



THERMOPLASTEN

Marie RICHARTZ

Classe: 6C6

Maison: Larochette

Année scolaire: 2019-2020

Tutrice: Madame Laurence TICHON

Inhalt

Vorwort.....	3
1 Einleitung in das Thema	4
2 Die Plastikproblematik	5
3 Organische Verbindungen.....	6
3.1 Aufbau.....	6
3.1.1 Gesättigte Verbindungen	7
3.1.2 Ungesättigte Verbindungen	7
3.1.3 Aromatische Verbindungen.....	8
3.2 Die verschiedene Darstellungsmöglichkeiten von organischen Stoffen	8
3.2.1 Die Elektronenformel	9
3.2.2 Die Valenzstrichformel	9
3.2.3 Die Keilstrichformel.....	9
4 Aufbau und Herstellung von Thermoplasten	10
4.1 Die Polymerisation	10
4.2 Taktizität - Anordnung der Monomere (isotaktisch, syndiotaktisch und ataktisch)	11
5 Recycling von Thermoplasten	12
5.1 Die Definition von "Recycling"	12
5.2 Unterschiedliche "Recycling"-Methoden von Thermoplasten (im weiteren Sinne)	13
5.2.1 Werkstoffliches Recycling.....	13
5.2.2 Chemisches Recycling.....	14
5.2.3 Energetisches "Recycling"	15
5.2.4 Thermisches Recycling	15
5.2.5 Aktuelle Recyclingforschungen und Diskussionen.....	16
6 Ausgewählte Thermoplasten, Charakterisierung und spezifisches Recyclingpotential	16
6.1 Polypropylen (PP).....	16
6.1.1 Geschichte.....	17
6.1.2 Aufbau.....	17
6.1.3 Eigenschaften	18
6.1.4 Verwendung.....	18
6.1.5 Recycling	19
6.2 Polystyrol (PS)	20
6.2.1 Geschichte.....	20
6.2.2 Aufbau.....	20
6.2.3 Eigenschaften	21
6.2.4 Verwendung.....	21

6.2.5	Recycling	22
6.3	Polyvinylchlorid (PVC)	22
6.3.1	Geschichte.....	22
6.3.2	Aufbau.....	23
6.3.3	Eigenschaften	23
6.3.4	Verwendung	24
6.3.5	Recycling	24
6.4	Polyethylenterephthalat (PET)	25
6.4.1	Geschichte.....	25
6.4.2	Aufbau.....	25
6.4.3	Eigenschaften	26
6.4.4	Verwendung	26
6.4.5	Recycling	27
7	Schlussfolgerung	28
8	Literatur- und Quellenverzeichnis	29
9	Abbildungsverzeichnis.....	31

Vorwort

Durch die aktuelle Plastikproblematik rund um die Erde und ihre breite Thematisierung in der Presse habe ich mich gefragt, wie Plastik überhaupt aufgebaut ist, welche unterschiedlichen Arten Plastik es gibt, wie die unterschiedlichen Recyclingmethoden funktionieren, wie effizient und umweltfreundlich diese sind. Ich möchte die Fragenstellungen größtenteils auf chemischer Ebene beantworten, allerdings interessieren mich auch Statistiken, wie z.B. die Menge an produziertem Plastik im Jahr und wieviel Prozent davon recycelt werden und auch die Behandlung der Problematik in der Gesellschaft und der Politik. Daher werde ich diese Themenbereiche nicht ausschließen.

1 Einleitung in das Thema

Thermoplasten sind eine von drei unterschiedlichen Kunststoffarten. Sie unterscheiden sich durch ihre thermoplastische Eigenschaft, also die Eigenschaft in einem bestimmten Temperaturbereich verformbar zu sein, von den Duroplasten und den Elastomeren, den anderen zwei Arten. Alle Kunststoffe können einer dieser drei Arten zugeordnet werden. Thermoplasten sind wegen ihrer Verformbarkeit die am meisten produzierte Kunststoffart.

Die verschiedenen Thermoplasten können durch ihre unterschiedlichen chemischen, mechanischen und thermischen Eigenschaften auf drei verschiedene Art und Weisen eingeteilt werden.

In der weiter unten abgebildeten Grafik handelt es sich um die mechanische Einteilung, wie sie von Ingenieuren verwendet wird. In dieser sind unten die Standardthermoplasten abgebildet, also die Thermoplasten, die, im Gegensatz zu den weiter oben abgebildeten technischen Thermoplasten bzw. den an der Spitze abgebildeten Hochleistungsthermoplasten, nicht auf komplexere Eigenschaften spezialisiert sind, und daher in viel größeren Mengen hergestellt werden¹.

Hier der bereits erwähnte Überblick mit der Einteilung der Thermoplasten nach mechanischen Eigenschaften:

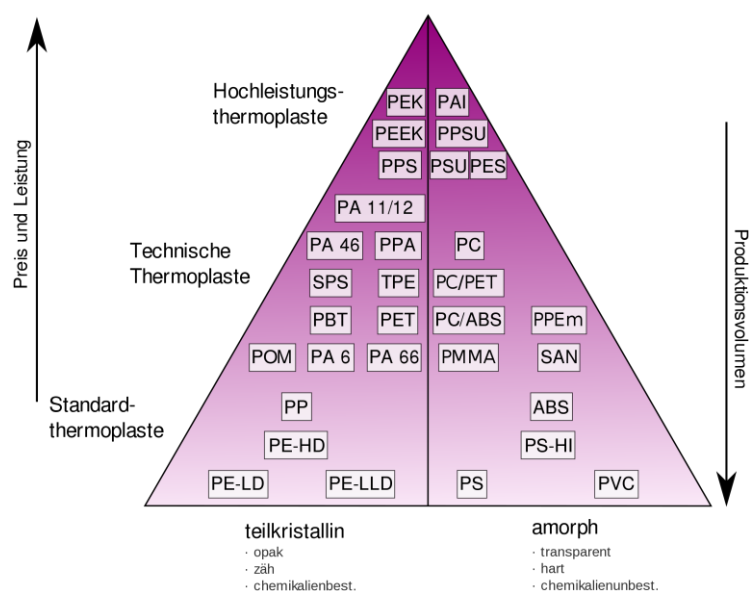


Abbildung 1: Mechanische Einteilung von Thermoplasten ²

Da ich mich in dieser Arbeit mit Materialien auseinandersetzen will, die für die Umwelt problematischen sind, und ich nicht die Möglichkeit habe, alle Thermoplasten zu analysieren, habe ich mir drei Standardthermoplasten und einen technischen Thermoplast ausgewählt, die wir alle größtenteils aus unserem Alltag kennen. Aus praktischen Gründen werde ich mich in dieser Arbeit

¹ vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Thermoplast> aufgerufen am 05.04.2020

² https://de.wikipedia.org/wiki/Thermoplast#/media/Datei:Highperformance_thermoplastics.svg aufgerufen am 10.05.2020

exemplarisch auf diese häufig vorkommenden Thermoplasten begrenzen. Das Behandeln aller Thermoplasten würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.³

Bei den vier zurückbehaltenen Thermoplasten handelt es sich um:

- **Polypropylen (PP)**, ein Standardthermoplast, der unter anderem für feste Plastikverpackungen benutzt wird⁴;
- **Polystyrol (PS)**, ein Standardthermoplast, der oft zum Schutz von zerbrechlichen Produkten benutzt wird, aber aus dem auch Joghurtbecher und ähnliche Behälter hergestellt werden⁵;
- **Polyvinylchlorid (PVC)**, ein Standardthermoplast, der für Fensterprofile, Kabelummantelungen, unterschiedliche Rohre und anderes benutzt wird⁶;
- **Polyethylenterephthalat (PET)**, ein technischer Thermoplast, der aber durch seine Verwendung bei PET-Flaschen in ähnlichen Mengen hergestellt wird wie die Standardthermoplasten⁷.

2 Die Plastikproblematik

In unserer gesamten Umwelt befindet sich mittlerweile Plastikmüll. Am schwersten betroffen sind die Meere. Studien besagen, dass 2050 mehr Plastikteile als Fische in den Meeren schwimmen werden, falls wir unser Verhalten und unsere Angewohnheiten nicht ändern.

Bis ins Jahr 2015 wurden weltweit mehr als 8,3 Milliarden Tonnen Plastik produziert, dies entspricht den folgenden Mengen:

- 882.000 Eifeltürme,
- 80 Millionen Blauwale, oder
- 1 Milliarde Elefanten.

Davon wurden nur 9 Prozent recycelt und nur 12 Prozent verbrannt. Die restlichen 79 Prozent wurden auf Deponien oder in der Umwelt entsorgt. Im Durchschnitt landen, nach Quellen von 2015, um die 8 Millionen Tonnen Plastik pro Jahr im Meer. Dies entspricht der dreifachen Fläche von Berlin⁸.

Der große Unterschied zwischen dem Plastikabfall und anderen Abfällen (die genauso wenig in die Umwelt gehören) besteht darin, dass die Plastikabfälle einen langen Zeitraum zur Zersetzung beanspruchen, beispielsweise benötigt die Plastikflasche geschätzte 450 Jahre, um sich zu zersetzen. Außerdem zersetzt sich das Material nie komplett, sondern zerfällt in, für das menschliche Auge nicht

³ vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Recycling-Code> aufgerufen am 10.05.2020;

vgl. SCHWARZ / EBELING / RICHTER (2016): Kunststoffkunde, S. 65 ff.

⁴ vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Polypropylen> aufgerufen am 06.04.2020

⁵ vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Polystyrol> aufgerufen am 06.04.2020

⁶ vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Polyvinylchlorid> aufgerufen am 06.04.2020

⁷ vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Polyethylenterephthalat> aufgerufen am 10.05.2020

⁸ vgl. <https://www.careelite.de/plastik-muell-fakten/#produktion-statistik> aufgerufen am 07.04.2020;

vgl. <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/plastik-menschen-haben-mehr-als-8-milliarden-tonnen-produziert-a-1158676.html#> aufgerufen am 07.04.2020;

vgl. <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/plastikmuell-bis-zu-13-millionen-tonnen-landen-in-meeren-a-1018226.html> aufgerufen am 06.04.2020;

<https://www.watson.ch/leben/wissen/652787665-an-unserem-plastik-werden-selbst-noch-unsere-ur-ur-ur-enkel-freude-hab> aufgerufen am 10.05.2020

sichtbare, kleine Teile, in den sogenannten Mikroplastik. Das Mikroplastik ist problematisch. Meerestiere können Teile verschlucken und daran sterben (das gilt aber auch für größere Plastikteile). Doch nicht nur den Meerestiere schaden wir mit dem Mikroplastik, sondern auch uns selbst. Über welchen Weg Mikroplastik in den menschlichen Körper gelangt, ist noch nicht vollständig geklärt, höchstwahrscheinlich gibt es mehrere Wege, unter anderem durch das Verspeisen von Meerestieren oder aber vielleicht auch über Lebensmittel aus Plastikverpackungen, von welchen sich Mikroplastik lösen könnte (darunter auch Wasser aus Plastikflaschen). Doch dass es in den menschlichen Körper gelangt, ist sehr deutlich nachgewiesen. Dies ist nicht nur in verschiedenen Teilen der Welt der Fall, sondern weltweit. Eine Studie der Uni Wien (Österreich) hat dies nachgewiesen, indem sie acht Testpersonen, die alle Kontinente abdeckten, durchgeführt hat. Es wurde dokumentiert, welche die Lebensmittel die Probanden über eine Woche zu sich nahmen. Nach dieser Woche konnten in den Stuhlproben aller 8 Probanden Mikroplastik nachgewiesen werden. Wie dieser genau in den Körper gelangt ist, ist wie oben schon erwähnt, noch nicht ganz klar.

