen erkennen (siehe Abbildung 1.3).



**Abbildung 1.3:** Atommodelle von Polyethylen und -propylen nebst deren Monomere

Das Monomer Propen hat an einer Ecke eine  $\text{CH}_3$ -Gruppe anstelle eines einfachen Wasserstoffatoms. Und diese Gruppe steht nach der Polymerisation seitlich von der Kette ab. Im Gegensatz dazu ist das ebenfalls abgebildete Ethen-Monomer symmetrisch. Somit ist die zugehörige Polyethylenkette ebenfalls symmetrisch aufgebaut (zumindest prinzipiell).

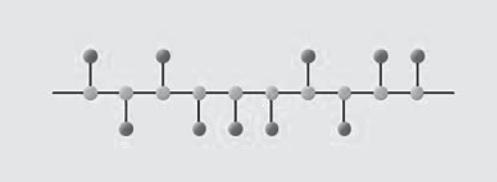
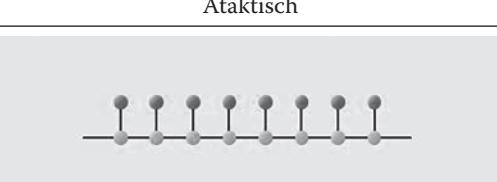
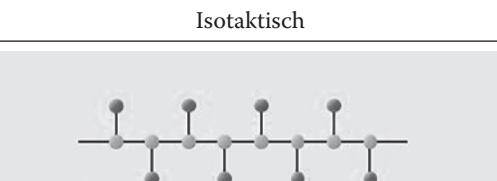
Die  $\text{CH}_3$ -Gruppe kann nun auf drei verschiedene Arten von der Hauptkette abstehen, eine entsprechende Übersicht finden Sie in Tabelle 1.3.

Der Oberbegriff für diese Verschiedenartigkeit lautet **Taktizität**. Eine andere Bezeichnung dafür lautet **Stereoregularität**.



Das Wort Taktizität kommt aus dem Altgriechischen. Taxis heißt wörtlich übersetzt Anordnung. Der Takt in der Überschrift hat damit nichts zu tun, der kommt aus dem Lateinischen und bezeichnet wörtlich übersetzt den Gefühlssinn.

Bei manchen Kunststoffen, beispielsweise Polypropylen und auch Polystyrol, können alle drei Formen auftreten. Und sie haben großen Einfluss auf die Materialeigenschaften. Bei anderen Kunststoffen existiert nur eine der drei Formen.

Bild + Bezeichnung	Beschreibung
	Die Seitengruppen sind zufällig verteilt
	Die Seitengruppen liegen alle auf einer Seite der Hauptkette
	Die Seitengruppen liegen schön abwechselnd an beiden Seiten der Hauptkette an

**Tabelle 1.3:** Übersicht Taktizität

## Was uns die Taktizität sagt

Die Taktizität haben die Polymerchemiker nicht einfach definiert, damit sie etwa eine Laune der Natur beschreiben könnten. Zum einen kann die Taktizität über die Wahl der Katalysatoren bei der Polymerisation beeinflusst werden. Zum anderen hat sie erheblichen Einfluss auf die Eigenschaften des Polymers. Je gleichmäßiger die Seitengruppen verteilt sind, desto eher wird das Polymer teilkristallin. Ansonsten wird es amorph. Zur Teilkristallinität beziehungsweise Amorphität mehr unter Punkt »Amorphität und Teilkristallinität«, hier ist erst mal nur wichtig zu wissen, dass in den kristallinen Bereichen die Bindungskräfte zwischen den Polymerketten stärker wirken als in den amorphen Bereichen. Polymere mit ataktischen Seitengruppen sind praktisch immer amorph. Das hat zur Folge, dass diese Polymere weicher und elastischer sind und bereits bei niedrigeren Temperaturen beginnen zu fließen als teilkristalline Polymere. Außerdem sind sie in der Regel transparent.

## Was es mit syndiotaktischen und isotaktischen Polymeren auf sich hat

Syndiotaktische und isotaktische Polymere sind härter, steifer, aber auch spröder und werden erst bei höheren Temperaturen fließfähig, im Gegensatz zu den ataktischen. Sie halten aber auch eine höhere Gebrauchstemperatur aus. Also sollte die Polymerchemie zusehen,

dass möglichst alle Polymere syndio- oder isotaktisch sind? Nein, denn auch hier gibt es ein Zuviel des Guten. Beispielsweise braucht rein isotaktisches Polystyrol zu lange zum Kristallisieren. Von daher wäre es für eine industrielle Verwertung nicht zu gebrauchen.

Im Gegensatz dazu kann Polypropylen nur in isotaktischer Form technisch verwertet werden. Nur in dieser Form bildet es einen stabilen Kunststoff. Da ein möglichst hoher Anteil an isotaktischen Polymerketten somit ein Merkmal hoher Qualität bei diesem Kunststofftyp ist, hat die Kunststoffindustrie extra den sogenannten **Isotaxie-Index** definiert. Dieser ist genormt in DIN 16774. Zur Bestimmung dieses Index wird Polypropylen in Heptan oder Xylol gekocht, dann wird gemessen, wieviel herausgelöst worden ist. Da isotaktisches Polypropylen unlöslich in diesen Flüssigkeiten ist, kann ja nur das ataktische Polypropylen herausgelöst worden sein. Der Index berechnet sich dann folgendermaßen:

$$X_C = \frac{m_{ges} - m_{atakt}}{m_{ges}} \cdot 100\%$$

**Formel 1.1:** Berechnung Isotaxie-Index

Mit:  $X_C$  = Isotaxie-Index

$m_{ges}$  = Gesamtmasse der Probe

$m_{atakt}$  = Masse des herausgelösten (=ataktischen) Anteils

Zu den verzweigten Polymeren mit aufgepflanzten Seitenketten ist noch zu erwähnen, dass auch so viele Seitenketten aufgepflanzt sein können, dass sich diese nicht mehr an die Hauptkette anlegen können, sondern sich von dieser wegstrecken müssen. Diese Form wird anschaulich **Polymerbürste** genannt.



