

Versuch 1. Erkennen von Kunststoffen

1.1. Aufgaben

Anhand von bekannten Kunststoffen sind einfache Vorproben durchzuführen. Zwei unbekannte Kunststoffe sind anhand dieser Vorproben zu identifizieren.

Grundlegende Operationen wie Lösen, Fällern, Abtrennen von Beimengungen und Depolymerisation sollen an Beispielen durchgeführt werden.

1.2. Literatur

1) D. Braun, *Erkennen von Kunststoffen: qualitative Kunststoffanalyse mit einfachen Mitteln*, 3. erg. und erw. Aufl., München, Wien, Hanser Verlag, 1998.

2) A. Krause, *Kunststoff-Bestimmungsmöglichkeiten*, Hanser, München 1970.

3) W. Hellerich, *Werkstoff-Führer Kunststoffe*, Hanser, München 1978.

4) R. P. Brown, *Taschenbuch der Kunststoff-Prüftechnik*, Hanser, München 1984.

1.3. Kunststoffe – Theoretische Grundlagen

Kunststoffe sind - meistens organische - makromolekulare Werkstoffe, die vollsynthetisch aus niedermolekularen Verbindungen oder durch chemische Veränderungen von makromolekularen Naturstoffen - in erster Linie Cellulose - hergestellt werden (siehe dazu auch Versuch 3, „Reaktionen an Polymeren“). Zwischen den einzelnen Makromolekülen, aus denen ein Kunststoff besteht, gibt es physikalische Wechselwirkungen, die typische Eigenschaften wie Festigkeit, Härte oder Erweichungsverhalten bestimmen. Je nach dem Ordnungsgrad der Makromoleküle im festen Zustand kann man zwischen teilkristallinen und amorphen Kunststoffen unterscheiden. Dementsprechend lassen sich Kunststoffe in der Regel durch Erwärmen erweichen und in vielen Fällen auch schmelzen.

Je nach ihrem Verhalten in der Wärme lassen sich Kunststoffe in Thermoplaste und Duroplaste (auch Duromere) einteilen. Thermoplaste werden in der Wärme fließfähig und erstarren beim Abkühlen wieder. Außer durch Zufügung von Wärme lassen sich die intermolekularen Wechselwirkungen auch durch Einwirkung von geeigneten Lösungsmittelmolekülen aufheben; die Stoffe sind löslich.

Im Gegensatz zu den Thermoplasten sind die Duromere nach Verarbeitung vernetzt und weder schmelzbar noch löslich. Sie können nur durch chemische Zerstörung der Netzbrücken in kleinere und damit schmelzbare und lösliche Bruchstücke gespalten werden.

Eine weitere Gruppe von polymeren Werkstoffen stellen die Elastomere dar. Sie bestehen aus - meist relativ schwach - vernetzten Makromolekülen. Dies ermöglicht den Elastomeren das typische kautschukelastische Verhalten, bei dem bei geringen Spannungen Dehnungen bis zu 600% erreichbar sind. Die Vernetzungen sind auch dafür verantwortlich, daß Elastomere beim Erhitzen bis kurz unterhalb der Zersetzungstemperatur nicht schmelzbar sind, wodurch sie sich von manchen ebenfalls elastischen Thermoplasten (z.B. Weich-PVC) unterscheiden.

1.4. Kunststoffanalyse

1.4.1 Grundlagen

Polymere liegen entweder als Fertig- oder Halbfabrikate vor, d.h. als Endprodukte oder als Fasern, Ballen, Schnitzel, Granulate. Hieraus sind Fasern bzw. Gewebe leicht erkennbar. Zu den kommerziellen Fasern gehören: Polyamide, Polyacrylnitril, Polyethylenterephthalat, Celluloseacetat, Carboxymethylcellulose, Polypropylen, Polyurethan, Polyvinylalkohol, Polycarbonat und chlorierte Polyvinylchloride. Diese Zuordnung ist nur in einer Richtung immer eindeutig, denn Polyamide und Polyester werden auch im Thermoplastsektor genutzt, Polypropylen sogar überwiegend.