Welchen Impact Mikroplastik auf den menschlichen Körper hat, ist noch nicht ganz erforscht. Doch Studien an verschiedenen Meerestieren zeigen, dass Mikroplastik Entzündungen auslösen, dem Lungengewebe und dem Darm schaden kann. Auch Wachstums- und Fortpflanzungsstörungen wurden bei verschiedenen Tieren festgestellt und auf Mikroplastik zurückgeführt.

Neben dem Mikroplastik, das durch Plastikabfall im Meer entsteht, sind auch alle Vorstufen des Mikroplastiks für viele Meerestiere lebensgefährlich. So verfangen sich viele Tiere in dem Müll und können sich nicht mehr befreien, wodurch sie sich nicht fortbewegen können, was wiederum dazu führt, dass diese Tiere verhungern. Daneben gibt es auch viele Tiere, die z. B. Plastiktüten mit ihrer Nahrungsquelle, den Quallen, verwechseln und am Verspeisen der Tüten sterben⁹.

3 Organische Verbindungen

3.1 Aufbau

Unter organischen Verbindungen werden Verbindungen, die auf Kohlenstoff (C) basieren, verstanden. Diese Bindungen bestehen neben Kohlenstoff größtenteils aus Wasserstoff (H), können aber auch Sauerstoff (O), Stickstoff (N), Schwefel (S) und Phosphor (P) enthalten. Obgleich den wenigen Elementen, aus denen sich organische Stoffe zusammensetzen, sind bis zu fünf Millionen verschiedene Verbindungen möglich. Dies ist auf die Eigenschaft des Kohlenstoffes, sich unbegrenzt und in vielen verschiedenen Weisen mit sich selbst zu verbinden, zurückzuführen¹⁰.

Organische Stoffe verbinden sich auf unterschiedliche Weisen. Aufgrund dieser Unterschiede werden einzelne Moleküle/Stoffe in Gruppen eingeteilt. Dabei ist zu beachten, dass immer nur die Bindungen

⁹ vgl. <https://www.sueddeutsche.de/gesundheit/mikroplastik-mensch-1.4181146> aufgerufen am 10.04.2020;

vgl. <https://www.gesundheit.de/medizin/gesundheit-und-umwelt/mikroplastik> aufgerufen am 10.04.2020;

¹⁰ vgl. <https://www.unibw.de/werkstoffe/lehre/bachelorstudium/skripte-werkstoffe/kunststoffe-2018.pdf/view> aufgerufen am 10.04.2020;

vgl. https://de.wikipedia.org/wiki/Organische_Chemie aufgerufen am 10.04.2020

zwischen Kohlenstoffatomen berücksichtigt werden. Die für den folgenden Kontext wichtigsten Arten von Bindungen werden im Folgende erläutert.¹¹

3.1.1 Gesättigte Verbindungen

Bei diesen Stoffen befindet sich zwischen allen Kohlenstoffatomen jeweils nur eine kovalente (einfache) Bindung. Außerdem sind alle Bindungsmöglichkeiten (Valenz) der Kohlenstoffatomen besetzt, wodurch das Molekül in diesem Zustand keine neuen Verbindungen eingehen kann. Daher sind gesättigte Stoffe meistens stabiler als ungesättigte Stoffe¹².

Beispiel (Butan):

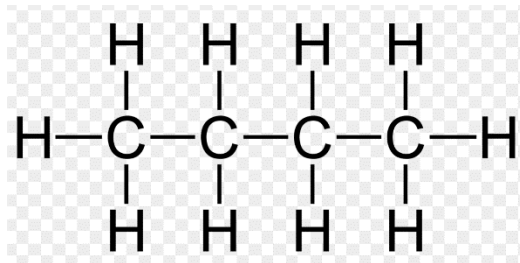


Abbildung 2: Gesättigte Verbindung, Butan ¹³

3.1.2 Ungesättigte Verbindungen

Befinden sich in einem Stoff Kohlenstoffatome, die durch zwei oder drei Bindungen verbunden sind, spricht man von ungesättigten Stoffen. Diese Stoffe sind reaktionsfreudiger und, wie schon erwähnt, instabiler als gesättigte Stoffe¹⁴.

Beispiel (Propylen):

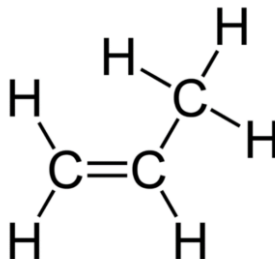


Abbildung 3: Ungesättigte Verbindung, Propylen ¹⁵

¹¹ vgl. https://de.wikipedia.org/wiki/Organische_Chemie aufgerufen am 10.04.2020;

vgl. <https://www.unibw.de/werkstoffe/lehre/bachelorstudium/skripte-werkstoffe/kunststoffe-2018.pdf/view> aufgerufen am 12.04.2020

¹² vgl. <https://www.unibw.de/werkstoffe/lehre/bachelorstudium/skripte-werkstoffe/kunststoffe-2018.pdf/view> aufgerufen am 12.04.2020;

vgl. https://de.wikipedia.org/wiki/Ges%C3%A4ttigte_Verbindingen aufgerufen am 10.04.2020

¹³ <http://chimie.lgk.lu/2GGE/Cours/04/alkanenin/alkanenin.htm> aufgerufen am 11.04.2020

¹⁴ vgl. <https://www.unibw.de/werkstoffe/lehre/bachelorstudium/skripte-werkstoffe/kunststoffe-2018.pdf/view> aufgerufen am 13.04.2020;

vgl. https://de.wikipedia.org/wiki/Unges%C3%A4ttigte_Verbindingen aufgerufen am 13.04.2020

¹⁵ <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Propene-2D-flat.svg> aufgerufen am 15.04.2020

3.1.3 Aromatische Verbindungen

Unter Aromaten werden ringförmige Verbindungen verstanden. Aromatische Verbindungen betreffen nicht ausschließlich Kohlenstoffatome; sie können sowohl gesättigt als auch ungesättigt sein. Der am häufigsten vorkommende aromatische Stoff ist das Benzol, dessen sehr stabiler Ring drei Doppelbindungen hat¹⁶:

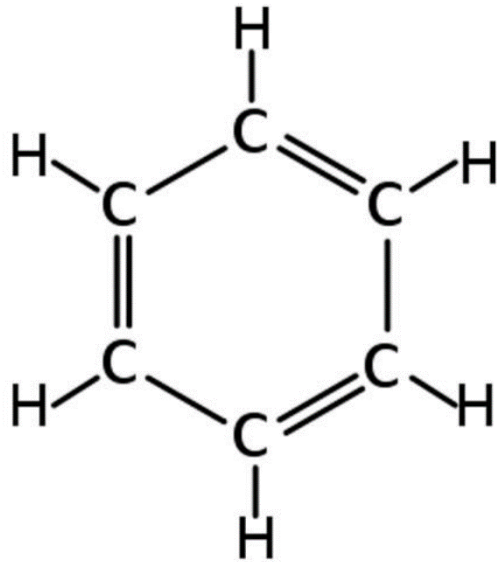


Abbildung 4: Aromatische Verbindung, Benzol ¹⁷

Dieser Ring (ohne die Wasserstoffatome) kommt auch in vielen anderen organischen Stoffen vor.

3.2 Die verschiedene Darstellungsmöglichkeiten von organischen Stoffen

Organische Verbindungen können bildlich unterschiedlich dargestellt werden. Unter anderem anhand folgender Formeln:

- Elektronenformel
- Valenzstrichformel
- Keilstrichformel

¹⁶ vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Aromaten> aufgerufen am 15.04.2020;
vgl. <https://www.unibw.de/werkstoffe/lehre/bachelorstudium/skripte-werkstoffe/kunststoffe-2018.pdf/view>
aufgerufen am 15.04.2020

¹⁷ https://de.wikipedia.org/wiki/Aromaten#/media/Datei:Benzene_Structural_Formulae_V.3.svg aufgerufen
am 15.04.2020

3.2.1 Die Elektronenformel

In dieser Darstellung werden die einzelnen Atome durch ihr Symbol wiedergegeben. Die Bindungen werden durch Punkte zwischen den Atomen dargestellt. Diese Punkte kennzeichnen die Anzahl der Elektronen, die sich im äußeren Orbital des Atoms befinden und für die Verbindungen zuständig sind¹⁸.

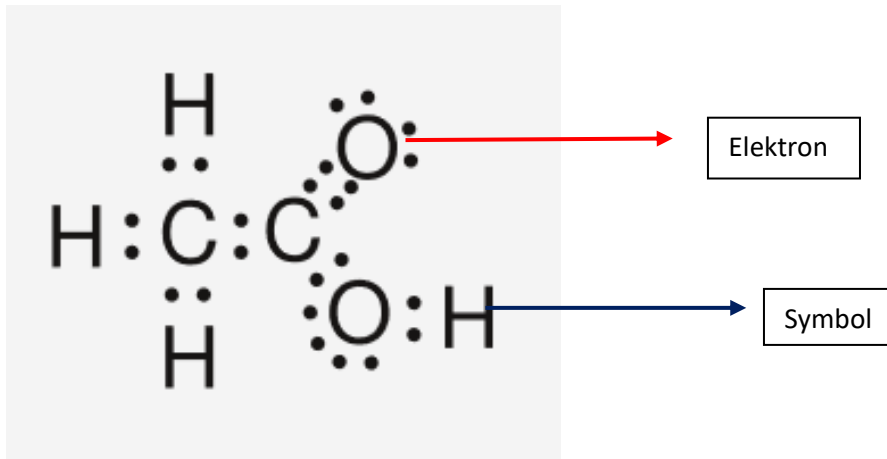


Abbildung 5: Elektronen Formel, Essigsäure ¹⁹

3.2.2 Die Valenzstrichformel

Die Valenzstrichformel ist eine zweidimensionale Verbildlichung eines Moleküls. Anstatt der Elektronen werden in diesem Modell die elektronischen Verbindungen symbolisiert, und zwar durch Striche. Jede Verbindung besteht dabei aus einem Elektronenpaar im äußeren Orbital. Mit diesen Strichen lassen sich einfache und Doppelbindungen darstellen²⁰.