Ich fasse zusammen. Handelt es sich bei den seitlichen Anhängseln an einer Hauptkette um Seiten-GRUPPEN dann spricht man von Taktizität, um die Art und Weise, wie diese Gruppen angeordnet sind, zu unterscheiden. Handelt es sich bei den Anhängseln um Seiten-KETTEN so spricht man von Verzweigungen.

## Was die Welt im Innersten zusammenhält

Jetzt sind also aus den Einzelmolekülen diese elend langen Polymerketten chemisch zusammengebaut worden. Aber was hält diese Ketten untereinander fest? Spaghetti flutschen doch auch aneinander vorbei? Ja, solange sie nicht anfangen, trocken zu werden und miteinander zu verkleben...

## Die Wärme macht

So ähnlich ist es auch mit den Polymeren. Da gibt es zunächst mal ganz schwache Bindungskräfte von den Monomeren der einen Kette rüber zu denen einer anderen Kette. Diese werden fachsprachlich Van-der-Waals-Kräfte genannt. Derartige »Klebe«-Verbindungen können relativ leicht mittels Zufuhr von Wärmeenergie gelöst werden, also durch Erhitzen. Das Material wird flüssig. Wenn anschließend die aufgenommene Wärmeenergie wieder abgegeben wird, können diese Bindungskräfte die Polymerketten wieder zusammenhalten. Das Material erstarrt wieder. Weil dieser Typ Polymer unter Zufuhr thermischer Energie plastisch verformbar wird, nennt man ihn **Thermoplast**.

## Härttere Verbindungen

Dann gibt es Polymerketten, deren Monomere sich über kleine Molekülbrücken chemisch miteinander verbinden. Meistens muss die Substanz, die diese Brücken bildet, extra untergemischt werden. Es bildet sich ein festes, hartes Netzwerk (siehe Abbildung 1.4).



Abbildung 1.4: Duromer, schematisch

Das lateinische Wort für »hart« lautet »durum«. Somit erhielt dieser Typ Polymer den Namen **Duroplast**, in Analogie zur Bezeichnung Thermoplast. Bei diesem Polymertyp ist aber nichts mehr plastisch. Nachdem sich diese Brücken gebildet haben, kann dieses Material nicht mehr aufgeschmolzen werden. Um das in der Bezeichnung zu berücksichtigen, wird dieser Polymer auch **Duromer** genannt.

## Ganz elastisch

Mit dem Vernetzen verhält es sich aber nicht so digital, entweder vernetzt = hart oder nicht vernetzt = weich. Das Ausmaß der Vernetzung kann in einem weiten Bereich kontinuierlich eingestellt werden. Wenn die Polymerketten nur weitmaschig miteinander vernetzt werden, dann können sich diese untereinander noch sehr wohl bewegen (siehe Abbildung 1.5).

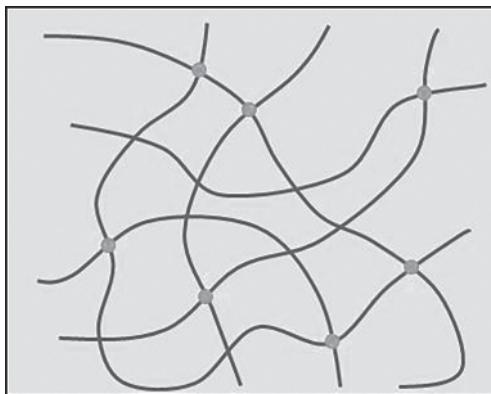


Abbildung 1.5: Elastomer, schematisch

Und da sind wir beim **Elastomer**. In Analogie zum Duromer. Oder einfach auf Deutsch Gummi. Und das ist eine eigene Welt, beziehungsweise genug Stoff für ein eigenes Buch...

Auch beim Gummi lassen sich die Vernetzungen, wenn sie einmal gebildet worden sind, nicht mehr lösen. Außerdem geht das mit dem Vernetzen nicht so schnell wie mit dem Erstarren bei den Thermoplasten. Und weil diese beiden Merkmale äußerst unpraktisch sind, haben sich die Makro-Chemiker Copolymeren einfallen lassen, die aus elastischen, gummiartigen Abschnitten und thermoplastischen Abschnitten bestehen. Die thermoplastischen Abschnitte sorgen für den Zusammenhalt, wie bei den reinen Thermoplasten, die elastischen Abschnitte sorgen für die gummiartige Elastizität. Diese Art Werkstoffe lässt sich im erwärmten Zustand verformen und ist im abgekühlten Zustand elastisch. Also war es naheliegend, diesem Werkstofftyp die Bezeichnung **thermoplastisches Elastomer** zu geben. Dies wäre ebenfalls genug Stoff für ein weiteres Buch.

Hier noch mal aufgelistet alle vier Strukturformen von Polymeren, zusammen mit der Art der inneren Bindung:

Strukturform	Innere Bindung
Thermoplast (Plastomer)	Intermolekulare Kräfte
Duromer (Duroplast)	Viele kovalente Vernetzungsstellen
Elastomer (Gummi)	Wenige kovalente Vernetzungsstellen
Thermoplastisches Elastomer	Intermolekulare Kräfte

Tabelle 1.4: Strukturformen von Polymeren



Auch die DIN 7724 teilt die Polymere in diese vier Gruppen ein, allerdings auf Basis der Temperaturabhängigkeit ihres mechanischen Verhaltens. Über die Norm hinaus werden innerhalb einer Gruppe verschiedene Sorten unterschieden, zum Beispiel die Sorte der Polyolefine. Und innerhalb einer Sorte werden noch verschiedene Typen unterschieden. Beim Beispiel Polyolefine sind dies Polyethylen und Polypropylen.