Polymere selbst sind meist transparent und farblos. Nur in Ausnahmefällen besitzen sie von Natur aus oder durch die Herstellung eine Eigenfarbe, wie z.B. die braunen Phenoplaste. Polymere sind mit verschiedenen Materialien gut einfärb- und füllbar. Demzufolge kann die Farbe kein Charakteristikum bezüglich des Erkennens sein, auch wenn z.B. Autoreifen immer schwarz sind. Gleiches gilt für die Transparenz, die wesentlich durch Füllstoffe beeinflusst wird. Auch die Oberfläche eignet sich schlecht zur Charakterisierung. Zwar gilt Polymethylmethacrylat als kratzempfindlich, und Polyethylen weist eine wachsartig fettige Griffigkeit auf, diese Eigenschaften können jedoch durch Füllstoffe verändert werden. Nur bei den Fasern gibt es ein relativ sicheres Unterscheidungsmerkmal: Naturfasern zeigen unter dem Mikroskop eine unregelmäßige Oberfläche, während die Oberflächen von Synthesefasern gleichmäßig erscheinen.

Am Anfang der Kunststoffanalyse stehen verschiedene, einfache Vorproben wie die Feststellung der Löslichkeit, der Dichte und des Erweichungs- und Schmelzverhaltens. Anschließend wird auf die Anwesenheit wichtiger Heteroelemente wie Stickstoff, Halogene und Schwefel geprüft. Hieran kann sich ein systematischer, vor allem auf der Löslichkeitsprüfung und einigen einfachen, spezifischen Tests beruhender Analysengang anschließen. Weiterhin gehört zur vollständigen Kunststoffanalyse die Bestimmung anorganischer oder organischer Füllkörper oder sonstiger Begleitstoffe wie Stabilisatoren, Weichmacher oder Flammschutzmittel.

Liegen die zu untersuchenden Kunststoffe nicht in feinverteilter Form vor, so sind sie vor ihrer Untersuchung in geeigneter Weise zu zerkleinern. Hierzu eignet sich das Zermahlen - gegebenenfalls nach Zugabe von Trockeneis oder flüssigem Stickstoff, wodurch zähe oder elastische Kunststoffe spröde werden. Anorganische oder organische Beimengungen sind vor der Untersuchung durch Extraktion abzutrennen. Umgekehrt können nichtvernetzte Polymere durch Lösen in geeigneten Lösungsmitteln von Füllstoffen oder Verstärkungsmaterialien (Glasfasern, Ruß) abgetrennt werden. Das Polymere kann dann durch Ausfällen (Eintropfen in Methanol) zurückgewonnen werden.

1.4.2. Vorproben

- *Löslichkeit*

In Tabelle 1 ist die Löslichkeit verschiedener Kunststoffe in gängigen Lösungsmitteln zusammengestellt. Zur Prüfung der Löslichkeit gibt man etwa 0,1 g des möglichst feinverteilten Kunststoffs in ein Reagenzglas und setzt 5 - 10 ml des Lösungsmittels zu. Man schüttelt im Verlauf von einigen Stunden mehrfach und beobachtet eine evtl. Quellung der Probe. Zur Beschleunigung kann gegebenenfalls erwärmt oder ein Ultraschallbad benutzt werden.

- *Dichtebestimmung*

Die Dichtebestimmung von Kunststoffen ist insbesondere dann problematisch, wenn es sich nicht um kompakte Probekörper handelt (beachte: Roh- und Reindichte bzw. Einfluss von Beimengungen). Beim Vorliegen pulverförmiger oder granulierter Proben muß das Volumen pyknometrisch oder mittels Auftriebsverfahren (Mohrsche Waage) bestimmt werden. Einfacher ist häufig das sogenannte Schwebeverfahren, bei dem die Probe in einer Flüssigkeit gleicher Dichte zum Schweben gebracht wird. Die Dichte der Flüssigkeit kann dann in bekannter Weise mit Aerometern gemessen werden. Als Flüssigkeiten für $\delta > 1 \text{ g/cm}^3$ eignen sich wäßrige Zinkchlorid- oder Magnesiumchlorid-Lösungen, bei Dichten unter 1 g/cm^3 Methanol-Wasser-Gemische. Stehen Probekörper zur Verfügung, kann die Dichte über die Verdrängungsmethode bestimmt werden.

