



FCI
FONDS DER
CHEMISCHEN
INDUSTRIE

Themengebiet: Schule, Ausbildung, Bildung

Informationsserie Nachwachsende Rohstoffe

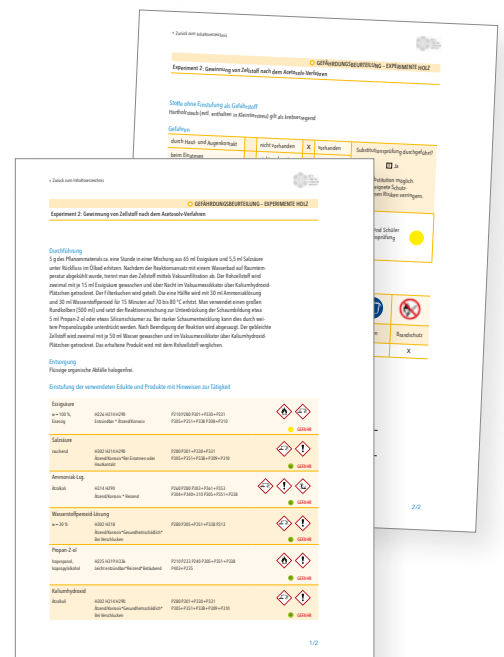
Arbeitsblätter und Experimente

Die Arbeitsblätter und Experimente (siehe S. 3) mit Lösungshinweisen (didaktische Hinweise) finden Sie auf den Internetseiten des Fonds unter: www.vci.de/fonds/unterrichtsmaterialien.



Dort sind auch die **Gefährdungsbeurteilungen** hinterlegt. Alle Abbildungen sowie das hier vorliegende Textheft stehen dort ebenfalls zum Herunterladen bereit.

Besuchen Sie uns im Internet unter www.vci.de/fonds und senden Sie uns Ihre Fragen und Anmerkungen per Mail: fonds@vci.de



Arbeitsblatt	Thema	Sekundarstufe I	Sekundarstufe II
1	Nachwachsende Rohstoffe im Alltag	X	X
2	Teller-Tank-Debatte – Kraftstoffe aus Biomasse	X	X
3	Von der Fischer-Projektion zur Haworth-Formel		X
4	Die Gewinnung von Zellstoff aus Holz	X	X
5	Zur chemischen Struktur von Fetten und Ölen	X	X
6	Gewinnung von Öl aus Raps	X	X
7	Grundlagen der Chromatographie	X	X
8	Trivialnamen	X	X
9	Funktionelle Gruppen der organischen Chemie	X	X
10	Mechanismus der alkoholischen Gärung		X
11	Spiegelbild-Isomere der Milchsäure		X
12	Darstellung von Sorbit und Mannit		X
13	Rätsel	X	X

Experiment	Thema	Sekundarstufe I	Sekundarstufe II
Experimente Holz			
1	Gewinnung von Zellstoff durch Aufschluss mit Wasserstoffperoxid und Ameisensäure		X
2	Gewinnung von Zellstoff nach dem Acetosolv-Verfahren		X
3	Darstellung von Vanillin aus Ligninsulfonsäure	X	X
4	Vergasung von Holz	X	X

Experimente Kohlenhydrate			
5	Polyester auf Basis von Sorbit	X	X
6	Darstellung eines Polyurethan-Schaums auf der Basis von Glucose, Saccharose oder Sorbit		X
7	Darstellung eines Biokunststoffes	X	X
8	Herstellen eines Kunststoffes aus Milchsäure	X	X
9	Herstellen einer Folie aus Chitosan	X	X
10	Untersuchung der Komplexieigenschaften von Chitosan	X	X
11a	Darstellung von Ethen aus Ethanol	X	X
11b	Darstellung von Ethen aus Ethanol (Demonstrationsexperiment)	X	X

Experimente Oleochemie			
12	Gewinnung von Sojaöl aus Sojaschrot	X	X
13	Epoxidation von Sojaöl		X
14	Darstellung eines Polyesters auf Basis von Sojaölepoxid	X	X
15	Darstellung eines Polyurethan-Schaums auf der Basis von Ricinusöl	X	X
16a	Dünnschichtchromatographie von Fetten	X	X
16b	Die Umesterung von Fetten	X	X
16c	Dünnschichtchromatographie von Fettsäuremethylestern	X	X

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit schließen Status-, Funktions- und Berufsbezeichnungen, die in der männlichen oder weiblichen Sprachform verwendet werden, die jeweils andere Sprachform ein.

	Vorwort	5
1	Einleitung	6
2	Methodisch-didaktische Einführung	10
3	Die Vielfalt der industriellen organischen Chemie	12
3.1	Erdöl – das Lebenselixier der Chemie	13
3.2	Mehr als Fett und Stärke	14
3.3	Von der Pflanzenzüchtung bis zur Bioraffinerie	19
4	Rohstoffe vom Acker: Die Natur sinnvoll nutzen	22
4.1	Stabil: Cellulose und Cellulosederivate	22
4.2	Auf dem Holzweg: Lignin	24
4.3	Als Rohstoff universell einsetzbar: Stärke	26
4.4	Fette und Öle	30
4.5	Terpene und Kautschuk	35
5	Chemische Bausteine aus der Natur	42
5.1	Klein, aber oho – die C1-Synthesebausteine	42
5.2	Wahre Multitalente – die C2-Synthesebausteine	43
5.3	Chemie mit Bakterien – C3-Synthesebausteine	46
5.4	C4-Synthesebausteine	54
5.5	C5-Synthesebausteine	55
5.6	Spitzenplatz für C6-Synthesebausteine	55
5.7	Synthesebausteine aus dem Wald: Die andere Seite des Lignins	59
	Literatur	62
	Impressum	64

Das Inhaltsverzeichnis, die Arbeitsblätter und die Experimente sind verlinkt.
 Klicken Sie auf den gewünschten Inhalt, und Sie gelangen direkt dorthin.
 Möchten Sie wieder zurück, klicken Sie rechts oben auf „Zurück zum Inhaltsverzeichnis“.

Vorwort



Die chemisch-pharmazeutische Industrie nutzt zur Herstellung ihrer Produkte seit langem nachwachsende Rohstoffe. Sie werden hauptsächlich bei der Herstellung von Waschmitteln und Kosmetikprodukten sowie in der Klebstoff- und Faserproduktion eingesetzt. Beispielsweise basieren oberflächenaktive Substanzen (Tenside) für Waschmittel auf Kokos- und Palmkernöl. Nachwachsende Rohstoffe haben sich überall dort durchgesetzt, wo technische und ökonomische Vorteile gegenüber fossilen Ressourcen bestehen. Rund 2,7 Millionen Tonnen nachwachsende Rohstoffe werden jährlich in der organisch-chemischen Produktion in Deutschland eingesetzt (Stand 2017). Das entspricht knapp 13 Prozent des Rohstoffeinsatzes in der deutschen chemischen Industrie.

Allerdings gibt es auch Grenzen für den Einsatz nachwachsender Rohstoffe. Für viele Anwendungen haben nachwachsende Rohstoffe eine unzureichende Qualität, oder es fehlen technische Verfahren für ihre Verarbeitung. Zudem müssen die neuen Verfahren wirtschaftlich konkurrenzfähig sein. Eine wichtige Frage ist auch die langfristige Versorgungssicherheit. Denn die Chemie tritt bei der Nutzung der Biomasse mit der Produktion von Lebensmitteln und den sehr viel größeren Sektoren der direkten Nutzung als Energieträger (Holz) sowie der Erzeugung von Energieträgern wie Biogas und Biodiesel in Konkurrenz. Gerade im Hinblick auf die stetig wachsende Weltbevölkerung und die gegenwärtigen Diskussionen rund um die „Energiewende“ nimmt die sogenannte „Teller-Tank-Thematik“ einen besonderen Stellenwert ein.

In dem vorliegenden Unterrichtsmaterial „Nachwachsende Rohstoffe“ geben wir einen aktuellen Überblick, wo die Syntheseleistung der Natur heute genutzt und an welchen Themen gegenwärtig geforscht wird. Wir erläutern, wie sogenannte Plattformchemikalien auf Basis nachwachsender statt auf Basis fossiler Rohstoffe gewonnen werden können. Auch technische, ökologische und ökonomische Grenzen beziehungsweise Probleme werden jeweils im Zusammenhang mit dem vorgestellten Produkt diskutiert. Wir hoffen, so die chemische Sicht rund um die Diskussion der Nutzung nachwachsender Rohstoffe anschaulich und für den naturwissenschaftlichen Unterricht verwertbar aufbereitet zu haben.

Das Unterrichtsmaterial „Nachwachsende Rohstoffe“ wird, ebenso wie die anderen Unterrichtsmaterialien des Fonds der Chemischen Industrie, Schulen und Hochschulen kostenlos zur Verfügung gestellt.

Vorschläge für Schülerarbeitsblätter und Experimente inklusive Lösungshinweisen (didaktische Hinweise) finden Sie auf den Internetseiten des Fonds unter: www.vci.de/fonds/unterrichtsmaterialien. Desweiteren sind dort auch die Gefährdungsbeurteilungen hinterlegt sowie alle Abbildungen. Auch das hier vorliegende Textheft steht zum Herunterladen bereit.

Klebstoffe auf der Basis von Stärke, Färbepflanzen für Naturfarben, Tenside aus pflanzlichen Ölen für Shampoos oder Kunststoffbecher aus Polymilchsäure: Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen gehören schon lange in vielfältiger Weise zu unserem Alltag.

Doch woher kommen nachwachsende Rohstoffe eigentlich? Der Begriff wurde bereits während der Ölkrise in den 1970er Jahren geprägt. Damals zeichnete sich erstmals eine Verknappung fossiler Rohstoffe ab. Die Forderung nach alternativen Rohstoffen, die langfristig zur Verfügung stehen, da sie sich immer wieder regenerieren, wuchs. Kaum war die Ölkrise überwunden, verschwand das Thema aus der öffentlichen Wahrnehmung. Der Begriff blieb aber bestehen. Er lässt sich einfach in einem Satz definieren: Nachwachsende Rohstoffe sind land- und forstwirtschaftlich erzeugte Produkte, die nicht als Nahrungsmittel verwendet werden. Sie lassen sich stofflich oder in Form von Bioenergie energetisch einsetzen.

Industriepflanzen sind ein- oder mehrjährige Pflanzen, aus denen gezielt Rohstoffe für die Industrie erzeugt werden. Energiepflanzen sind Pflanzen, die als Energieträger für die Herstellung von Kraftstoffen und für die Wärme-

und Stromgewinnung eingesetzt werden. Die Natur wird in beiden Fällen als chemische Fabrik genutzt.

Aber was stellt uns die Natur überhaupt zur Verfügung? Abbildung 1-1 zeigt die Hauptbestandteile der Biomasse, wie wir sie auf der Welt vorfinden.

Mehr als 90 Prozent der Biomasse besteht aus Polysacchariden, besonders Cellulose und Lignin (Abbildung 1-1). Beide sind Hauptbestandteile von Holz, dem weltweit am häufigsten industriell genutzten nachwachsenden Rohstoff (ca. 1,6 Milliarden Tonnen/Jahr). Zum Vergleich: Die produzierte Stahlmenge lag 2016 bei über 1,6 Milliarden Tonnen, die Kunststoffmenge bei über 320 Millionen Tonnen.

2017 wurden von der chemischen Industrie in Deutschland 2,7 Millionen Tonnen nachwachsende Rohstoffe eingesetzt. Deutschland ist dabei abhängig von Importen. 90 Prozent der eingesetzten fossilen Rohstoffe müssen importiert werden. Bei nachwachsenden Rohstoffen liegt der Anteil aus heimischer Erzeugung höher, allerdings beträgt der Importanteil auch hier rund 65 Prozent.

ABBILDUNG 1-1

Hauptbestandteile der Biomasse

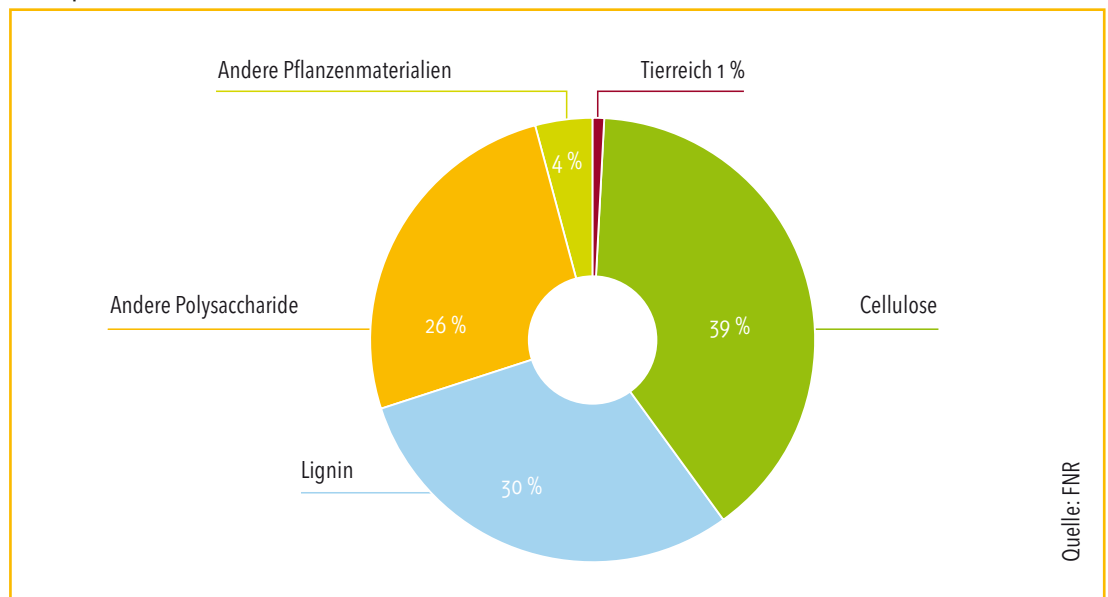


ABBILDUNG 1-2

Rohstoffbasis der organischen Chemie in Deutschland 2018

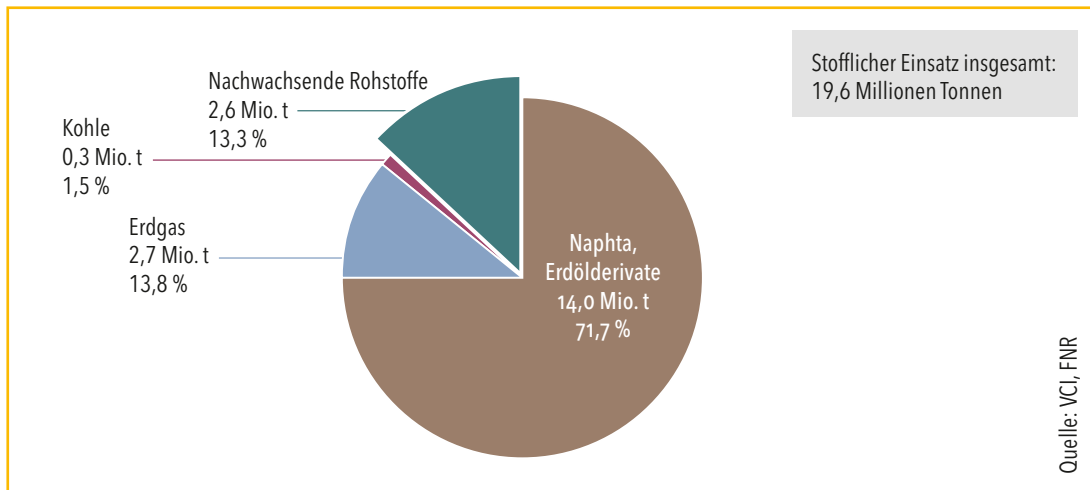


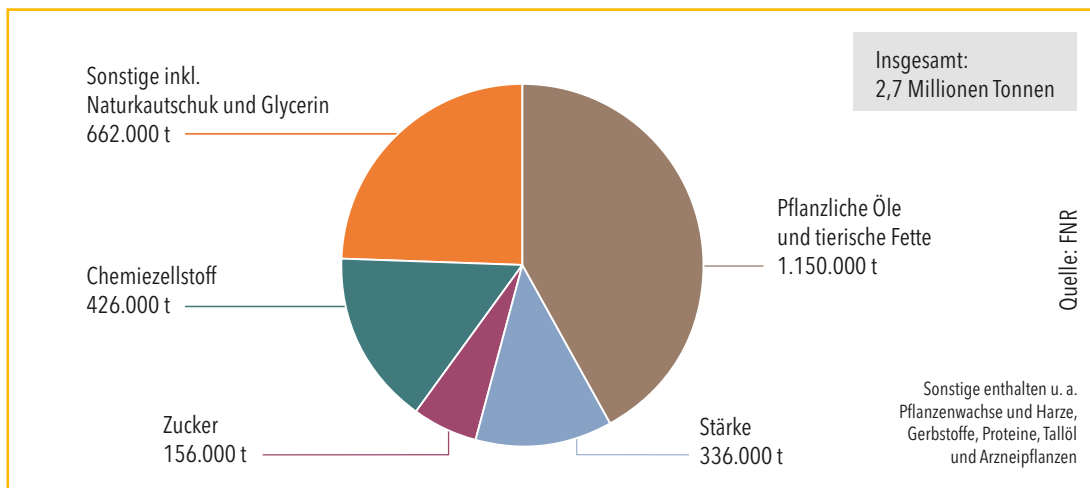
Abbildung 1-3 gibt einen Überblick, welche nachwachsenden Rohstoffe in der chemischen Industrie genutzt werden. Knapp die Hälfte entfällt auf Fette und Öle, auf Chemiezellstoff etwa ein Sechstel, was etwa der Menge von Zucker und Stärke entspricht. Fette und Öle werden vorwiegend in der Oleochemie genutzt, unter anderem zur Herstellung von Tensiden (waschaktiven Substanzen in Waschmitteln). Stärke und Zucker werden in diversen Anwendungen genutzt. Als Rohstoffe für Fermentationsprozesse sind sie die Basis für die industrielle Bio-

technologie. Cellulose (Chemiezellstoff) wird vor allem für die Herstellung von Chemiefasern (Viskose) genutzt.

Nachwachsende Rohstoffe werden heute meist für spezielle Anwendungen eingesetzt. Diese sind ausgesprochen vielfältig und reichen von der Herstellung von Kunststoffen und Fasern über Waschmittel, Kosmetika, Farben und Lacke, Druckfarben, Klebstoffe, Baustoffe, Hydrauliköle und Schmiermittel bis hin zu Arzneimitteln.

ABBILDUNG 1-3

Stofflicher Einsatz nachwachsender Rohstoffe in der chemischen Industrie in Deutschland 2017





Die Renaissance der nachwachsenden Rohstoffe

In der Chemie- und Pharmaindustrie hat die Verwendung nachwachsender Rohstoffe wie Zucker, Stärke, Cellulose und Öl eine lange Tradition. Doch durch den verstärkten Einsatz von Kohle, Erdöl und Erdgas im Industriezeitalter wurden sie – mit wenigen Ausnahmen – weitgehend verdrängt.

Diese Entwicklung verlief allerdings langsam und in mehreren Schritten, von denen hier nur drei exemplarisch dargestellt werden:

- Gegen Ende des 19. Jahrhunderts eroberten synthetische Farbstoffe („Teerfarben“) den Markt. Weiterhin gelang es den Chemikern, Naturfarbstoffe wie Indigo und Alizarin preisgünstig zu synthetisieren. Basis waren Rohstoffe, die aus dem Steinkohlenteer gewonnen wurden, der bei der Herstellung von Koks aus Kohle anfällt.
- Auch lange nach Beginn der industriellen Nutzung der Kohle diente insbesondere Holz als Quelle für Chemierohstoffe. Noch zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden aus Holz Kohle, aber auch Gas und Chemikalien wie Essigsäure und Methanol erzeugt. Besonders das aus Holz erzeugte Methanol war wertvoll, bis schließlich dessen großtechnische Synthese aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff entwickelt wurde.
- Bis etwa 1950 war Kohle der meistgenutzte Rohstoff für die Herstellung organisch-chemischer Produkte. Seitdem werden zunehmend Erdöl und Erdgas eingesetzt, um Grundstoffe wie Synthesegas (eine Mischung aus Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid), Ethen, Propen, Benzol, Toluol oder Xylol zu gewinnen. In unterschiedlichsten chemischen Verfahren entstehen daraus nach etlichen Zwischenschritten Produkte, die in vielen Industriebereichen verwendet werden.

Die Endlichkeit von Erdöl und Erdgas, steigender Rohstoffverbrauch infolge einer stark wachsenden Weltbevölkerung sowie der weltweite Klimawandel machen es heute erforderlich, dass verstärkt Biomasse – sowohl energetisch als auch stofflich – genutzt wird.

Nachwachsende Rohstoffe bilden sich immer wieder neu und sind dank ihrer Aufnahme von Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre klimaneutral. Das Interesse an nachwachsenden Rohstoffen und den Syntheseleistungen der Natur ist in Industrie und Forschung deshalb groß.

📍 METHODISCHE ANMERKUNG

Als lebensnaher Einstieg in das Thema „Nachwachsende Rohstoffe“ dient [Arbeitsblatt 1](#), in dem die Lernenden zusammenstellen sollen, welche Gegenstände aus ihrer Alltagswelt aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt sind oder sein könnten. [Arbeitsblatt 13](#) ist ein Suchsel (Wörtersuche) zum Thema „Nachwachsende Rohstoffe“ im Allgemeinen. Die Kontroverse, ob die stoffliche und energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe der Produktion von Lebensmitteln wichtige Flächen entzieht („[Tank-Teller-Diskussion](#)“ siehe S. 16), kann in Form von

Referaten vertieft dargestellt werden. Mittels Recherchen im Internet können Argumente (pro und kontra) aus der gesellschaftlichen und der wissenschaftlichen Diskussion gesammelt werden. Besonderer Wert sollte auf die Differenzierung zwischen stofflicher und energetischer Nutzung gelegt werden, da gerade bei der Energieerzeugung die Nutzung von Wind und Sonne in den vergangenen Jahren eine hohe Bedeutung erlangt hat, die Speichermöglichkeiten aber beschränkt sind.



Nachwachsende Rohstoffe können einen bedeutenden Beitrag für ein nachhaltiges und in weiten Teilen klimaneutrales Wirtschaften leisten. Bei der zukünftigen Versorgung der Menschheit mit Materialien und Energie werden sie ein unverzichtbarer Bestandteil sein. Sie sind somit nicht nur für Spezialisten aus Forschung und Wirtschaft interessant, sondern ein wichtiges Thema auch in den naturwissenschaftlichen Unterrichtsfächern, besonders im Chemieunterricht.

Die Diskussion um den Klimawandel, zunehmende Umweltbelastungen wie steigende Kohlenstoffdioxidemissionen und die Endlichkeit fossiler Rohstoffe lenkt den Blick der Öffentlichkeit besonders auf regenerative Energieerzeugung, etwa durch Wind und Sonne, in zweiter Linie auch auf alternative Treibstoffe und Heizmaterialien. Dadurch wird die Nutzung nachwachsender Rohstoffe in der Chemie nur in geringem Umfang wahrgenommen, obwohl besonders hier ein zukunftsträchtiges und innovatives Feld mit steigender wirtschaftlicher Bedeutung liegt.

Das vorliegende Unterrichtsmaterial stellt gerade den letztgenannten Bereich in das Zentrum der Betrachtungen: Welche Möglichkeiten bieten sich für die chemisch-pharmazeutische Industrie, wenn erdölbasierte Produkte durch solche auf Basis nachwachsender Rohstoffe ersetzt werden und bei Neuentwicklungen nachwachsende Rohstoffe gezielt berücksichtigt werden? Die daraus resultierende Struktur des Unterrichtsmaterials geht von einer Frage aus, wie die Syntheseleistung der Natur geschickt genutzt werden kann, zum anderen davon, wie wichtige in der industriellen organischen Chemie verwendete Plattformchemikalien auf der Basis nachwachsender Rohstoffe gewonnen werden können. Damit orientiert sich die Erarbeitung des Themas sehr dicht an einem realitätsnahen und hochaktuellen Szenarium.

Unter methodisch-didaktischen Gesichtspunkten ist dieser chemisch gesehen produktorientierte Ansatz ungewohnt. Zwar sind nachwachsende Rohstoffe in der chemiedidaktischen Literatur bereits seit über dreißig Jahren Gegenstand zahlreicher vorrangig schulexperimenteller Veröffentlichungen, übergreifender Gesichtspunkt

der Strukturierung war jedoch meist die Systematik der organischen Chemie, also eine Einteilung in Produkte ausgehend von Fetten, Kohlenhydraten, Terpenen und weiteren Verbindungsklassen.