# Amorphität und Teilkristallinität

*Ordnung ist nur das halbe Leben*

Im Unterpunkt »Eine Frage des Taktes« habe ich geschrieben, das Polymere **teilkristallin** sein können. Das hat Sie vielleicht ebenso stutzig gemacht wie mich, als ich das erste Mal von teilkristallinen Kunststoffen hörte. Bis dato waren Kristalle für mich diese schönen, bunten Steine. Auf jeden Fall sind doch Kristalle hart und Kunststoffe im Vergleich dazu weich?

In der Chemie hat das Wort **Kristall** eine andere Bedeutung als in der Umgangssprache. Alle Stoffe, deren Moleküle (oder Ionen oder Atome) in einer gleichmäßigen, sich wiederholenden Struktur angeordnet sind, sind für den Chemiker Kristalle. Da sich diese Struktur über das gesamte Material wiederholt, wird auch gesagt, im Material liegt eine **Fernordnung** vor.

Im Gegensatz dazu besagt **Nahordnung**, dass nur nahe um die einzelnen Moleküle (Ionen, Atome) herum, das heißt nur bis zum nächsten Nachbarn, eine Struktur erkennbar ist. Solche Stoffe werden amorphe Stoffe genannt.

In Thermoplasten halten die schwachen Van-der-Waals-Kräfte die Polymerketten aneinander. Diese Kräfte wirken aber nicht punktuell oder abschnittsweise, sondern entlang der gesamten Kette. Wenn zwei Ketten erst mal an einer Stelle über diese Kräfte verbunden sind, dann können sie sich weiter zusammenschließen, ähnlich wie die beiden Zahnreihen eines Reißverschlusses. Und wenn erst mal ein Doppelstrang vorliegt, werden sich diesem weitere Polymerketten dazu gesellen. Die besagte Fernordnung über mehrere Moleküle hinweg entsteht. Das Polymer kristallisiert.

Nur Thermoplaste können amorph oder teilkristallin sein. In Duromeren und Elastomeren sind die Ketten über die Vernetzungsstellen miteinander verbunden und die noch freien Abschnitte erzwungenermaßen immer amorph. Die Van-der-Waals-Kräfte sind viel zu schwach, um da noch etwas auszurichten (im doppelten Wortsinn). Die Materialeigenschaften dieser beiden Polymertypen werden maßgeblich vom Vernetzungsgrad geprägt.

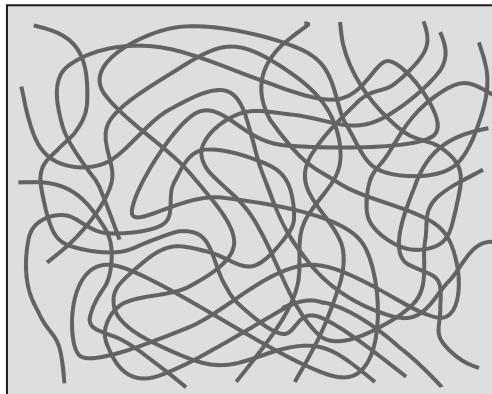


Das Wort Kristall kommt aus dem Griechischen. »Krystallos« heißt auf Deutsch Eis. Die alten Griechen haben Quarz-Kristalle für Brocken aus Eis gehalten, das bei so tiefen Temperaturen gefroren ist, dass es nicht mehr schmelzen kann.

## Amorphe Thermoplaste

Auch das Wort amorph kommt aus dem Altgriechischen, »morphos« bezeichnet die Gestalt und das »a« davor ist eine Negation. Also bedeutet »ámorphos« wörtlich übersetzt gestaltlos.

Viele Verzweigungen hindern die Polymerketten daran, sich zu ordnen. Es kann sich kein regelmäßiges Muster bilden (siehe Abbildung 1.6). Nur eine Nahordnung ist erkennbar, aber keine Fernordnung.



**Abbildung 1.6:** Amorpher Thermoplast, schematisch

Dieses Durcheinander bewirkt eine geringe Packungsdichte, deswegen haben die amorphen Bereiche ein geringeres spezifisches Gewicht als die teilkristallinen. Hier als Beispiel die Dichtewerte von Polyethylen in Abhängigkeit vom Kristallisationsgrad:

Polymerart	Kristallisationsgrad in %	Dichte in g/cm <sup>3</sup>
Polyethylen LLD	10 bis 50	0,87 bis 0,94
Polyethylen LD	40 bis 50	0,915 bis 0,935
Polyethylen HD	60 bis 80	0,94 bis 0,97

**Tabelle 1.5:** Dichte in Abhängigkeit vom Kristallisationsgrad

Beim Erwärmen von amorphen Thermoplasten findet kein Phasenübergang statt. Das Material wird einfach immer weicher, bis es flüssig ist (siehe Abbildung 1.7).

Ab Übergangsbereich nimmt die Temperatur mit zugeführter Wärme nicht mehr so stark zu wie vorher. Siehe dazu auch den Unterpunkt »Glasübergangstemperatur« in Kapitel 9, »Thermische Eigenschaften«.

Amorphe Thermoplaste sind in der Regel durchsichtig. Sie sind nur mäßig beständig gegenüber Chemikalien. Aber unterhalb des Glasübergangs sind sie sehr hart und fest. Somit bieten sie eine gute Dimensions-Stabilität und verziehen sich nur wenig.