Dichtebestimmung nach modifizierter Auftriebsmethode (Mohr'sche Waage):

Der Probekörper wird am Haken der Waage befestigt und gewogen (m_P). Danach wird in die Waage ein Wasserglas gestellt in das der Probekörper eintaucht. Danach wird erneut gewogen (m_A).

$$m_W = m_P - m_A$$

$$V_W = V_P = m_W / \rho_W$$

$$\rho_P = m_P / V_P = m_P / (m_W / \rho_W) = (m_P \cdot \rho_W) / m_W = (m_P \cdot \rho_W) / (m_P - m_A)$$

m_W = Masse des verdrängten Wassers

ρ_W = Dichte des Wassers ($\rho_W (20^\circ\text{C}) = 0.998 \text{ g/ml}$).

m_A = durch den Auftrieb scheinbar verminderte Masse

Verhalten von Kunststoffen beim Erwärmen

Nicht vernetzte thermoplastische Kunststoffe erweichen im Allgemeinen beim Erwärmen und beginnen bei weiterem Erhitzen in einem meist recht breiten und nicht scharf begrenzten Temperaturbereich zu fließen. Teilkristalline Polymere besitzen in der Regel engere Schmelzbereiche, die aber auch stets weniger scharf sind als die Schmelzpunkte von niedermolekularen kristallinen Stoffen. Oberhalb der Fließtemperatur beginnt dann die als thermischer Abbau bezeichnete chemische Zersetzung der Probe, die Pyrolyse.

- *Pyrolysetest*

Man gibt etwa 100 mg des Kunststoffs in ein Glühröhrchen, an dessen offenem Ende sich ein angefeuchtetes pH-Papier befindet. Man erhitzt nun das Röhrchen mit der Sparflamme des Bunsenbrenners (langsam). Je nach der Färbung des pH-Papiers, hervorgerufen durch die Reaktion mit den entweichenden Dämpfen, lassen sich die Kunststoffe in drei Klassen einteilen (Tabelle 3).

- *Brennprobe*

Zum Prüfen des Verhaltens in der Flamme hält man eine kleine Probe des Kunststoffs in die Sparflamme des Bunsenbrenners. Man beobachtet die Brennbarkeit (Flammenfärbung, Rauch) innerhalb und außerhalb der Flamme sowie den Geruch nach dem Verlöschen. Tabelle 4 zeigt das Verhalten der wichtigsten Kunststoffe bei der Brennprobe. (Zur Beachtung: viele Kunststoffe enthalten flammhemmende Zusätze!)

- Schmelzverhalten

Wie schon ausgeführt wurde, erweichen oder schmelzen nur unvernetzte Kunststoffe; in einigen Fällen liegen die Erweichungs- oder Schmelzbereiche aber oberhalb des Gebietes, in dem die Polymeren thermisch stabil sind (Zersetzung). Bei vernetzten Kunststoffen tritt in der Regel bis kurz vor dem Beginn der Zersetzung kein Erweichen ein, so dass dies ein (nicht eindeutiges) Kennzeichen aller gehärteter Duroplaste ist. Allgemein gilt außerdem, dass hochmolekulare Stoffe keine so scharfen Schmelzpunkte haben wie kristalline niedermolekulare organische Verbindungen. Aus Tabelle 5 gehen Erweichungs- und Schmelzbereiche der wichtigsten Polymere hervor. Die Bestimmung der Erweichungsbereiche von Kunststoffen kann mit den in der organischen Chemie üblichen Methoden (Schmelzpunktröhrchen, Heiztisch, Mikroskop) erfolgen. Zu beachten ist, daß das thermische Verhalten häufig stark von der Geschwindigkeit des Aufheizens und von etwaigen Zusatzstoffen abhängig ist.

1.4.3. Prüfung auf Heteroelemente

Als Heteroatome werden hier Stickstoff, Schwefel, Halogene, Phosphor und Silizium betrachtet. Zum Nachweis müssen die Heteroelemente in lösliche Form überführt werden; dazu dient der Natrium-Aufschluss (außer bei Silizium).

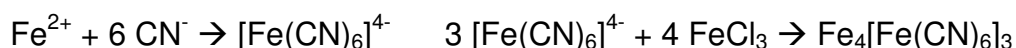
- Natrium-Aufschluss

In einem trockenen Glühröhrchen werden ca. 100 mg Substanz mit der gleichen Menge Natrium oder Kalium mit dem Bunsenbrenner bis zur Rotglut erhitzt, wobei die Heteroatome reagieren. Das rotglühende Röhrchen wird dann in 5-10 ml destilliertes kaltes Wasser (im Becherglas) gegeben. Das Glühröhrchen zerspringt, überschüssiges Alkalimetall reagiert mit dem Wasser und die Heteroatome liegen gebunden in löslichen Natriumsalzen vor. Anschließend wird die Lösung filtriert und kann dann für die Einzelnachweise genutzt werden.