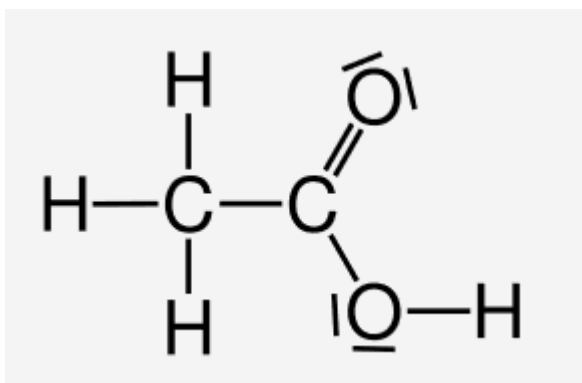


Abbildung 6: Valenzstrichformen, Essigsäure ²¹

3.2.3 Die Keilstrichformel

Die Keilstrichformel dient dazu, ein Molekül dreidimensional darzustellen. So können Bindungen auf drei Weisen abgebildet werden. Eine Bindung, die sich in der Zeichenebene befindet, wird durch einen

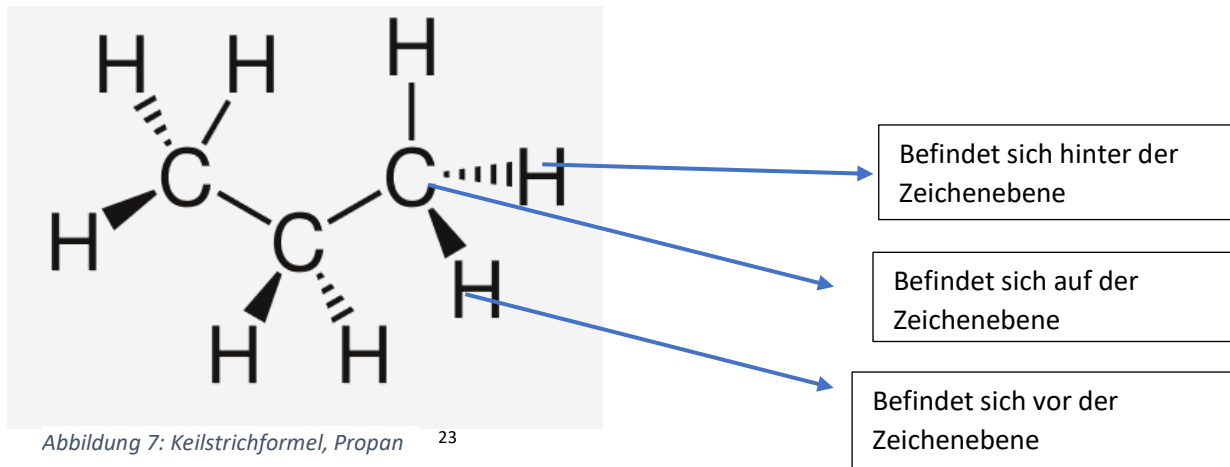
¹⁸ vgl. <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Elektronenformel> aufgerufen am 18.03.2020

¹⁹ https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Datei:Essigs%C3%A4ure_Elektronenformel.svg aufgerufen am 18.03.2020

²⁰ vgl. <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Valenzstrichformel> aufgerufen am 18.03.2020

²¹ https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Datei:Essigs%C3%A4ure_Valenzstrichformel.svg aufgerufen am 19.03.2020

einfachen Strich dargestellt. Befindet sich ein Atom des Moleküls hinter der Zeichenebene, wird die Bindung mit einer breiter werdenden gestrichelten Linie abgebildet. Befindet sich ein Atom vor der Zeichenebene, so wird die Bindung durch einen breiter werdenden schwarzen Strich abgebildet²².



4 Aufbau und Herstellung von Thermoplasten

Thermoplasten sind Polymere. Dabei handelt es sich um Makromoleküle, die aus vielen kleineren Bausteinen zusammen gesetzt sind. Diese Bausteine sind sogenannte Monomere und sind alle gleich oder ähnlich aufgebaut. Im Gegensatz zu den zwei anderen Kunststoffarten (Duroplasten und Elastomeren) sind die Polymere, also die einzelnen Ketten, aus denen der Kunststoff besteht, bei den Thermoplasten nicht durch chemische Verknüpfungen verbunden, sondern durch zwischenmolekulare Kräfte. Diese Kräfte entstehen durch Verlagerungen der Elektronen, wodurch positive und negative Ladungen in den einzelnen Atomen entstehen. Diese unterschiedlich geladenen Teile in den Ketten ziehen sich gegenseitig an und verbinden die einzelnen Ketten so miteinander. Es handelt sich dabei um physikalische Bindungen, ähnlich der Wasserstoffbrücken, die die Oberflächenspannung des Wassers garantieren (s. mein TraPe vom letzten Jahr). Diese Bindungskräfte sind schwächer als chemische Verbindungen²⁴.

4.1 Die Polymerisation

Unter Polymerisation wird der Vorgang (Reaktion) verstanden, durch den einzelnen Monomeren zu einem Polymer werden. Damit Monomere eine derartige Reaktion eingehen können, müssen sie mindestens eine Doppelbindung besitzen.

²² vgl. <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Keilstrichformel> aufgerufen am 19.03.2020

²³ https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Datei:Propan_Struktur.svg aufgerufen am 20.03.2020

²⁴ vgl. SCHWARZ / EBELING / RICHTER (2016): Kunststoffkunde, S. 34 f.;

vgl. https://1379989n.esidoc.fr/id_1379989n_39871.html aufgerufen am 19.03.2020



Abbildung 8: Monomer mit Doppelbindung

25

Eine dieser Bindungen wird bei der Polymerisation aufgehoben, wodurch Bindungen zu anderen Monomeren aufgebaut werden können.



Abbildung 9: Teil eines Polymeren

26

Die sogenannte Absättigung (das Ende) einer solchen Kette kann unter anderem durch das Bilden einer Doppelbindung erzeugt werden²⁷.

4.2 Taktizität - Anordnung der Monomere (isotaktisch, syndiotaktisch und ataktisch)

Die einzelnen Monomere eines Polymeren können sich auf drei Weisen anordnen. Diese sind nicht komplett unterschiedlich, da die Verbindungen zwischen den Molekülen sich immer zwischen den zwei gleichen Atomen befinden. Allerdings können sich die Atome, die nicht an den Verbindungen zwischen den einzelnen Monomeren beteiligt sind, in unterschiedliche Richtungen ausrichten:

Ataktisch:

Die nicht in der Polymeren Verbindung beteiligten Monomer Teile (in diesem Fall Aromaten Ringe) sind zufällig ausgerichtet

Syndiotaktisch:

Die Aromaten Ringe sind im periodischen Wechsel ausgerichtet

Isotaktisch:

Die Aromaten-Ringe sind immer gleich ausgerichtet

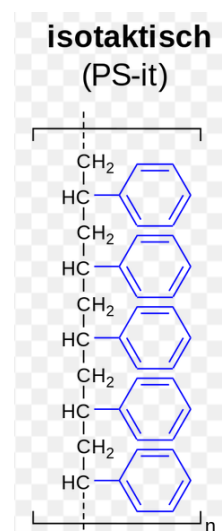
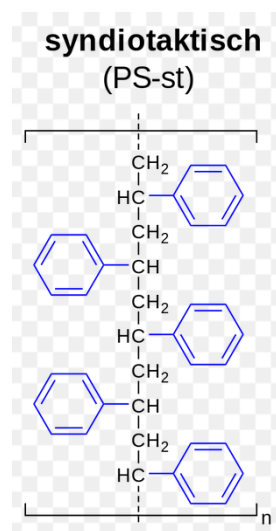
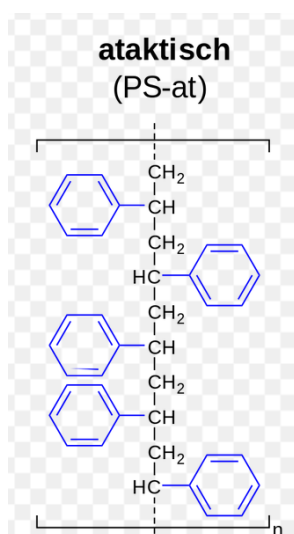


Abbildung 10: Taktizität

28

²⁵ SCHWARZ / EBELING / RICHTER (2016): Kunststoffkunde, S. 26

²⁶ SCHWARZ / EBELING / RICHTER (2016): Kunststoffkunde, S. 26

²⁷ vgl. SCHWARZ / EBELING / RICHTER (2016): Kunststoffkunde, S. 25 f.

²⁸ <https://de.wikipedia.org/wiki/Polystyrol> aufgerufen am 25.03.2020

Ataktische Polymere sind in der Regel instabiler und weicher als isotaktische und syndiotaktische Polymere. Dies ist wichtig für die industrielle Nutzung²⁹.

Wichtig zu erwähnen ist, dass die meisten Thermoplasten sich bei einer ungeprüften Syntheseataktisch anordnen. Dies kommt daher, dass es keine Regel gibt und die Monomere sich dadurch zufällig anordnen. Da in der Industrie allerdings meistens isotaktische oder syndiotaktische Thermoplasten verwendet werden, werden diese unter besonderen Bedingungen hergestellt. Durch Druck- und Temperatursteuerung bei der Herstellung entstehen Bedingungen, in denen sich die Monomere nur auf eine bestimmte Weise anordnen können, wodurch die erwünschten Polymere entstehen.³⁰

Sind die Strukturen völlig ungeordnet, so spricht man auch von amorphen Thermoplasten. Damit können also nur ataktische Polymere gemeint sein. Teilkristalline Thermoplaste sind Thermoplaste mit teilweise parallel angeordneten Makromolekülen, also vermutlich isotaktische oder syndiotaktische Thermoplaste. Diese sind in der Regel steifer und härter.³¹

5 Recycling von Thermoplasten

Thermoplasten können auf unterschiedliche Weisen recycelt werden. Auf einige dieser Verfahren werde ich in diesem Kapitel eingehen. Allerdings werde ich dies größtenteils nicht auf der chemischen Ebene tun, da ich erstens fast keine Informationen zu chemischen Reaktionen während dem Recyclingprozess gefunden habe, und die wenigen, die ich gefunden habe, sehr komplex sind, und so den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

5.1 Die Definition von "Recycling"

Das Wort "Recycling" wird in unserer heutigen Gesellschaft oft für unterschiedliche Verfahren in Bezug auf Abfall genutzt. Deshalb werde ich zuerst auf die wissenschaftliche Definition von Recycling eingehen.

Das Wort "Recycling" wird im deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetz wie folgt definiert:

*"Recycling im Sinne dieses Gesetzes ist jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden; es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, nicht aber die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind."*³²

²⁹vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Polystyrol> aufgerufen am 25.04.2020;

vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Polypropylen> aufgerufen am 25.04.2020

³⁰ Als Synthese wird der Umsatz von zwei oder mehr Elementen zu einer neuen Einheit bezeichnet; vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Synthese> aufgerufen am 25.04.2020

³¹ vgl. ABTS (2016): Kunststoffwissen für Anfänger, S. 27

³² <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/KrWG.pdf> aufgerufen am 13.04.2020

Dies bedeutet vereinfacht:

- Jedes recycelte Material/Produkt muss irgendwann in seiner Vergangenheit als Abfall bezeichnet worden sein.
- Das neue Material/Produkt kann sowohl den gleichen Zweck erfüllen wie den, den es vor der Entsorgung erfüllt hat, als auch einen neuen Zweck.
- Auch die Aufarbeitung organischer Stoffe fällt unter die Definition "Recycling".
- Das Verwenden von Abfallmaterialien zur Gewinnung von Energie (Verbrennung oder Aufarbeitung zu Brennstoffen) fällt nicht unter die Definition "Recycling".
- Auch das Wiederverwenden, also das nochmal Benutzen, ohne eine strukturelle Änderung vorzunehmen (wie z. B. als Verfüllung) wird nicht als Recycling angesehen, sondern wird einfach als "Wiederverwendung" definiert.

Damit wird klar, dass der Begriff "Recycling" im wissenschaftlichen und juristischen Sinne nicht unbedingt in der gleichen Form benutzt wird als im umgangssprachlichen Sprachgebrauch. Da es mir in der vorliegenden Arbeit darum geht, die Möglichkeiten aufzuzeigen, Umweltverschmutzung durch Plastikabfälle zu reduzieren, werde ich im Folgenden den Begriff "Recycling" weit fassen, also eher umgangssprachlich. In meine Überlegungen werde ich sowohl auf die nach obiger Definition als Recycling zu bezeichnenden Verfahren, als auch auf das energetische "Recyclen" eingehen, also das Verbrennen von Plastikmüll.