Viel mehr gibt es nicht zu sagen. Der Bereich der amorphen Thermoplaste ist überschaubar. In der Hauptsache können nur Thermoplaste mit ataktischen Seitengruppen amorph sein. Hier ein paar Beispiele: Polymethylmethacrylat (PMMA) und Polystyrol (PS), beide durchsichtig. Des Weiteren gibt es Thermoplaste, deren Moleküle derart komplex sind, dass sie nicht kristallisieren können. Ein Beispiel hierfür ist Polycarbonat (PC), ebenfalls durchsichtig. Auch Polymere mit stark verzweigten Seitenketten sind immer amorph. Ein Beispiel hierfür ist Silikon.

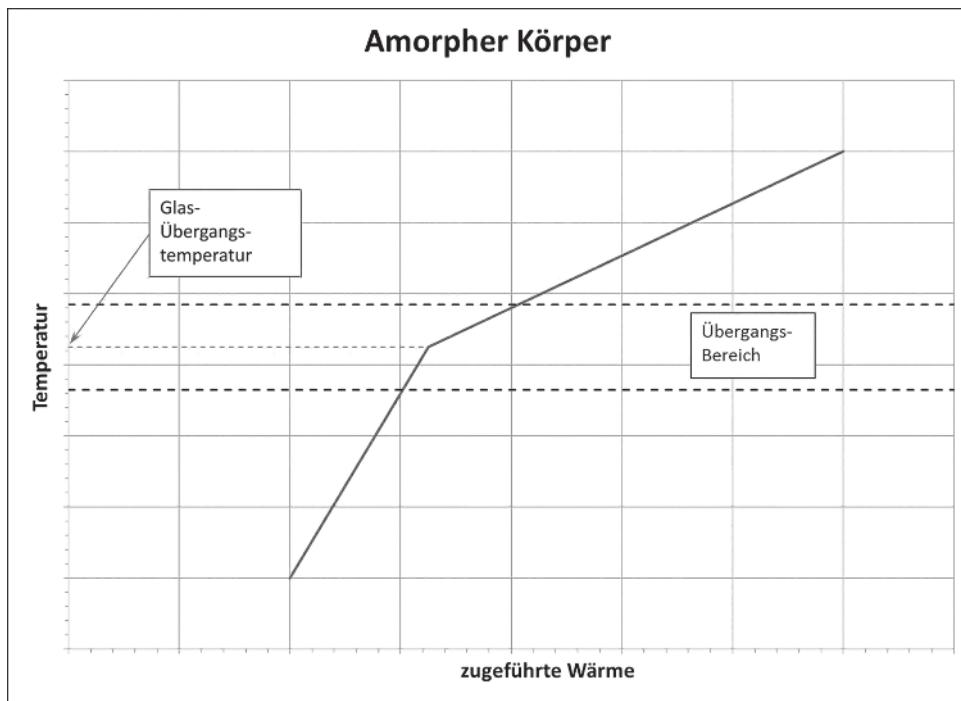


Abbildung 1.7: Temperaturverlauf über zugeführte Wärme bei amorphen Thermoplasten

## Teilkristalline Thermoplaste

Haben die Polymerketten nur wenig bis gar keine Seitengruppen, welche zudem noch regelmäßig angeordnet sind, dann können sie sich, zumindest abschnittsweise, aneinander ausrichten, wie Abbildung 1.8 veranschaulicht.

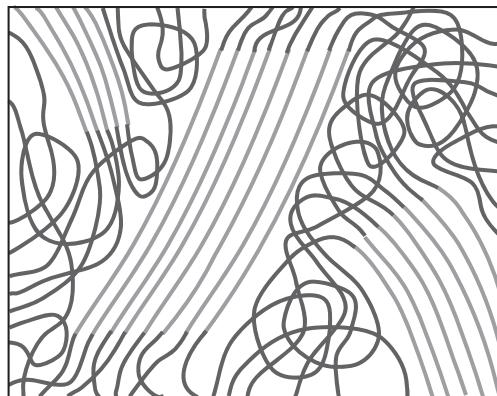


Abbildung 1.8: teilkristalliner Thermoplast, schematisch

Die Abschnitte, die aneinander liegen, müssen nicht von verschiedenen Polymerketten stammen. Es kann sich auch eine Polymerkette so schön ordentlich zusammenfalten. Sie können es, aber warum machen sie es auch? Die Ketten könnten ja weiterhin ungeordnet verknäult bleiben.

Je dichter die Monomere aneinander liegen, desto weniger sind die Van-der-Waals-Kräfte zwischen ihnen »gespannt«. Deswegen »wollen« sich die Ketten von selber eng aneinanderlegen. Das gelingt aber nicht vollständig, weil die Polymerketten sehr lang sind. Stellen Sie sich diese nicht als Spaghetti vor, sondern besser als ein Faden-Wirrwarr. Einzelne Verschlaufungen darin lösen sich ja auch nicht von selber auf. Und diese behindern im Polymer ein weiteres Ausrichten der Ketten. Somit kristallisiert das Polymer nicht vollständig, sondern nur zum Teil. Er wird *teil-kristallin*. So ein parallel ausgerichteter, eng zusammenliegender Abschnitt von Polymerketten wird **Kristallit** genannt. Er ist typischerweise zwischen fünfzehn bis einhundert Nanometer groß. Zwischen den Kristalliten bleiben weiterhin ungeordnete, amorphe Bereiche erhalten.

### Wie entstehen die Kristallite?

Jedes Kristallit-Wachstum benötigt einen Kristallisationskeim als Ursprung. Und welche Stoffe taugen als Keim für eine Kristallisation?

Kristallite können sich bilden, wenn schon ein paar Ketten zufällig passend zueinander liegen. Solange das Material geschmolzen ist, muss so ein Keim aber eine gewisse Größe haben, damit er nicht aufgrund der thermischen Bewegung der Moleküle sofort wieder zerfällt.