(C, H, O), N, S, P, Hal + Na → NaCN, Na₂S, Na₃PO₄, NaCl

- Stickstoff-Nachweis

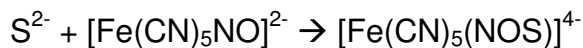
Lassaigne-Probe: Eine Probe der filtrierten Aufschlußlösung wird mit einigen Körnchen Eisen(II)-sulfat erhitzt. Anschließend setzt man wenige Tropfen einer 5%igen Eisen(III)-chloridlösung zu und säuert mit Salzsäure an. Bei Gegenwart von Stickstoff bildet sich ein Niederschlag von Berliner Blau. Ist wenig Stickstoff vorhanden, erhält man eine schwachgrüne Lösung, aus der erst nach mehrstündigem Kochen ein Niederschlag ausfällt. Wenn die Lösung gelb bleibt, ist kein Stickstoff vorhanden.



- Schwefel-Nachweis

Wenige Milliliter der alkalischen Aufschlußlösung werden mit einigen Tropfen einer wäßrigen 1%igen Dinatrium-pentacyanonitrosylferrat-Lösung (Nitroprussid-natrium, Natrium-nitroprussid, Natriumnitroprussiat) versetzt. Bei Anwesenheit von Schwefel tritt

eine Violettfärbung auf. (alternativ: Verwendung einer "Silbermünze" bzw. von Bleiacetatpapier)

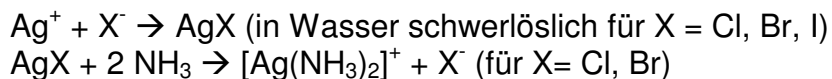


- Halogen-Nachweis: Beilstein-Probe

Halogene, besonders Chlor, lassen sich leicht und sehr empfindlich mit der sogenannten *Beilstein-Probe* nachweisen. Dazu wird das Ende eines Kupferdrahtes in der nicht leuchtenden Bunsenflamme ausgeglüht, bis die Flamme farblos ist. Nach dem Abkühlen wird eine kleine Probe der zu untersuchenden Substanz auf den Draht gebracht und am Rand der nicht leuchtenden Flamme erhitzt. Nach dem Verbrennen des Kunststoffes erkennt man bei Anwesenheit von Halogenen eine grüne bis blaugrüne Färbung der Flamme. (Bei der Beilstein-Probe handelt es sich um einen sehr empfindlichen Nachweis. Eindeutig kann nur die Abwesenheit von Halogenen nachgewiesen werden, da stickstoffhaltige organische Verbindungen wie z.B. Cyanid-Substanzen auch eine positive Reaktion bewirken können.)

- Halogen-Nachweis: Chlor, Brom und Jod

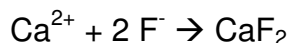
Ca. 2 ml der Aufschlußlösung werden mit 30%iger Salpetersäure angesäuert und zum Sieden erhitzt (Entfernung von Sulfid und Cyanid). Nach Zugabe einiger Tropfen 3%iger Silbernitratlösung zeigt ein weißer, käsiger Niederschlag (löslich in verdünntem Ammoniak) Chlor, ein gelblicher Niederschlag (löslich in konz. NH_3) Brom und ein gelber Niederschlag (unlöslich in NH_3) Jod an. Brom und Jod sind in Polymeren sehr ungewöhnlich; Brom ist eventuell auch einem Flammschutzmittel zuzuordnen.



- Halogen-Nachweis: Fluor

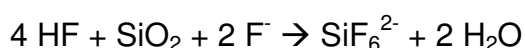
mit CaCl_2 :

Ca. 2 ml der filtrierten Aufschlußlösung werden mit verdünnter Essigsäure angesäuert und mit 1N Calciumchloridlösung versetzt, wobei sich in Anwesenheit von Fluor ein gallertartiger Niederschlag von Calciumfluorid bildet.



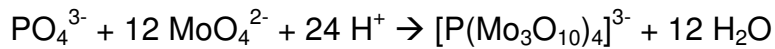
Ätz-/Kriechprobe:

Fluor lässt sich dadurch nachweisen, daß man ca. 0.5 g des Kunststoffes in einem kleinen Reagenzglas in der Bunsenbrennerflamme pyrolysiert; nach dem Erkalten werden wenige Milliliter konz. Schwefelsäure zugesetzt. Bei Anwesenheit von Fluor tritt eine charakteristische Unbenetzbarkeit der Wand des Glases auf.