5.2 Unterschiedliche "Recycling"-Methoden von Thermoplasten (im weiteren Sinne)

Thermoplasten werden zurzeit größtenteils durch das mechanische Verfahren, auch "Werkstoffliches Recycling" genannt, recycelt. Dabei werden die Kunststoffabfälle nach den Kunststoffarten sortiert, anschließend gewaschen und eingeschmolzen und daraufhin zu sogenannten Rezyklaten aufgearbeitet. Aus diesen Rezyklaten werden neue Produkte hergestellt. Bei diesem Vorgang bleibt die chemische Struktur der Kunststoffe erhalten.

Eine andere Methode zum Recyclen von Kunststoffen ist das chemische Recyclen. Dieses Verfahren ist allerdings sehr energieaufwendig.

Neben den bereits erwähnten Verfahren zum Recyclen von Thermoplasten, gibt es auch noch sogenannte biologische Recycling Verfahren die allerdings größtenteils noch nicht weit genug entwickelt wurden, um sie schon anwenden zu können. Möglicherweise stellen sie aber eine Alternative für die Zukunft dar³³.

5.2.1 Werkstoffliches Recycling

Beim werkstofflichen Recycling wird der Kunststoffabfall durch das Baden in Lösungsmittel von unterschiedlichen Additiven getrennt. So wird unter anderem die Farbe vom Kunststoff getrennt,

³³ vgl. <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/abfall-und-recycling/recycling/27543.html> aufgerufen am 07.05.2020

wodurch dieser zu "sauberem Kunststoff" wird und somit fast die gleiche Qualität besitzt als neuer Kunststoff.³⁴

Dieses Verfahren bringt allerdings auch viele unterschiedliche Probleme mit sich. So ist zum Beispiel die Trennung der Kunststoffe, da immer öfter mehrere unterschiedliche Kunststoffe zu einem einzelnen Produkt gemischt werden, sehr problematisch. Oft sind diese Kunststoffe nicht mehr voneinander zu trennen. Dies führt meistens zu einem starken Qualitätsverlust und schlechteren mechanischen Eigenschaften. Außerdem führt schon das alleinige Erhitzen jedes Mal zu einem Qualitätsverlust des Materials. Daher wird dieses Vorgehen auch als Downcycling bezeichnet.³⁵

5.2.2 Chemisches Recycling

Es gibt mehrere Möglichkeiten des chemischen Recyclings. In der folgenden Grafik sind diese Möglichkeiten und die damit verbundenen Verwendungs-/Produktionswege übersichtlich abgebildet:

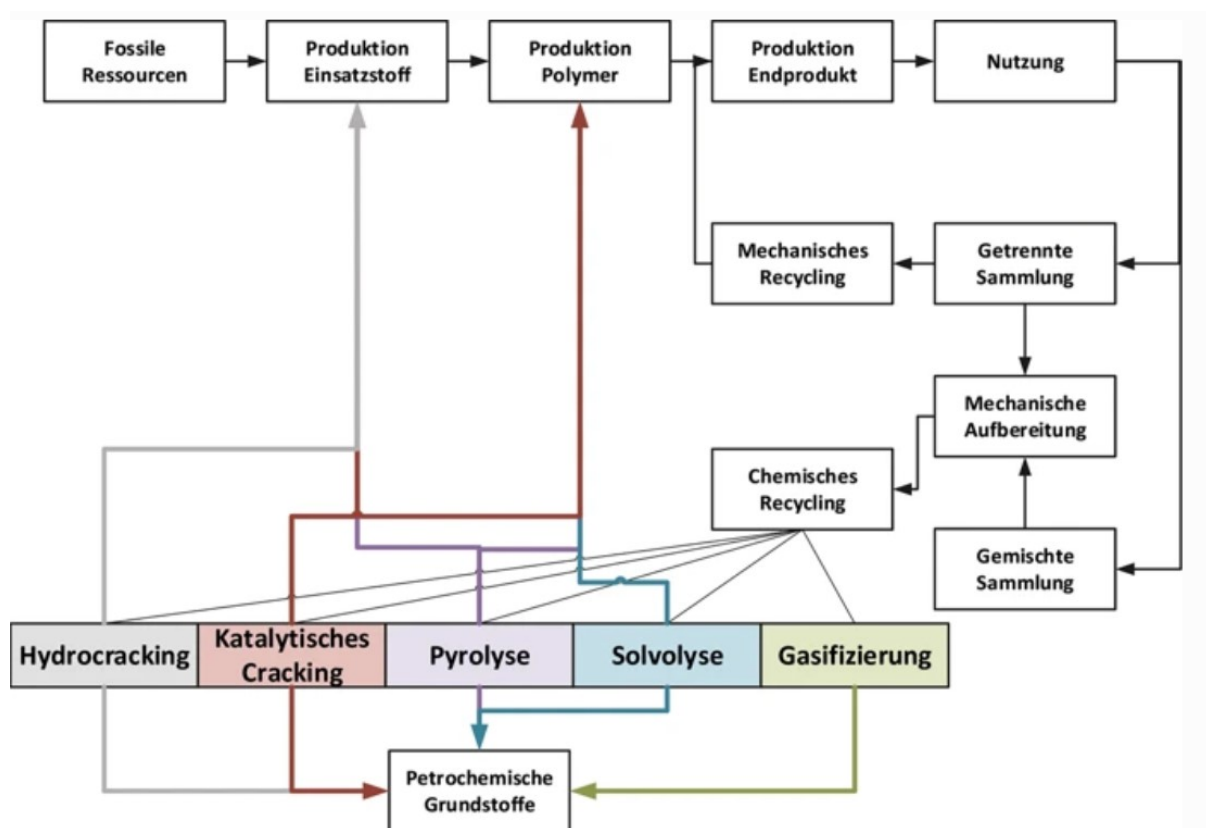


Abbildung 11: Chemisches Recycling³⁶

³⁴ vgl. <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/abfall-und-recycling/recycling/27543.html> aufgerufen am 07.05.2020

³⁵ vgl. <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/abfall-und-recycling/recycling/27543.html> aufgerufen am 07.05.2020;

vgl. <https://www.chemie.de/lexikon/Kunststoff.html#Kunststoffrecycling> aufgerufen am 07.05.2020

³⁶ <https://link.springer.com/article/10.1007/s00506-019-00628-w> aufgerufen am 07.05.2020

Die unterschiedlichen chemischen Verfahren dienen dazu, unterschiedliche Recyclingergebnisse zu erhalten, und sind jeweils für unterschiedliche Kunststoffe geeignet. Ich werde allerdings nur allgemein auf das Prinzip von chemischen Verfahren eingehen, da dieses vom Prinzip her eigentlich immer gleich ist. Detailliertere Beschreibungen der genauen Spezifitäten der unterschiedlichen Verfahren können unter folgender Quelle nachgelesen werden: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00506-019-00628-w> (aufgerufen am 07.05.2020).³⁷

Bei den chemischen Verfahren geht es anders als beim werkstofflichen Verfahren darum, das jeweilige Material wieder in seine einzelnen Bausteine zu zerlegen, um diese später neu zu verwenden. Dies passiert mit Hilfe höherer Erhitzung (150-400 °C) und unterschiedlicher Reagenzien (u. a. Methanol, Glykol und Wasser). Dieser Vorgang dient unter anderem auch zur Reinigung der Stoffe.³⁸

Doch auch für dieses Verfahren ist die Vermischung mehrerer unterschiedlicherer Kunststoffe problematisch. Das chemische Recycling von gemischten Kunststoffen ist so energieaufwendig, dass dies sich umwelttechnisch gesehen nicht lohnt.

5.2.3 Energetisches "Recycling"

Bei der energetischen Verwertung von Kunststoffen geht es darum, die in den Kunststoffen enthaltene Energie wiederzugewinnen. Dies passiert größtenteils in Kraftwerken, Zementwerken oder Hochöfen. Für gemischte und verschmutzte Kunststoffe wird diese Verwertung oft angewendet.³⁹ Es würde den Rahmen dieser Arbeit leider sprengen, für die verschiedenen Vorgehensweisen in diesem Zusammenhang jeweils die Energieeffizienz, die möglicherweise entstehenden Schadstoffe oder Umweltschäden im Detail zu thematisieren.

5.2.4 Thermisches Recycling

Beim thermischen Recycling werden die Kunststoffe unter sehr hohem Druck in einzelne Moleküle zersetzt. Dies passiert bei einer Temperatur von mindestens 400 °C und maximal 1500°C (in Bezug auf die nötigen Temperaturen wurden in allen angegebenen Quellen leicht unterschiedliche Angaben gemacht). Das Endprodukt dieses Verfahrens sind u. a. Wachse, Öle, Benzine, Schmierstoffe und Basischemikalien. Diese Endprodukte können auch wieder zu neuen Kunststoffen verarbeitet werden. Durch diesen Vorgang werden Additive oder andere Verunreinigungen von den Materialien gelöst. Der Vorgang unterscheidet sich hauptsächlich durch die höheren Temperaturen vom energetischen Recycling. Mit diesem Verfahren können auch gemischte Kunststoffe recycelt werden. Doch wegen der benötigten sehr hohen Temperaturen ist auch dieses Verfahren sehr energieaufwändig und somit umweltschädlich.⁴⁰

³⁷ vgl. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00506-019-00628-w> aufgerufen am 09.05.2020

³⁸ vgl. <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/abfall-und-recycling/recycling/27543.html> aufgerufen am 08.05.2020;

vgl. <https://eu-recycling.com/Archive/25138> aufgerufen am 08.05.2020;

vgl. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00506-019-00628-w> aufgerufen am 08.05.2020;

vgl. <https://www.chemie.de/lexikon/Kunststoff.html#Kunststoffrecycling> aufgerufen am 08.05.2020

³⁹ vgl. <https://www.plasticseurope.org/de/focus-areas/circular-economy/zero-plastics-landfill/recycling-and-energy-recovery> aufgerufen am 08.05.2020;

vgl. <https://www.chemie.de/lexikon/Kunststoff.html#Kunststoffrecycling> aufgerufen am 08.05.2020

⁴⁰ vgl. <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/abfall-und-recycling/recycling/27543.html> aufgerufen am 08.05.2020; vgl. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00506-019-00628-w> aufgerufen am 08.05.2020
<https://eu-recycling.com/Archive/25138> aufgerufen am 08.05.2020

5.2.5 Aktuelle Recyclingforschungen und Diskussionen

Im Jahre 2015 hat eine spanische Studie europaweit für Schlagzeilen gesorgt. Es ging um eine Raupe, die angeblich Plastik fressen konnte, und dieses somit zersetzen sollte. Doch 2017 meldete die Uni Mainz (Deutschland) Zweifel an. Nach Meinung der Mainzer Wissenschaftler sind keine Beweise für eine Biologische Zersetzung durch die Raupen in der Studie vorhanden. Dies machten sie hauptsächlich daran fest, dass die spanischen Forscher von Messungen berichteten, die Ethylenglycol nachweisen sollten. Der Nachweis von Ethylenglycol im Endprodukt würde darauf hindeuten, dass die Raupen das Plastik (in diesem Fall Polyethylen) tatsächlich biochemisch aufspalten und dadurch abbauen würden. Die deutschen Forscher berichteten allerdings von Zweifel an diesen Messungen: *“Das lässt sich nach unseren Erkenntnissen nicht halten”*⁴¹, so der Leiter der Mainzer Forscher. In den veröffentlichten Dateien der spanischen Forscher sollen *“[s]pezifische spektroskopische Signale für den eindeutigen Nachweis von Ethylenglycol”*⁴² fehlen. Außerdem haben die Spanier notendige Kontrollexperimente nicht durchgeführt. In ihrer Schlussfolgerung schreiben die deutschen Forscher, dass es keine Beweise für das Verdauen und das biologische Zersetzen des Plastiks durch die Raupen gäbe. Die Raupen würden das Plastik vielmehr mit ihrem Kauwerkzeug zerkleinern und später wieder chemisch unverändert als Mikroplastik ausscheiden.⁴³

Ob die Raupen das Plastik jetzt zersetzen oder zerkleinern, müssen weitere Studien klären. Ausgeschlossen ist die Zersetzung jedenfalls noch nicht, doch durch die spanische Studie ist es sicherlich auch nicht bewiesen⁴⁴.