Kristallite bilden sich aber auch an Fremdkörpern in der Schmelze. Diese Fremdkörper können sein:

- ✓ Verunreinigungen,
- ✓ eingemischte Farbstoffe,
- ✓ weitere Zuschlagstoffe,
- ✓ absichtlich hinzugefügte Nukleierungsmittel.

Beliebte, weil erfolgreiche Nukleierungsmittel, sind Metallsalze von organischen Säuren.

### Bleibt es bei den Kristalliten oder kommt noch mehr?

An die Kristallite legen sich weitere Polymerketten-Schleifen an. Es entsteht ein langes Band, welches aufgrund der eng zusammenliegenden Schleifen aussieht wie eine **Lamelle** und dementsprechend so benannt wird.

Ein Keim ist ja nicht mit der Bildung einer Lamelle vollauf beschäftigt. Vielmehr wachsen von diesem Keim aus strahlenförmig, radial ringsum Lamellen. Wie die Speichen eines Rades. Es bildet sich ein sogenannter **Sphärolith** (siehe Abbildung 1.9).

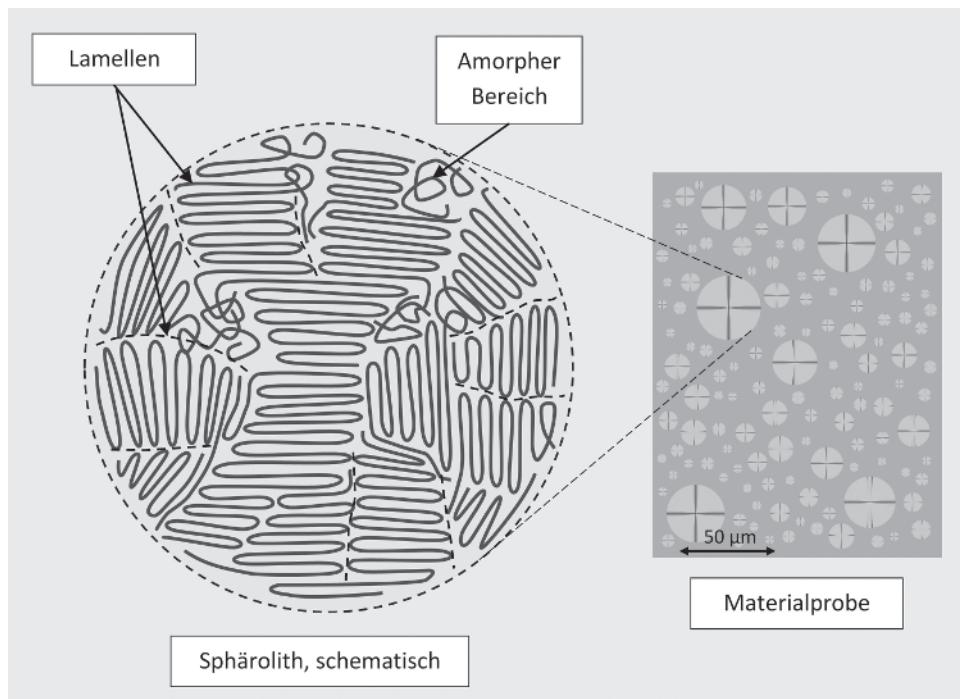


Abbildung 1.9: Sphärolith, schematisch



Wieder ein alter Griech. Das Wort »Sphärolith« setzt sich zusammen aus dem altgriechischen »Sphaira« für Kugel und »lithos«, auf Deutsch Stein. Noch eine Info: Ein Sphärolith ist kein Kristall mehr. Er ist »nur« noch eine Anhäufung, ein Aggregat von kleinen kristallinen Bereichen.

Sogar innerhalb eines Sphäroliths bleiben einige Bereiche amorph. Somit bleibt das Material weiterhin nur *teil*-kristallin, auch wenn die Probe ausschließlich aus Sphärolithen besteht.

## Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit

Weiter vorne hieß es, Kristallite bilden sich auch von selber an zufällig passend zueinander liegenden Kettenabschnitten. Welche aber in der Schmelze sofort wieder zerfallen, wenn dieser Keim nicht groß genug ist. Daraus folgt: bei schnellem Abkühlen bilden sich viele kleine Sphärolithe. Bei langsamem Abkühlen bilden sich wenige große Sphärolithe. Dadurch wird das Material aber brüchig und spröde. In der Regel will man ein gleichmäßiges, festes Gefüge haben. Das wird erreicht durch viele kleine Sphärolithe. Und eben um das zu erreichen, ohne sich mit der Abkühlgeschwindigkeit zu sehr einschränken zu müssen, mischt man das Nukleierungsmittel unter.

Der Grad der Kristallinität gibt den Massenanteil der kristallinen Bereiche an. Sie können es sich bestimmt schon denken, der Grad der Kristallinität ist von Kunststoff zu Kunststoff verschieden. Hier ein paar typische Werte:

Polymerart	Typischer Kristallisationsgrad in %
Polyamid, PA	35 bis 45
Polyoxymethylen, POM	90
	75
Polyethylenterephthalat, PET	30 bis 40
Polybutylenterephthalat, PBT	40 bis 50
Polytetrafluorethylen, PTFE	60 bis 80
Polypropylen, PP	Isotaktisch
	Syndiotaktisch
	Ataktisch
Polyethylen	Hohe Dichte, PE-HD
	Niedrige Dichte, PE-LD
	70 bis 80
	45 bis 55

**Tabelle 1.6:** Kristallisationsgrade einiger Kunststoffe

Da das einfallende Licht an den Kristalliten gebrochen und gestreut wird, haben teilkristalline Thermoplaste eine weiße Eigenfarbe. Und da die Polymerketten so dicht zusammengepackt sind, bieten sie wenig Angriffsfläche für andere Moleküle. Somit verfügen die teilkristallinen Thermoplaste über gute Chemikalienbeständigkeit. Des Weiteren bieten sie hohe Verschleißfestigkeit und gutes Gleitverhalten an.