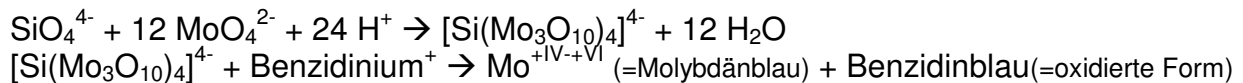
- Phosphor-Nachweis

Ca. 2 ml der filtrierten Aufschlußlösung versetzt man mit Ammoniummolybdatlösung, säuert mit Salpetersäure an und erhitzt etwa eine Minute. Bei Anwesenheit von Phosphor bildet sich ein gelber Niederschlag.



- Silizium-Nachweis

In einem Nickeltiegel werden ca. 50 mg des Polymeren mit der 100 mg Natriumcarbonat und 10 mg Natriumperoxid(!) gemischt und langsam aufgeschmolzen. Nach dem Abkühlen und Auflösen in wenig Wasser erhitzt man kurz und neutralisiert mit verdünnter Salpetersäure an (oder schwach ansäuern). Nach anschließender Zugabe von einem Tropfen Ammoniummolybdatlösung wird erneut erhitzt und nach dem Erkalten mit einem Tropfen Benzidin-Lösung versetzt. Nach Zugabe eines Tropfens gesättigter Natriumacetatlösung ergibt sich bei Anwesenheit von Silizium eine Blaufärbung.



1.5. Abtrennen von Hilfsstoffen

1.5.1. Allgemeines

Kunststoffe enthalten Hilfsstoffe wie z.B. Stabilisatoren, Antioxidantien, Weichmacher, Füllstoffe, Schlichten und Pigmente. Das Abtrennen dieser Zusätze ist deswegen wichtig, weil sie das Ergebnis der Analyse verfälschen können. Durch Lösen des Polymers kann man Füllstoffe durch Zentrifugieren abtrennen. Weichmacher und Stabilisatoren dagegen lassen sich extrahieren. Dazu extrahiert man eine Probe des Kunststoffes in einer Soxhlet-Apparatur in der Regel ca. 12 Stunden zur vollständigen Abtrennung. Als Extraktionsmittel dienen für stickstoffhaltige Stabilisatoren Methanol oder Diethylether, für Phenole und Amine als Antioxidantien Chloroform. Als Weichmacher dienen vorwiegend Phthalsäureester, die mit Diethylether extrahiert werden.

1.5.2. Abtrennung von Glasfasern aus Polyamid

Ca. 100 mg des glasfaserverstärkten Polyamids werden in einem Zentrifugenglas mit 5 ml m-Kresol versetzt und im Ultraschallbad innerhalb von ca. 30 Minuten gelöst. Nach dem Abzentrifugieren der festen Bestandteile (Glasfasern und Pigmente) wird die klare Lösung mit einer Pasteur-Pipette in ein weiteres Zentrifugenglas mit Methanol eingetropft und das ausgefällte Polymer erneut abzentrifugiert.

1.6. Abbaureaktionen von Polymeren

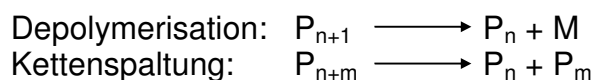
1.6.1. Allgemeines

Reaktionen, bei denen der Polymerisationsgrad von Polymeren verringert wird, nennt man Abbaureaktionen. Dabei können sich zusätzlich noch Veränderungen der chemischen Konstitution der Grundbausteine einstellen oder Vernetzungen bilden. Dies ist besonders dann der Fall, wenn der Kunststoff längere Zeit Umwelteinflüssen, besonders dem Licht und der Luft ausgesetzt ist. In diesem Fall spricht man vom „Altern von Polymeren“; es ist meist unerwünscht, da der Kunststoff dabei seine Eigenschaften ändert.

Im Gegensatz dazu werden Abbaureaktionen oft gezielt eingesetzt, um etwa die Konstitution, die Konfiguration oder die Modifikation des Makromoleküls zu untersuchen (z.B. bei der Sequenzanalyse von Peptiden) oder aus geeigneten sortenreinen Kunststoffabfällen das Monomer zurückzugewinnen.

Die Abbaureaktion des Makromoleküls wird durch Spaltung kovalenter Bindungen hervorgerufen. Die dazu erforderliche Energie kann auf physikalische oder chemische Art aufgebracht werden. Zu ersterem gehört das Einwirken von Wärme, Licht, Ultraschall oder mechanischer Energie, zum zweiten u.a. die Hydrolyse von Polykondensaten oder die reduktive Spaltung von Polyalkylenpolysulfiden.