Dies ist nur eines von vielen Beispielen, die zeigen, dass die Wissenschaft immer wieder neue mögliche Verfahren zum Recycling von Plastik erörtert. Momentan sind noch mehrere andere Möglichkeiten dabei erforscht zu werden. Diese werden dann möglicherweise wieder verworfen oder es tauchen Probleme auf, gefundene Verfahren eignen sich dann vermutlich auch nur für spezifische Arten von Plastik etc. Doch die Forschung geht weiter und vielleicht wird irgendwann einmal auf diesem Weg eine Lösung gefunden.

6 Ausgewählte Thermoplasten, Charakterisierung und spezifisches Recyclingpotential

6.1 Polypropylen (PP)

Polypropylen wird heutzutage in vielen sehr unterschiedlichen Industrien verwendet. So kann man das Material in Matratzen, Teppichen, Kleidung und anderen Gegenstände, die wir in unserem Alltag verwenden bzw. benötigen, finden.

⁴¹ <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/muell-fressende-raupe-streit-um-forschungsarbeit-a-1165373.html> aufgerufen am 09.05.2020

⁴² idem

⁴³ vgl. idem

⁴⁴ vgl. <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/muell-fressende-raupe-streit-um-forschungsarbeit-a-1165373.html> aufgerufen am 09.05.2020;

vgl. <https://www.martina-rüter.de/text-fachtexte-naturwissenschaften/bionik/mehlwuermer-fressen-plastikmuell/> aufgerufen am 09.05.2020;

vgl. <https://eu-recycling.com/Archive/25138> aufgerufen am 09.05.2020

6.1.1 Geschichte

Der Thermoplast Polypropylen wurde im Jahre 1951 zum ersten Mal von Paul Hogan und Robert Banks hergestellt. Über die kommenden Jahre wurde das Herstellungsverfahren unter anderem von Karl Ziegler weiter erforscht und entwickelt. Die 1953 von ihm entwickelte Synthese sollte besser für die großtechnische Anwendung geeignet sein. Wenige Jahre später kam das Material erstmals auf den Markt. Die Produktionszahlen stiegen und steigen seitdem stetig. So wurden im Jahr 1955 weltweit 200 Tonnen PP produziert. Im Jahr 1958 waren es bereits 17.000 Tonnen. 2007 wurden weltweit 45,1 Millionen Tonnen produziert. Dies entspricht dem Wert von 65 Milliarden US\$ oder 47,4 Milliarden €. Heute gilt Polypropylen zu einem der weltweit wichtigsten Kunststoffe⁴⁵.

6.1.2 Aufbau

Das Polypropylen wird durch die Polymerisation von Propen hergestellt.

Das Propen Monomer sieht folgend aus:

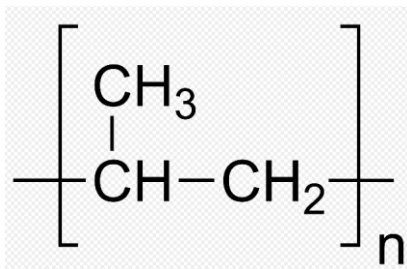


Abbildung 12: Propen Monomer 1

46

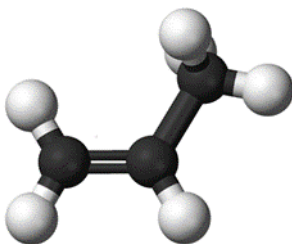


Abbildung 13: Propen Monomer 2 ⁴⁷

Polypropylen ist in der Regel isotaktisch. Isotaktisches Polypropylen ist folgendes:

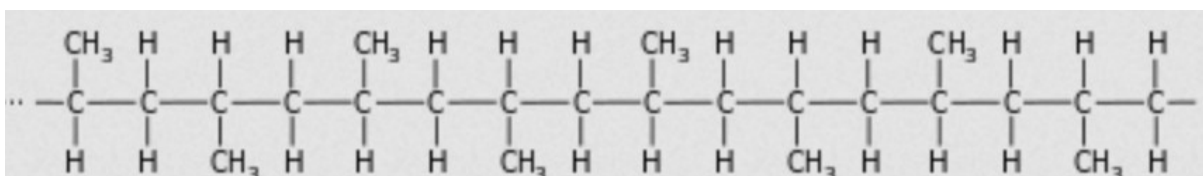


Abbildung 14: Isotaktisches Polypropylen ⁴⁸

⁴⁵ vgl. https://de.wikipedia.org/wiki/Polypropylen#Mechanische_Eigenschaften aufgerufen am 09.05.2020; vgl. <https://www.chemie.de/lexikon/Polypropylen.html#Herstellung> aufgerufen am 09.05.2020

⁴⁶ <https://cs.wikipedia.org/wiki/Polypropylen#/media/Soubor:Polypropylene.svg> aufgerufen am 10.05.2020

⁴⁷ <http://workinginafieldofgrease.blogspot.com/2012/07/wonders-of-polypropylene.html> aufgerufen am 10.05.2020

⁴⁸ https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/8a/Polypropylene_tacticity.svg/438px-Polypropylene_tacticity.svg.png aufgerufen am 09.05.2020

6.1.3 Eigenschaften

Polypropylen weist für einen Kunststoff eine ausgezeichnete Widerstandsfähigkeit gegen Ermüdung auf. Es lässt sich dauerhaft zwischen 0 und 100°C verwenden. Unter einer Temperatur von 0°C wird es spröde. Bei Raumtemperatur ist es gegen Fette und fast alle organischen Lösungsmittel, abgesehen von starken Oxidationsmitteln, beständig. Bei erhöhten Temperaturen löst sich Polypropylen in wenigen polaren Lösungsmitteln. Außerdem ist das Material geruchlos, hautverträglich und physiologisch unbedenklich.⁴⁹

6.1.4 Verwendung

Polypropylen wird wie schon erwähnt in vielen unterschiedlichen Bereichen verwendet. Hier einige Beispiele:

- Wegen der sehr hohen Widerstandsfähigkeit gegen Ermüdung eignet sich der Thermoplast sehr gut für Scharniere.
- Da es sich um ein hautverträgliches und geruchloses Material handelt, wird dies oft für die Produktion von Kleidung oder Matratzen-Bezüge genutzt.
- Im elektronischen Bereich werden oft Kabelummantelungen und Isolationsfolien aus Polypropylen hergestellt.
- Viele Verpackungen wie z. B. Joghurtbecher bestehen aus Polypropylen.
- Auch Fortbewegungsmittel (Autos, Flugzeuge etc.) bestehen zu großen Teilen aus dem Thermoplast.
- Sogar verschiedene Geldscheine bestehen zum Teil aus diesem Plastik.
- Wie an diesen Beispielen zu sehen ist, begegnet uns dieser Kunststoff überall im Alltag.⁵⁰



Abbildung 15: Stuhl aus PP ⁵¹



Abbildung 16: Seil aus PP⁵²

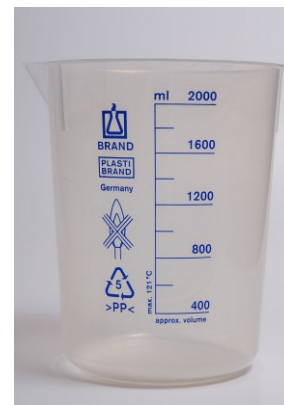


Abbildung 17: Becher aus PP ⁵³

⁴⁹ vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Polypropylen#Geschichte> aufgerufen am 09.05.2020;

vgl. <https://lexikon.wohnen.de/polypropylen/> aufgerufen am 09.05.2020;

vgl. <https://www.chemie.de/lexikon/Polypropylen.html#Herstellung> aufgerufen am 09.05.2020

⁵⁰ vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Polypropylen#Geschichte> aufgerufen am 09.05.2020;

vgl. <https://www.chemie.de/lexikon/Polypropylen.html#Herstellung> aufgerufen am 09.05.2020;

vgl. <https://lexikon.wohnen.de/polypropylen/> aufgerufen am 09.05.2020

⁵¹ https://de.wikipedia.org/wiki/Polypropylen#/media/Datei:Plastic_2000ml_beaker.jpg aufgerufen am 09.05.2020

⁵² <https://seiloo.de/polypropylenseile/290-4mm-polypropylenseil-rot-400m-pp-seil-polypropylen.html> aufgerufen am 09.05.2020

⁵³ <https://delta-engineering.be/pp> aufgerufen am 09.05.2020

6.1.5 Recycling

Ich habe nicht viele Informationen über das Recycling von Polypropylen gefunden, und die Informationen, die ich gefunden habe, widersprechen sich oft inhaltlich. Trotzdem werde ich im folgenden Inhalt dieser Arbeit versuchen, einen Überblick über die unterschiedlichen Informationen zu geben.

Als erstes habe ich versucht herauszufinden, welche Verwertungsverfahren sich für das Polypropylen eignen. Dort bin ich auf die Information gestoßen, dass sich das thermische Verfahren sehr gut für diesen Thermoplast eignen soll⁵⁴. Das PP kann allerdings auch energetisch verwertet werden.

Neben dieser Information bin ich auf zwei andere Informationsquelle gestoßen. In beiden wird sowohl von der Plastikproblematik als auch vom Recycling berichtet. Die beiden Quellen unterscheiden sich allerdings sehr stark was die Umweltbilanz beim Recyceln von Polypropylen angeht. So steht in der ersten Quelle:

„Kunststoff ist kein einzigartiges Material. Es gibt tatsächlich mehrere Arten, die alle vom Erdöl stammen [...]. Polyethylen hoher Dichte oder Polypropylen. Letzteres, hauptsächlich in Plastikgeschirr, Joghurtbechern oder Verpackungen enthalten, ist nicht oder nur wenig recycelbar, weil es viel zu dünn und leicht ist. Diese Objekte enthalten nicht genug Material, sodass das Recycling nicht rentabel ist.“⁵⁵

In der zweiten Quelle sind vier Vorteile des Polypropylens aufgezählt, zwei davon sind in diesem Kontext relevant.

Erstens:

„Neueste Scanner-Technologien sind in der Lage, das Material fast sortenrein aus dem Plastikmüll zu sortieren und wiederzuverwenden. In Deutschland liefert das Duale System gebrauchtes Plastik zur Weiterverarbeitung. So werden aus recyceltem Plastikmüll zum Beispiel Blumentöpfe hergestellt.“⁵⁶

Und zweitens:

„Die Produktion mit recyceltem Plastik verbraucht weniger Energie als die Herstellung von neuem Plastik.“⁵⁷

Beide Quellen weisen außerdem darauf hin, dass neben dem Recycling ein viel zu großer Teil des Plastiks in der Umwelt landet. Auch gehen beide darauf ein, dass es immer die beste Entscheidung ist, die Verpackung wegzulassen.