## Bestimmung der Kristallinität

Die Polymerchemiker haben im Laufe der Zeit eine Reihe von Methoden zur Messung der Kristallinität entwickelt, die sich stark voneinander unterscheiden. Allerdings unterscheiden sich auch die Messergebnisse zum Teil stark.



Ein Vergleich der Kristallinität verschiedener Thermoplaste ergibt nur Sinn, wenn das Messverfahren stets das Gleiche ist!

Hier erst mal eine Übersicht der unterschiedlichen Messmethoden:

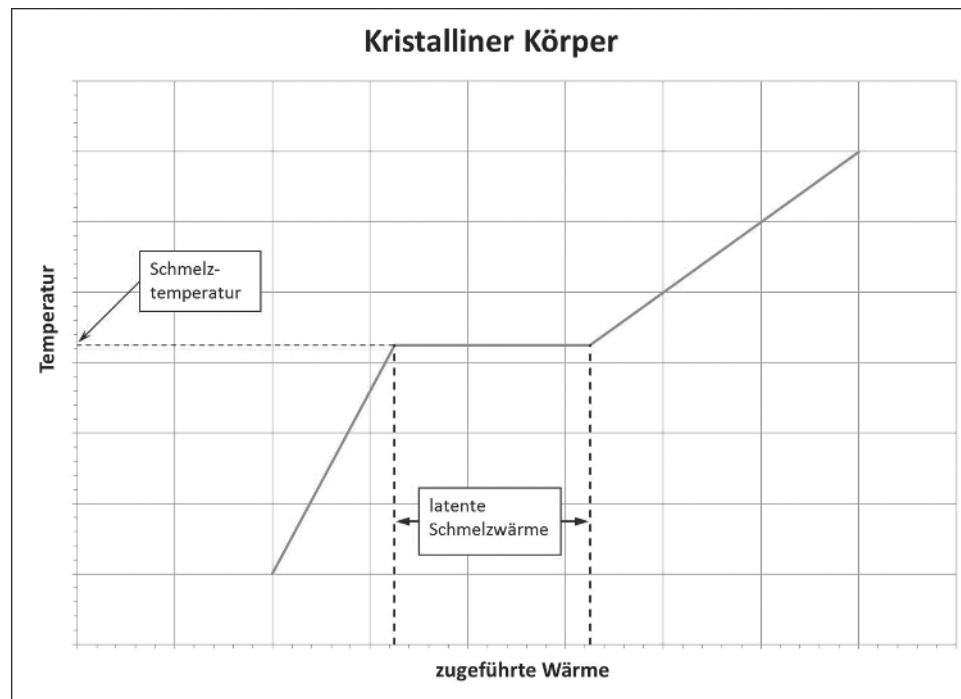
- ✓ Differential Scanning Calorimetry (DSC)
- ✓ Röntgenbeugung
- ✓ Dichtemessung
- ✓ Infrarot-Spektroskopie
- ✓ Kernresonanz-Spektroskopie
- ✓ Polarisationsmikroskopie

Im Folgenden erfahren Sie Näheres über die Verfahren. Fangen wir an mit dem Verfahren, welches am häufigsten eingesetzt wird.

## Differential Scanning Calorimetry (DSC)

Auf Deutsch: dynamische Differenz Kalorimetrie oder dynamische Differenz-Thermoanalyse. Diese Methode nutzt aus, dass zum Aufschmelzen der Kristallbereiche Energie erforderlich ist, zusätzlich zur Energie zum Aufheizen des Körpers.

Ist die Schmelztemperatur erreicht, nimmt die Temperatur trotz weiter zugeführter Wärmeenergie solange nicht weiter zu, bis alle Kristallbereiche geschmolzen sind. Erst dann steigt die Temperatur weiter (siehe Abbildung 1.10).



**Abbildung 1.10:** Temperaturverlauf über zugeführte Wärme bei (teil-)kristallinen Werkstoffen

## 54 TEIL I Und jedem Zauber wohnt ein Anfang inne

Auch hier ist die Schmelztemperatur nicht nur ein Punkt, sondern ein Bereich. Begründung: die Kristalle sind ja nicht alle gleich groß. Die kleineren Kristalle schmelzen schon bei etwas niedrigerer Temperatur.



Wer es genauer wissen will, die Zusammenhänge zwischen Temperatur, zugeführter Energie und Phase (fest oder flüssig) beschreibt das Adam-Gibbs-Modell.

Wie dem auch sei, der Anteil der zugeführten Energie, welcher nicht zur Temperaturerhöhung, sondern nur zum Aufschmelzen der Kristalle benötigt wird, kann gemessen werden. Daraus kann der Kristallisationsgrad nach folgender Formel berechnet werden:

$$x_C = \frac{\Delta H}{\Delta H_0} \cdot 100\%$$

**Formel 1.2:** Kristallisationsgrad als Funktion der Schmelzenthalpie

Darin bedeuten:

- ✓  $x_C$  – Kristallisationsgrad
- ✓  $\Delta H$  – Schmelzenthalpie der Probe
- ✓  $\Delta H_0$  – Schmelzenthalpie vollständig kristallisierten Polymers

Der letztgenannte Vergleichswert muss also bekannt sein.