Beim Abbau sind zwei Reaktionsmöglichkeiten zu unterscheiden:



Bei der Kettenspaltung zerfallen die Makromoleküle in unterschiedlich große Bruchstücke; diese Reaktion ist die Umkehr der Kettenverknüpfung. Bei der echten Depolymerisation werden vom Kettenende her die Grundbausteine in Form von Monomermolekülen nacheinander abgespalten. Die Depolymerisation ist somit die Rückreaktion der Polymerisation.

Inaktive Makromoleküle können jedoch nicht ohne weiteres depolymerisieren, sie müssen aktiviert werden. Dies kann durch homolytische Bindungsspaltung (Radikalbildung) oder durch Bildung ionischer Endgruppen erfolgen. Dabei neigen vor allem Makromoleküle mit großen Substituenten wegen der in der Kette herrschenden Spannungen zur Depolymerisation, da sie auch relativ niedrige ceiling-Temperaturen besitzen.

1.6.2. Depolymerisation von Polystyrol

In einer einfachen Destillationsapparatur werden 20 g Polystyrol mit fächernder Flamme geschmolzen und dann kräftiger erhitzt. Sobald entstandenes Styrol zu sieden beginnt, bilden sich weiße Dämpfe. Aus dem Kühler tropft eine anfangs gelbliche, später farblose wasserklare Flüssigkeit (Styrol: bp.~145°C). Sie besteht zum größten Teil aus monomerem Styrol, enthält aber auch Dimere und Trimere (beachte: selbstinitiierte Polymerisation des Styrols). Nach Depolymerisation von etwa 50 % der Ausgangsmenge wird der Versuch abgebrochen.

Anhang: Tabellen zur Kunststoffanalyse

Tabelle 1. Lösungsmittel und Fällungsmittel einiger Kunststoffe

Polymeres	Lösemittel	Nichtlöser
Polyethylen, Poly-1-buten, isotakt. Polypropylen	p-Xylol*, Trichlorbenzol*, Dekan* Dekalin*	Aceton, Diethylether, niedere Alkohole
atakt. Polypropylen	Kohlenwasserstoffe, Isoamylacetat	Ethylacetat, Propanol
Polyisobutylen	Hexan, Toluol, CCl ₄ , THF	Aceton, Methanol, Methylacetat
Polybutadien, Polyisopren	aliphatische & aromatische KW	Aceton, Diethylether, niedere Alkohole
Polystyrol	Toluol, Chloroform, Cyclohexanon, Butylacetat, CS ₂	niedere Alkohole, Diethylether, Aceton
Polyvinylchlorid	THF, Cyclohexanon, Methylethylketon, DMF	Methanol, Aceton, Heptan
Polyvinylfluorid	Cyclohexanon, DMF	aliphat. KW, Methanol
Polytetrafluorethylen	unlöslich	-
Polyvinylacetat	Toluol, Chloroform, Methanol, Aceton, Butylacetat	Diethylether, Petrolether, Butanol
Polyvinylisobutylether	Isopropanol, Methylethylketon, Chloroform, aromat. KW	Methanol, Aceton
Polyacryl- und Polymethacrylsäureester	Chloroform, Aceton, Ethylacetat, THF, Toluol	Methanol, Diethylether, Petrolether
Polyacrylnitril	DMF, Dimethylsulfoxid, konz. Schwefelsäure	Alkohole, Diethylether, Wasser, Kohlenwasserstoffe
Polyacrylamid	Wasser	Methanol, Aceton
Polyacrylsäure	Wasser, verd. Alkaliäugen, Methanol, Dioxan, DMF	KW, Methylacetat, Aceton
Polyvinylalkohol	Wasser, DMF*, DMSO*	KW, Methanol, Aceton, Diethylether
Cellulose	wäβr. Kupfertetraminhydroxid, wäβr. Zinkchlorid, wäβr. Calciumthiocyanat	Methanol, Aceton
Cellulose-2-acetat	Aceton	Methylenchlorid
Cellulosetriacetat	Methylenchlorid, Chloroform, Dioxan	Methanol, Diethylether
Cellulosetrimethylether	Chloroform	Ethanol, Diethylether, Petrolether
Carboxymethylcellulose	Wasser	Methanol
aliphatische Polyester	Chloroform, Ameisensäure, Toluol	Methanol, Diethylether, aliphat. KW
Polyethylenterephthalat	m-Kresol, o-Chlorphenol, Nitrobenzol, Trichloressigsäure	Methanol, Aceton, aliphat. KW
Polyamide	Ameisensäure, konz. Schwefelsäure, DMF, m-Kresol	Methanol, Diethylether, KW
Polyurethane (unvernetzt)	Ameisensäure, γ -Butyrolacton, DMF, m-Kresol	Methanol, Diethylether, KW
Polyoxymethylen	γ -Butyrolacton*, DMF*, Benzylalkohol*	Methanol, Diethylether, aliphat. KW
Polyethylenoxid	Wasser, Toluol, DMF	aliphat. KW, Diethylether
Polydimethylsiloxan	Chloroform, Heptan, Toluol Diethylether	Methanol, Ethanol
Polycarbonat	Chlorkohlenwasserstoffe (z.B. DCM), Chlorbenzol	Methanol, Aceton, Hexan, Wasser, ...
Polyethersulfon	CH ₂ Cl ₂ , CHCl ₃	Hexan