Doch auf die Frage ob Polypropylen umwelttechnisch gesehen besser oder schlechter ist als andere Thermoplasten, kann ich keine mit Quellen belegte Antwort geben. Ich könnte mir allerdings vorstellen, dass beide Aussagen größtenteils stimmen. So wäre das Recyceln von Polypropylen

⁵⁴ vgl. <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/abfall-und-recycling/recycling/27543.html> aufgerufen am 09.05.2020

⁵⁵ <https://www.greenpeace.org/luxembourg/de/aktualitaet/3884/warum-wir-aufhoeren-sollten-an-den-mythos-des-recycelbaren-plastiks-zu-glauben/> aufgerufen am 09.05.2020

⁵⁶ <https://utopia.de/ratgeber/polypropylen-pp-was-du-ueber-den-kunststoff-wissen-solltest/> aufgerufen am 09.05.2020

⁵⁷ <https://utopia.de/ratgeber/polypropylen-pp-was-du-ueber-den-kunststoff-wissen-solltest/> aufgerufen am 09.05.2020

umweltfreundlicher als das Produzieren von neuem Material, dies allerdings nur unter der Voraussetzung, dass genug Material recycelt wird. Aktuell landet aber bei weitem mehr als die Hälfte davon in der Umwelt, was schon allein auf dieser Ebene sehr große Schäden mit sich bringt, aber auch noch dazu führt, dass sich die Recyclinganlagen nicht lohnen, was die Situation noch dramatischer macht.

6.2 Polystyrol (PS)

Das Polystyrol wird in der Verpackungsindustrie sehr häufig verwendet. So ist er regelrecht in unseren Alltag integriert und wird sehr schnell zu Abfall. Neben dieser Verwendung ist das Material auch jedem z.B. als Styropor zum Schutz von Lieferungen oder als Dämmstoff bekannt.

6.2.1 Geschichte

Der Berliner Apotheker Eduard Simon beobachtete 1839 erstmals, wie sich das Styrol über Monate in eine dickflüssige, gelartige Masse verdickte. Simon stellte damals die Vermutung auf, dass es sich bei dem beobachteten Prozess um eine Oxidation handelte. Deswegen nannte er die dickflüssige Masse Styroloxyd. 1845 berichteten John Buddle Blyth und August Wilhelm von Hofmann von ihrer Erkenntnis, dass der Vorgang ohne Auf- und Abnahme irgendeines Elementes geschehe, sondern einfach durch die molekulare Veränderung des Styrols erfolgen würde. So gaben sie der Masse den neuen Name Metastyrol. Erstmals wurde die Bezeichnung Polystyrol von Abraham Kronstein verwendet. Darunter verstand er allerdings nicht das heutige Polystyrol, sondern ein Zwischenprodukt in der Produktion des Stoffs, der damals Metastyrol genannt wurde, heute jedoch Polystyrol. Die industrielle Herstellung des Polystyrols begann 1931. Um die zwanzig Jahre später kam dann erstmals der bekannte Schaumstoffkunststoff Styropor auf den Markt.⁵⁸

6.2.2 Aufbau

Das Polystyrol entsteht, wie schon erwähnt, aus der Polymerisation von Styrol. Das Styrol-Monomer ist folgendermaßen aufgebaut:

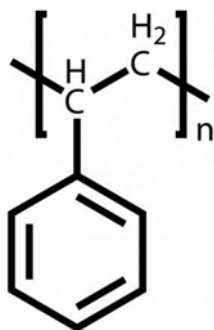


Abbildung 18: Styrol-Monomer ⁵⁹

⁵⁸vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Polystyrol> aufgerufen am 10.05.2020

⁵⁹<https://www.ecosia.org/images?q=polystyrol%20chemische%20formel#id=AE37F5CA204B78CD52F51AD945B4018BD0CBF86A> aufgerufen am 10.05.2020

Standard Polystyrol ist ataktisch:

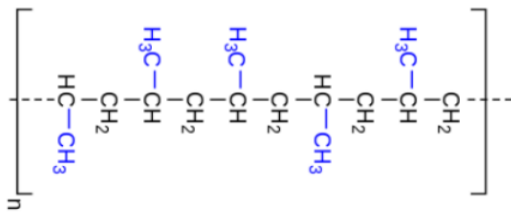


Abbildung 19: Ataktisches Polystyrol ⁶⁰

6.2.3 Eigenschaften

Standard Polystyrol ist glasklar, hart und schlagempfindlich. Durch Biegen oder Brechen des Materials wird ein starker Geruch von Styrol freigesetzt. Der Thermoplast kann in allen Farben gefärbt werden. Die Wärmebeständigkeit ist vergleichsmäßig niedrig, ab 55°C altert das Material schneller, deswegen erfolgt eine Verwendung nur bis zu maximal 70°C. Geschäumtes Polystyrol ist, weiß, undurchsichtig und hält einen hohen Druck aus. Der Thermoplast ist gegen wässrige Laugen und Mineralsäuren gut beständig, aber gegen unpolare Lösungsmittel wie Benzin, langkettige Ketonen und Aldehyden nicht beständig. Außerdem ist es UV-empfindlich⁶¹.

Polystyrol hat auch gesundheitsschädliche Eigenschaften. So ist die Gefahr groß, dass sich Styrol aus dem Material herauslöst (hauptsächlich bei Kontakt mit heißen oder öligen Lebensmitteln). Dabei handelt es sich um eine gesundheitsschädliche chemische Verbindung, die z.B. auch in Zigarettenrauch oder Autoabgasen enthalten ist. Es ist nachgewiesen, dass dieser Stoff unterschiedliche negative Auswirkungen auf den menschlichen Körper hat.⁶²

6.2.4 Verwendung

Polystyrol kennt neben der massiven Anwendung in der Verpackungsindustrie noch einige andere Anwendungsbereiche. In folgender Aufzählung sind alle aufgelistet, die ich finden konnte:

- Wie schon öfters erwähnt, wird PP in sehr großen Mengen für die Produktion von Einwegplastik verwendet.
- Neben dem Einwegplastik befindet sich das Material auch sehr oft in wiederverwendbaren Lebensmittelbehältern.
- In anderen alltäglichen Gegenständen wie z. b. Fahrradhelmen ist auch Polystyrol enthalten.
- Wegen seiner hohen Druck Widerstandsfähigkeit, wird Polystyrol oft zur Dämmung von Gebäuden eingesetzt.
- Polystyrol besitzt zudem eine gute Isolierungseigenschaft, weshalb es häufig für Isolationszwecke in elektrischen Geräten eingesetzt wird.
- Lose Polystyrol Schaumkugel dienen auch oft zur Füllung von Sitzsäcken etc.⁶³

⁶⁰ <https://de.wikipedia.org/wiki/Polystyrol> aufgerufen am 10.05.2020

⁶¹ vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Polystyrol> aufgerufen am 10.05.2020;

vgl. <https://www.chemie.de/lexikon/Polystyrol.html> aufgerufen am 10.05.2020;

vgl. <https://utopia.de/ratgeber/polystyrol-wissenswertes-informationen-ueber-den-kunststoff/> aufgerufen am 10.05.2020

⁶² vgl. <https://utopia.de/ratgeber/polystyrol-wissenswertes-informationen-ueber-den-kunststoff/> aufgerufen am 10.05.2020

⁶³ vgl. <https://utopia.de/ratgeber/polystyrol-wissenswertes-informationen-ueber-den-kunststoff/> aufgerufen am 10.05.2020

Abbildung 20: Eisbecher aus PS ⁶⁴Abbildung 22: Einwegbesteck aus PS ⁶⁶Abbildung 21: Verpackungsmaterial ⁶⁵

6.2.5 Recycling

Die Recyclingrate des Polystyrols ist sehr niedrig. Dies kommt daher, dass Polystyrol nur selten ohne das Vermischen mit anderen Kunststoffen verarbeitet wird. So wird Polystyrol meistens energisch verwertet, landet auf Mülldeponien (wird also auf keine Weise verwertet und bleibt, da es sich nicht zersetzt, für immer auf der Erde vorhanden). Für das Recyceln von reinem Polystyrol eignen sich das thermische oder das werkstofflich Verfahren. Allerdings sind auch diese Verfahren nicht umweltfreundlich, da nicht genügend reines Polystyrol vorhanden ist, dass sich der energetische Aufwand dafür lohnen würde. ⁶⁷

6.3 Polyvinylchlorid (PVC)

Polyvinylchlorid wird in vielen Bereichen eingesetzt. In der Verpackungsindustrie ist er aber eher nicht präsent. Es handelt sich um einen sehr stabilen Kunststoff, der in anderen Bereichen Anwendung findet.

6.3.1 Geschichte

1835 war es Henri Victor Regnault der als erstes Vinylchlorid herstellte. Er beobachtete, dass sich daraus unter der Einwirkung der Sonnenstrahlen ein weißes Pulver bildete. Damit hatte er das

⁶⁴ <https://www.verpacken24.com/shop/2361-eisbecher-royal-aus-polystyrol-ps-transparent> aufgerufen am 10.05.2020

⁶⁵ <https://metro.co.uk/2018/04/18/can-recycle-polystyrene-7478185/> aufgerufen am 10.05.2020

⁶⁶ https://www.amazon.de/BIOZOYG-Einweg-Besteck-Besteckset-Einwegbesteck-umweltfreundlich/dp/B08738GQH2/ref=sr_1_2_sspa?mk_de_DE=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&dchild=1&keywords=Einwegbecher+aus+ps&qid=1589116713&s=drugstore&sr=1-2-spons&pssc=1&spLa=ZW5jcnlwdGVkUXVhbGlmaWVyPUFaVTNLRjdYR01QWDMmZW5jcnlwdGVkSWQ9QTA1MzI1MzgyUUVGTkNPWTE5U0Q3JmVuY3J5cHRlZEFkSWQ9QTA3NDI5OTZSQ0NSQIE3WlNENksmd2lkZ2V0TmFtZT1zcF9hdGYmYWNoaW9uPWNsaWNrUmVkaXJlY3QmZG9Ob3RMb2dDbGljaz10cnVl aufgerufen am 10.05.2020

⁶⁷ vgl. <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/abfall-und-recycling/recycling/27543.html> aufgerufen am 10.05.2020;

vgl. <https://utopia.de/ratgeber/polystyrol-wissenswertes-informationen-ueber-den-kunststoff/> aufgerufen am 10.05.2020

Polyvinylchlorid (PVC) entdeckt, ohne sich jedoch der Bedeutung seiner Entdeckung bewusst zu werden. 1912 entwickelte Fritz Klatte das Produktionsverfahren für PVC, indem auch er Vinylchlorid mit verschiedenen Zusätzen dem Sonnenlicht aussetzte. 1913 ließ Klatte sich die Polymerisation von Vinylchlorid und Verwendung als Hornersatz, als Filme, Kunstfäden und für Lacke patentieren, zu einer industriellen Produktion oder Verwendung kam es jedoch nicht. Erst durch die Rohstoffknappheit während und nach dem ersten Weltkrieg kam es zu Bestrebungen PVC als billigen Rohstoff anstelle anderer teurer Rohstoffe zu verwenden. 1928 lief die Produktion in den USA an, 1931 im I.G.-Werk Ludwigshafen, nachdem die I.G.-Farben-Industrie ein brauchbares Polymerisationsverfahren für PVC entwickelt hatte. Igelit, ein Weich-PVC wurde ab 1935 in Bitterfeld hergestellt. Nach 1945 avancierte PVC zum meistproduzierten Kunststoff der Welt. Ab 1948 wurden Schallplatten aus PVC anstatt wie bis dahin aus Schellack hergestellt. In den 1960er Jahren wurde in den USA PVC zu nachchloriertem PVC (Chloriertes Polyvinylchlorid) weiterentwickelt; dieses ist auch bei höheren Temperaturen korrosionsbeständig und hat bessere mechanische Eigenschaften als PVC; es kann somit auch zu Rohren für die Warmwasserversorgung und mit Einschränkungen sogar für Heizungskreisläufe verarbeitet werden.⁶⁸