Die Schmelzenthalpie berechnet sich aus der zugeführten Wärme folgendermaßen:

$$\Delta H = m \cdot Q$$

**Formel 1.3:** Schmelzenthalpie als Funktion der zugeführten Wärme

Mit den weiteren Formelzeichen:

- ✓  $Q$  – zugeführte Wärmeenergie
- ✓  $m$  – Masse des Probenkörpers

Da Sie, lieber Leser, sehr scharfsinnig und aufmerksam sind (sonst hätten Sie ja gar nicht erst dieses Buch gekauft), möchten Sie jetzt sicher anmerken »Halt, Stopp, eine reale Kunststoffprobe besteht ja nicht nur aus dem Polymer. Es sind doch noch andere Stoffe eingemischt!« Richtig. Und deren Massenanteil an der Probe sowie deren spezifische Wärmekapazität ist ja bekannt. Somit kann leicht berechnet werden, wieviel diese Stoffe wegschlucken von der zugeführten Wärmeenergie.

Auch für die DSC gibt es eine Norm, die »DIN EN ISO 11357 Kunststoffe – Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC)«. Ein weiteres Verfahren ist die Röntgenbeugung, die im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

## Röntgenbeugung

Auch Debye-Scherrer-Verfahren genannt. Hierbei wird die Probe mit einem Röntgenstrahl durchleuchtet (siehe Abbildung 1.11).

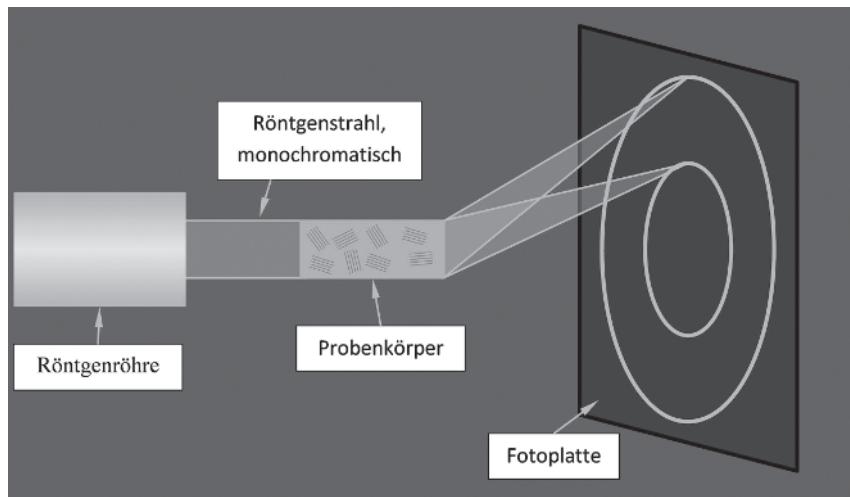


Abbildung 1.11: Debye-Scherrer-Verfahren

Röntgenstrahlen werden beim Durchgang durch das Material gebeugt. Dabei kommt es zu Interferenz, teilweise verstärken sich die überlagerten, gebeugten Strahlen, teilweise löschen sie sich aus. Hinter der Probe ist eine Fotoplatte angebracht, welche das typische Interferenzbild aufzeichnet. Diese Abbildung wird **Diffraktogramm** genannt (siehe Abbildung 1.12).

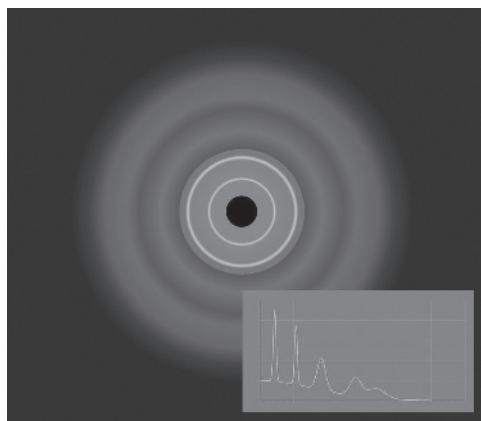


Abbildung 1.12: Diffraktogramm

Im amorphen Bereich zeigt das Diffraktogramm eine sehr breite Glockenkurve. Im kristallinen Bereich ist die Verteilung der Intensität sehr viel schmäler. Dort sieht der Verlauf nicht

mehr aus wie eine Glocke, sondern wie eine Spitze. Aus der Höhe der Spitzen und der Breite der Glocken kann die Kristallinität berechnet werden.

Viel einfacher macht man es sich mit der:

## Dichtemessung

Eingangs haben Sie ja bereits gelesen, dass die Dichte im kristallinen Bereich höher ist, aufgrund der höheren Packungsdichte.

Der Grad der Kristallinität  $X_c$  berechnet sich dann nach folgender Formel:

$$X_c = \frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_c - \rho_a} \cdot 100\%$$

**Formel 1.4:** Kristallisationsgrad als Funktion der Dichte

Darin bedeuten:

- ✓  $X_c$  – Kristallisationsgrad
- ✓  $\rho_p$  – Dichte der Polymer-Probe
- ✓  $\rho_a$  – Dichte der amorphen Bereiche
- ✓  $\rho_c$  – Dichte der kristallinen Bereiche

Auch hier muss zur Berechnung die Dichte der kristallinen Bereiche und darüber hinaus auch die der amorphen Bereiche bekannt sein.

Diese Berechnung liefert nur brauchbare Ergebnisse, wenn es sich um einen Homopolymer oder einen höchstens einphasigen Copolymer handelt. Auf jeden Fall aber nimmt die Dichte im amorphen Bereich mit der Zeit zu. Bei Kunststoffen mit Füllstoff liefert dieses Verfahren überhaupt keine brauchbaren Ergebnisse.