* evtl. erst bei höheren Temperaturen

Tabelle 2. Die Rohdichten einiger Kunststoffe (Achtung: Beimengungen !)

Dichte [g/cm ³]	Kunststoff	Dichte [g/cm ³]	Kunststoff
0,80	Silikon Gummi	1,19-1,35	Weich-PVC (ca. 40% Weichmacher)
0,85-0,92	Polypropylen	1,20-1,22	Polycarbonat auf Bisphenol -A-Basis
0,89-0,93	Polyethylen (niedrige Dichte)	1,20-1,26	vernetzte Polyurethane
0,91-0,92	Poly-1-buten	1,24	Polysulfon (BisphenolA-Diphenylsulfon-Ether)
0,91-0,93	Polyisobutylen	1,26-1,28	Phenol-Formaldehyd-Harze (füllstoff-frei)
0,92-1,0	Naturkautschuk	1,21-1,31	Polyvinylalkohol
0,94-0,98	Polyethylen (hohe Dichte)	1,25-1,35	Celluloseacetat
1,01-1,04	Polyamid-12	1,34-1,40	Cellulosenitrat
1,03-1,05	Polyamid-11	1,30-1,41	organ. gefüllte Phenol-Formaldehyd-Harze
1,04-1,06	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copol.(ABS)	~ 1.30	Polyacrylamid (nichtionisch)
1,04-1,08	Polystyrol	1,33-1,41	Polyethersulfon (Diphenylsulfon-Polyether)
1,05-1,07	Polyphenylenoxid	1,38-1,41	Hart-PVC
1,06-1,10	Styrol-Acrylnitril-Copolymere	1,38-1,41	Polyethylenterephthalat
1,07-1,09	Polyamid 610	1,41-1,43	Polyoxymethylen (Polyformaldehyd)
1,12-1,15	Polyamid 6	1,47-1,52	Harnstoff- und Melamin-Formaldehyd-Harze (organisch gefüllt)
1,13-1,16	Polyamid 66	1,47-1,55	chloriertes PVC
1,10-1,40	Epoxidharze, ungesättigte Polyesterharze	1,50-2,00	anorg. gefüllte Phenoplaste und Aminoplaste
1,14-1,17	Polyacrylnitril	1,80-2,30	glasfasergefüllte Polyester- und Epoxid-Harze
1,15-1,25	Celluloseacetobutyrat	1,86-1,88	Polyvinylidenchlorid
1,16-1,20	Polymethylmethacrylat	2,10-2,20	Polytrifluormonochlorethylen
1,17-1,20	Polyvinylacetat	2,10-2,30	Polytetrafluorethylen
1,18-1,24	Cellulosepropionat		

Tabelle 3. Reaktion der Pyrolysegase einiger Kunststoffe

Lackmuspapier: rot	kaum verändert	blau
pH-Papier: 0,5-4,0	5,0-5,5	8,0-9,5
halogenhaltige Polymere (PVC)	Polyolefine	Polyamide
Polyvinylester	Polyvinylalkohol	ABS-Polymere
Celluloseester	Polyvinylacetale	Polyacrylnitril
Polyethylenterephthalat	Polyvinylether	Phenol- und Kresolharze
Novolake	Styrolpolymere (auch Styrol-Acrylnitril-Copolymere)	Aminoplaste (Anilin-, Melamin-, Harnstoff- Formaldehyd-Harze)
Polyurethanelastomere	Polymethacrylsäureester	Polyacrylamid
ungesättigte Polyesterharze	Polyoxymethylen	
fluorhaltige Polymere	Polycarbonate	
Vulkanfiber	lineare Polyurethane	
Polyalkylensulfide	Silikone	
Polyethersulfone	Phenolharze	
	Epoxidharze	
	vernetzte Polyurethane	