Auch wenn wie hier der Schwerpunkt auf die Erzeugung chemischer und pharmazeutischer Zwischen- und Endprodukte gelegt wird, ist das gesamte Thema der nachwachsenden Rohstoffe so umfangreich und teilweise so komplex, dass im naturwissenschaftlichen Unterricht eine Beschränkung auf ausgesuchte exemplarische Aspekte erfolgen muss. Somit wird nicht versucht, einen erschöpfenden Überblick über die gesamte Thematik zu geben. Vielmehr werden grundlegende Vorgehensweisen – wie etwa die Aufarbeitung pflanzlicher Materialien in einer „Grünen Raffinerie“ – dargestellt und wichtige Produktgruppen, beispielsweise C2-Plattformchemikalien, anhand einfacher Beispiele erarbeitet. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Inhalten, die in den gängigen Lehrplänen für das Fach Chemie abgebildet sind (Tabelle 1-1).

Experimente zu nachwachsenden Rohstoffen

Soweit möglich, sollte im Experiment der gesamte Weg vom pflanzlichen oder tierischen Rohstoff bis zu einem Produkt erarbeitet werden. Ein Beispiel zeigt die Versuchsreihe zur Gewinnung und Umsetzung von Sojaöl:

- ⬢ Aus Sojaschrot wird im ersten Schritt das Öl extrahiert.
- ⬢ Durch Reaktion der Doppelbindungen der Fettsäurereste mit Essigsäure/Wasserstoffperoxid erhält man daraus ein epoxidiertes Öl.
- ⬢ Das „Sojaölepoxid“ wird mit einem Diisocyanat zu einem Polyurethan umgesetzt.

Hier besteht methodisch ein deutlicher Vorteil gegenüber der Erarbeitung der Petrochemie im Unterricht, da dort ein vergleichbarer Weg, also vom Rohöl bis zu einem Kunststoff, mit schulischen Mitteln experimentell nicht gezeigt werden kann.



TABELLE 2-1

Bezug des Themenbereichs „Nachwachsende Rohstoffe“ zu den Inhalten gängiger Lehrpläne

Industriepflanzen (Beispiele)	Nachwachsender Rohstoff	Verwendung	Lehrplanbezug Sekundarstufe I	Lehrplanbezug Sekundarstufe II
Nutzwald	Holz, Cellulose	Schnittholz, Plattenwerkstoffe, Zellstoff, Papier	Kohlenhydrate, Holz, Cellulose, Papier	Kohlenhydrate
	Lignin	Vanillin, Betonadditiv, Kunststoffe		evtl. Naturstoffe
	Terpene	Lösemittel		evtl. Naturstoffe
Sonnenblume, Raps, Öllein	Fette und Öle	Naturfarben, Lacke, Tenside, Schmierstoffe	Fette und Öle	Fette und Öle, Waschmittel
Zuckerrübe	Zucker	Tenside, Kunststoffe, Kosmetika, Arzneimittel	Kohlenhydrate, Kunststoffe, Waschmittel, Kosmetik	Kohlenhydrate, Kunststoffe, Waschmittel, Arzneimittel
Kartoffeln, Mais, Weizen	Stärke	Papier, Klebstoffe, Kunststoffe, Textilhilfsmittel	Kohlenhydrate, Kunststoffe	Kohlenhydrate, Klebstoffe, Kunststoffe
Hanf, Flachs	Pflanzenfasern	Verbundwerkstoffe, Dämmstoffe, Textilien	Kunststoffe	Kunststoffe, Papier, Baumwolle und Wolle
Saffor, Waid, Krapp	Farbstoffe	Farben, Lacke		Farbstoffe
Arzneipflanzen	Extrakte	Pharmazeutische Wirkstoffe		Arzneimittel

Ist es aus Zeitgründen oder anderen Gründen nicht möglich, den gesamten Weg vom Rohstoff zum Produkt aufzuzeigen, kann vielfach auf käufliche Chemikalien als Edukte zurückgegriffen und so zumindest ein Ausschnitt der Reaktionsfolge erarbeitet werden.

Hinweise zur Behandlung des Themas im Unterricht

Nachwachsende Rohstoffe können im Chemieunterricht einmal als gesondertes Thema behandelt werden, wobei Kenntnisse der organischen Chemie Voraussetzung sind. In diesem Fall handelt es sich um eine Anwendung, Vertiefung und Erweiterung vorangegangenen Unterrichtsstoffs.

Das Thema kann aber auch dazu dienen, Reaktionen und Stoffgruppen der organischen Chemie zu erarbeiten. Beispiele sind Carbonsäuren, Alkohole und Ester anhand der Chemie der Triglyceride.

Fachübergreifende Bedeutung

Nachwachsende Rohstoffe sind ein fachübergreifendes Thema, in das wichtige Aspekte der Biologie, der Geografie und der Sozialwissenschaften einfließen. Die Frage, welche Auswirkungen der großflächige Anbau von Nutz-

pflanzen ökologisch und ökonomisch hat, besonders welche Vor- und Nachteile Entwicklungsländern daraus erwachsen können, darf nicht vernachlässigt werden. Die Nutzung eines nachwachsenden Rohstoffs ist nur dann sinnvoll, wenn dadurch kein Raubbau getrieben wird, der die Möglichkeiten zukünftiger Generationen einschränkt.

Die Diskussion über die Konkurrenz der Erzeugung von Lebensmitteln zur rohstofflichen und energetischen Nutzung von Pflanzen, die „Tank-Teller-Diskussion“, wird auf Seite 16 angesprochen.

Zum Aufbau des Unterrichtsmaterials

Didaktische Hinweise zu den Fachtexten finden sich in den Kästen „METHODISCHE ANMERKUNG“ auf nahezu jeder Doppelseite. Darin sind sowohl methodische Anregungen aufgenommen als auch Verweise auf Arbeitsblätter und Experimente. Die Arbeitsblätter und Versuchsvorschriften finden Sie unter: www.vci.de/fonds/unterrichtsmaterialien.

3 Die Vielfalt der industriellen organischen Chemie

An jedem Tag des Jahres, gleich ob im Beruf oder in der Freizeit, nutzen wir direkt oder indirekt Produkte der chemisch-pharmazeutischen Industrie. Frischhaltefolien aus Kunststoff, Schalenkoffer, atmungsaktive Outdoor-Jacken, Medikamente, Wandfarben oder Autolacke sind nur einige von unzähligen Beispielen. Obwohl die Vielfalt der Produkte beinahe unüberschaubar ist, bestehen sie nur aus einigen wenigen gleichen Grundstoffen, die man heutzutage fast ausschließlich aus Erdöl und Erdgas gewinnt – zum Beispiel Wasserstoff, Kohlenstoffmonoxid, Ethen, Propen, Benzol, Toluol oder Xylol. Für die Herstellung organischer Erzeugnisse sind diese kohlenstoffhaltigen Grundstoffe unverzichtbar.

Zwar werden Erdöl und Erdgas noch für Jahrzehnte verfügbar sein, die leicht zugänglichen Quellen werden aber immer weniger. Damit steigen der Energieeinsatz und die Umweltbelastungen, um auf diese Rohstoffbasis zurückzugreifen, an. Noch deutlicher wird das am Beispiel der Kohle, deren weltweite Vorräte auch längerfristig reichen würden: Grundsätzlich können organische Grundprodukte und Treibstoffe auch auf Kohlebasis hergestellt werden, Umweltbelastung und Energieeinsatz liegen aber erheblich höher als bei der Nutzung von Erdgas und Erdöl. Deshalb wird Kohle besonders vor dem Hintergrund des Klimawandels als Rohstoff heute kaum noch diskutiert.

Insgesamt gesehen ist es somit ein Ziel, die für organische Erzeugnisse unverzichtbaren kohlenstoffhaltigen Grundstoffe, soweit möglich und sinnvoll, unabhängig von Erdgas, Erdöl und Kohle zu gewinnen. Durch die Nutzung nachwachsender Rohstoffe kann dies gelingen.

HINWEIS

Eine Alternative könnte sich zukünftig durch die Nutzung von Kohlenstoffdioxid (CO_2) als Kohlenstoffquelle bieten, wenn es gelingt, dieses aus Abgasströmen oder sogar aus der Atmosphäre effektiv abzutrennen. Reduktion mit Wasserstoff führt zu Kohlenstoffmonoxid. Dieses kann in unterschiedlichen Verhältnissen mit Wasserstoff gemischt werden – man nennt solche Mischungen Synthesegas – und zu organischen Grundstoffen wie Methanol, Formaldehyd oder Kohlenwasserstoffen umgesetzt werden. Dieser Weg ist nur dann wirtschaftlich und umweltneutral, wenn zur Wasserstofferzeugung Strom aus regenerativen Quellen verwendet wird.

Gänzlich neu sind nachwachsende Rohstoffe in der kohlenstoffbasierten Chemie nicht. Viele Industrieprodukte werden bereits heute daraus hergestellt. In erster Linie nutzt man pflanzliche Öle und Kohlenhydrate wie Zucker, Stärke und Cellulose ([siehe Experiment 15](#)).

HINWEIS

Plattformchemikalien bilden die Grundlage, um zentrale Gruppen (sogenannte Stammbäume) von Industriechemikalien zu synthetisieren. Von besonderem Interesse sind Bausteine mit einem (Kohlenstoffmonoxid, Methan) und bis zu sechs Kohlenstoffatomen (beispielsweise Benzol). Man spricht von C1- bis C6-Bausteinen. Über Folgereaktionen entstehen aus den Plattformchemikalien dann Produkte wie Kunststoffe, Farbstoffe, Arzneimittel oder Lackrohstoffe.



3.1 Erdöl – das Lebenselixier der Chemie

Noch aber stellt die chemische Industrie ihre organisch-chemischen Erzeugnisse überwiegend aus Erdgas und aus den Raffinationsprodukten des Erdöls her. Zu ihnen gehören LPG (Liquified Petroleum Gas, Flüssiggas), Heizöl, Benzin und das sogenannte Naphtha, das auch Rohbenzin genannt wird. Hinzu kommen verschiedene Aromaten (siehe Abbildung 3-1). Aus dem Destillationsrückstand des Erdöls gewinnt man durch Vakuumdestillation Motor- und Schmieröle. Durch verschiedene Prozesse entstehen aus den Raffinationsprodukten Grundstoffe wie Ethen, Propen, Benzol, Toluol, Xylol oder Synthesegas, ein Gemisch aus Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid. Angesichts der Menge und Vielfalt der daraus hergestellten organischen Produkte überrascht es

kaum, dass jedes Jahr weltweit Millionen Tonnen dieser Grundstoffe hergestellt und verarbeitet werden.

Zwischenprodukte wie Synthesegas, Ethen und Benzol sind zweifellos die Basis der chemischen Industrie. Experten nennen sie daher treffend Plattformchemikalien: Sie sind die Substanzplattform, von der aus man tausende anderer Produkte aufbaut (siehe Abbildung 3-2).

Die bedeutendste Plattformchemikalie ist das Ethen, auch als Ethylen bezeichnet. In Deutschland wurden im Jahr 2016 knapp über 5,1 Millionen Tonnen hergestellt, von Propen 4,1 Millionen Tonnen, von Benzol 1,9 Millionen Tonnen. Der Bedarf dieser wichtigen Grundchemikalien wird weltweit weiter wachsen. Alle drei Substanzen werden bislang aus Naphtha und damit aus Erdöl erzeugt.



ABBILDUNG 3-1

Herstellung von Grundstoffen der chemischen Industrie

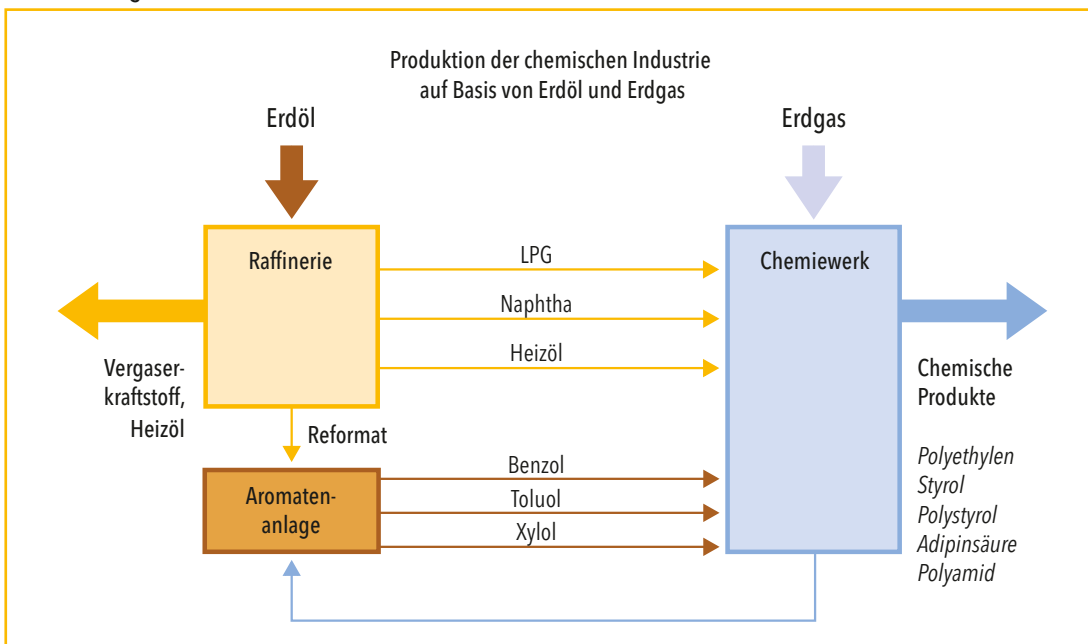
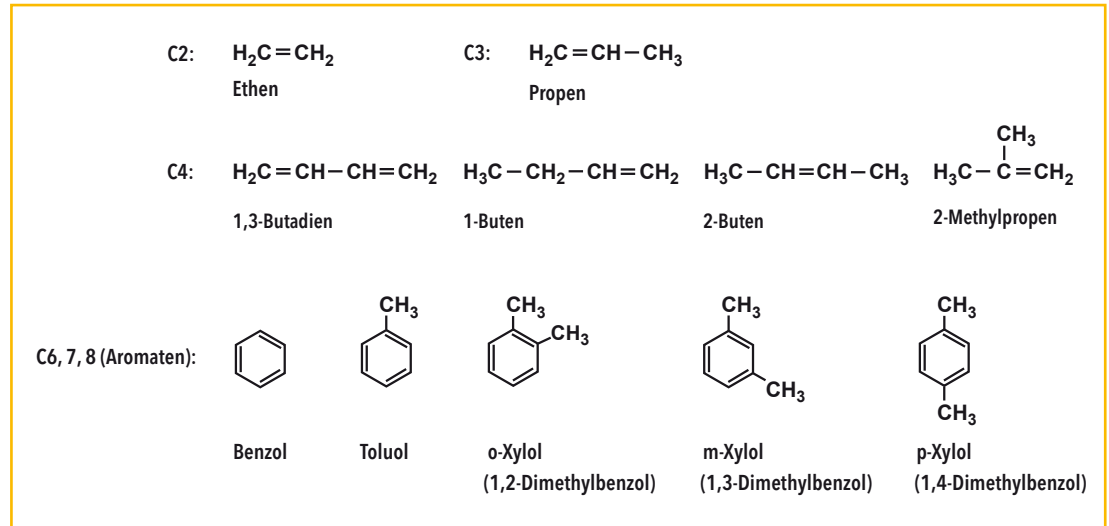


ABBILDUNG 3-2

Beispiele für wichtige Plattformchemikalien der chemischen Industrie



HINWEIS

Raffinerien und Bioraffinerien

Raffinerien sind in der Erdölindustrie Betriebe, in denen das Ausgangsmaterial Rohöl destilliert, gereinigt und veredelt wird. In Analogie dazu gibt es mittlerweile Bioraffinerien. Eine Bioraffinerie steht für ein integratives und multifunktionelles Nutzungskonzept: In einer technischen Anlage wird der Rohstoff Biomasse mit Hilfe verschiedenster Technologien in ein Spektrum aus Zwischen- und Endprodukten umgewandelt – und das unter möglichst vollständiger Nutzung aller Biomasse-Bausteine. Es entstehen in erster Linie biobasierte Werkstoffe, Chemikalien oder Energieträger. Hierbei lässt sich die Energiegewinnung mit der stofflichen Nutzung koppeln, wodurch die Effizienz noch gesteigert wird.

METHODISCHE ANMERKUNG

Als Biokraftstoffe werden flüssige und gasförmige Kraftstoffe bezeichnet, deren Produktion aus nachwachsenden Rohstoffen wie Ölpflanzen, Zuckerrüben und Getreide erfolgt. Derzeit werden große Anstrengungen unternommen, Biokraftstoffe der 2. und 3. Generation zu erzeugen, für deren Herstellung ausschließlich auf Biomasse zurückgegriffen wird, die nicht für Nahrungsmittel oder Futtermittel Verwendung findet.

[Arbeitsblatt 2: Kraftstoffe aus Biomasse](#)

3.2 Mehr als Fett und Stärke













Die Gewinnung solcher Rohstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen ist mittlerweile in einigen Bereichen wirtschaftlich. Langfristig gesehen werden die Preise für landwirtschaftliche Nutzflächen und Produkte und damit auch für nachwachsende Rohstoffe steigen, parallel zu den steigenden Energiepreisen. Deshalb ist es wichtig, dass Verarbeitungsprozesse für nachwachsende Rohstoffe effizient und wirtschaftlich gestaltet werden, damit diese wettbewerbsfähig gegenüber fossilen Rohstoffen bleiben beziehungsweise werden.

Die Natur liefert nicht nur Öle, Fette und Kohlenhydrate, sondern noch eine ganze Reihe weiterer Rohstoffe (siehe Abbildung 3-3). Bereits heute werden die unterschiedlichsten Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen erzeugt (siehe Abbildung 3-4). Deren Anteil dürfte nach Einschätzung von Experten künftig deutlich steigen, da die chemische Industrie in Zukunft vermehrt Bausteine für organische Synthesen aus nachwachsenden Rohstoffen gewinnen wird. Wie sich die Nachfrage nach Biokraftstoffen zukünftig entwickeln wird, lässt sich derzeit nicht einschätzen.

Industriepflanzen für die stoffliche Nutzung

Ölpflanzen Raps, Öllein, Soja, Sonnenblume, Palmöl, Mohn	Zuckerpflanzen Zuckerrübe, Zuckerhirse, Zuckerrohr, Topinambur, Zichorie	Färbepflanzen Waid, Indigo, Krapp, Färberdistel, Färberwau, Henna	Pestizid- liefernde Pflanzen Neembaum, Chrysatheme	Zellulose- liefernde Pflanzen Ein- und mehrjährige Pflanzen
Stärkepflanzen Kartoffel, Körnermais, Markerbsen, Maniok	Faserpflanzen Hanf, Flachs, Baumwolle, Ramie, Brennessel, Agave	Heilpflanzen Baldrian, Johanniskraut, Ringelblume, Sonnenhut, Ginseng, Kamille	Gummi- liefernde Pflanzen Gummibaum	Kork- liefernde Pflanzen Korkeiche

Biobasierte Rohstoffe und Produkte

	Nachwachsende Rohstoffe		Biobasierte Produkte	
	Lignin Cellulose Chitin Hemicellulose		Polymere Tenside Lösemittel Farbstoffe	
	Zucker Stärke Öle und Fette		Geruchsstoffe Pharmawirkstoffe Kosmetika Kraftstoffe	
			Schmierstoffe Klebstoffe Fasern	

Wo nachwachsende Rohstoffe in der chemischen Industrie tatsächlich zum Einsatz kommen, hängt von mehreren Faktoren ab. Zu berücksichtigen sind sowohl technische als auch wirtschaftliche Aspekte. Dabei sind folgende Fragen zu beantworten:

- Gibt es eine ausreichende Basis an nachwachsenden Rohstoffen, um die weltweite Nachfrage zu decken?
- Lassen sich die Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen kostengünstig herstellen und zu wettbewerbsfähigen Preisen verkaufen?
- Stehen geeignete Verarbeitungsverfahren zur Verfügung?
- Kann trotz schwankender Qualität der natürlichen Rohstoffe eine konstante Qualität der Produkte gewährleistet werden?





- ⬡ Wie stark unterscheidet sich die elementare Zusammensetzung (Verhältnis der Elemente Wasserstoff, Kohlenstoff und Sauerstoff) der nachwachsenden Rohstoffe von der Zusammensetzung der etablierten Rohstoffe Erdgas und Erdöl?
- ⬡ Wie stark schwankt die stoffliche Zusammensetzung – der Gehalt bestimmter Inhaltsstoffe?
- ⬡ Wie stark unterscheidet sich die Molekülstruktur der Biosubstanzen von der etablierter Rohstoffe Erdgas und Erdöl?
- ⬡ Was könnten Zielprodukte sein, die aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden können?

Sichere Nachfrage bei günstigen Preisen?

Ganz gleich, ob es sich um Laub, Stroh, Bioabfall oder Holzreste handelt – nachwachsende Rohstoffe gibt es in vielen Ländern der Erde in großen Mengen. Genaue Abschätzungen der in Zukunft technisch verwertbaren

Biomasse-Mengen sind sehr unsicher, da deren Verfügbarkeit von einer Vielzahl von Faktoren abhängig ist. Vor allem der zunehmende Bedarf an Nahrungsmitteln und die künftigen Ernährungsgewohnheiten, aber auch Faktoren wie Wasserverfügbarkeit werden sich entscheidend auf das künftige Angebot an nachwachsenden Rohstoffen auswirken.

Allerdings wächst mit dem steigenden Bedarf an nachwachsenden Rohstoffen auch der Bedarf an landwirtschaftlicher Anbaufläche. Schon heute wachsen auf vielen Äckern Raps und Mais, einzig, um zu Treibstoffen verarbeitet oder in Biogastanks vergoren zu werden. Die Konkurrenz zwischen Industriepflanze und Nahrungspflanze nimmt also zu. Es ist daher auch wichtig, die Frage zu stellen, welche Flächen für den Anbau von Nahrungspflanzen nicht geeignet sind, um diese dann für den Anbau nachwachsender Rohstoffe zu nutzen.

⬡ WAS IST DIE TANK-TELLER-DISKUSSION?

Unter dem Schlagwort „Teller oder Tank“ wird schon seit mehreren Jahren sehr intensiv darüber diskutiert, inwiefern die Nutzung nachwachsender Rohstoffe für Industrie, Verkehr und Technik mit dem Anbau von Pflanzen für die Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln in unmittelbare Konkurrenz tritt. Angesichts der sehr aktuellen Diskussion um den vom Menschen verursachten Klimawandel sowie der Endlichkeit der fossilen Energieträger ist der Ansatz, mit nachwachsenden Rohstoffen einen Teil der Energie- und Materialversorgung (z. B. Biokunststoffe) sicherzustellen, aus technischer und ökologischer Sicht recht vielversprechend. Die Problematik der Flächenkonkurrenz ist aber nicht ohne weiteres zu entschärfen. So ist es nicht von der Hand zu weisen, dass zum Beispiel die landwirtschaftlich genutzten Flächen in Europa nicht einmal ausreichen würden, um den europäischen Bedarf an nachwachsenden Rohstoffen für die Energiegewinnung zu decken. Es kommt daher auf eine verantwortungsvolle Nutzung der zur Verfügung stehenden Flächen an, die alle Aspekte berücksichtigt. Viele westliche Länder waren mit dem Vorwurf konfrontiert, dass sie beispielsweise den Rohstoff Mais nicht mehr für Nahrungszwecke anbauen,

sondern ihn direkt in Biogasanlagen zur Energieerzeugung verwenden und somit einen wertvollen Rohstoff regelrecht „verfeuern“ würden. In diesem Kontext entstand die sogenannte „zweite Generation“ von Energiepflanzen. So kann beispielsweise zur Ethanolgewinnung für Treibstoffe Stroh als Restprodukt der Landwirtschaft verwendet werden, während andere Pflanzenbestandteile für die Ernährung verwendet werden. Ebenfalls wird im Bereich der Pflanzenforschung daran gearbeitet werden müssen, eine möglichst hohe Energieeffizienz bei der Pflanzenaufzucht zu realisieren, indem ein möglichst hoher Output bei möglichst geringem Flächen- und Ressourcenverbrauch generiert wird. Die effiziente und nachhaltige Biomassenutzung steht im Fokus der Nationalen Forschungsstrategie Bioökonomie 2030 der Bundesregierung. Nachhaltig heißt hier unter anderem, nur Reststoffe oder nichtessbare Pflanzen als nachwachsende Rohstoffe zu nutzen. Hierbei gelten Bioraffinerien als wichtige Schlüsseltechnologie. Langfristig werden sich die Schwerpunkte der Energieerzeugung verschieben und Sonnenenergie, Windkraft, Wasserkraft und Solarthermie dominieren.



Konstante Qualität?

Ob sich ein Rohstoff für chemische Prozesse eignet, hängt vor allem von seiner konstanten Zusammensetzung ab. Bei pflanzlichen und tierischen Produkten aber schwankt die stoffliche Zusammensetzung oder der Gehalt an bestimmten Inhaltsstoffen. Dies ist unter anderem abhängig von den Wachstumsbedingungen oder der Erntezeit. Beides kann sich durch die globale Erwärmung verändern. Auch Verunreinigungen wie Pilz- oder Insektenbefall beeinflussen die Qualität des Materials.

Ganz elementar: die Zusammensetzung!