Das nächste Verfahren ist die:

## Infrarotspektroskopie

Hierbei wird die Probe mit infrarotem Licht in der Bandbreite von 2,5 bis 25  $\mu\text{m}$  durchleuchtet. Im transmittierten Licht fehlen dann einige Wellenlängen, erkennbar als schwarze Streifen. Aufgrund der regelmäßigen Anordnung der Polymerketten in den kristallinen Bereichen werden diese Wellenlängen absorbiert. Durch Vergleich mit den Spektren von bekannten Materialien kann die Kristallinität bestimmt werden. Diese Referenzspektren werden in kommerziell erhältlichen Datenbanken zur Verfügung gestellt.

Dass dieses Verfahren aber bei Weitem nicht bei allen teilkristallinen Polymeren funktioniert, können Sie schon daran erkennen, dass die zugehörige Norm nur eine bestimmte Kunststoffsorte betrifft.

Die DIN 53742 (1971-09) definiert das infrarotspektrographische Verfahren nur für die Bestimmung des Vinylacetat-Gehalts von Copolymeren aus Vinylchlorid und Vinylacetat.

Noch ein Hightech-Verfahren ist die:

## Kernresonanzspektroskopie

Die Protonen in den Atomkernen der Polymerketten sind in den kristallinen und in den amorphen Bereichen unterschiedlich beweglich. Dies beeinflusst die Form und Verteilung der Linien im NMR-Spektrum (NMR, englisch für nuclear magnetic resonance). Allerdings benötigen Sie für die Auswertung eines NMR-Spektrums eine umfangreiche Sachkenntnis.

Und wenn Sie über keine einzige der oben aufgeführten Messapparaturen verfügen, sondern nur ein Mikroskop zur Hand haben, bleibt Ihnen noch die:

## Polarisationsmikroskopie

So ein teilkristalliner Thermoplast besteht ja wie gesagt aus Sphärolithen und amorphen Bereichen dazwischen.

Die amorphen Bereiche und die Sphärolithe brechen einen Lichtstrahl, der durch das Material geht, unterschiedlich stark. Diese Eigenschaft wird **Formdoppelbrechung** genannt.

Und die Sphärolithe bestehen aus parallel ausgerichteten Polymerketten-Abschnitten. Diese brechen ihrerseits durchgehendes Licht unterschiedlich stark, je nachdem, ob die Schwingungsebenen der Lichtwellen tangential oder radial auf so einen Sphärolith treffen. Diese Eigenschaft wird **Eigendoppelbrechung** genannt.

Die Doppelbrechung bewirkt Folgendes: der Lichtstrahl, der durch die Probe geht, wird in zwei Strahlen getrennt, den ordentlichen und den außerordentlichen Strahl. Die Schwingungsebenen der Lichtwellen der beiden Strahlen stehen senkrecht aufeinander.

Das bedeutet auch, bei den Lichtwellen (des einfallenden Lichts) mit Schwingungsebene dazwischen wird diese in eine der beiden Ebenen gedreht.

Optisch isotrope Materialien brechen das Licht immer gleich, egal, ob die Schwingungsebenen des einfallenden Lichts längs oder quer zur Probe auftreffen. Hier wird der einfallende Lichtstrahl nicht in zwei Strahlen aufgeteilt. Amorphe Thermoplaste bestehen aus wirrem Durcheinander von Polymerketten, die haben keine Orientierung in irgendeine Richtung. Sie sind somit optisch isotrop.



Für das amorphe, isotrope Material gibt es aber noch eine dritte Art der Doppelbrechung, die Spannungsdoppelbrechung. Wird eine Probe aus solchem Material durch mechanische Spannungen verformt, tritt ebenfalls Doppelbrechung auf.

Ein Polarisationsmikroskop ist ein »ganz normales« Mikroskop, lediglich ergänzt um zwei Polarisationsfilter. Der erste Filter befindet sich direkt vor der Lichtquelle. Somit trifft auf die Probe polarisiertes Licht, Licht, dessen Lichtwellen in Ebenen schwingen, die alle parallel zueinander sind.

## 58 TEIL I Und jedem Zauber wohnt ein Anfang inne

Der zweite Polarisationsfilter befindet sich hinter der Probe. Oft wird er einfach auf das Okular gelegt. Wenn die Durchlass-Richtung dieses Filters senkrecht zur Durchlass-Richtung des ersten Filters steht, dann kommt überhaupt kein Licht mehr durch. Das Bild im Okular ist schwarz.

Und bei isotropen Materialien bleibt das Bild schwarz, da diese die Schwingungsebenen ja nicht drehen können.

Aber drehen Sie eine Probe eines teilkristallinen Thermoplasts unter dem Mikroskop, bis die Ebenen des Materials schräg zu der des einfallenden Lichts stehen, dann kann die Probe auch dieses polarisierte Licht in seine eigenen beiden materialspezifischen Ebenen zerlegen. Und diese stehen schräg zum ersten aber auch zum zweiten Filter. Somit kann jetzt doch etwas Licht bis zum Okular durchkommen. Das Bild wird etwas heller.

Die amorphen Bereiche sind isotrop, die drehen keine Ebenen. Das bedeutet, je größer der Anteil der kristallinen Bereiche ist, desto mehr Anteile des Lichts werden gedreht, desto heller wird das Bild.

Auf diese Art und Weise kann die Kristallinität abgeschätzt werden.



Drehen Sie die Probe, bis die Ebene des einfallenden polarisierten Lichts parallel zu einer der beiden Ebenen des Materials steht, dann wird diese Lichtebebe nicht weiter gedreht und das Bild im Okular bleibt dunkel. Das Material verfügt über zwei senkrecht zueinander stehende Ebenen. Eine Ebene um  $180^\circ$  gedreht ist ja wieder parallel zur Ausgangslage, also gibt es vier Stellungen im Winkel  $90^\circ$  zueinander, wo das Bild auch bei teilkristallinen Thermoplasten dunkel bleibt.