Tabelle 4: Verhalten von Kunststoffen bei der Brennprobe

Brennbarkeit	Flamme/Rauch	Geruch der Dämpfe	Kunststoff
nicht brennbar	-- -- -- --	-- stechend nach Flußsäure -- --	Silikone Polytetrafluorethylen Polytrifluorchlorethylen Polyimide Polyethersulfone
schwer entzündbar, erlischt außerhalb der Flamme	hell, rußend hellgelb grüner Saum	Phenol, Formaldehyd Ammoniak, Amine, Formaldehyd Chlorwasserstoff	Phenoplaste Aminoplaste Chlorkautschuk, PVC, Polyvinylidenchlorid (ohne brennbare Weichmacher)
brennt in der Flamme, erlischt außerhalb langsam oder nicht	leuchtend, rußend gelb, grauer Rauch gelborange, blauer Rauch dunkelgelb, rußend gelb leuchtend, Zersetzung gelborange gelborange, rußend gelb, blauer Rand gelb, blauer Kern leuchtend, rußend	-- -- verbranntes Horn Essigsäure Phenol, verbranntes Papier kratzend verbrannter Gummi süßlich, aromatisch stechend (Isocyanat) Paraffin scharf	Polycarbonate Silikongummi Polyamide Celluloseacetat Phenolharzschichtstoffe Polyvinylalkohol Polychloropren Polyethylenterephthalat Polyurethane Polyethylen, Polypropylen (glasfaserverstärkte) Polyesterharze
Leicht entzündbar, brennt außerhalb der Flamme weiter	leuchtend, rußend dunkelgelb, schwach rußend dunkelgelb, rußend leuchtend, blauer Kern, knisternd bläulich dunkelgelb, schwach rußend hellgrün, Funken gelborange, hell, heftig	süßlich, Leuchtgas(Stadtgas) (Styrol) Essigsäure Verbrannter Gummi Süßlich-fruchtig Formaldehyd Essigsäure, Buttersäure Essigsäure Verbranntes Papier, Stickoxide	Polystyrol Polyvinylacetat Kautschuk PMMA POM Celluloseacetobutyrat Celluloseacetat Cellulose, Cellulosenitrat

Tabelle 5: Erweichungs- und Schmelzbereiche der wichtigsten Polymere*

Thermoplast	Schmelz- bzw. Erweichungsbereich (°C)
Polyvinylacetat	70-210 (abhängig vom Polymerisationsgrad);
Polystyrol	70-115
Polyvinylchlorid	75-90 (Erweichung)
Polyethylen, Dichte 0,92 g/cm ³ 0,94 g/cm ³ 0,96 g/cm ³	ca. 110 ca. 120 ca. 135
Poly(but-1-en)	125-135
Polyvinylidenchlorid	115-140 (Erweichung)
Polymethacrylsäuremethylester	120-160
Celluloseacetat	125-175
Polyacrylnitril	130-150 (Erweichung)
Polypropylen	160-170
Polyoxymethylen	165-185
Polyurethan	stark variierend, m _p für -O(CH ₂) _m OCONH(CH ₂) ₆ NHCO- mit m=2-6: 158-184
Polyamid 12	170-180
Polyvinylalkohol	230
Polyamid 11	180-190
Polyacrylamid	>140: Abspaltung von NH ₃ , Imidbildung (Vernetzung), >200: Zersetzung
Polytrifluorchlorethylen	200-220
Polyamid 610	210-220
Polyamid 6	215-225
Polybutylenterephthalat	220-230
Polycarbonat	220-230
Polyethersulfon	220 - 230
Poly(4-methylpent-1-en)	230-240
Polyamid 66	250-260
Polyethylenerephthalat	250-260
Polyphenylensulfid	260-280
PTFE	330 !
Polyaryletherketon	340-380

*Schwankungen aufgrund von Beimengungen bzw. Eigenschaftsänderung bei sehr variablen Polymerklassen

Protokollvorgaben:

- es ist die deutsche Rechtschreibung und Grammatik anzuwenden!!
- es ist eine übersichtliche Protokollform zu wahren!!
- Mindestanforderung:
 - o Protokollkopf: Name(n), Gruppennummer, Datum, Versuchstitel, Betreuer
 - o Aufgabenbeschreibung
 - o Durchführung und Beobachtung
 - o Auswertung
 - o zu allen chemischen Nachweisen sind die Reaktionsgleichungen aufzuführen (nicht nur bei Positiv-Verläufen)