6.3.2 Aufbau

Polyvinylchlorid wird durch die Polymerisation von Vinylchlorid hergestellt:

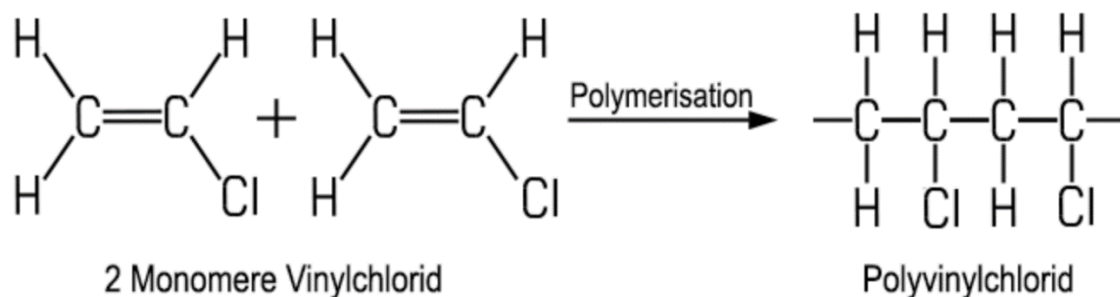


Abbildung 23: Polymerisation von Vinylchlorid ⁶⁹

6.3.3 Eigenschaften

Durch die Zugabe von Weichmachern lassen sich die Härte und die Zähigkeit von Polyvinylchlorid gut variieren. Diese Weichmacher können sich allerdings lösen und so auf unterschiedliche Wege in die Umwelt oder in unser Grundwasser gelangen. Sie wurden vom deutschen Umweltbundesamt schon in der Luft, in Böden und im Wasser nachgewiesen. Das Amt stuft die Stoffe als "gesundheitsgefährdend" ein.⁷⁰

PVC ist gegen Säuren, Ethanol, Öle, Laugen und Benzin beständig und wird von Ether, Chloroform, Aceton, Benzol und konzentrierten Salzsäuren angegriffen. Es lässt sich gut einfärben und nimmt kaum Wasser auf. Bei Temperaturen zwischen 120°C und 150°C lässt es sich spanlos verformen. Mit Klebstoff oder durch Schweißen können Verbindungen hergestellt werden. Bei einer Verbrennung von

⁶⁸ vgl. SCHWARZ / EBELING / RICHTER (2016): Kunststoffkunde, S. 80

vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Polyvinylchlorid#Geschichte> aufgerufen um 08.05.2020

⁶⁹ https://www.seilnacht.com/Lexikon/k_pvc.html aufgerufen am 08.05.2020

⁷⁰ vgl. <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Polyvinylchlorid> aufgerufen am 08.05.2020

PVC werden Chlorwasserstoff, Dioxine und auch Aromaten freigesetzt⁷¹. Das Einatmen von Chlorwasserstoff kann Verätzungen in der Lunge auslösen⁷².

6.3.4 Verwendung

PVC hat gegenüber anderen Kunststoffen den großen Vorteil, dass es sich lange hält und sehr stabil ist. So können Sonnenlicht, Wasser und Luft dem Material nichts anhaben. Deshalb werden hauptsächlich langlebende Produkte aus PVC hergestellt. Die Industrie, in welcher der Thermoplast am häufigsten verwendet wird, ist die Bauindustrie. Er gilt als Grundstoff für Fensterprofile, Rohre, Fußbodenbeläge und Dachbahnen. Andere Anwendungsprodukte sind z. B. Kreditkarten, Elektro-Schalterdosen, unterschiedliche Folien, Sportboote, Rotorblätter von Windrädern oder Kunstleder.⁷³



Abbildung 24: Rohre aus PVC ⁷⁴



Abbildung 25: Kunstleder aus PVC ⁷⁵



Abbildung 26: Folie aus PVC ⁷⁶

6.3.5 Recycling

PVC kann sowohl werkstofflich als auch energetisch verwertet werden.

Das PVC eignet sich z. B. sehr gut für die werstoffliche Verwertung. Dies kommt daher, dass es beim PVC, anders als bei den meisten anderen Kuststoffen, möglich ist, ausreichend reines Material zusammen zu bekommen, damit sich diese Art von Recycling lohnt. Doch durch den Qualitätsverlust ist dies auch beim PVC keine langfristige Lösung. Außerdem gibt es natürlich auch PVC, welches mit anderen Kunststoffe oder sogar eher mit komplett anderen Materialien vermischt ist.

Neben dem werkstofflichem Recycling kann das PVC auch energetisch verwertet werden. Bei der Verbrennung von PVC bilden sich giftige und gesundheitsschädliche Stoffe. Diese können von

⁷¹ vgl. <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Polyvinylchlorid> aufgerufen am 08.05.2020;

vgl. <https://www.chemie.de/lexikon/Polyvinylchlorid.html> aufgerufen am 08.05.2020;

vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Polyvinylchlorid#Eigenschaften> aufgerufen am 08.05.2020

⁷² vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Chlorwasserstoff> aufgerufen am 08.05.2020

⁷³ vgl. <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Polyvinylchlorid> aufgerufen am 08.05.2020;

vgl. <https://www.chemie.de/lexikon/Polyvinylchlorid.html> aufgerufen am 08.05.2020;

vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Polyvinylchlorid#Eigenschaften> aufgerufen am 08.05.2020

⁷⁴ <https://www.schwimmbad-brunn.de/PVC-ROHR-HART-d-50-mm> aufgerufen am 08.05.2020

⁷⁵ https://www.alibaba.com/product-detail/PVC-Leather_169418726.html aufgerufen am 08.05.2020

⁷⁶ <https://www.schlichter.com/folien/pvc-feinschrumpffolien/> aufgerufen am 08.05.2020

modernen Müllverbrennungsanlagen allerdings neutralisiert werden. Doch die Verbrennung erfolgt trotzdem unvollständig (es bleibt Abfall übrig) und rußend.⁷⁷

6.4 Polyethylenterephthalat (PET)

Polyethylenterephthalat (PET) ist ein Polyester und neben Polybutylenterephthalat (PBT) der Polyester mit der größten kommerziellen Bedeutung.⁷⁸

6.4.1 Geschichte

Ab 1920 versucht Wallace Hume Carothers auf der Grundlage der Synthese von Polyestern, eine Alternative zur Naturseide zu finden. Die parallel entwickelten Polyamide haben sofort Erfolg, so dass die Polyesterentwicklung ad acta gelegt wird.

John Rex Whinfield und James Tennant Dickson entdecken 1939, dass sich gute Faserwerkstoffe durch die Verwendung von aromatischen (s.o. Abschnitt 4.1.3) Monomer-Bausteinen erzeugen lassen. Die ersten auf diese Art erzeugten Fasern kommen Anfang der 1950er-Jahre auf den Markt.

6.4.2 Aufbau

Ester heißt in der Chemie das Produkt, das bei der Reaktion einer Säure mit einem Alkohol oder einem Phenol unter Abspaltung von Wasser entsteht. Es handelt sich also um eine Kondensationsreaktion. Bei der Säure kann es sich um organische Säuren (z.B. Carbonsäuren wie Essigsäure) oder um anorganische Säuren (z.B. Kohlensäure) handeln.⁷⁹ Im Prinzip wird also eine Alkohol-Gruppe mit einer Carbon-Gruppe verknüpft. Handelt es sich um eine vielfache Verknüpfung, so entsteht ein Polyester (s. Polymerisation in Abschnitt 5.1).⁸⁰

PET ist, wie schon gesagt, ein aromatischer Polyester (s.o. Abschnitt 4.1.3). Dies lässt sich in folgender Darstellung an der ringförmigen Verbindung eines Bestandteils erkennen:

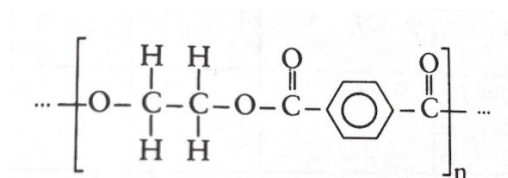


Abbildung 27: Polyethylenterephthalat ⁸¹

⁷⁷ vgl. <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Polyvinylchlorid> aufgerufen am 08.05.2020; vgl. <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/abfall-und-recycling/recycling/27543.html> aufgerufen am 08.05.2020

⁷⁸ vgl. SCHWARZ / EBELING / RICHTER (2016): Kunststoffkunde, S. 131

⁷⁹ vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Ester> aufgerufen am 01.05.2020

⁸⁰ vgl. SCHWARZ / EBELING / RICHTER (2016): Kunststoffkunde, S. 131

⁸¹ SCHWARZ / EBELING / RICHTER (2016): Kunststoffkunde, S. 131

6.4.3 Eigenschaften

PET kann amorph verarbeitet werden, indem es durch ein schnelles Abkühlen aus der Schmelze eine amorphe Struktur erhält, es kann aber auch teilkristallin verarbeitet werden. In dieser Form besitzt es eine etwas größere Steifigkeit und Härte⁸². Es handelt sich insgesamt also um einen festen, zähen Stoff mit einem hohen Oberflächenglanz und einer hohen Abriebfestigkeit, dessen Härte je nach Verarbeitung mehr oder weniger ausgeprägt sein kann (s.o. Abschnitt 5.2 zur Taktizität). Zusätzlich ist der Stoff sehr witterungsbeständig und hat gute elektrische Isoliereigenschaften. PET nimmt, wie alle Polyester, aber im Gegensatz zu den Polyamiden, kaum Feuchtigkeit auf. PET ist beständig gegen Öle und Fette, jedoch nicht gegen aromatische Kohlenwasserstoffe, halogenierte organische Verbindungen und gegen Säuren und Laugen. Um den Anforderungen des Brandschutzes gerecht werden zu können, müssen Flammenschutzmittel zugesetzt werden. Dagegen weist PET gute geruchliche und geschmackliche Eigenschaften im Kontakt mit Lebensmitteln und mit Trinkwasser auf.⁸³ Allerdings können sich Gesundheitsschädliche Stoffe von PET Flaschen lösen und es ist nachgewiesen, dass PET mehr Mikroplastik an die sich in den Gefäßen befindenden Flüssigkeiten abgibt als andere Kunststoffe.⁸⁴

6.4.4 Verwendung

PET wird als Folie in Ton-, Video- und Filmbändern, in Papierbezügen, in Kondensatoren und in Lebensmittelverpackungen verwendet, als Faser in Kleidungsstücken, in Teppichböden, in Kunstrasen und Segeltüchern, in der Form von Funktionsteilen als Zahnräder, Rollen oder Ventile, in Labormaterialien und, wie schon gesagt, in großem Stil in Getränkeflaschen.⁸⁵