Wie Tabelle 3-1 zeigt, unterscheidet sich die elementare Zusammensetzung nachwachsender Rohstoffe deutlich von der des Erdöls. So haben Öle und Fette oder Lignocellulose einen geringeren Kohlenstoffgehalt, dagegen einen höheren Sauerstoffgehalt. Aber auch der chemische Aufbau – die Molekülstruktur – unterscheidet sich.

TABELLE 3-1

Elementare Zusammensetzung verschiedener Rohstoffe

	Erdöl	Öle/Fette	Lignocellulose (Holz)
C	85 - 90 %	76 %	50 %
H	10 - 14 %	13 %	6 %
O	0 - 1,5 %	11 %	43 %

Während Erdöl sich überwiegend aus aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen zusammensetzt, besteht etwa Lignocellulose aus Komponenten, die eine hohe Anzahl funktioneller Gruppen tragen (siehe Tabelle 3-2). Erdöl und Erdgas lassen sich also nicht ohne weiteres durch nachwachsende Rohstoffe ersetzen. Wenn nicht die Syntheseleistung der Natur direkt genutzt werden kann (siehe Kapitel 4), müssen neue Verfahren entwickelt werden, um nachwachsende Rohstoffe tatsächlich einsetzen zu können.

TABELLE 3-2

Stoffliche Zusammensetzung nachwachsender Rohstoffe am Beispiel von Lignocellulose

	Gehalt	Aufbau	Funktion
Cellulose	40 - 55 %	Langkettiges Makromolekül aus Cellobiose-einheiten	Gerüstsubstanz der Zellwand
Hemicellulose	15 - 35 %	Kurzkettiges, verzweigtes Makromolekül aus Pentosen	Gerüstsubstanz der Zellwand
Lignin	28 - 41 % (Nadelholz) 18 - 25 % (Laubholz)	Dreidimensionales Makromolekül aus Methoxyphenylpropan-Einheiten	Füllsubstanz im Zellgerüst, verursacht die Verholzung

Betrachten wir zum Beispiel Stärke und Cellulose: Zwar sind beide aus Glucose-Einheiten aufgebaut, sie unterscheiden sich aber in der Art der Verknüpfung der Zuckermoleküle zu Ketten und darin, wie stark diese verzweigt sind (siehe Abbildungen 3-5 und 3-6). Möchte man Cellulose und Stärke enzymatisch spalten, benötigt man deshalb unterschiedliche Enzyme.



ABBILDUNG 3-5

Molekülstruktur von Stärke

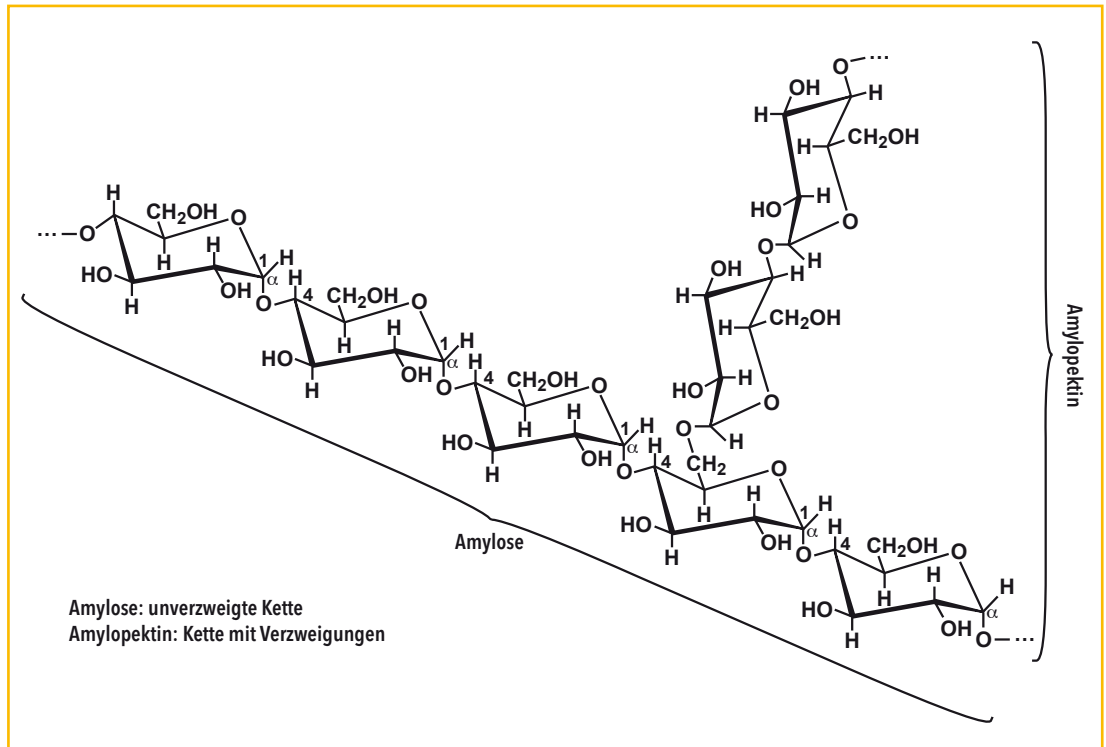
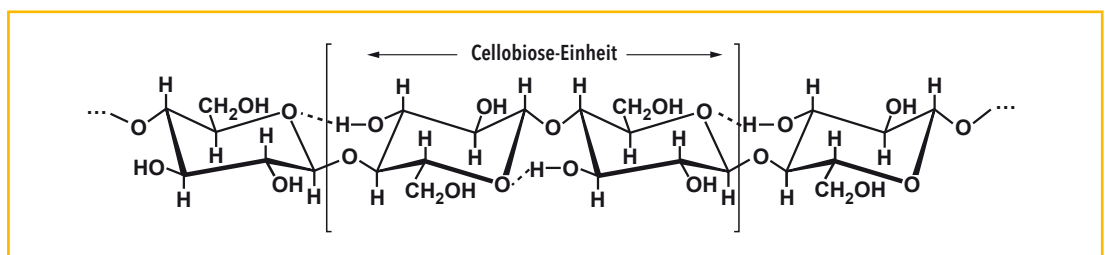


ABBILDUNG 3-6

Molekülstruktur von Cellulose



Doch egal welches Verfahren zum Einsatz kommt, entscheidend ist es, das Naturmaterial in möglichst wenigen Schritten und mit guter Ausbeute in Chemierohstoffe

zu verwandeln. Nur so wird man organische Chemieprodukte zu günstigen Preisen aus nachwachsenden Rohstoffen herstellen können.

3.3 Von der Pflanzenzüchtung bis zur Bioraffinerie

Nachwachsende Rohstoffe sind für die chemische Industrie im Grunde nichts Neues. Schon in ihren Anfängen im 19. Jahrhundert setzte die chemische Industrie nachwachsende Rohstoffe ein: So basierten die ersten Kunststoffe darauf: Galalith etwa, das man zu Knöpfen, Stricknadeln und Schmuck verarbeitete, wurde aus Milch hergestellt. Schellack, aus dem die ersten Schallplatten hergestellt wurden, ist ein anderes Beispiel für diese frühe Nutzung pflanzlicher oder tierischer Rohstoffe.

Schon 1910 lagerte der Kaufmann Fritz Henkel Hunderte Tonnen Palmkerne und Sojasaat in seinen backsteinernen Speicherhäusern in Düsseldorf, um aus dem Öl Seife und Waschmittel herzustellen. Henkel gehörte zu jenen Pionieren, die das Biomaterial erstmals in großem Maßstab verarbeiteten. Das Produktspektrum und die Anwendungsmöglichkeiten waren damals aber noch sehr eingeschränkt.

Heute verfolgt man unterschiedliche Strategien, um nachwachsender Rohstoffe industriell zu nutzen. Dabei kann es einmal das Ziel sein, hochpreisige Produkte wie etwa Pharmaka zu erzeugen. Dann sind die Volumina gering, aber die Wertschöpfung ist hoch. Andererseits kann es auch das Ziel sein, große Volumina an Chemikalien zu erzeugen, die unterschiedlichste Anwendungsbereiche haben.

Im Vorfeld stellt sich allerdings die Frage nach dem geeigneten Pflanzenmaterial. Durch Züchtungen und molekularbiologische Methoden lassen sich Art und Gehalt der gewünschten Inhaltsstoffe optimieren, etwa die Zusammensetzung des Öls einer Pflanze.

Bei der Aufarbeitung des Pflanzenmaterials kann es zum einen das Ziel sein, die Vielfalt der Substanzen, die die Natur selbst hervorbringt, direkt zu nutzen, wobei nur Aufbereitungs- und Reinigungsprozesse angewendet werden (Kapitel 4).

Von Pflanzen erzeugte Cellulose wird beispielsweise direkt für die Herstellung von Celluloseethern oder Cellulosefasern verwendet. Diese Strategie macht sich also weitgehend die Syntheseleistungen zunutze, die von der Natur schon erbracht wurden.

Zum anderen kann die Biomasse aufgetrennt und so behandelt werden, dass Verbindungen entstehen, die ein weites Spektrum von Möglichkeiten zur Erzeugung von chemischen Produkten ermöglichen ([Plattformchemikalien, Kapitel 5](#)). Genutzt werden also chemische Grundstrukturen der pflanzlichen oder tierischen Rohstoffe. Einen Sonderfall stellt die Gewinnung von Synthesegas, einer Mischung von Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff, dar. Synthesegas eröffnet die Möglichkeit der Herstellung einer breiten Palette organischer Verbindungen, von Methanol bis zu Kohlenwasserstoffen.

Die Herstellung von Plattformchemikalien aus nachwachsenden Rohstoffen unterscheidet sich allerdings deutlich von der Gewinnung aus petrochemischen Rohstoffen. Die in Erdöl enthaltenen Kohlenwasserstoffe müssen durch entsprechende Synthesen beispielsweise in Alkene, Alkohole, Aldehyde, Ketone, Nitroverbindungen oder Amine umgewandelt werden. Das heißt, dass die Rohbausteine aus dem Erdöl mit unterschiedlichsten funktionellen Gruppen ausgestattet werden. Bei nachwachsenden Rohstoffen wie Zucker ist das Problem oft genau umgekehrt: Sie müssen „entfunktionalisiert“ werden. Nicht benötigte funktionelle Gruppen muss man dafür gezielt umwandeln oder abspalten (Abbildung 3-7).

Kohlenhydrate wie Zucker, Stärke oder Cellulose sind für die Synthese von Plattformchemikalien besonders interessant. Biomasse enthält jedoch nicht nur Kohlenhydrate, sondern auch andere Grundprodukte wie Lignin, Proteine und Fette. In einem ersten Schritt (Abbildung 3-8) muss daher die gesamte Biomasse aufbereitet und in die für die chemische Industrie geeigneten Rohstoffe umgewandelt werden. Daran schließen sich dann wieder die Prozesse der chemischen Industrie an.



ABBILDUNG 3-7

Synthese von Ethanol aus petrochemischem und nachwachsendem Rohstoff

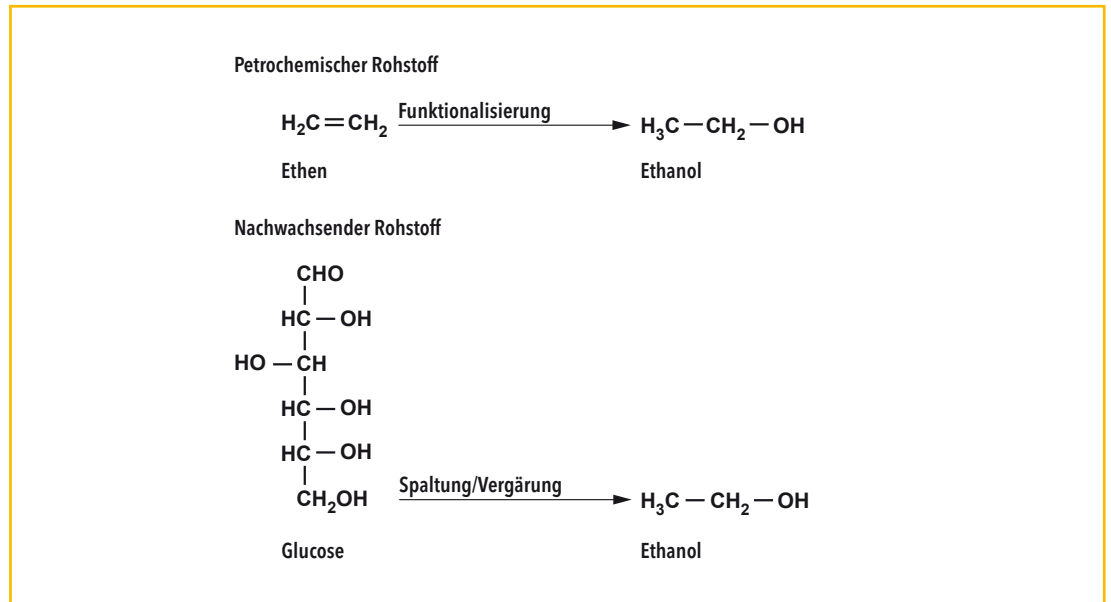
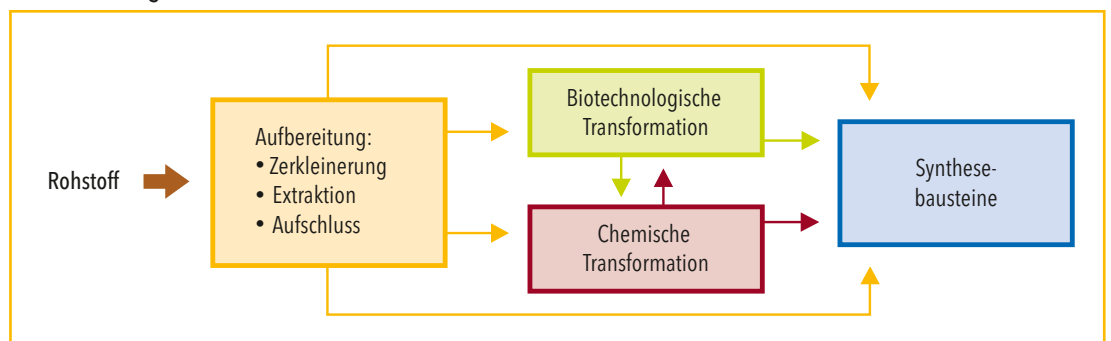


ABBILDUNG 3-8

Aufbereitung und Konversion der nachwachsenden Rohstoffe



Die gewünschten Synthesebausteine gewinnt man durch biotechnologische Prozesse, etwa die enzymatische Spaltung von Polysacchariden in einzelne Zuckermoleküle, oder durch chemische Prozesse, sogenannte Transformationen, zum Beispiel hydrolytische Reaktionen. Biotechnologische und chemische Verfahren können auch kombiniert werden.

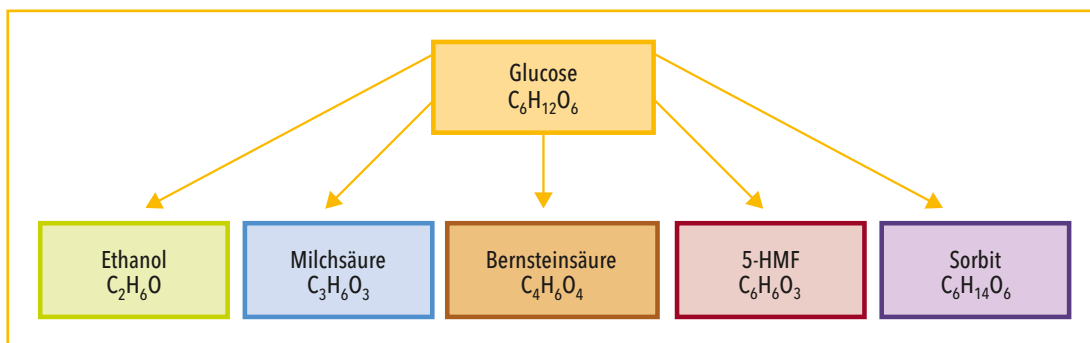
Eines ist sicher: Bevor nachwachsende Rohstoffe Erdöl- und Erdgasprodukte in der chemischen Industrie im großen Stil ersetzen können, ist noch einiges zu tun. Dennoch konnten sich nachwachsende Rohstoffe behaupten: überall dort, wo sie technische, wirtschaftliche oder sonstige Vorteile bei Verarbeitung oder Anwendung gegenüber fossilen Rohstoffen bringen.

Ausgehend von Glucose lassen sich auf diese Weise zum Beispiel C1- bis C6-Synthesebausteine herstellen. Das sind Moleküle, deren Gerüst aus bis zu sechs Kohlenstoffatomen besteht (Abbildung 3-9).

Derzeit gibt es deutschlandweit viele Forschungs- und Entwicklungsprojekte, in denen neue Synthesestrategien und Produktionsverfahren für die Nutzung von Biomasse erforscht werden.

ABBILDUNG 3-9

Plattformchemikalien auf Basis von Glucose



4 Rohstoffe vom Acker: Die Natur sinnvoll nutzen



Gummireifen, Seifen, Papier oder Shampooflaschen – dieses Kapitel zeigt, wie sich bestimmte nachwachsende Rohstoffe für die Herstellung von Produkten unseres Alltags nutzen lassen.

4.1 Stabil: Cellulose und Cellulosederivate

Cellulose ist das häufigste und bedeutendste Biopolymer in der Natur. Bei der Photosynthese entstehen jährlich rund 28 Mrd. Tonnen Cellulose (grobe Schätzung), rund 1,3 Milliarden Tonnen davon werden genutzt. Cellulose kommt in unterschiedlichen Anteilen in allen höheren Pflanzen, in vielen Pilzen und in Algen vor. Die Naturfaser Baumwolle beispielsweise enthält 95 Prozent Cellulose. Holz hingegen besteht nur zu etwa 40 bis 55 Prozent aus Cellulose.

Cellulose wird vor allem für die Papier- und Pappeherstellung benötigt. Man setzt hierfür Holz als Rohstoff ein. Es muss zunächst aufgeschlossen werden, um die Bestandteile Cellulose, Lignin und Polyosen (Hemicellulosen) voneinander zu trennen. Das heute dominierende technische Verfahren ist der Kraft-Aufschluss, auch Sulfatprozess genannt (Abbildung 4-1). Dieser basiert auf einem Druckaufschluss des Pflanzenmaterials mit einer alkalischen Natriumsulfidlösung. Chemisch wird – vereinfacht gesehen – das Lignin durch Spaltung von Etherbrücken abgebaut, wodurch lösliche Phenolate entstehen. Die Hemicellulosen gehen gleichzeitig in Lösung. Übrig bleibt eine feinfaserige, vorwiegend aus Cellulose bestehende Masse, der Zellstoff. Mehr als 80 Prozent des Zellstoffs werden in Deutschland mit diesem Verfahren oder Varianten davon gewonnen. Der Vorteil des Kraft-Aufschlusses liegt in der hohen Reißfestigkeit des damit hergestellten Zellstoffs und in der Möglichkeit, Hölzer

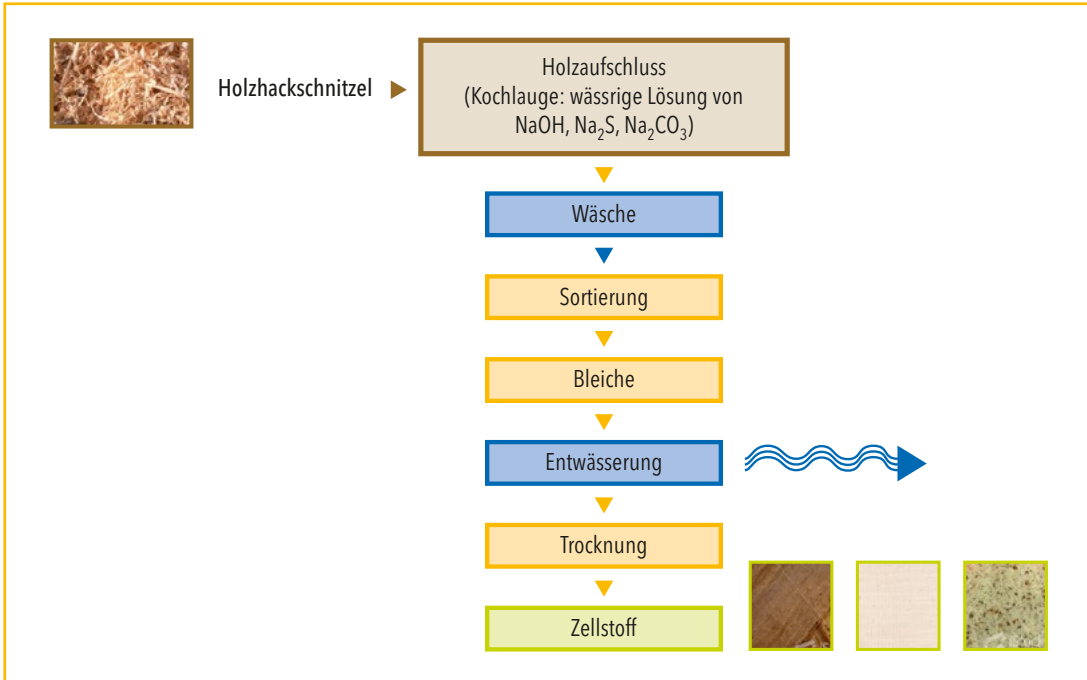
aller Sorten und Qualitäten, aber auch andere Pflanzen wie Schilf einsetzen zu können. Nachteilig sind der hohe Wasserverbrauch, große Mengen organisch belasteter Abwässer und schwer zu vermeidende Geruchsbelästigungen durch Schwefelverbindungen wie Mercaptanen.

Beim alternativen Sulfitverfahren werden die eingesetzten Holzschnitzel mit Lösungen von Sulfiten oder Hydrogensulfiten unter Überdruck gekocht. Auch hier wird das Lignin chemisch angegriffen, es entstehen durch Aufspaltung von Etherbrücken und Substitutionsreaktionen Ligninsulfonsäuren. Der so hergestellte Zellstoff ist nicht so reißfest wie der mit dem Kraft-Aufschluss gewonnene. Die Papierindustrie benötigt aber sowohl langfaserigen Zellstoff – etwa für Verpackungspapiere und als Zusatz zu Recyclingpapieren –, als auch kurzfasriges Material für Schreib- und Büropapiere.

Für die Herstellung weißer Papiere müssen die Zellstoffe – ganz gleich, nach welchem Prozess sie hergestellt wurden – zum Abbau restlicher Ligninanteile gebleicht werden. Aus Gründen des Umweltschutzes verzichtet man dabei mehr und mehr auf den Einsatz von Chlor und chlorhaltigen Chemikalien und setzt stattdessen Sauerstoff, Ozon und Peroxide wie Wasserstoffperoxid oder Natriumperoxid ein.

Eine Alternative zu den beiden vorgestellten Verfahren des Holzaufschlusses stellt zum Beispiel das Acetosolv-Verfahren dar. Bei dieser schadstoffarmen Technologie werden Essigsäure und Salzsäure eingesetzt und keine schwefelhaltigen Chemikalien. Das Verfahren stellt jedoch auf Dauer einen hohen Anspruch an die Belastbarkeit des Reaktormaterials (Edelstahl) und hat sich wie auch andere alternative Verfahren derzeit noch nicht durchgesetzt.

Vereinfachte Darstellung der Prozess-Stufen des Kraft-Aufschlusses



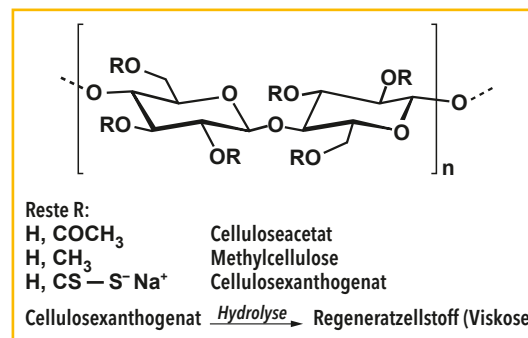
Neben der direkten Verwendung von Zellstoff kann die Cellulose auch chemisch modifiziert werden. Man nennt diese Produkte allgemein Cellulosederivate (Abbildung 4-2). Beispiele hierfür sind:

- Cellulosenitrat: Versetzt man Zellstoff mit einer Mischung aus Schwefel- und Salpetersäure, erhält man Cellulosenitrat (Nitrocellulose), das beim Entzünden spontan und ohne Rauchentwicklung verbrennt (Schießbaumwolle). Cellulosenitrat wird für die Herstellung von Lacken (Nitrolacken) und Klebstoffen verwendet.
- Celluloseacetat: zeichnet sich durch eine hohe Festigkeit, Schlagzähigkeit, Lichtdurchlässigkeit, Oberflächenglanz und Kratzunempfindlichkeit aus. Es wird beispielsweise zur Herstellung von Filmen, Schaltknöpfen, Zierleisten und Leuchten in der Automobilindustrie verwendet.
- Celluloseether: Die wichtigsten sind Methyl- und Benzylcellulose. Celluloseether werden unter anderem als Filmbildner, Klebstoffe, Schutzkolloide, Stabilisatoren, Waschhilfsmittel und als Plastifizierungsmittel eingesetzt.

- Cellulose ist in den meisten Lösemitteln unlöslich. Möchte man jedoch Textilfasern aus diesem Rohstoff herstellen, gibt es einen Trick: Cellulose reagiert in einer Mischung aus Natronlauge und Schwefelkohlenstoff zum Xanthogensäureester, wobei eine Lösung entsteht. Spritzt man diese hochviskose Lösung in Schwefelsäure ein, entsteht durch Hydrolyse wieder Cellulose (Regeneratzellstoff). Der Prozess wird so durchgeführt, dass man Fasern (Viskose) erhält, die zu Textilien verarbeitet werden.



Struktur von Cellulosederivaten



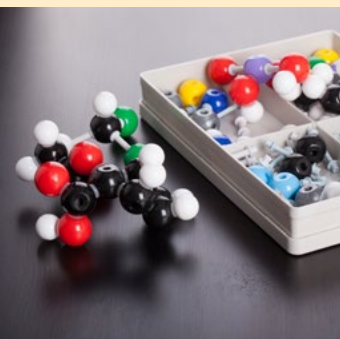


⬡ METHODISCHE ANMERKUNG

Ziel eines Holzaufschlusses ist, die gewünschte Cellulose von den übrigen Bestandteilen im Holz abzutrennen. Für den Chemieunterricht existieren zwei stark vereinfachte Aufschlussverfahren ([siehe Experimente 1 und 2](#)). Die Gewinnung von Zellstoff aus Holz ist in [Arbeitsblatt 4](#) dargestellt. Erhitzt man Holz unter Luftabschluss, erhält man ein Gemisch verschiedener Produkte (Holzkohle, Holzessig und Holzgas). Bei Holzkohle handelt es sich um ein komplexes Gemisch organischer Verbindungen mit einem Kohlenstoffanteil von bis zu 90 Prozent. Holzessig besteht vor allem aus Wasser, daneben enthält er auch Essigsäure sowie in geringen Mengen Methanol und Aceton. Holzgas enthält vor allem Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid und Methan, in kleineren Anteilen auch Ethen und Wasserstoff ([siehe Experiment 4](#)).

⬡ METHODISCHE ANMERKUNG

Erfahrungsgemäß bereitet es Schülerinnen und Schülern große Schwierigkeiten, sich zweidimensional gezeichnete Strukturen (zum Beispiel Cellobiose- oder Glucose-Moleküle) dreidimensional vorzustellen. Es gibt jedoch verschiedene Möglichkeiten, dies im Chemieunterricht zu üben. Ausgehend von der Fischer-Projektion über den Ringschluss zur Haworth-Formel bis zur Sesselform am einfachen Beispiel Glucose kann das räumliche Vorstellungsvermögen trainiert werden ([siehe Arbeitsblatt 3](#)). Unterstützend können auch Chemie-Zeichenprogramme oder Molekülbaukästen eingesetzt werden.



4.2 Auf dem Holzweg: Lignin

Die Gerüstsubstanz des Holzes ist das Lignin. Es wird in die pflanzlichen Zellwände eingebaut und macht sie dadurch steifer und fester. Man spricht auch von Verholzung. Neben Cellulose ist Lignin der häufigste organische Stoff der Erde. Chemisch gesehen ist das Lignin ein aus aromatischen Einheiten aufgebautes Makromolekül. Sein Aufbau ist derart komplex, dass Strukturen lediglich statistisch angegeben werden können.

Reines Lignin ist wasserunlöslich und farblos bis ockerfarben. Es kann aus lignocellulosehaltiger Biomasse nur mit Hilfe chemisch-technischer Prozesse isoliert werden ([siehe auch Kapitel 5.7](#)).

Beim industriellen Aufschluss von Holz ([siehe auch Kapitel 4.1](#)) fallen jährlich weltweit etwa 50 Millionen Tonnen Lignine als Nebenprodukt an. Bis zu 95 Prozent dieser sogenannten technischen Lignine werden verbrannt, um Energie in Form von Heißdampf und Strom zu erzeugen und Chemikalien für den Holzaufschluss zurückzugewinnen. Tatsächlich sind manche moderne Anlagen heute in der Lage, entstehende Energieüberschüsse in das öffentliche Elektrizitätsnetz einzuspeisen.

Ligninsulfonat: fast schon ein Allrounder

Ein kleiner Teil des Lignins wird jedoch technisch verwertet. Ligninsulfonate entstehen beim Sulfite-Aufschluss von Holz zur Gewinnung von Cellulose. Bei diesem Aufschlussverfahren wird Lignin an den C3-Seitenketten der Phenylpropan-Grundeinheiten sulfoniert. Je nach den beim Aufschlussverfahren verwendeten Basen resultieren wasserlösliche Natrium-, Ammonium-, Calcium- oder Magnesium-Salze der Ligninsulfonsäure. Die Angaben zum Molekulargewicht der Ligninsulfonsäuren variieren mit Werten von circa 10.000 bis 200.000. Die Anzahl der Sulfonsäure-Gruppen beträgt etwa zwei pro fünf bis acht Phenylpropan-Einheiten. Die stoffliche Nutzung von Lignin beruht fast ausschließlich auf der Verwendung dieser Ligninsulfonate.

ABBILDUNG 4-3

Schematisierte Darstellung von Ligninsulfonat

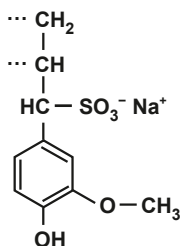


TABELLE 4-1

Beispiele für Verwertungsmöglichkeiten von Ligninsulfonaten

Wirkung	Anwendungsgebiete
Verzögert das Abbinden von Beton	Baustoffindustrie
Bindemittel	Futtermittel, Düngemittel und Agrochemikalien, Gussformen
Emulgier- und Dispergiermittel	Farben und Pigmente

Eine Zementmischung mit Ligninsulfonaten fließt zum Beispiel deutlich besser als eine reine Zementmischung. Dieser Effekt wird beim Gießen von Betonteilen ausgenutzt. Die Zementmischungen fließen so auch in die letzte Ecke der Form. Ob in der Baustoffindustrie, für Futter- und Düngemittel oder um Farben herzustellen: Die Anwendungspalette von Ligninsulfonaten ist breit gefächert (Tabelle 4-1). Eigenschaften wie die hohe Adsorptionsfähigkeit, die Ionentauscherwirkung, die gesundheitliche Unbedenklichkeit und insbesondere die Polymereigenschaften machen diese Ligninsulfonate zu „Allroundern“.

Sogar die Herstellung von Computer-, Fernseh- und Handygehäusen aus Werkstoffen, die auf Ligninsulfonat basieren, ist möglich. Das liegt an den thermoplastischen Eigenschaften von Ligninsulfonat. Mischt man dieses mit Naturfasern wie Flachs oder Hanf und erwärmt das Gemisch, erhält man einen Faserverbundwerkstoff, den herkömmliche Kunststoffverarbeitungsmaschinen wie einen synthetisch hergestellten Thermoplast zu Formteilen, Tafeln oder Platten verarbeiten können. Obwohl es nun so viele Möglichkeiten gibt, Ligninsulfonate zu verwenden, sind sie wegen ihrer komplexen und uneinheitlichen Zusammensetzung und wegen der aus dem Sulfitverfahren stammenden Verunreinigungen nicht wirklich konkurrenzfähig gegenüber Kunststoffen.

HINWEIS

Aufbau von Holz

Die wichtigsten Bestandteile von Holz sind Cellulose, Polyosen (Hemicellulosen) und Lignin. Weiterhin finden sich Inhaltsstoffe wie Harze, Wachse und Terpene (siehe Kapitel 4.5). Bei den Hemicellulosen handelt es sich ebenfalls um Polysaccharide. Sie sind mehr oder weniger verzweigt, haben aber eine kürzere Kettenlänge als Cellulose. Lignin kann als eine hochmolekulare aromatische Verbindung betrachtet werden, bestehend aus unterschiedlichen Phenylpropan-Einheiten. Der Phenylring ist mit bis zu zwei Methoxy-Gruppen und der Propan-Rest mit Hydroxy-Gruppen substituiert. Die Alkohole sind zu einer dreidimensionalen Struktur verbunden (Abbildung 4-4). Die aromatischen Strukturen des Lignins sind mit der Cellulose und der Hemicellulose über Van-der-Waals-Bindungen (Wasserstoffbrücken) sowie kovalent über Etherbrücken (-C-O-C-) vernetzt. Cellulose, Hemicellulosen und Lignin sind in der pflanzlichen Zellwand zu einem übermolekularen System miteinander verknüpft (Abbildung 4-5).



ABBILDUNG 4-4

Struktur eines Fichtenholzlignins und Phenylpropaneinheit

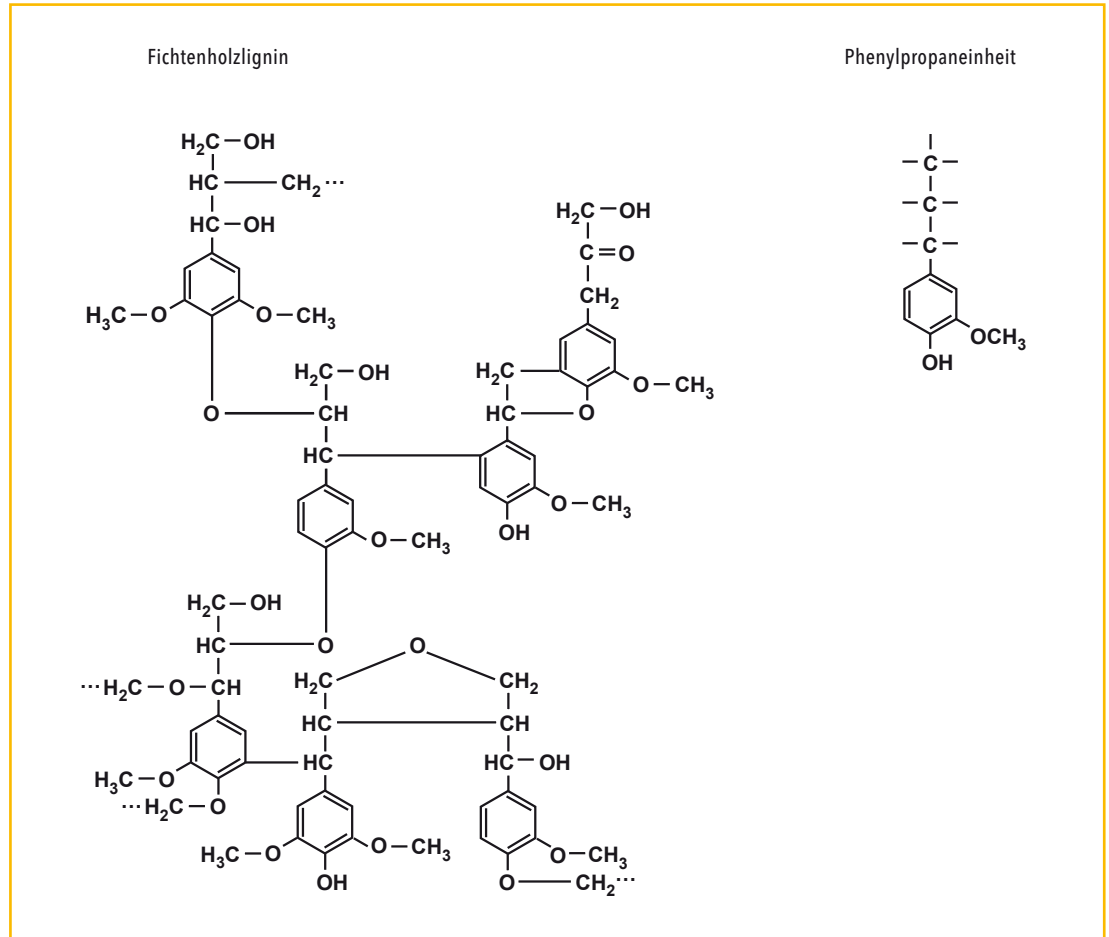
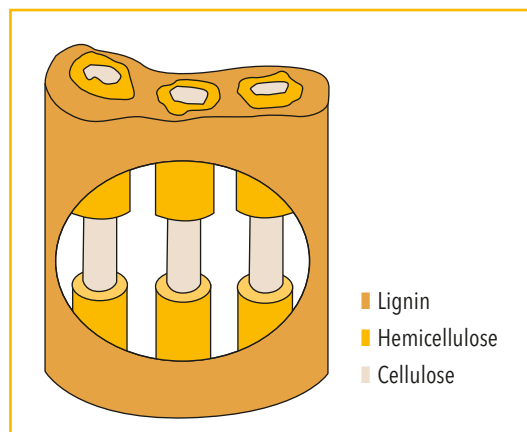


ABBILDUNG 4-5

Vereinfachte Darstellung einer Holzfaser im Querschnitt



4.3 Als Rohstoff universell einsetzbar: Stärke

Stärke ist im Pflanzenreich weit verbreitet. Man findet sie vor allem in den Reserveorganen: Samenkörnern, Knollen, Wurzeln, Früchten und Mark. Auf diese Weise speichern Pflanzen überschüssige Energie – und zwar unlöslich und deshalb osmotisch unwirksam. Ob in Kartoffeln oder Reis, Brot oder Pfannkuchen – als verdauliches Kohlenhydrat ist Stärke für den Menschen sehr wichtig. Stärke ist chemisch gesehen ein aus D-Glucose-Molekülen aufgebautes Polysaccharid und besteht hauptsächlich aus zwei verschiedenen D-Glucose-Polymeren, der Amylose (10 bis 30 Prozent) und dem Amylopektin (70 bis 90 Prozent). Diese bilden zusammen mit Wasser das Stärkekorn.

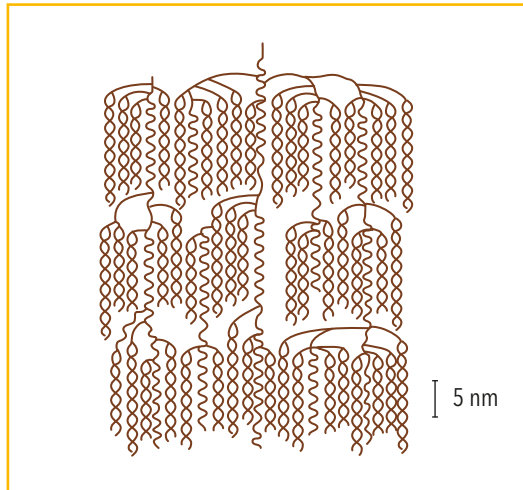
Die Amylose ist kettenförmig aus α -1,4-glycosidisch verknüpften D-Glucose-Einheiten aufgebaut (Abbildung 3-5). Die linearen Amylosemoleküle haben allerdings die Tendenz, sich spiralförmig in einer Helixstruktur anzuordnen.

Das Amylopektin ist verzweigt (siehe Seite 18). Es enthält im Gegensatz zur Amylose neben den α -1,4-glycosidischen Verknüpfungen auch α -1,6-glycosidische Bindungen (circa vier bis sechs Prozent). Die Verzweigungen sind derart über das Molekül verteilt, dass sich eine Büschelstruktur mit relativ kurzen Seitenketten entwickelt (Abbildung 4-6).

Außer Amylose und Amylopektin enthält Stärke Wasser (etwa 20 Prozent, je nach Sorte und Lagerungsbedingungen) und kleinere Mengen an Eiweiß, Fetten, Proteinen, mineralischen Bestandteilen und esterartig gebundener Phosphorsäure. Kartoffelstärke, Maisstärke oder Weizenstärke – die Eigenschaften der unterschiedlichen Stärkearten hängen unter anderem davon ab, in welchem Mengenverhältnis Amylose und Amylopektin von der Pflanze gebildet werden. Die industrielle Stärkegewinnung erfolgt hauptsächlich aus Mais, Weizen, Kartoffeln, Reis und Maniok. Abbildung 4-7 zeigt schematisch das Verfahren zur Gewinnung von Weizenstärke. Weizenmehl wird mit Wasser vermischt. Der entstandene Teig ruht einige Zeit. Um die Stärke abzutrennen, wird er mit Wasser gewaschen. Das Gluten (pflanzliches Eiweiß, sogenanntes Klebereiweiß) bleibt zurück und wird getrocknet. Das restliche Gluten und die restliche Kleie werden durch Sieben von der Rohstärkesuspension abgetrennt. Dann wird die Stärkesuspension zentrifugiert und damit weitgehend von Wasser befreit. Die erhaltene Stärke wird schließlich getrocknet.

ABBILDUNG 4-6

Büschelstruktur des Amylopektins



Ungleiche Schwestern: Amylose und Amylopektin

Die Stärkeproduktion steigt kontinuierlich – und zwar sowohl für den klassischen Lebensmittelbereich wie auch für den technischen Sektor. 2016 wurden weltweit ca. 85 Millionen Tonnen Stärke produziert. Mehr als die Hälfte (59 Prozent) wurden für Lebensmittel und 41 Prozent für technische Anwendungen genutzt. Haupterzeuger sind mit großem Abstand die USA und China. Weitaus begehrter als die Amylose ist das Amylopektin. Die Amylopektin-Stärke eignet sich für Kleister, Kleb- und Schmierstoffe, aber auch für Lebensmittel. Die Amylose wiederum hat sehr gute Film- und Bindeeigenschaften: Sie wird beispielsweise als Soßen- und Puddingbinder oder für die Herstellung von Filmen und Folien eingesetzt. Die „ungleichen Schwestern“ lassen sich nur durch aufwendige Verfahren voneinander trennen, die das Abwasser stark belasten. Die Lösung des Problems ist aber ganz einfach: Es werden Pflanzen gezüchtet, die entweder besonders viel Amylose oder besonders viel Amylopektin enthalten, so dass weitere Trennverfahren entfallen – beispielsweise gibt es genetisch veränderte Mais- und Kartoffelvarianten, die fast amylosefrei sind.



ABBILDUNG 4-7

Gewinnung von Weizenstärke

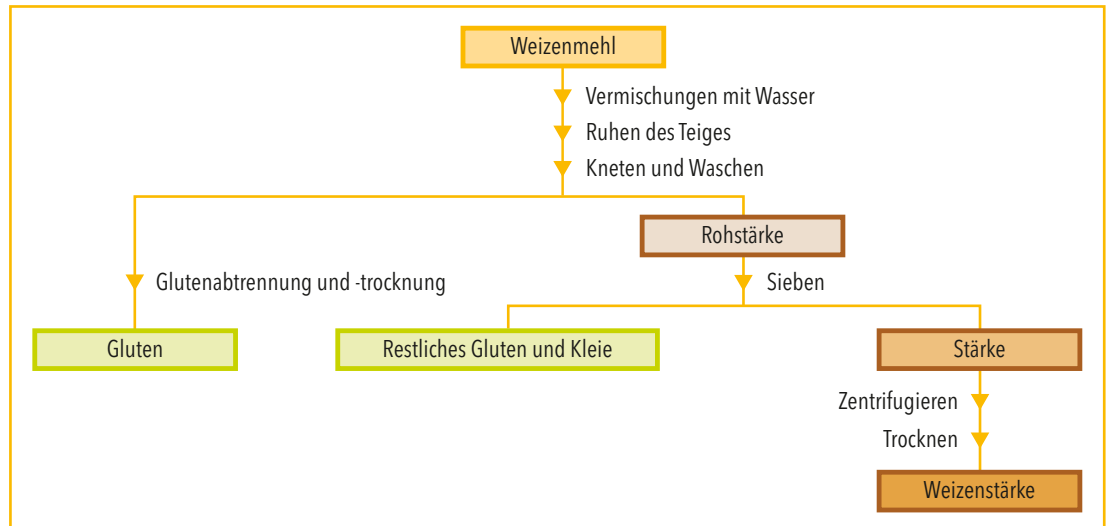
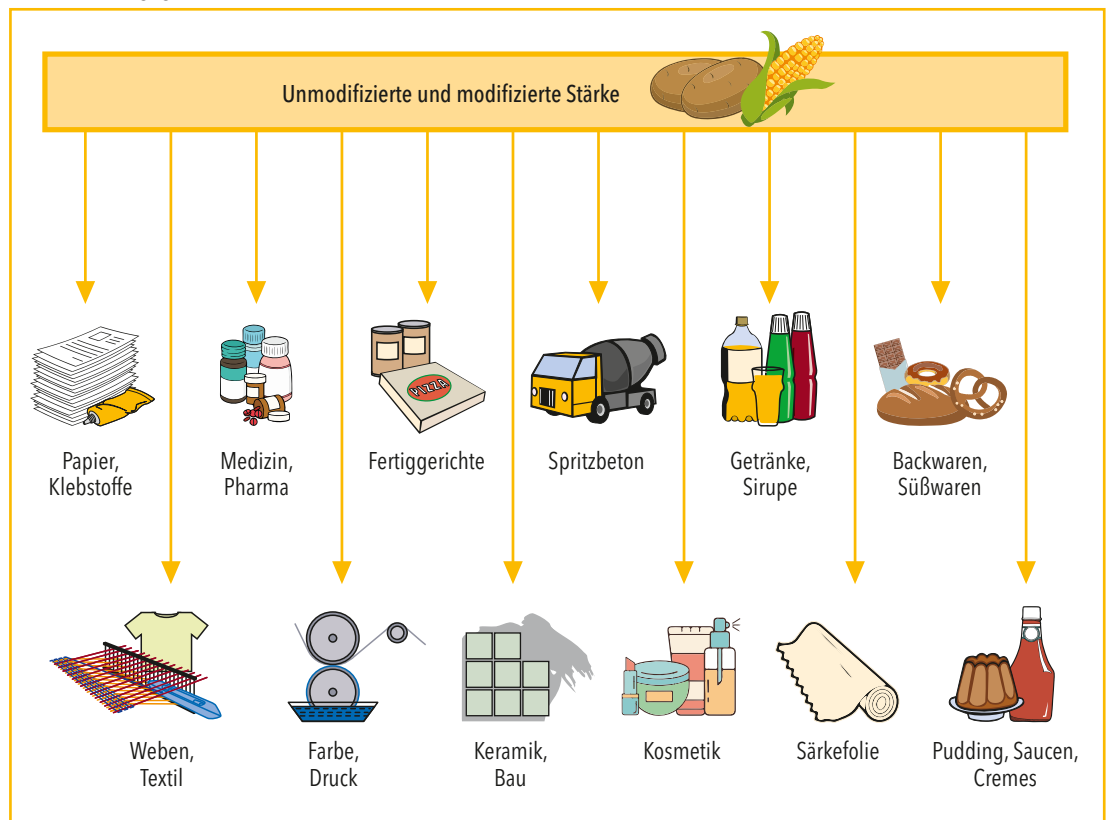


ABBILDUNG 4-8

Anwendungsgebiete von Stärke



Echt stark: Papier

Stärke ist ein „klassischer“ nachwachsender Rohstoff von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Vor allem die Papierindustrie nutzt die Stärke. Besprüht man feuchtes Papier mit Stärke, lässt sich äußerst kostengünstig die Papierfestigkeit verbessern: Hat die Stärke das Papier durchdrungen, wird es stärker und steifer. Auch verläuft Tinte nicht mehr so stark wie bei unbehandeltem Papier.

Stärke ist ein äußerst vielseitiger nachwachsender Rohstoff: Über die bisher genannten direkten Verwendungsmöglichkeiten hinaus spielen auch chemisch veränderte, sogenannte modifizierte Stärken, eine große Rolle. Wichtige Anwendungsfelder der Stärke in unmodifizierter oder modifizierter Form zeigt die Abbildung 4-8.

Vernetzen von Stärke

Vernetzt man Stärke (Crosslinking), entstehen neben den natürlich vorliegenden Wasserstoffbrückenbindungen kovalente Bindungen zwischen den Molekülen. Die vernetzte Stärke kann nun nicht mehr so gut quellen, ist aber mechanisch stabiler.

Leicht vernetzen lässt sich Stärke mit Phosphoroxychlorid (Abbildung 4-9). Stärken können auch mit Säureanhydriden (zum Beispiel Acetanhydrid) oder Säurechloriden oder anorganischen Säuren wie Phosphorsäure verestert werden (Abbildung 4-10). Mit teilweise acetylierter Stärke lassen sich Filme und Folien herstellen.

In den vergangenen Jahren wurden immer wieder neue Anwendungsgebiete entdeckt: So werden heute kompostierbare Folien angeboten, die zum größten Teil aus Stärke bestehen, ebenso gibt es kompostierbares Essgeschirr und Lebensmittelverpackungen zu kaufen.