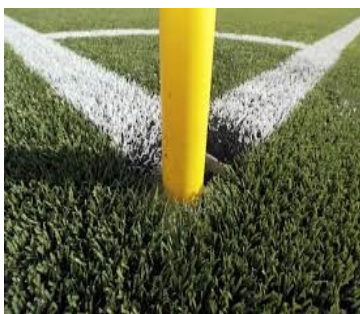


Abbildung 28: Kunstrasen aus PET⁸⁶



Abbildung 29: Lebensmittelverpackungen aus PET⁸⁷



Abbildung 30: PET-Flaschen⁸⁸

⁸² vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Polyethylenterephthalat> aufgerufen am 08.05.2020

⁸³ vgl. SCHWARZ / EBELING / RICHTER (2016): Kunststoffkunde, S. 131

⁸⁴ vgl. <https://utopia.de/ratgeber/pet-polyethylenterephthalat-was-du-ueber-den-kunststoff-wissen-solltest/> aufgerufen am 10.05.2020

⁸⁵ vgl. idem, S. 134

⁸⁶ <https://www.saechische.de/plus/das-problem-mit-dem-kunstrasen-5104050.html> aufgerufen am 10.05.2020

⁸⁷ <https://www.kunststoffe.de/bildergalerien/artikel/werkstoff-fuer-alle-faelle-3453060.html> aufgerufen am 10.05.2020

⁸⁸ <https://www.kunststoffe.de/bildergalerien/artikel/werkstoff-fuer-alle-faelle-3453060.html> aufgerufen am 10.05.2020

6.4.5 Recycling

PET lässt sich eigentlich einfach recyceln. Das chemische Recycelverfahren eignet sich hierfür am besten. Doch dies ist eben auch sehr energieaufwendig, wodurch die Umweltbilanz nicht unbedingt besser ist, als wenn neues Plastik produziert werden würde, doch da es auf diesen Weg nicht in der Umwelt landet und Erdöl eingespart wird, ist es trotzdem die bessere Lösung.⁸⁹

⁸⁹ vgl. <https://utopia.de/ratgeber/pet-polyethylenterephthalat-was-du-ueber-den-kunststoff-wissen-solltest/> aufgerufen am 10.05.2020
vgl. <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/abfall-und-recycling/recycling/27543.html> aufgerufen am 10.05.2020

7 Schlussfolgerung

Nachdem ich mich in der vorliegenden Arbeit mit der chemischen Beschaffenheit von Thermoplasten auseinandergesetzt habe und exemplarisch 4 verschiedene Arten hervorgehoben habe und an diesen die Möglichkeiten des Recyclings erörtert habe, musste ich feststellen, dass die chemischen Reaktionen, die diesen Verfahren zu Grunde liegen, scheinbar komplexer sind, als ich es gedacht und gehofft hatte. Leider ist es mir daher nicht gelungen, mich im Detail mit den chemischen Reaktionen bei den Recyclingvorgängen auseinanderzusetzen.

Nichtsdestotrotz bin ich durch diese Arbeit in meinen Augen zu einigen interessanten Erkenntnissen gekommen. Diese möchte ich im Folgenden kurz zusammenfassen:

Das Recyceln von Plastik ist bei weitem komplexer, als ich gedacht hätte und lohnt sich unter den momentanen Umständen scheinbar nur sehr selten.

Daraus schließe ich:

Von seiten der Politik aus müssten meiner Meinung nach strengere Regelungen für die Produktion und die Verwendung von Plastik erlassen werden. So müsste man erstens unnütze Plastikverpackungen (wie z. B. die von Bananen, Orangen, Ananas u. a.) verbieten. Außerdem müsste man Regelungen zum Vermischen unterschiedlicher Kunststoffarten verabschieden. So sollte man alle vermischten Materialien, die sich durch reine ersetzen ließen, verbieten. Dadurch würde man dazu beitragen, dass das Recyceln sich lohnen würde und weniger energieaufwendig wäre. Die EU hat bereits Regelungen zum Thema Einwegplastik, die im Jahr 2021 eintreten werden, verabschiedet. Ich hoffe, dass auf diese schnellstmöglich weitere strengere Auflagen folgen werden.

Für den einzelnen Bürger gilt einzig und alleine: So gut wie möglich auf alle Arten von Plastik verzichten. Dies gilt sowohl besonders für Einwegplastik, als auch für alle andere Arten von Plastik. Wenn es eine Alternative, z. B. aus Glas, gibt, sollte man zu dieser greifen.

Wenn man trotzdem einmal Plastikabfall hat, sollte man diesen auf jeden Fall richtig getrennt zum Recycling geben, da dies immer noch besser ist, als wenn er im Hausmüll oder in der Umwelt landet.

8 Literatur- und Quellenverzeichnis

Bücher:

ABTS, G. (2016): Kunststoffwissen für Anfänger (3., aktualisierte und erweiterte Aufl.). München: Carl Hanser Verlag.

SCHWARZ / EBELING / RICHTER (2016): Kunststoffkunde (10., überarbeitete Aufl.). Würzburg: Vogel Business Media GmbH & Co KG.

Internetseiten:

- <http://chimie.lgk.lu/2GGE/Cours/04/alkanenin/alkanenin.htm>
- <http://workinginfieldofgrease.blogspot.com/2012/07/wonders-of-polypropylene.html>
- https://1379989n.esidoc.fr/id_1379989n_39871.html
- <https://cs.wikipedia.org/wiki/Polypropylen#/media/Soubor:Polypropylene.svg>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Polystyrol>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Aromaten>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Chlorwasserstoff>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Ester>
- https://de.wikipedia.org/wiki/Ges%C3%A4ttigte_Verbindingen
- https://de.wikipedia.org/wiki/Organische_Chemie
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Polyethylenterephthalat>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Polypropylen>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Polystyrol>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Polyvinylchlorid>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Recycling-Code>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Synthese>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Thermoplast>
- https://de.wikipedia.org/wiki/Unges%C3%A4ttigte_Verbindingen
- <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Propene-2D-flat.svg>
- <https://eu-recycling.com/Archive/25138>
- <https://lexikon.wohnen.de/polypropylen/>
- <https://link.springer.com/article/10.1007/s00506-019-0062>
- <https://link.springer.com/article/10.1007/s00506-019-00628-w>
- <https://metro.co.uk/2018/04/18/can-recycle-polystyrene-7478185/>
- <https://seiloo.de/polypropylenseile/290-4mm-polypropylenseil-rot-400m-pp-seil-polypropylen.html>
- https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/8a/Polypropylene_tacticity.svg/438px-Polypropylene_tacticity.svg.png
- <https://utopia.de/ratgeber/pet-polyethylenterephthalat-was-du-ueber-den-kunststoff-wissen-solltest/>
- <https://utopia.de/ratgeber/polypropylen-pp-was-du-ueber-den-kunststoff-wissen-solltest/>
- <https://utopia.de/ratgeber/polystyrol-wissenswerte-informationen-ueber-den-kunststoff/>
- https://www.alibaba.com/product-detail/PVC-Leather_169418726.html
- <https://www.amazon.de/BIOZOYG-Einweg-Besteck-Besteckset-Einwegbesteck-umweltfreundlich/>
- <https://www.careelite.de/plastik-muell-fakten/#produktion-statistik>
- <https://www.chemie.de/lexikon/Kunststoff.html#Kunststoffrecycling>
- <https://www.chemie.de/lexikon/Polypropylen.html#Herstellung>

- <https://www.chemie.de/lexikon/Polystyrol.html>
- <https://www.chemie.de/lexikon/Polyvinylchlorid.html>
- https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Datei:Essigs%C3%A4ure_Elektronenformel.svg
- https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Datei:Essigs%C3%A4ure_Valenzstrichformel.svg
- https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Datei:Propan_Struktur.svg
- <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Elektronenformel>
- <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Keilstrichformel>
- <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Polyvinylchlorid>
- <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Valenzstrichformel>
- <https://www.ecosia.org/images?q=polystyrol%20chemische%20formel#id=AE37F5CA204B78CD52F51AD945B4018BD0CBF86A>
- <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/KrWG.pdf>
- <https://www.gesundheit.de/medizin/gesundheit-und-umwelt/mikroplastik>
- <https://www.greenpeace.org/luxembourg/de/aktualitaet/3884/warum-wir-aufhoeren-sollten-an-den-mythos-des-recyclbaren-plastiks-zu-glauben/>
- <https://www.kunststoffe.de/bildergalerien/artikel/werkstoff-fuer-alle-faelle-3453060.html>
- <https://www.martina-rüter.de/text-fachtexte-naturwissenschaften/bionik/mehlwuermer-fressen-plastikmuell/>
- <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/abfall-und-recycling/recycling/27543.html>
- <https://www.plasticseurope.org/de/focus-areas/circular-economy/zero-plastics-landfill/recycling-and-energy-recovery>
- <https://www.saechsische.de/plus/das-problem-mit-dem-kunstrasen-5104050.html>
- <https://www.schlichter.com/folien/pvc-feinschrumpffolien/>
- <https://www.schwimmbad-brunn.de/PVC-ROHR-HART-d-50-mm>
- https://www.seilnacht.com/Lexikon/k_pvc.html
- <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/muell-fressende-raupe-streit-um-forschungsarbeit-a-1165373.html>
- <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/plastik-menschen-haben-mehr-als-8-milliarden-tonnen-produziert-a-1158676.html#>
- <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/plastikmuell-bis-zu-13-millionen-tonnen-landen-in-meeren-a-1018226.html>
- <https://www.sueddeutsche.de/gesundheit/mikroplastik-mensch-1.4181146>
- <https://www.unibw.de/werkstoffe/lehre/bachelorstudium/skripte-werkstoffe/kunststoffe-2018.pdf/view>
- <https://www.verpacken24.com/shop/2361-eisbecher-royal-aus-polystyrol-ps-transparent>
- <https://www.watson.ch/leben/wissen/652787665-an-unserem-plastik-werden-selbst-noch-unsere-ur-ur-ur-enkel-freude-hab>

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mechanische Einteilung von Thermoplasten	4
Abbildung 2: Gesättigte Verbindung, Butan	7
Abbildung 3: Ungesättigte Verbindung, Propylen.....	7
Abbildung 4: Aromatische Verbindung, Benzol	8
Abbildung 5: Elektronen Formel, Essigsäure.....	9
Abbildung 6: Valenzstrichformen, Essigsäure	9
Abbildung 7: Keilstrichformel, Propan	10
Abbildung 8: Monomer mit Doppelbindung.....	11
Abbildung 9: Teil eines Polymeren.....	11
Abbildung 10: Taktizität	11
Abbildung 11: Chemisches Recycling	14
Abbildung 12: Propen Monomer 1	17
Abbildung 13: Propen Monomer 2	17
Abbildung 14: Isotaktisches Polypropylen	17
Abbildung 15: Stuhl aus PP.....	18
Abbildung 16:Seil aus PP.....	18
Abbildung 17: Becher aus PP.....	18
Abbildung 18: Styrol-Monomer 1	20
Abbildung 19: Ataktisches Polystyrol	21
Abbildung 20: Eisbecher aus PS	22
Abbildung 21: Verpackungsmaterial	22
Abbildung 22: Einwegbesteck aus PS	22
Abbildung 23: Polymerisation von Vinylchlorid	23
Abbildung 24: Rohre aus PVC.....	24
Abbildung 25: Kunstleder aus PVC.....	24
Abbildung 26: Folie aus PVC	24
Abbildung 27: Polyethylenterephthalat.....	25
Abbildung 28: Kunstrasen aus PET.....	26
Abbildung 29: Lebensmittelverpackungen aus PET.....	26
Abbildung 30:PET-Flaschen	26