ABBILDUNG 4-9

Stärkevernetzung mit POCl_3

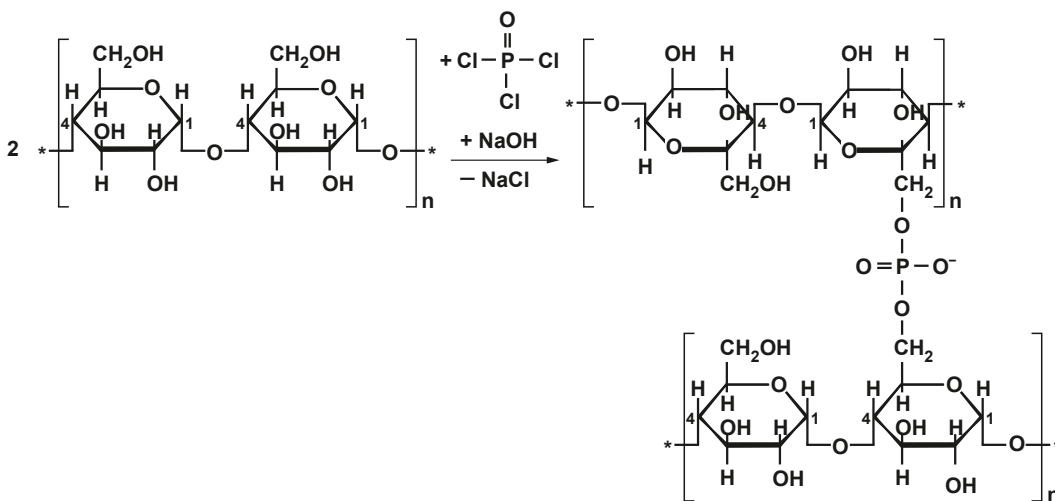
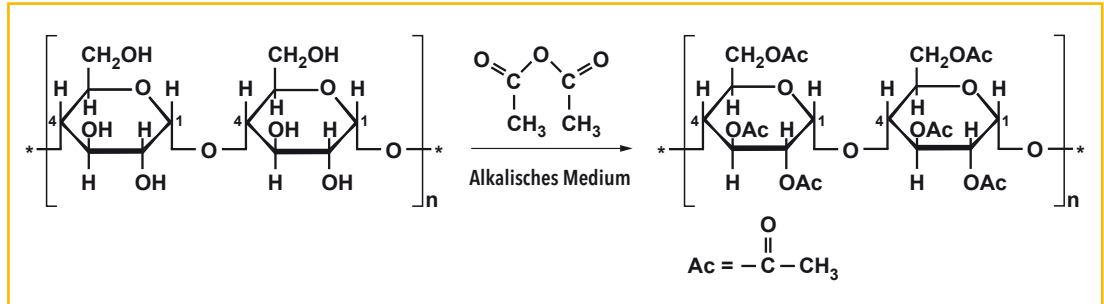


ABBILDUNG 4-10

Veresterung von Stärke mit Acetanhydrid



METHODISCHE ANMERKUNG

Biokunststoffe werden aus nachwachsenden Rohstoffen wie Bambus, Mais, Zucker oder Milchsäure (PLA=Polyactide; zählen zu den Polyestern) hergestellt. Sie sind mit Labels gekennzeichnet.

- Biobasiert = natürlichen Ursprungs, aber der Kunststoff muss nicht schadstofffrei oder biologisch abbaubar sein.
- Biologisch abbaubar = kompostierbare Produkte, aber die Zersetzungsdauer hängt von den Rahmenbedingungen ab, industrielle Kompostierung.
- Biokompatibel = keine negativen Auswirkungen auf Lebewesen und Umwelt.

Experiment 7: Darstellung eines Biokunststoffes

4.4 Fette und Öle

Von jeher spielen Fette und Öle eine wichtige Rolle für die Ernährung des Menschen. Auch in der chemischen Industrie haben sie eine hohe Bedeutung.

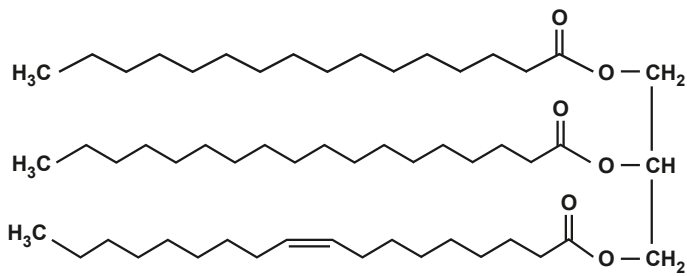
Chemisch betrachtet sind Öle und Fette Ester des Glycerins mit überwiegend langkettigen Carbonsäuren, den sogenannten Fettsäuren. Diese Verbindungen werden auch Triglyceride (siehe Abbildung 4-11) genannt. Produkte, die bei Raumtemperatur fest sind, werden als Fette bezeichnet, die flüssigen Produkte werden Öle genannt.

Je nach Herkunft des Triglycerids unterscheiden sich die Fettsäuren in Kettenlänge und Anzahl der Doppelbindungen (X:Y-Darstellung: X Kohlenstoffatome mit Y Doppelbindungen). Tierische und pflanzliche Fette und Öle enthalten unterschiedliche Fettsäuren, so dass man nur den durchschnittlichen Gehalt angeben kann. Es wird deshalb von einem „Fettsäuremuster“ gesprochen. Abbildung 4-12 zeigt häufig vorkommende ungesättigte Fettsäuren, Tabelle 4-2 führt typische Fettsäuremuster auf.

Die Industrie interessiert sich meist für Triglyceride mit möglichst hohen Anteilen bestimmter Säuren. Es liegt auf der Hand, dass auch hier wieder eine gezielte Pflanzenzüchtung zum Erfolg führt: Der „alte Raps“ beispielsweise durfte von Mensch und Tier nicht gegessen werden, da die darin enthaltene Erucasäure ernährungsphysiologisch bedenklich ist. Diese „alte“ Rapsorte wird deshalb heute ausschließlich als Rohstoff für die chemische Industrie eingesetzt. Man züchtet sogar Rapsorten, bei denen der prozentuale Anteil an Erucasäure weiter gesteigert wurde, um größere Mengen dieser ungewöhnlichen, aber hochinteressanten ungesättigten C22-Fettsäure für Synthesezwecke zur Verfügung zu haben. So gibt es inzwischen eine Rapsorte mit Erucasäureanteilen (22:1) von über 50 Prozent.



Beispiel für ein Triglycerid



HINWEIS

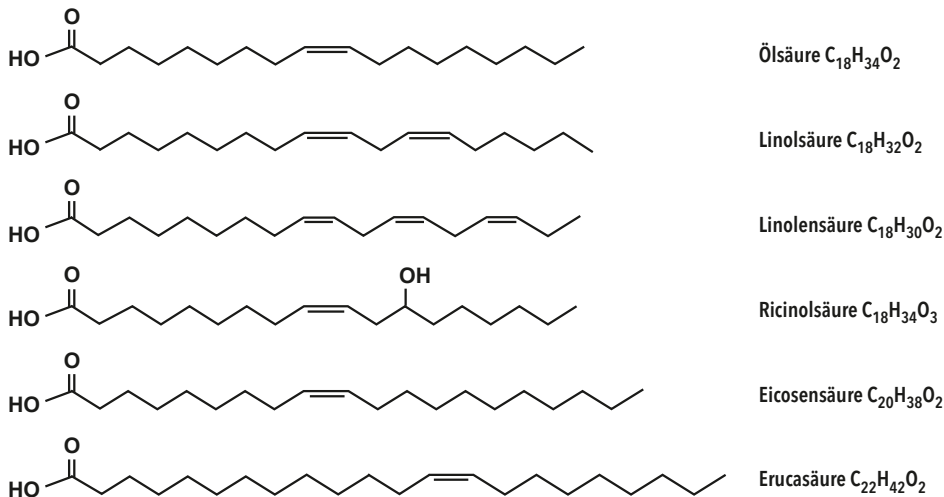
Was ist Doppel-Null-Raps?

Das früher aus Raps hergestellte Öl hatte einen hohen Anteil an Erucasäure. Es enthielt außerdem Gondosäure und Nervensäure – alle drei Säuren sind gesundheitsschädlich – und einen Bitterstoff, ein sogenanntes Glucosinolat. Mittels Züchtung gelangte man zum Doppel-Null-Raps (00-Raps oder Low-Erucic-Acide-Rapeseed), der nur noch sehr wenig Erucasäure und Glucosinolate besitzt, jedoch einen hohen Gehalt an Ölsäure (50 bis 65 Prozent), Linolsäure (15 bis 30 Prozent) und Linolensäure (5 bis 13 Prozent). Inzwischen wird in Deutschland nahezu die gesamte Anbaufläche mit 00-Raps bestellt.

METHODISCHE ANMERKUNG

Natürliche Fette und Öle sind Mischungen unterschiedlicher Triglyceride. Eine direkte Dünnschicht-Chromatographie von Fetten und Ölen erlaubt keine Zuordnung einzelner Triglyceride. Dennoch lassen sich zumindest verschiedene Fette und Öle unterscheiden. Will man herausfinden, welche Fettsäuren in einem Triglycerid vorhanden sind, kann man diese durch Umesterung zunächst in ihre Methylester überführen. Anschließend ist eine chromatographische Auftrennung möglich (siehe Experiment 16a-c). Arbeitsblatt 7 dient zum Üben und Wiederholen der Grundlagen der Chromatographie.

Häufig vorkommende ungesättigte Fettsäuren



Prozentuale Fettsäurezusammensetzung einiger Ölpflanzen

Fett/Öl	Gehalt [%]									
	10:0	12:0	14:0	16:0	18:0	18:1	18:2	18:3	20:1	22:1
Rapsöl (low erucic)	-	-	-	1-5	1-4	50-65	15-30	5-13	1-3	0-2
Rapsöl (high erucic)	-	-	-	2-3	1-4	12-24	12-16	7-10	4-6	45-53
Sonnenblumenöl (alte Sorte)	-	-	-	3-10	1-10	14-65	20-75	-	-	-
Sonnenblumenöl (high oleic)	-	-	-	3-4	1-2	90-91	3	-	-	-
Leinöl	-	-	-	5-8	2-4	15-25	12-16	50-60	-	-
Kokosfett	5-10	45-53	15-21	7-11	2-4	6-8	1-3	-	-	-
Palmkernöl	3-5	40-52	14-18	6-10	1-4	9-16	1-3	-	-	-
Palmöl	-	-	0-2	38-48	3-6	38-44	9-12	-	-	-
Sojaöl	-	-	-	7-14	1-5	19-30	44-62	4-11	0-1	-
Erdnussöl	-	-	0-1	6-16	1-7	36-72	13-45	0-1	0-2	-

☐ METHODISCHE ANMERKUNG

Am Beispiel des Sojaöls kann die Ölgewinnung aus pflanzlichem Material durch Extraktion mit einem Lösemittel gut gezeigt werden (siehe Experiment 12). Das in diesem Experiment gewonnene Sojaöl enthält etwa zur Hälfte ungesättigte Fettsäuren. Die dort vorhandenen Doppelbindungen können epoxidiert und das Produkt schließlich zu einem Polyester umgesetzt werden (siehe Experimente 13 und 14). Die Gewinnung von Öl aus Raps (oder Sonnenblumen) ist in Arbeitsblatt 6 dargestellt.

„Ölbedarf“ steigt

Öle und Fette werden großtechnisch durch Pressung und Extraktion gewonnen. Interessant in diesem Zusammenhang ist, dass auch Press- und Extraktionsrückstände gut verwertet werden können: Entöltes Soja- und Rapsschrot eignet sich beispielsweise als Viehfutter.

Triglyceride werden als Rohstoff für Kosmetika, Schmierstoffe, Seifen, Hydrauliköle und Lacke genutzt.

Ob Kosmetik, umweltneutrale Schmiermittel für Sägen oder Hydrauliköle – mit wenigen chemischen Reaktionen entsteht aus Fetten und Ölen eine Vielzahl von Folgeprodukten. Abbildung 4-13 zeigt einige dieser Reaktionen, die für die chemische Industrie wichtig sind, in

einer Übersicht. Die Abbildungen 4-14 und 4-15 geben genauere Informationen über die Produkte, die durch Reaktionen der Doppelbindungen beziehungsweise der Carboxylgruppe ungesättigter Triglyceride entstehen:

- ☐ Hydrolysiert man Triglyceride unter Druck, entstehen Fettsäuren und Glycerin. Die Fettsäuren können mit Laugen zu Seifen umgesetzt werden.
- ☐ Reaktion der Säuren mit Alkoholen führt zu Fettsäureestern, die jedoch auch direkt durch Umesterung der Fette (Transester-Reaktion) erzeugt werden können (Beispiel Biodiesel, „Rapsölmethylester“).
- ☐ Durch katalytische Hydrierung lassen sich aus den Triglyceriden direkt Glycerin und Fettalkohole herstellen. Diese langgestreckten Moleküle werden als Rohstoffe für Tenside – etwa durch Reaktion mit Schwefelsäure und anschließende Neutralisation zu Alkylsulfonaten – eingesetzt.
- ☐ Epoxidierung der Doppelbindungen führt zu Epoxiden, die etwa mit Dicarbonsäuren zu Polymeren umgesetzt werden können.
- ☐ Reaktion der Triglyceride mit Schwefelsäure führt zu partiell sulfonierten Produkten – Türkischrotölen –, die früher in der Färberei als Tenside eingesetzt wurden.
- ☐ Durch Reaktionen der Carboxylgruppe können weiterhin Fettsäurehalogenide, Fettsäureamide und -amine sowie Fettsäuresalze gewonnen werden.

ABBILDUNG 4-13

Reaktionen der Triglyceride

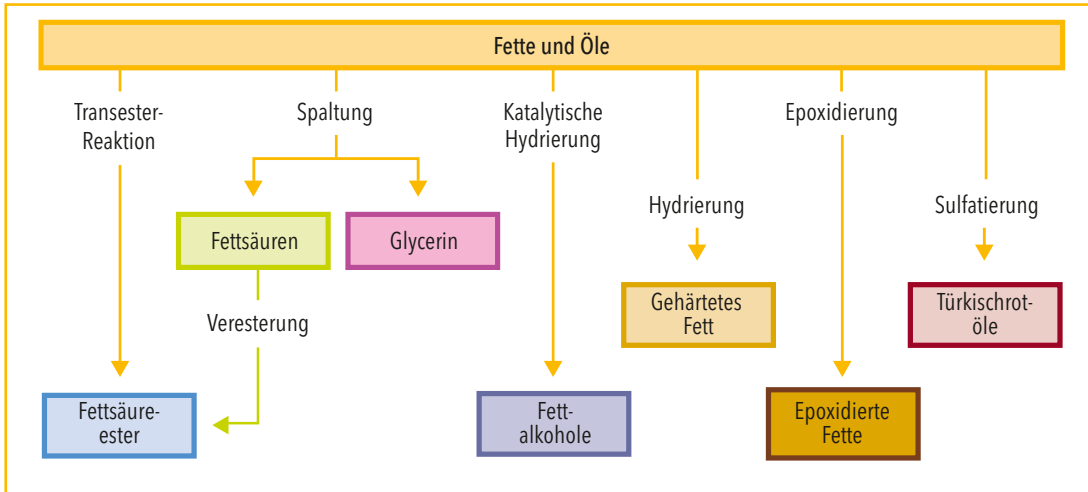


ABBILDUNG 4-14

Mögliche Reaktionen an der Doppelbindung

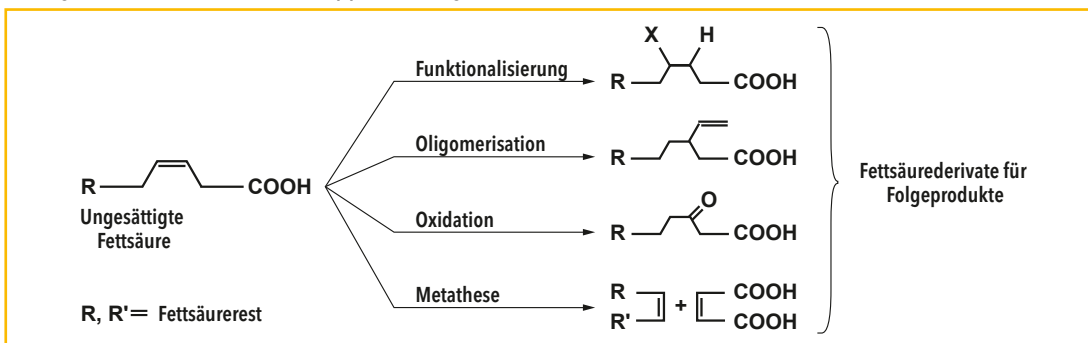


TABELLE 4-3

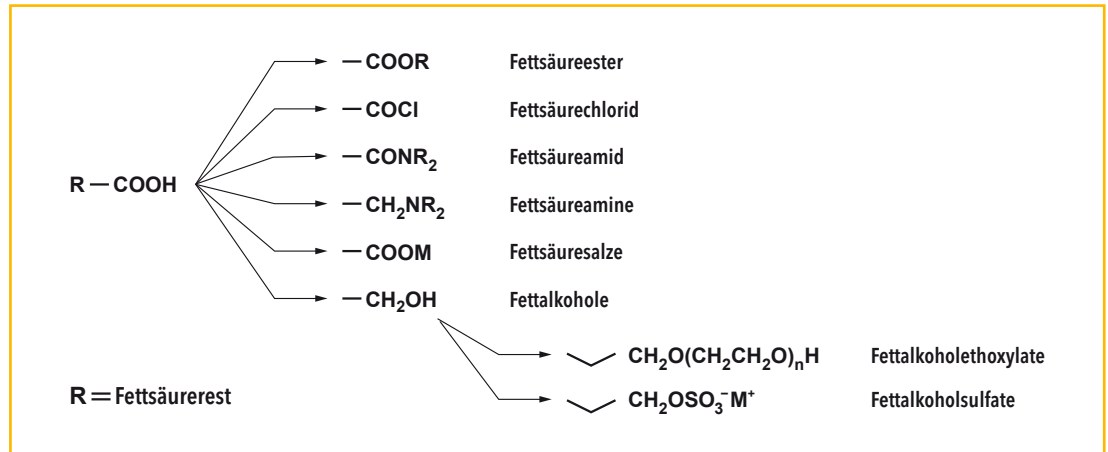
Beispiele für die industrielle Verwendung von Fettsäurederivaten

Fettsäurederivat	Anwendung
Fettsäureester	Weichmacher in der Lackindustrie
Fettsäureethoxylate	Emulgatoren in der Kosmetik und Textilindustrie
Fettsäureamide	Löslichkeit und Pigmentbenetzung in der Farbenindustrie; Korrosionsschutz in der Metallbearbeitung

Die aus den Reaktionen der Fettsäuren entstehenden Fettsäurederivate werden benötigt, um Seifen, Tenside, Schmierstoffe, Epoxid- und Alkydharze, Anstrichmittel, Weichmacher, Pharmazeutika, Insektizide, Kunststoffe und Gleit- sowie Textilhilfsmittel (Tabelle 4-3) herzustellen.

Tenside mit mindestens einem Baustein aus nachwachsenden Rohstoffen haben heute (Stand 2018) einen relativen Anteil von circa 50 Prozent am Gesamt-Tensidmarkt in Europa. Und der Anteil wird weiter steigen.

Bevorzugte Reaktionen an der Carboxylgruppe



Vorteil von Ölen und Fetten: kürzere Wege zum Endprodukt

Weshalb wurden und werden in bestimmten Bereichen Fette und Öle oder Fettsäuren aus nachwachsenden Rohstoffen eingesetzt? Die Petrochemie stellt Grundchemikalien wie Ethen, Propen und Aromaten auf Erdölbasis her, die über mehrere Syntheschritte in Zwischen- und Endprodukte umgewandelt werden. Einige Produkte sind allerdings auf wesentlich kürzerem Weg zugänglich, wenn man nachwachsende Rohstoffe einsetzt. So werden langkettige Carbonsäuren in einem Schritt durch Fettverseifung gewonnen. Hingegen hat sich die Möglichkeit, aus erdölbasierten langkettigen Paraffinen durch Oxidation die gewünschten Carbonsäuren zu erhalten, in vielen Fällen als unwirtschaftlich erwiesen. Die synthetische Route beschränkt sich deshalb auf Spezialprodukte, die nicht über natürliche Fette und Öle zu erhalten sind.

Ein Blick in die Zukunft

Wie neue biotechnologische Verfahren zukünftig neue Wege eröffnen, soll am Beispiel der Fettsäureerzeugung erläutert werden. Die Spaltung von Ölen und Fetten erfolgt großtechnisch mit der Dampfspaltung. Die Biotechnologie bietet hierzu eine interessante Alternative: die enzymatische Spaltung von Ölen/Fetten durch geeignete Enzyme, die sogenannten Lipasen – bekannt aus der menschlichen Fettverdauung. Es handelt sich um ein prozesstechnisch einfaches Verfahren, das bei Umge-

bungsbedingungen arbeitet und daher Energie einspart. Es zeigt außerdem eine hohe Produktselektivität, das heißt, es lassen sich gezielt bestimmte Produkte (hier Fettsäuren) gewinnen.

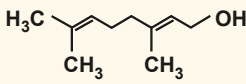
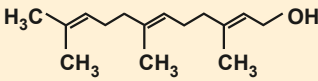
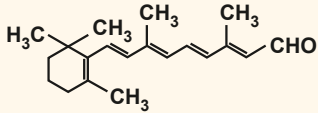
Diese biotechnologischen Verfahren werden seitens der Fraunhofer-Institute intensiv erforscht, um letztendlich großtechnische Anlagen betreiben zu können.

METHODISCHE ANMERKUNG

Komplizierte Moleküle werden in der Chemie meist als Skelettformel gezeichnet. Für Schüler gerade der unteren Klassen ist dies wenig anschaulich. Arbeitsauftrag für die Lernenden: Lassen Sie diese zunächst ein beliebiges Fett mit drei unterschiedlichen Fettsäureresten als Skelettformel und als ausführliche Strukturformel zeichnen, um einen Eindruck von der räumlichen Dimension zu vermitteln. Je nach Jahrgangsstufe können an diesem Beispiel grundlegende Begriffe der Chemie wie gesättigte oder ungesättigte Kohlenwasserstoffe, Einfach- und Doppelbindung, cis-trans- oder (Z)-(E)-Isomerie sowie Veresterung, Fettsäure und mehrwertiger Alkohol wiederholt werden (siehe Arbeitsblatt 5, Struktur von Fetten und Ölen).

TABELLE 4-4

Beispiel für in der Natur vorkommende Terpene

Name	Anzahl Isopren-Einheiten	Beispiel	Chemische Struktur	Bemerkung
Monoterpene	2	Geraniol		ist ein Bestandteil des Rosenöls
Sesquiterpene	3	Farnesol		hat einen blumigen Duft
Diterpene	4	Retinal		ist ein Vertreter aus der Vitamin-A-Gruppe

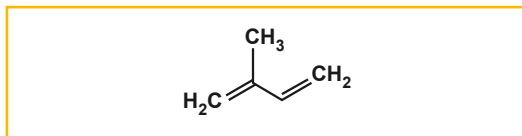
4.5 Terpene und Kautschuk

Zitronenöl vertreibt angeblich schlechte Laune. Ob das wirklich stimmt, weiß niemand. Sicher aber ist, dass das für den Duft verantwortliche Citronellol zu den Terpenen gehört. Terpene sind eine Gruppe von meist angenehm riechenden Naturstoffen. Hauptsächlich sind sie Bestandteile der ätherischen Pflanzenöle. Neben Citronellol gibt es weitere bekannte Beispiele wie das Menthol, das im Pfefferminzöl vorkommt, oder das Cuminal in Kreuzkümmel und Eukalyptus. Terpene setzen sich aus sogenannten Isopren-Einheiten zusammen (Abbildung 4-16). Da Isopren aus fünf Kohlenwasserstoffatomen besteht, lässt sich die Kohlenstoffanzahl der Terpene immer durch fünf teilen (sogenannte C5-Regel von Leopold Ruzicka, 1922). Aus einer einzigen Isopren-Einheit bestehende Verbindungen sind in der Natur selten. Da Terpene aus zwei, drei oder mehr Isopren-Einheiten weit verbreitet sind, wurden ihnen im Laufe der Jahrzehnte oftmals Trivialnamen gegeben, einige Beispiele sind in Tabelle 4-4 dargestellt. Von den etwa 40.000 beschriebenen Terpenen kennt man zwar die Strukturen, aber ihre biologische Bedeutung und Funktion nur teilweise. Bei manchen Tieren sind sie beispielsweise Pheromone, die abgegeben werden, um mit Artgenossen zu kommunizieren. Oder sie dienen als Lockmittel: Der Borkenkäfer folgt den Fichten-Terpenen, einem Duftstoff, den kranke Bäume abgeben.

In der Parfüm- und Lebensmittelindustrie werden bestimmte Terpene seit vielen Jahren genutzt. Beispiele sind Menthol, Geraniol und Nerol.

ABBILDUNG 4-16

Chemische Struktur von Isopren
2-Methyl-buta-1,3-dien



Terpene zur Krebsbekämpfung

Auch die Pharmaindustrie hat die Terpene für sich entdeckt: So basiert das für die Krebsforschung erfolgreich verwendete Medikament Taxol auf einem Diterpen. Ferner dienen Terpene als Ausgangsstoffe für die Synthese von Vitaminen, Pharmazeutika und Terpenharzen (Tabelle 4-5).

TABELLE 4-5

Terpene und ihre Anwendung

Industriezweig	Anwendung
Lebensmittelindustrie	Geschmacks- und Aromastoffe
Pharmazeutische Industrie	Ätherische Öle, Pharmazeutika; Vitamine
Kosmetikindustrie	Geruchs- und Aromastoffe
Farben- und Lackindustrie	Häufiger Ersatz für Lösemittel
Landwirtschaft	Pestizide





Kautschuk bewegt die Welt

„Cahuchu“ heißt Kautschuk in der peruanischen India-nersprache und bedeutet „tränder Baum“: Ritzt man die Rinde des Kautschukbaumes *Hevea brasiliensis* an, fließt eine Milch, die Kautschuk enthält.

Kautschuk ist ein Sammelbegriff für unvernetzte, aber vernetzbare (vulkanisierbare) Polymere mit elastischen Eigenschaften, aus denen Gummi und Elastomere hergestellt werden können. Vor allem in der Reifenindustrie spielt der nachwachsende Rohstoff eine große Rolle. Die Hersteller betreiben in Ländern wie Brasilien Forschungsprojekte, um die Qualität des „grünen Werkstoffs“ stetig zu verbessern. Das erste Patent zur Herstellung von synthetischem Kautschuk wurde 1909 an den deutschen Chemiker Fritz Hofmann erteilt.

Pflanzen produzieren Naturkautschuk, auch Latex genannt, als Emulsion von Naturkautschuktröpfchen in Wasser. Ein mittelgroßer Kautschukbaum liefert täglich mehrere Gramm Latex, der meistens noch vor Ort mit verschiedenen Mitteln (zum Beispiel Essigsäure) zur Gerinnung gebracht wird. Der Kautschuk wird als feste Masse vom Wasser getrennt. Walzen arbeiten die geronnene Masse, auch als Koagulat bezeichnet, zu etwa ein Millimeter dicken Schichten auf, die in beheizten Räumen bei etwa 50 °C trocknen. Am Ende wird der Latex pulverisiert, da er sich in dieser Form am besten transportieren lässt.

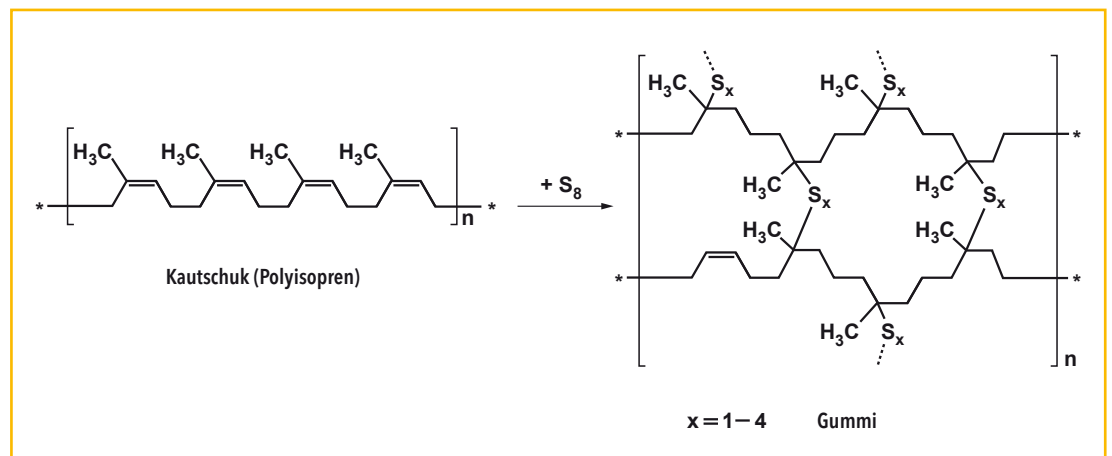
Chemisch gesehen besteht Kautschuk aus polymerisiertem Isopren mit einer mittleren Molmasse von 2×10^6 g/mol. Abbildung 4-17 zeigt einen Strukturausschnitt.

Es lebe die Vulkanisation!

Naturkautschuk lässt sich mit gutem Gewissen als „traditioneller“ nachwachsender Rohstoff bezeichnen, der bis zum heutigen Tag eine große Rolle spielt. Das war nicht immer so: Lange wusste man mit den Eigenschaften des Kautschuks nichts anzufangen. Der Schotte Charles Macintosh fand um 1823 heraus, dass sich Kautschuk in organischen Lösemitteln löst, und brachte diese Lösung auf Gewebe auf. War das Lösemittel verdampft, erhielt man einen regendichten Stoff, der allerdings bei Wärme verklebte und langsam durch Reaktion mit Luftsauerstoff spröde wurde. In England werden Regenmäntel noch heute „Macintosh“ genannt.

ABBILDUNG 4-17

Vulkanisation von Kautschuk



1839 entdeckte der Amerikaner Charles Goodyear die Vulkanisation. Bei der Vulkanisation werden plastische, kautschukartige Polymere durch die Vernetzung mit Schwefel in den gummielastischen Zustand umgewandelt (Abbildung 4-17). In der Vernetzungsreaktion werden zwischen den einzelnen Makromolekülen Schwefelbrücken aufgebaut. So entsteht schließlich ein unlösliches und thermoplastisch nicht mehr verarbeitbares Produkt, das als Gummi bezeichnet wird. Über die Schwefelmenge kann die Konsistenz festgelegt werden. Je nach Kautschuk-Beschaffenheit und nach Verwendungszweck des Gummis braucht man für die Kautschukverarbeitung zahlreiche weitere Hilfsstoffe wie Füllstoffe (Ruß, Kieselerde), Pigmente und Farbstoffe, Weichmacher, Alterungsschutzmittel, Flammenschutzmittel und andere Zusätze (Abbildung 4-18).

Da aber Naturkautschuk auch Nachteile hat, beispielsweise seine mangelnde Altersbeständigkeit, wurde – wie bereits oben erwähnt – eine synthetische Route für die Herstellung von Kautschuk entwickelt: Eine herausragende Rolle spielt in diesem Zusammenhang der Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR). SBR macht etwa 50 Prozent der Synthesekautschuk-Weltproduktion aus. Polybutadien-Kautschuk (BR) und Nitrilkautschuk sind weitere wichtige Synthesekautschuke. Die Herstellung von Styrol-Butadien-Kautschuk beruht großtechnisch auf der Polymerisation

von Styrol und Butadien. Die weltweite Produktion von Kautschuk betrug 2016 rund 27 Millionen Tonnen, der Anteil des natürlichen Kautschuks lag mit 12,4 Millionen Tonnen bei 44 Prozent. Diese Zahlen verdeutlichen die immense wirtschaftliche Bedeutung dieses nachwachsenden Rohstoffs.

Die wichtigsten Produktionsländer von Naturkautschuk sind Thailand, Indonesien, Malaysia, Indien, Vietnam und China. Hauptabnehmer sind die USA, Japan, China, Deutschland und Frankreich.

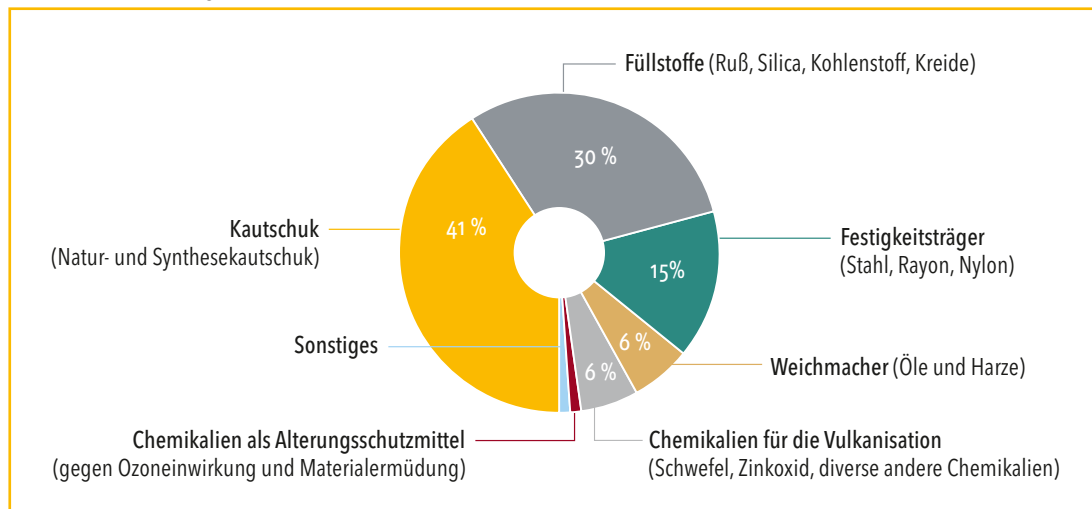
Von der Pusteblume zum Autoreifen

Autoreifen aus Löwenzahnmilch? Die Vorstellung irritiert, ist aber keineswegs abwegig. Gentechnisch veränderter Russischer Löwenzahn kann als Rohstoffquelle für Kautschuk dienen und damit als eine Alternative zum Gummibaum. Die ersten Autoreifen wurden schon produziert, die Materialeigenschaften sind vergleichbar mit Reifen aus herkömmlichem Naturkautschuk.

Rund 65 Prozent des weltweiten Kautschukbedarfs entfielen im Jahr 2014 auf Reifenanwendungen. Ferner produziert man aus Gummi Handschuhe, Dichtungen, Luftballons, Schläuche, Gummistiefel, Schuhsohlen und Transportbänder.

ABBILDUNG 4-18

Zusammensetzung eines Autoreifens



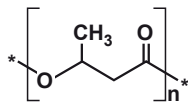
Biokunststoffe aus Bakterien

Weltweit haben Forscher diese Substanzen im Visier: die besonders vielseitigen Polyhydroxyalkanoate (PHA). Seit Jahrtausenden entstehen PHA im Stoffwechsel von Bakterien (zum Beispiel *Alcaligenes eutrophus*). Sie dienen den Einzellern als Energiereserve, die in Form von wasserunlöslichen, stark lichtbrechenden Einschlüssen in der Zelle vorliegen. Chemisch gehören die PHA zu den Polyestern. Für viele Forscher sind sie deshalb die „Biokunststoffe“ (siehe Hinweis S.40) der Zukunft und die aussichtsreichste Alternative für die Polyolefine. Mikroorganismen produzieren diese Polyester meist unter Mangelbedingungen (beispielsweise Stickstoff-, Phosphor- oder Sauerstoffmangel) – bei einem gleichzeitigen Kohlenstoffüberschuss.

Verschiedene Bedingungen beeinflussen den Prozess: welche Art Mikroorganismen eingesetzt wird, welche Kohlenstoffquelle ihnen zur Verfügung steht und welche Kultivierungsbedingungen herrschen. All das bestimmt die Ausbeute, das Molekulargewicht und die Zusammensetzung der PHA. So können Polyester mit unterschiedlichen Eigenschaften aus verschiedenen Hydroxyalkansäuren von den Bakterien erzeugt werden. Technisch werden Polyhydroxyalkanoate durch Fermentation gewonnen. Anschließend wird das Polyhydroxyalkanoat – meist durch Extraktion – aus den Mikroorganismen isoliert.

ABBILDUNG 4-19

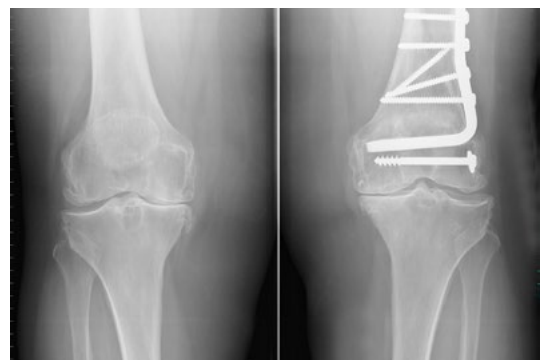
Struktur von Poly(3-hydroxybutyrat)



Vom Kunststoffhandschuh bis zum Becher

Vom flexiblen Kunststoffhandschuh über den festen Becher bis zur starren Flasche – Polyhydroxyalkanoate sind vielfältig verwendbar. Diese Gruppe von biologisch abbaubaren Kunststoffen ist auch interessant, wenn es um Lebensmittelverpackungen geht: Einige PHA sind annähernd so sauerstoffdicht wie Polypropylen oder Polyethylen.

PHA-Kunststoffe lassen sich bei hohen Temperaturen verformen, gießen und durch Düsen pressen – sie sind vielseitig verarbeitbar, und vor allem: Sie lassen sich biologisch wieder abbauen. Auch der Mensch baut viele der PHA-Kunststoffe biologisch wieder ab. So müssen Implantate wie Schrauben, die nach Knochenbrüchen eingesetzt werden, nicht durch eine weitere Operation entfernt werden. Die biologische Abbaubarkeit kann auch zur gezielten Freisetzung von Medikamenten im Körper genutzt werden. Hierzu werden Wirkstoffe etwa in eine Matrix aus PHA oder in eine Hülle aus PHA eingearbeitet. Im menschlichen Körper löst sich die Matrix langsam auf, und der Wirkstoff wird freigesetzt.



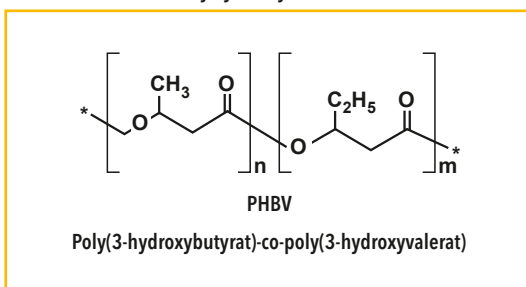


Der einfachste Polyhydroxyalkanoat-Vertreter ist die Polyhydroxybuttersäure (PHB) (Abbildung 4-19). Technisch bedeutsamer sind jedoch die Copolymere der Polyhydroxybutyrate, weil sie für technische Anwendungen die besseren Eigenschaften mitbringen.

Um 1960 wurde in den USA ein Fermentations- und Extraktionsverfahren entwickelt, um PHB als thermoplastischen Kunststoff kommerziell zu gewinnen. Doch das reine PHB ist spröder als Polypropylen, was die Anwendungsmöglichkeiten des PHB stark einschränkt. Erst mit der biochemischen Synthese von Copolymeren, zum Beispiel Poly(3-hydroxybutyrat)-co-poly(3-hydroxyvalerat) (PHBV; Abbildung 4-20), die weniger spröde sind, gelang ein wichtiger Fortschritt. In den 1990er Jahren wurde schließlich erstmals in Deutschland eine biologisch abbaubare Shampooflasche aus PHBV hergestellt. Da der Preis der Flasche aber deutlich höher war als der von PET-Flaschen, konnte sich die PHBV-Flasche am Markt nicht durchsetzen.

ABBILDUNG 4-20

Struktur eines Polyhydroxyalkanoats



Ein japanischer Anbieter stellt seit 2010 einen Partikelschaum (ähnlich Styropor®) aus PHA her. Eine chinesische Firma vertreibt das Copolymer Polyhydroxy-Butyrate-co-Valerate als Pulver bzw. Pellets. Es wird durch Fermentation mit dem Bakterium *Ralstonia Entrophia* aus Getreidestärke gewonnen und dient als Ausgangsstoff für thermoplastische Kunststoffe sowie für Fasern und Vliesstoffe.

Momentan stehen einer umfassenden Kommerzialisierung von PHAs noch erhöhte Materialkosten entgegen.

Um den Einsatz von biobasierten und/oder bioabbaubaren Kunststoffen zu erhöhen, bedarf es einiger wichtiger Voraussetzungen. Nachwachsende Rohstoffe müssen in guter und konstanter Qualität sicher und zu wettbewerbsfähigen Preisen verfügbar sein, wobei das Verhältnis zum Preis von Erdgas und Erdöl ausschlaggebend ist.

Die Entwicklung ist jedoch schwer kalkulierbar, auch aufgrund der konkurrierenden Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen bei Energieerzeugung, Transport und der Nahrungsmittelproduktion vor dem Hintergrund einer wachsenden Weltbevölkerung.



Was sind Biokunststoffe?

Der Begriff Biokunststoff wird für verschiedene Aspekte genutzt, die die Rohstoffbasis (Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen), die Funktionalität (biologisch abbaubar) oder beides betreffen können. (Abb. 4.21)

Biobasierte Kunststoffe

Die Kunststoffindustrie setzt nachwachsende Rohstoffe dort ein, wo sie ökonomische und technische Vorteile bieten. Zurzeit (Stand 2018) basiert weltweit weniger als ein Prozent des gesamten Kunststoffverbrauchs auf nachwachsenden Rohstoffen. Biobasierte Kunststoffe werden heute in erster Linie aus Stärke, Polymilchsäure (PLA) und Cellulose hergestellt. Sie spielen zum Beispiel bei der Herstellung von Lebensmittelverpackungen eine Rolle. Allerdings ist die Haltbarkeit der Lebensmittel eingeschränkt, da die Barriereigenschaften von Biokunststoffen gegenüber Wasserdampf und Gasen unzureichend sind. Ausreichende Wasserdampf- und Sauerstoffrückhaltung die zum Beispiel für die Verpackung von Fleisch wichtig ist, kann nur erreicht werden durch eingebaute Barrieren aus klassischen Kunststoffen, durch den Einsatz von Nanocomposites oder durch das Aufdampfen einer anorganischen Sperrschicht, etwa aus Aluminium. Biobasiert heißt nicht, dass ein Kunststoff auch biologisch abbaubar ist!

Bioabbaubare Kunststoffe

Allgemein ist eine Substanz biologisch abbaubar, wenn sie von Mikroorganismen oder durch Stoffwechselforgänge zu Wasser, Kohlenstoffdioxid, Methan und Biomasse abgebaut werden kann. Die biologische Abbaubarkeit eines Kunststoffs hängt von seiner Struktur ab, nicht von der Rohstoffbasis. Diese kann petrostämmig sein oder auf nachwachsenden Rohstoffen basieren. Bioabbaubare Kunststoffe werden in medizinischen Anwendungen, im Agrarbereich und für Verpackungen eingesetzt, wo Abbaubarkeit ein nützliches Merkmal ist.

- In der Landwirtschaft können biologisch abbaubare Kunststoffe zum Beispiel als Blumentöpfe eingesetzt werden, die im Boden zu Biomasse verstoffwechselt werden und gleichzeitig als Bodenverbesserer dienen.
- Mulchfolien fördern das Pflanzenwachstum und haben außerdem eine positive Wirkung bei der Unkrautbekämpfung. Ihr Einsatz macht eine mechanische Entfernung überflüssig, wodurch eine Schädigung der Pflanzen vermieden wird. Nach Gebrauch können sie untergepflügt werden, da sie sich im Boden biologisch abbauen.
- Im Verpackungsbereich können aus biologisch abbaubaren Kunststoffen Küchenabfallbeutel hergestellt werden, die gemeinsam mit dem Bioabfall kompostiert werden. Sie verbessern die Bioabfallsammlung, indem sie für mehr Hygienesicherheit sorgen und die Handhabung vereinfachen.

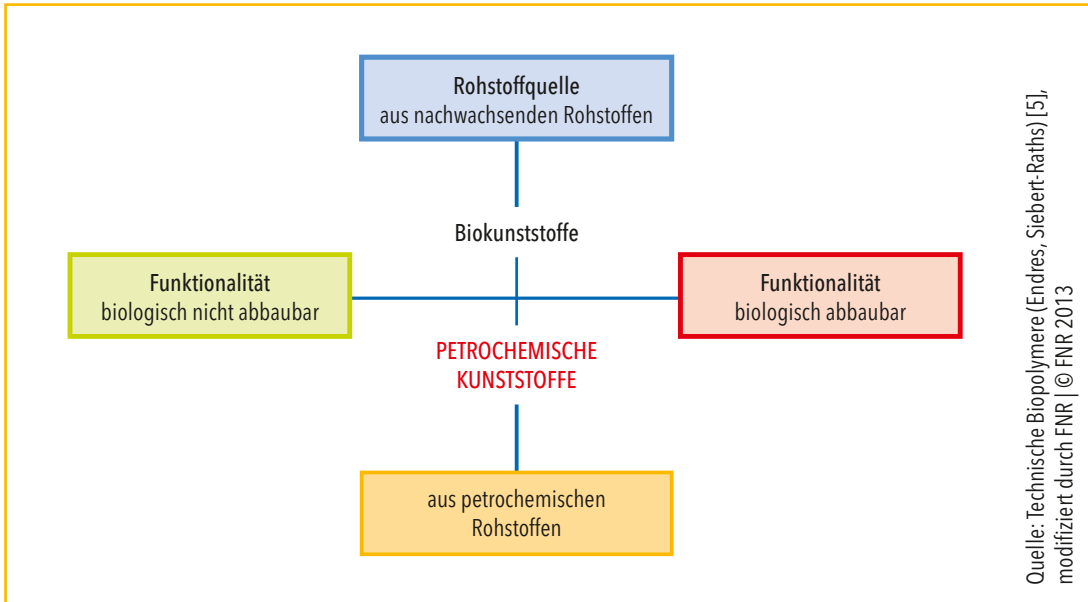
Biologische Abbaubarkeit

Zusätzlich zu den herkömmlichen Verwertungswegen – werkstofflichem und rohstofflichem Recycling sowie energetischer Verwertung – können biologisch abbaubare Kunststoffabfälle durch Kompostierung (aerob) oder Vergärung (anaerob) behandelt werden. Welche Verwertung jeweils die ökoeffizienteste ist, hängt von der Zusammensetzung und der Qualität des Abfalls ab. Produkte, die aus kompostierbarem Material hergestellt sind (EN 13432 für kompostierbare Verpackungen), tragen als Kennzeichen oft das Keimlingslogo und können in Kompostbehältern entsorgt werden. Biologische Abbaubarkeit löst allerdings nicht das Problem der Vermüllung der Landschaft. Selbst bioabbaubare Werkstoffe brauchen Monate, um zu verrotten. So ist bei der Prüfung nach EN 13432 nachzuweisen, dass im wässrigen Medium mindestens 90 Prozent des organischen Materials in sechs Monaten in Kohlendioxid umgewandelt werden.



ABBILDUNG 4-21

Biobasierte und bioabbaubare Kunststoffe



Biokunststoffe werden als Folien, Fasern, Spritzguss oder in extrudierter Form bereits in einer Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen eingesetzt. Dabei basieren viele Produkte auf Mischungen aus Komponenten nachwach-

sender und erdölbasierter Rohstoffe. Die erdölbasierten Komponenten werden gebraucht, um die funktionellen Eigenschaften des fertigen Produkts zu verbessern und so die Anwendungspalette zu erweitern.

TABELLE 4-6

Einige Einsatzfelder von Biokunststoffen

Bereich	Anwendung	Eigenschaft und Auswirkung
Medizin	Chirurgisches Nahtmaterial	Faser, im Körper abbaubar
	Wirkstoffträger	Faser, im Körper abbaubar
	Implantate	Körperverträglich
Verpackung/Folie	Shampooflaschen	Kompostierbar
	Tragetaschen	Kompostierbar
	Folienbeete (Frühgemüse)	Frostschutz und Wärmerückhaltung, biologisch abbaubar und daher im Feld kompostierbar
Gebrauchsartikel	Handygehäuse	Kompostierbar
	Einweggeschirr	Kompostierbar
	Kleidung	Guter Wassertransport, gute Verträglichkeit

Ohne Erdöl und Erdgas geht in der chemischen Industrie nichts. Die Rohstoffe liefern die nötigen chemischen Bausteine, die sogenannten Plattformchemikalien, aus denen man verschiedenste Substanzen und Produkte aufbaut. Doch auch wenn die Erdöl- und Erdgasvorkommen derzeit noch nicht zur Neige gehen, wird die Förderung immer aufwendiger. Auch vor dem Hintergrund des Klimawandels sollte die intensive Nutzung fossiler Kohlenstoffträger so weit als möglich eingeschränkt werden. Weltweit sucht man deshalb nach alternativen Rohstoffquellen. Eine solche Quelle sind die nachwachsenden Rohstoffe. Dieses Kapitel zeigt, wie wichtige Synthesebausteine der chemischen Industrie aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden können. Je nachdem, wie viele C-Atome diese Synthesebausteine enthalten, spricht man zum Beispiel von C1-, C2- und C3-Bausteinen.

5.1 Klein, aber oho – die C1-Synthesebausteine

Methanol und Formaldehyd

Sie gehören zu den wichtigsten chemischen Bausteinen, den C1-Verbindungen, die man in vielen chemischen Produktionsverfahren benötigt.

Oxidiert man Methanol mit Sauerstoff, entsteht daraus Formaldehyd. Historisch gesehen war die bedeutendste Verwendung von Formaldehyd die Herstellung des Kunststoffs Bakelit durch Reaktion mit Phenol. Seit den 1930er Jahren formte man daraus die eleganten schwarzen Bürotelefone oder Radiogehäuse in Klavierlackanmutung. Zwar braucht man heute keine schweren Bakelit-Apparate mehr. Doch Formaldehyd ist weiterhin eine wichtige Grundchemikalie, die unter anderem in großen Mengen für die Herstellung von Lacken und Kunststoffen verwendet wird.

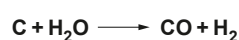
Die Herkunft der C1-Bausteine

C1-Verbindungen stellt man industriell aus Synthesegas her – einem Gasgemisch aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff. Ausgangsstoffe für das Synthesegas sind derzeit zum großen Teil Erdgas und Naphtha. Durch Reaktion mit Wasserdampf entsteht bei Temperaturen

von 800 – 900 °C und Drücken von bis zu 40 bar in einer endothermen Reaktion das Gasgemisch, wie das folgende Beispiel zeigt:



Die Industrie besitzt eine reiche Erfahrung bei der Herstellung von Synthesegas. Unterschiedliche verfahrenstechnische Varianten sind seit mehr als 90 Jahren bekannt, auch mit Kohle als Rohstoff:

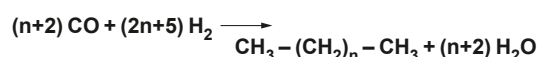


Auf diese Erfahrung kann jetzt zurückgegriffen werden, wenn man nach Wegen sucht, bei der Synthesegaserzeugung von Biomasse anstelle von Erdgas und Erdölprodukten auszugehen.

Wird Biomasse unter Luftausschluss auf Temperaturen von etwa 550 °C erhitzt, man spricht hier von einer Pyrolyse, zersetzt sie sich. Es entsteht ein brennbares Gas, das Verbindungen wie Kohlenstoffmonoxid und Methan enthält, weiterhin eine Flüssigkeit – das aus vielen organischen Verbindungen zusammengesetzte Pyrolyseöl – und ein mit Koks vergleichbarer Feststoff. Der Koks und ein Teil des Öls werden mit Wasserdampf zu Synthesegas umgesetzt. Das Gas und das restliche Pyrolyseöl dienen dazu, die notwendige Energie für die Pyrolyse und die Synthesegaserzeugung bereitzustellen.

Das gereinigte Gemisch aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff kann zu C1-Verbindungen wie Methanol umgesetzt werden.

Aber auch länger-kettige Kohlenwasserstoffe oder Alkohole lassen sich aus Synthesegas gewinnen – es kommt nur auf die Reaktionsbedingungen an. Folgende Gleichung gilt für die Synthese von Kohlenwasserstoffen:



Grundlegend erforscht wurde die Reaktion von Franz Fischer und Hans Tropsch bereits in den 1920er Jahren. Sie eröffnete seinerzeit die Möglichkeit, aus Kohle Motortreibstoffe herzustellen. Und auch heute noch spricht man von der Fischer-Tropsch-Synthese.



Seit Jahren arbeiten Forscher in zahlreichen Entwicklungsprojekten daran, die Umsetzung von nachwachsenden Rohstoffen in Synthesegas zu optimieren. Sie testen verschiedene Kombinationen von Pyrolyse und Vergasung, variieren die Prozessbedingungen und versuchen so, die Biomasse so gut wie möglich zu nutzen. Durch neue Techniken und neue Katalysatoren ist es möglich, das Verhältnis von Wasserstoff zu Kohlenstoffmonoxid (H₂:CO) im Rohgas aus der Vergasung fester Biomasse zuverlässig auf die erwünschten Werte von 2:1 bis über 3:1 einzustellen. Wirtschaftlichkeitsberechnungen zeigen, dass diese Entwicklungen in einer Industrieanlage auch zu ökonomischen Verbesserungen gegenüber dem derzeitigen Stand der Technik führen würde.

5.2 Wahre Multitalente – die C₂-Synthesebausteine

Ethen und Ethanol

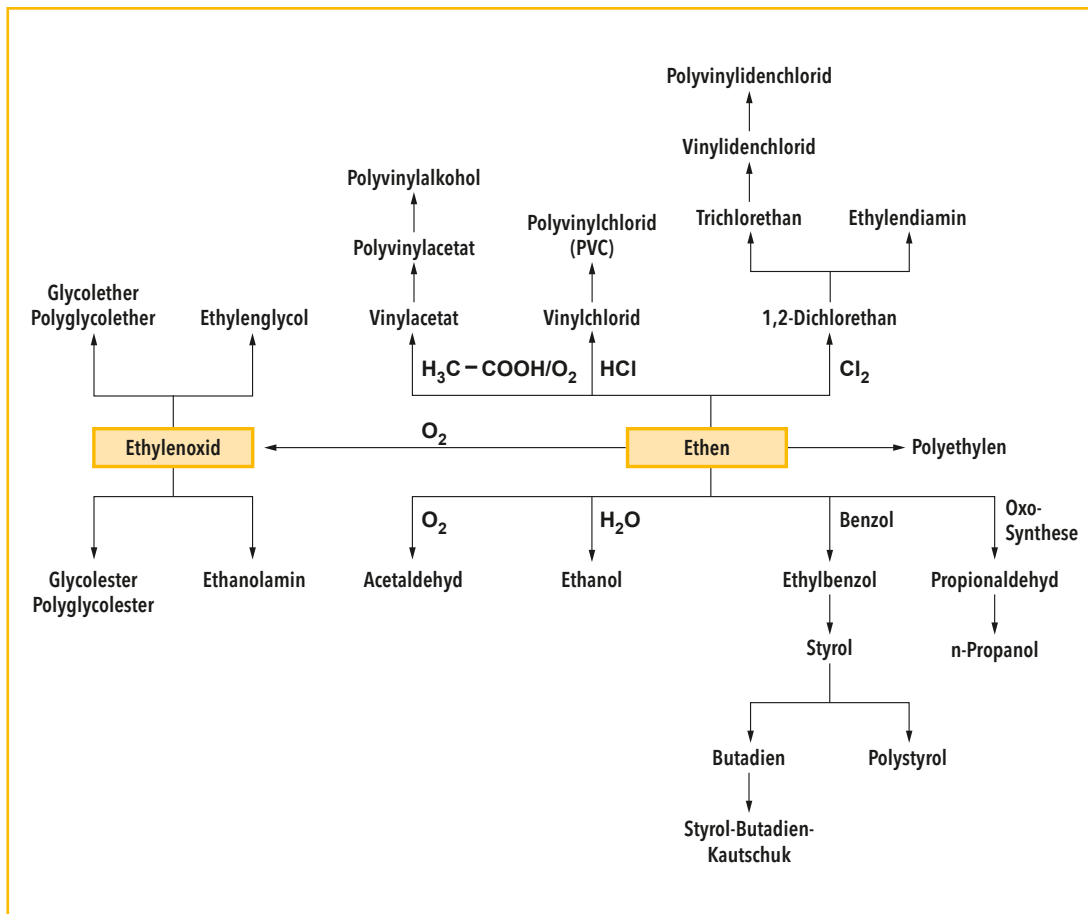
Ethen ist die wichtigste C₂-Verbindung der chemischen Industrie. Es lässt sich in eine erstaunliche Fülle verschiedener Substanzen umwandeln. Die folgende Übersicht verdeutlicht dies eindrucksvoll (Abbildung 5-1).

Im Laufe der Jahrzehnte hat man die Produktionsverfahren für Polyethylene immer weiter variiert und verbessert. Es stehen heute maßgeschneiderte Polyethylen-Typen für unterschiedliche Einsatzzwecke zur Verfügung. Plastiktüten sind heute leichter und reißfester als noch vor 30 Jahren. Und längst gibt es Frischhaltedosen, die sowohl Frost als auch Backofentemperaturen überstehen.



ABBILDUNG 5-1

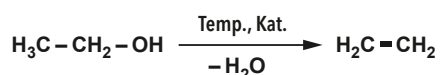
Verblüffend vielseitig: Folgeprodukte des C₂-Bausteins Ethen



Der Ethenbedarf wächst ständig. Das dürfte auch in Zukunft so bleiben. Ethen ist ein organisches Multitalent – Grund genug für die Forscher, intensiv nach alternativen Rohstoffquellen für die Synthese von Ethen zu suchen.

Die Herkunft von Ethen ...

In den 40er Jahren des 19. Jahrhunderts gewann man Ethen vorwiegend aus Ethanol. Später wurde dieses Verfahren allerdings durch das thermische Cracken von Kohlenwasserstoffen aus Erdöl verdrängt, was auch heute dominiert. Aber die Synthese von Ethen aus Ethanol gewinnt inzwischen wieder an Bedeutung. Hierbei handelt es sich um eine säurekatalysierte Dehydratisierung, die endotherm abläuft (siehe Experimente 11a und b):



Für die Reaktion werden unterschiedliche Katalysatoren wie Zeolithe, Aluminiumoxide und Wolframphosphorsäuren eingesetzt, wobei Ausbeuten von bis zu 99 Prozent erreicht werden.

... und Ethanol

Weltweit wurden 2016 über 130 Milliarden Liter Ethanol produziert. Dies kann einmal in Umkehrung der oben abgebildeten Reaktion durch Anlagerung von Wasser an Ethen, das aus fossilen Rohstoffen gewonnen wurde, erfolgen. Immer bedeutender wird die Herstellung von Bioethanol durch Fermentation, also die alkoholische Gärung von Stärke, Zucker oder Melasse (einem Rückstand aus der Zuckerproduktion). Die größten Produzenten von Bioethanol sind Brasilien und die USA.

Die alkoholische Gärung ist in Abbildung 5-2 vereinfacht dargestellt. Dieser Mechanismus läuft so in jedem Bierbraukessel ab. Bestimmte Hefen bauen dabei mit ihren Enzymen die Zuckermoleküle (Hexosen) zu Ethanol und Kohlenstoffdioxid ab. Aus einem Kilogramm Glucose entstehen unter optimalen Bedingungen etwa 0,5 Kilogramm Ethanol.

Das mit Hilfe der Hefen biotechnologisch in großen Fermentern gewonnene Ethanol wird anschließend aufkonzentriert. Experten bezeichnen diesen Vorgang als Rektifikation oder „Brennen“ – ein Begriff, den man von der „Schnapsbrennerei“ kennt.

Neue Wege zu mehr Ethanol

Obwohl die Ethanolgewinnung ein vergleichsweise altes Verfahren ist, gab es in der letzten Zeit viele verfahrenstechnische Neuerungen, um die Produktion zu optimieren. Ein Problem ist zum Beispiel die während der Fermentation steigende Ethanolkonzentration, die einen inhibierenden (hemmenden) Effekt auf den Prozess hat. Mögliche Lösung ist die „kontinuierlich betriebene Fermentation“. Bei diesem Verfahren wird der entstehende Alkohol, das Ethanol, ständig aus dem Prozess entfernt – durch Methoden wie die simultane Vakuumdestillation, durch die Extraktion des Ethanols mit Lösemitteln oder durch Abtrennen aus dem Fermentationsgemisch mit Hilfe von Membranen. Solche Verbesserungen geben der weltweit wachsenden Ethanolproduktion zusätzlichen Schwung. So steigt die erzeugte Bioethanolumenge ständig.

Der wachsende Bioethanolbedarf wird sich langfristig nicht allein mit der Fermentation von Stärke und Zucker decken lassen. Statt nur den stärkehaltigen Teil der Pflanzen zu verwenden, erforschen Wissenschaftler, inwieweit sich auch Stiele und Blätter oder solche Pflanzen eignen, die der Mensch nicht als Nutzpflanzen verwendet. Das könnte besonders gut in Bioraffinerieanlagen funktionieren: Dort werden Lignocellulosen aus holzartigen Rohstoffen in ihre Bestandteile Cellulose, Hemicellulosen und Lignin zerlegt. Die Cellulose und die Hemicellulosen könnte man dann als Substrate für die Bioethanolherstellung nutzen. Doch vor der Vergärung müssen Cellulose und Hemicellulosen zunächst zu Einfachzuckern aufgespalten werden. Entsprechende Verfahren, bei denen biotechnologisch veränderte Enzyme, Cellulasen, diese robusten Naturrohstoffe wirksam knacken können, werden seit einigen Jahren intensiv erforscht.

Ethanol kann noch viel mehr

Der C2-Baustein Ethanol ist allerdings deutlich mehr als nur Grundstoff für die Ethenherstellung. Ethanol lässt sich zum Beispiel als Lösemittel, für pharmazeutische Präparate, als Rohstoff für die chemische Industrie und als Kraftstoff nutzen. Seit Dezember 2010 verpflichtet die EU alle Mitgliedstaaten, Ottokraftstoff mit bis zu zehn Volumenprozent Kraftstoffethanol (Bioethanol) als E10 auf den Markt zu bringen. Die Beimischung verbessert

die Klimabilanz von Benzin. Bei der Nutzung von Bioethanol als Kraftstoff ist Brasilien weltweit Spitzenreiter. Hier fahren mittlerweile rund 70 Prozent der Pkw mit Benzin, dem 25 Prozent Bioethanol zugesetzt wurden. Allerdings muss hier auch die Frage gestellt werden, inwieweit die Bioethanolgewinnung umweltverträglich erfolgt, oder ob die großen notwendigen Mengen an Zuckerpflanzen nur durch Raubbau an der Natur erzeugt werden können (z.B. Abholzung von Regenwald, Monokulturen) und ob das Problem der anfallenden Reststoffe gelöst ist. Nachteilig ist etwa, dass bei der Vergärung nur ein kleiner Teil des zur Verfügung stehenden pflanzlichen Rohstoffs stofflich genutzt werden kann, denn der Zuckergehalt in Zuckerrohr beträgt nur knapp 20 Prozent. Es werden daher große Anbauflächen benötigt.

HINWEIS

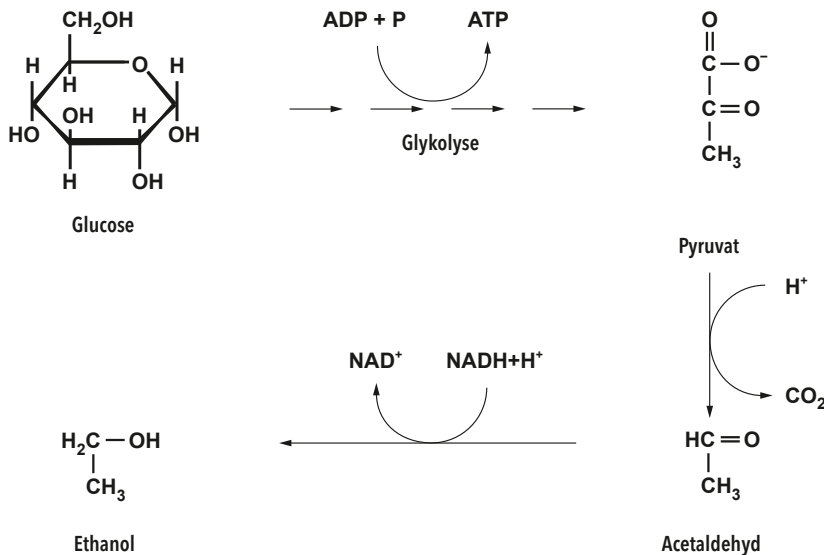
Ein Blick in die nahe Zukunft

Aufgrund der sehr hohen Investitionskosten für eine Anlage zur Ethanolherstellung aus fossilen Rohstoffen könnte die Nachfrage nach Ethanol zukünftig steigen. Dies hängt jedoch auch stark von der Entwicklung des Ethanolpreises ab. Vor allem in Afrika, Asien und Südamerika aber könnte sich die Ethanolherstellung und -nutzung zu einem lohnenden Geschäft entwickeln, da Ethanol in diesen Regionen relativ preisgünstig aus Zuckerrohr gewonnen wird. Ein Vorreiter ist Brasilien. Im Frühjahr 2009 wurde dort die erste Anlage der Welt errichtet, mit der vollständig biobasiertes Polyethylen aus Bioethanol produziert wird. Allerdings liegen die Preise für biobasiertes Polyethylen noch höher als für petrochemisch erzeugtes Polyethylen.



ABBILDUNG 5-2

Ablauf der alkoholischen Gärung



Bei der Glycolyse wird über mehrere Stufen ein Molekül Glucose in zwei Moleküle Pyruvat umgewandelt und zwei Moleküle ATP gebildet. Anschließend erfolgt die Decarboxylierung des Pyruvats (es wird CO₂ abgespalten). Zuletzt reduziert NADH das Acetaldehyd zu Ethanol. Alle Schritte werden durch Enzyme katalysiert.

Erläuterung der Abkürzungen: ADP, ATP: Adenosindi- bzw. -triphosphat (Energieträger)
 NAD⁺, NADH + H⁺: Nicotinamid-Adenin-Dinucleotid (Cosubstrat für enzymatische Redox-Reaktionen)

5.3 Chemie mit Bakterien – die C3-Synthesebausteine

Milchsäure und ihre Folgeprodukte

Milchsäure ist ein C3-Baustein und lässt sich ähnlich wie Ethen zu vielen chemischen Folgeprodukten umsetzen. Die Säure ist ein Produkt des anaeroben Abbaus von Zuckern im Stoffwechsel fast aller Lebewesen. Auch dies ist ein Gärungsprozess. Milchsäure wurde 1780 von dem schwedischen Chemiker Carl Wilhelm Scheele in saurer Milch entdeckt. Aus Milchsäure wird Polymilchsäure (Polylactic – PLA) hergestellt. Unter den biobasierten Polyestern ist Polymilchsäure derzeit der am Markt bedeutendste Biokunststoff.

METHODISCHE ANMERKUNG

In der Chemie wurden schon immer einfache und griffige Trivialnamen genutzt. Diese haben sich trotz der Einführung systematischer IUPAC-Nomenklaturregeln bis heute gehalten. Denn oft sind systematische Bezeichnungen für größere Moleküle recht kompliziert. Die unsystematischen und deswegen nicht aus Regeln herleitbaren Trivialnamen bereiten Lernenden jedoch oftmals Schwierigkeiten und müssen wie Vokabeln gelernt werden. Einen Vorschlag für eine solche Liste mit Trivialnamen organischer Verbindungen (sowie mit IUPAC-Namen und Strukturformeln) gibt es auf [Arbeitsblatt 8](#).

Zur Ergänzung von [Arbeitsblatt 8](#) gibt [Arbeitsblatt 9](#) eine Kurzübersicht über die funktionellen Gruppen der organischen Chemie. Auf [Arbeitsblatt 13](#) finden sich Kreuzworträtsel, mit denen spielerisch die IUPAC-Nomenklatur sowie Trivialnamen geübt werden können.

Den Mechanismus der alkoholischen Gärung zeigt [Arbeitsblatt 10](#).

Die Darstellung von Ethen aus Ethanol zeigen die [Experimente 11a und 11b](#).

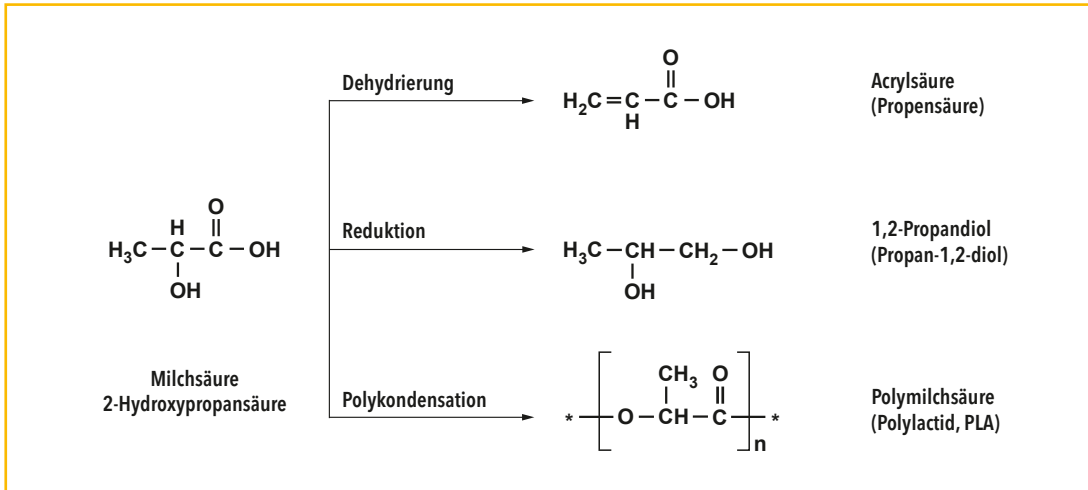
Vielseitig verwendbar

Milchsäure wird häufig als Lebensmittelzusatzstoff E 270 verwendet – etwa als Säuerungsmittel in Süßwaren oder Limonade. Auch die Kosmetikindustrie setzt Milchsäure ein. Und Gerbereien entkalken damit Häute. Außerdem ist sie wichtiger Grundstoff für die Produktion von Polymilchsäure (Polylactid, PLA; siehe Abbildung 5–3), einem biologisch abbaubaren Kunststoff. Aus PLA werden schon seit längerem Implantate und Nahtmaterialien für die Medizintechnik hergestellt. Da PLA durchsichtig ist und sich gut verarbeiten lässt, wird es auch zur Produktion kurzlebiger Lebensmittelverpackungen wie Folien und Bechern eingesetzt. Forscher arbeiten daran, neue Anwendungsgebiete für PLA zu erschließen, indem sie Füllstoffe zusetzen bzw. Copolymere mit anderen Monomeren synthetisieren. Eine zukunftsweisende Anwendung könnte die Herstellung von hochtemperaturfestem PLA werden, das als Basis für ein 3-D-Druckmaterial aus nachwachsenden Rohstoffen dient. Auf diesem Gebiet wird derzeit intensiv geforscht.

Aus Milchsäure lassen sich noch viele andere Basischemikalien für die chemische Industrie synthetisieren. Abbildung 5–3 zeigt Produktbeispiele und bereits untersuchte und in der Literatur beschriebene Reaktionswege. Abgesehen von der Polylactid-Herstellung wird bislang allerdings keines dieser Verfahren im industriellen Maßstab eingesetzt, da sie noch nicht ausgereift und derzeit unwirtschaftlich sind. Von den möglichen Folgeprodukten der Milchsäure sind die Acrylsäure und das 1,2-Propandiol am interessantesten, da diese Substanzen Vorstufen für die Herstellung hochpreisiger Kunststoffe sind. Aus Erdöl werden heutzutage jährlich weltweit allein mehr als 3,4 Millionen Tonnen Acrylsäure als Basis für Polyacrylate hergestellt. Der alternative Syntheseweg, über die Milchsäure (2-Hydroxypropionsäure) zu Acrylsäure zu gelangen, wurde erforscht, aber nicht kommerzialisiert. 2012 starteten drei Unternehmen aus Deutschland, den USA und Dänemark ein gemeinsames Forschungsprojekt zur Herstellung von Acrylsäure aus nachwachsenden Rohstoffen.



Verschiedene Reaktionswege zu Milchsäure-Folgeprodukten



Herstellung der Milchsäure

Bereits 1813 berichtete der Franzose Henri Braconnot von der Möglichkeit, Milchsäure mit Hilfe von Bakterien in großen Mengen zu produzieren. Die industrielle Herstellung auf biotechnologischem Weg begann 1881.

Auch heute wird der Großteil der jährlich weltweit produzierten Milchsäure biotechnologisch mittels Bakterien gewonnen. Fachleute gehen davon aus, dass diese Menge wegen der bedeutenden Rolle der Milchsäure als organischer Synthesebaustein in den nächsten Jahren drastisch zunehmen wird. Nach einer vom amerikanischen Energieministerium in Auftrag gegebenen Studie gehört die Milchsäure sogar zu den Top 30 der weltweit wichtigsten Synthesebausteine.

Großtechnisch wird Milchsäure heute in der Regel durch Vergärung von Glucose oder anderen Sechsfachzuckern (Abb. 5-4) hergestellt, die wiederum aus Kartoffel- oder Getreidestärke, Melasse, zuckerhaltigen Rohstoffen oder Molke gewonnen werden. Zur Vergärung können dabei zwei Arten von Bakterienstämmen eingesetzt werden: entweder die sogenannten homofermentativen Stäm-

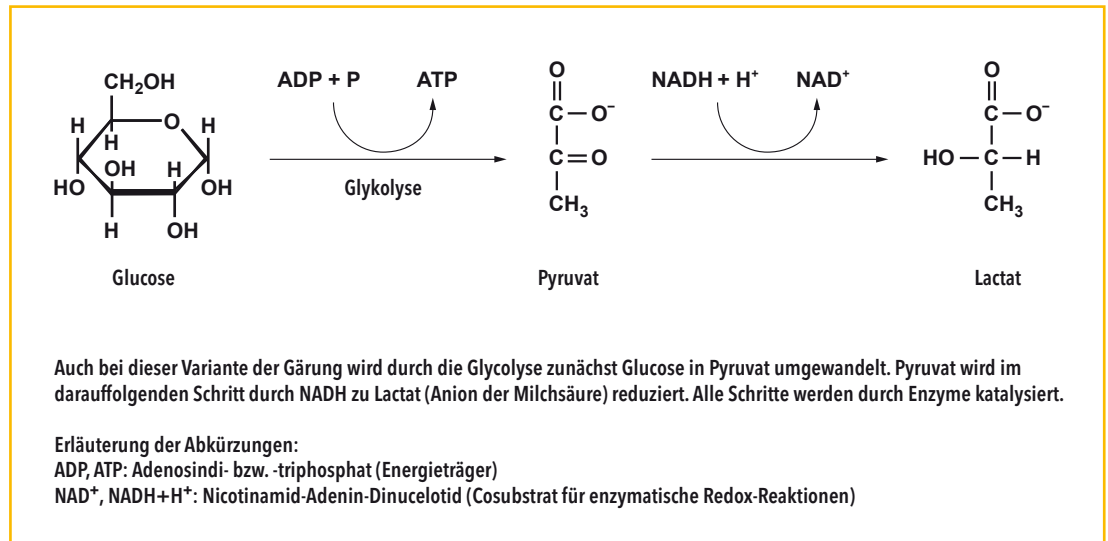
me, die ausschließlich Milchsäure erzeugen, oder die heterofermentativen Stämme, die außer Milchsäure auch noch andere Produkte wie Essigsäure oder Ethanol und Kohlenstoffdioxid erzeugen. In der Molkereindustrie wird beispielsweise das homofermentative Bakterium *Lactobacillus casei* eingesetzt.

Forschung für eine bessere Produktion

Derzeit laufen viele Forschungsaktivitäten, um die Milchsäureherstellung noch weiter zu verbessern:

- Viele Arbeitsgruppen verfolgen das Ziel, nicht Zucker oder Melasse, sondern kostengünstigere Lignocellulosen als Ausgangsmaterial für die Fermentation einzusetzen.
- Andere Forschungsarbeiten befassen sich mit den Nährstoffen, die für die Mikroorganismen während der Fermentation benötigt werden. Hier will man von den momentan eingesetzten löslichen Peptiden, Aminosäuren, Phosphaten, Vitaminen und Ammoniumsalzen auf kostengünstigere Alternativen umsteigen.

Reaktionsschema der Milchsäuregärung



Probleme bereitete bisher die Abtrennung der bei der Milchsäureherstellung anfallenden Abfallprodukte: Während der Fermentation muss der pH-Wert der Reaktionslösung zwischen fünf und sechs liegen. Ist die Gärung abgeschlossen, neutralisiert man in den meisten Fällen mit Calciumhydroxid. Um die Milchsäure schließlich aus dem Gemisch freizusetzen, gibt man Schwefelsäure zu. Das dabei entstehende Calciumsulfat wird abgetrennt und entsorgt. Um die großen Abfallmengen deutlich zu reduzieren und das Entsorgungsproblem zu lösen, suchten Fachleute lange nach effektiveren Produktionsverfahren. Eine Lösung sind genetisch veränderte Bakterien, die in der Lage sind, Milchsäure im neutralen oder niedrigeren pH-Bereich zu bilden.

Molekulare Spiegelbilder

Manche Moleküle kommen in zwei spiegelbildlichen Varianten vor, sogenannte Enantiomere. Das Phänomen der Spiegelbildlichkeit heißt Chiralität (siehe Hinweis). Mikroorganismen stellen meist bevorzugt eines von zwei Enantiomeren her – das gilt auch für die Milchsäure. Manche Bakterien erreichen eine besonders hohe Reinheit, sie produzieren enantioselektiv. Aktuelle biochemische Verfahren für die Milchsäureproduktion erreichen eine optische Reinheit von 85 bis 95 Prozent – abhängig vom eingesetzten Zucker.

HINWEIS

Von Chiralität, optischer Aktivität und Enantiomeren

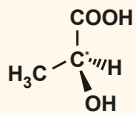
In einem Spiegel betrachtet, sieht eine linke Hand aus wie die rechte Hand; die linke Hand ist also das Spiegelbild der rechten Hand und umgekehrt. Hände und auch einige Moleküle lassen sich nicht mit ihrem Spiegelbild zu Deckung bringen.



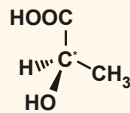
Dieses Phänomen bezeichnet man als Chiralität und die „Spiegelbilder“ als Enantiomere. Chiralität (griech., Händigkeit) tritt in einem Molekül dann auf, wenn es mindestens ein asymmetrisches Kohlenstoffatom mit vier unterschiedlichen Substituenten besitzt. Ein Beispiel für eine chirale Verbindung ist die Milchsäure. Enantiomere haben die Eigenschaft, linear polarisiertes Licht in der Drehachse zu verändern. Damit sind sie optisch aktiv. Das kann mit einem sogenannten Polarimeter gemessen werden. Liegen beide Enantiomere in der gleichen Konzentration vor, so ist die Probe optisch inaktiv und wird Racemat genannt. Enantiomere werden nach der „Cahn-Ingold-Prelog-Konvention“ (CIP-Regeln) benannt.

METHODISCHE ANMERKUNG

(S)-Milchsäure



(R)-Milchsäure



Von der Milchsäure (2-Hydroxypropansäure) existieren zwei Strukturen, die nicht durch Drehen zur Deckung gebracht werden können. Sie ist chiral. Das C*-2-Atom ist asymmetrisch, da es vier unterschiedliche Substituenten besitzt. Das Beispiel Milchsäure eignet sich dank ihres einfachen Aufbaus gut, die Grundlagen der optischen Aktivität, die Fischer-Projektion sowie die Cahn-Ingold-Prelog-Konvention (CIP-Regeln) im Unterricht zu wiederholen (siehe Arbeitsblatt 11, Spiegelbild-Isomere der Milchsäure).

Milchsäure besitzt pro Molekül eine Hydroxy- und eine Carboxylgruppe und ist somit bifunktionell. Über eine intermolekulare Veresterung entsteht Polymilchsäure (siehe Experiment 8).

Glycerin – der C3-Baustein-Lieferant

Glycerin ist ein chemisches Multitalent, das sich in verschiedene C3-Bausteine wandeln lässt und deshalb in vielen Industriezweigen Verwendung findet (Tabelle 5-1). Glycerin kommt außerdem als Edukt für die Herstellung von Polyurethanen und Alkydharzen oder auch als Grundstoff für die Synthese von Epoxidharzen zum Einsatz.

Reines Glycerin – eine schwere Geburt

All diese Einsatzgebiete benötigen hochreines Glycerin. Die großtechnische Verarbeitung natürlicher Fette und Öle liefert jedoch vor allem wässriges Rohglycerin, das sich nicht direkt verwenden lässt und aufwendig aufbereitet werden muss. Zum Beispiel entstehen bei der Biodieselerstellung pro 100 Kilogramm Biodiesel 10 Kilogramm wässriges Rohglycerin als Nebenprodukt. Dessen Glyceringehalt ist mit weniger als 15 Prozent sehr gering.

TABELLE 5-1

Anwendungsbereiche von Glycerin

Industriezweig	Anwendung
Pharmazeutische Industrie	Bestandteil von Salben
Kosmetikindustrie	Bestandteil von Cremes, Zahnpasta
Textilindustrie	Einsatz bei der Appretur – der Fein- und Nachbearbeitung gewebter Stoffe
Automobilindustrie, Maschinenbau	Einsatz als Brems- und Kühlflüssigkeit
Kunststoffverarbeitende Industrie	Einsatz als Weichmacher
Sprengstoffindustrie	Herstellung von Nitroglycerin

Fachleute suchen deshalb intensiv nach neuen Prozessen, mit denen man Rohglycerin zu wertvolleren Produkten, zum Beispiel 1,3-Propandiol, Acrylsäure oder Epichlorhydrin, weiterverarbeiten kann (Abbildung 5-5).

Verfahrenstechniker mit Schwerpunkt Umweltschutz und Nachhaltigkeit haben in einem Pilotprojekt ein Verfahren entwickelt, mit dem die wichtige Chemikalie Epichlorhydrin (Epoxidharze, Papierproduktion, Zweikomponentenkleber, Bestandteil von Autoreifen) aus Rohglycerin gewonnen werden kann. Dazu forschen Mikrobiologen an Verfahren, mit denen ausgewählte Bakterienstämme Rohglycerin zu Zitronensäure oder auch 1,3-Propandiol umsetzen. An der US-Universität Virginia Tech wurde durch Algenfermentation Rohglycerin zu hochwertigen vielfach ungesättigten Omega-3-Fettsäuren umgewandelt.





C3-Bausteine – nicht aus Erdöl?

1,3-Propandiol, 1,2-Propandiol, Acrylsäure und Epichlorhydrin sind die wohl wichtigsten Abkömmlinge des Glycerins. Alle vier C3-Bausteine sind von herausragender wirtschaftlicher Bedeutung:

- 1,3-Propandiol ist ein Grundstoff für Polyester, die in der Textil- und der Teppichindustrie eingesetzt werden.
- 1,2-Propandiol ist mischbar mit Wasser und vielen organischen Lösemitteln, was es technisch sehr interessant macht.
- Acrylsäure und ihre Ester sind wichtige Monomerbausteine zur Herstellung von unterschiedlichen Polymeren. Ohne Acrylsäure säßen Säuglinge zum Beispiel nicht im Trockenen. Polyacrylsäure kann nämlich das Tausendfache ihres Eigengewichts an Wasser aufnehmen. Aufgrund dieser Eigenschaft wird sie als Füllstoff für Babywindeln und Hygieneartikel verwendet, sie ist ein sogenannter Superabsorber.

Acrylpolymere werden aber auch für die Herstellung von Anstrichen („Acryllacke“), Klebstoffen sowie in der Papier- und Textilveredelung eingesetzt.

- Epichlorhydrin ist für die Produktion von Epoxidharzen unverzichtbar. Diese Harze sind das Bindemittel für faserverstärkte Kunststoffteile, wie sie zum Beispiel im Fahrzeug-, Schiffs- und Flugzeugbau verwendet werden.

HINWEIS

Ein Kunststoff auf Erfolgskurs: 1,3-Propandiol in der Polyesterherstellung

Mit Polytrimethylenterephthalat (PTT) ist ein hochwertiger Polyester auf dem Markt, der nicht auf Ethandiol, sondern auf 1,3-Propandiol basiert. PTT weist im Vergleich zu herkömmlichem aus Terephthalsäure und Ethandiol (Glycol) hergestelltem Polyethylenterephthalat (PET) bessere Verarbeitungs- und Anwendungseigenschaften auf und findet als Teppich- und Textilfaser breite Verwendung.

ABBILDUNG 5-5

Aus Glycerin gewonnene C3-Synthesebausteine

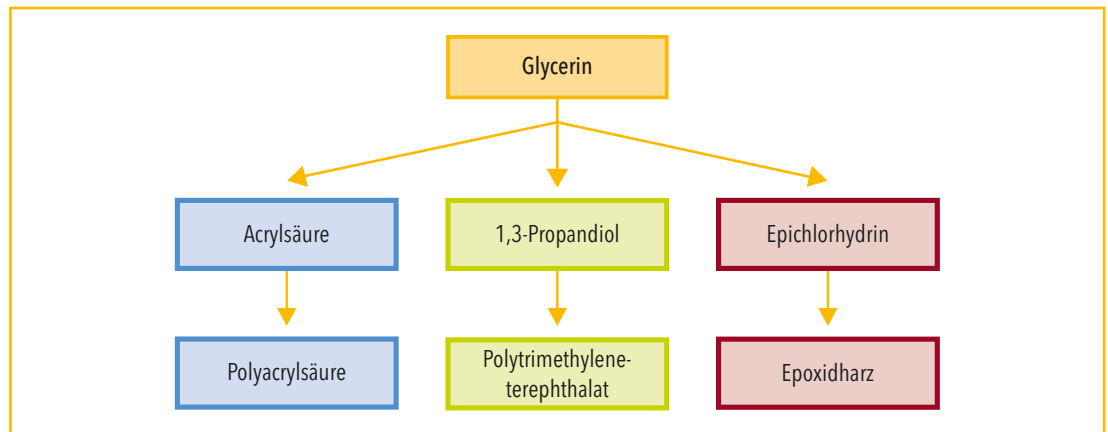
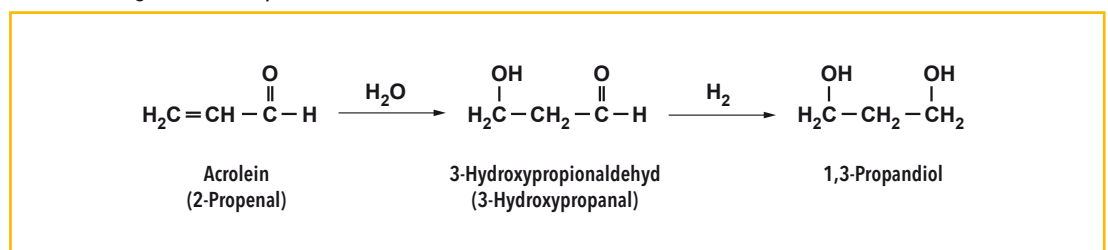


ABBILDUNG 5-6

Herstellung von 1,3-Propandiol aus Acrolein





Herstellung von 1,3-Propandiol auf Basis nachwachsender Rohstoffe

Alternativ lässt sich 1,3-Propandiol (PDO) biotechnologisch aus Glycerin durch sogenannte Biokonversion herstellen. Das Verfahren beruht darauf, Rohglycerin mit Hilfe von Mikroorganismen zu 1,3-Propandiol umzuwandeln. Ein Vorteil der Biokonversion ist, dass auch preisgünstiges Rohglycerin genutzt werden kann. Mittlerweile wurde die Herstellung von biobasiertem 1,3-Propandiol durch fermentative Prozesse sowohl auf Basis von Rohglycerin als auch auf Basis von Zuckern kommerzialisiert. Ein US-Unternehmen produziert jährlich um die 65.000 Tonnen Bio-PDO aus Glucose, die aus Maisstärke gewonnen wird.

Bisher werden die genannten C3-Chemikalien größtenteils noch auf petrochemischer Basis hergestellt. Wie sie sich auf der Basis von Glycerin oder – im Falle des 1,2-Propandiols aus Milchsäure oder Zucker synthetisieren lassen, wird im Folgenden erläutert.

Synthese von 1,3-Propandiol und 1,2-Propandiol

Die kommerzielle chemische Herstellung von 1,3-Propandiol erfolgt derzeit über zwei Verfahren:

1. Beim ersten Verfahren gewinnt man 1,3-Propandiol durch Carbonylierung von Ethylenoxid.
2. Im zweiten Verfahren entsteht durch Anlagerung von Wasser an Acrolein als Zwischenprodukt 3-Hydroxypropionaldehyd. Dieser wird hydriert, wobei als Nebenprodukt 1,2-Propandiol entsteht (Abbildung 5-6).

Forscher arbeiten außerdem an einem weiteren Verfahren zur Herstellung von 1,2-Propandiol, das von wässrigem Rohglycerin ausgeht. Dabei handelt es sich um eine Hochdrucksynthese bei 250 bar und 300 bis 350 °C, bei der durch Dehydroxylierung 1,2-Propandiol in lohnender Menge entsteht.

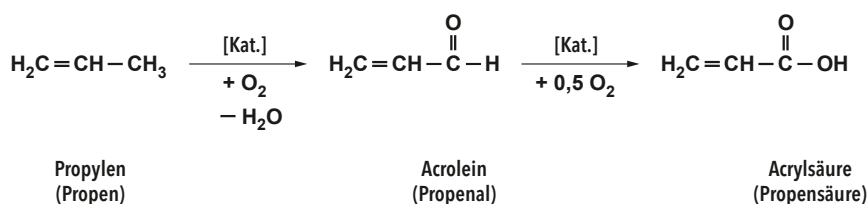
Seit einigen Jahren wird biobasiertes 1,3-Propandiol als Bio-PDO und bald auch 1,4-Butandiol als Bio-BDO aus nachwachsenden Rohstoffen wie Maisstärke vermarktet. Wie 1,3-Propandiol kann auch 1,2-Propandiol biotechnologisch hergestellt werden. Hierbei unterscheidet man zwei verschiedene Synthesewege:

- ◻ Gärung von Zuckern zu Milchsäure und anschließende Hydrierung.
- ◻ Direkte Fermentation von Zuckern.

Die biologische Route hat den Vorteil, reine Enantiomere des 1,2-Propandiols zu produzieren, was bei der derzeit genutzten industriellen Synthese durch Wasseranlagerung an Propylenoxid nicht möglich ist.

◻ ABBILDUNG 5-7

Industrielle Herstellung von Acrylsäure



HINWEIS

Für Kunststoff und Kosmetika: 1,2-Propandiol

1,2-Propandiol wird vor allem bei der Herstellung von Alkyd- und Polyesterharzen und als Weichmacher für Vinylharze verwendet. Außerdem wird es als Starter zur Herstellung von Polyurethanen und als Vernetzer für Polymere genutzt. In der Nahrungsmittelindustrie dient es als Konservierungsmittel sowie als Lösemittel für Gelatine, Farbstoffe und Aromen, als Emulgator und als Feuchthaltemittel für Tabak. In Kosmetika wird es als Trägersubstanz in verschiedenen Salben und Cremes eingesetzt. Durch Veresterung und/oder Veretherung einer oder beider Hydroxy-Gruppen lassen sich aus 1,2-Propandiol Lösemittel, Weichmacher, Verdickungsmittel oder Emulgatoren gewinnen. Mit Propylenoxid entstehen Di-, Tri- und höhere Propylenglycole. Die Polyaddition liefert Polypropylenglycole.

Acrolein und Acrylsäure aus Rohglycerin

Das heute dominierende Syntheseverfahren für Acrylsäure ist die katalytische Oxidation von Propen (Abbildung 5-7). Da Acrylsäure ein bedeutendes Zwischenprodukt für die chemische Industrie darstellt, ist es von Interesse, sie auch auf der Basis nachwachsender Rohstoffe herstellen zu können.

Als Ausgangsstoff bietet sich Glycerin an, das zunächst durch Erhitzen auf 250 bis 350 °C in Gegenwart dehydratisierender Katalysatoren zu Acrolein umgesetzt wird. Dieses lässt sich in einem weiteren Schritt zu Acrylsäure oxidieren (Abbildung 5-8).

ABBILDUNG 5-8

Darstellung von Acrylsäure aus Glycerin

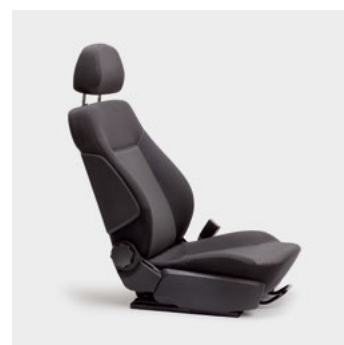
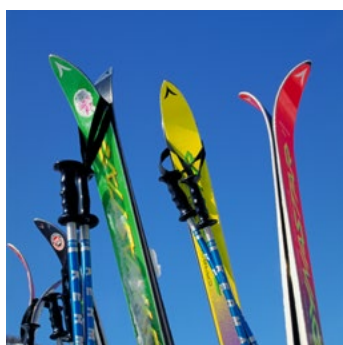
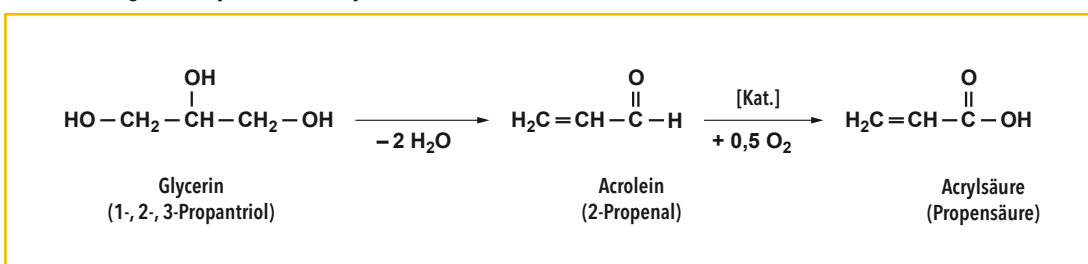
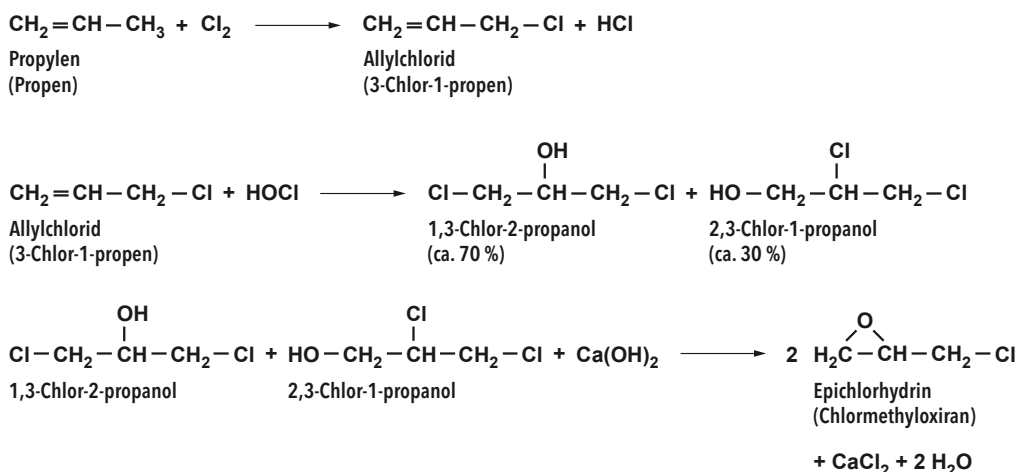


ABBILDUNG 5-9

Klassische Synthese von Epichlorhydrin aus Propen



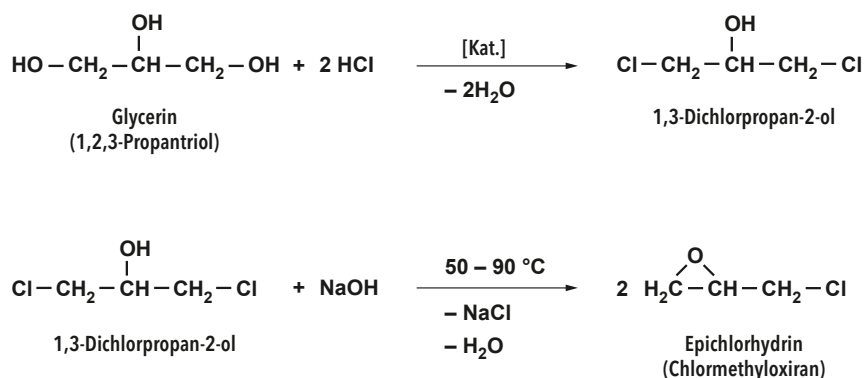
Glycerinbasierte Synthese von Epichlorhydrin

Der klassische Prozess zur Gewinnung von Epichlorhydrin basiert auf Propylen, welches mit Chlor zu 1-Chlorpropen (Allylchlorid) reagiert. Dieses wird dann mit Hypochlorit zu einem Gemisch der zwei isomeren Dichlorhydroxypropane umgesetzt. Das Rohprodukt wird anschließend mit Calciumhydroxid in Epichlorhydrin überführt (Abbildung 5-9). Nachteilig ist, dass viele Nebenprodukte entstehen und der Einsatz von Chlor hoch ist. Mittlerweile gibt es

neue Verfahren, mit denen wässriges Rohglycerin direkt weiter zu Epichlorhydrin verarbeitet werden kann. Hierbei wird das Glycerin mit Salzsäure zu den entsprechenden Chlorhydrinen (Chlorglycerinen) und anschließend über die klassische Alkalibehandlung zu Epichlorhydrin umgesetzt (Abbildung 5-10). Bei diesem Prozess gibt es wenig Nebenprodukte. Zudem ist auch der Wasserverbrauch geringer, als bei der Synthese auf Propenbasis und der Einsatz von Chlor entfällt.

ABBILDUNG 5-10

Synthese von Epichlorhydrin aus Glycerin



5.4 C4-Synthesebausteine

Bernsteinsäure

Wollte man Bernsteinsäure heute noch so herstellen wie ihr Entdecker Georgius Agricola vor fast 500 Jahren, wäre das eine teure Angelegenheit. Er erzeugte sie durch Erhitzen echter Bernsteine. Bernsteinsäure kommt aber auch in Früchten, Algen und Pilzen vor. Aus ihr lassen sich biologisch abbaubare Polyester für den Massenmarkt wie etwa kompostierbare Müllbeutel, aber auch teure Spezialchemikalien und umweltfreundliche Lösemittel gewinnen, die in den Bereichen Polymere, Lebensmittel, Pharmazeutika und Kosmetika eingesetzt werden. In der Lebensmittel- und Getränkeherstellung wird Bernsteinsäure als Säuerungsmittel, Geschmacksstoff und Konservierungsmittel verwendet.

Die Salze und Ester der Bernsteinsäure heißen Succinate. Mit der Bernsteinsäure steht der chemischen Industrie ein vielseitig einsetzbarer C4-Synthesebaustein zur Verfügung, aus dem viele andere Verbindungen zugänglich sind (Abbildung 5-11).

Die Pyrrolidone sowie Tetrahydrofuran werden bereits großtechnisch als Lösemittel eingesetzt. Butandiol dient

als Vernetzer und Lösemittel bei Polymerisationsreaktionen. Diaminobutan spielt in der Polyamidsynthese eine immer wichtigere Rolle.

Chemisch oder biotechnologisch?

Großtechnisch wurde Bernsteinsäure bisher noch ausschließlich auf erdölbasiertem Weg, zum Beispiel durch Hydrierung von Maleinsäure oder Maleinsäureanhydrid oder durch Oxidation von 1,4-Butandiol, hergestellt.

Doch bereits heute lässt sich sehr reine Bernsteinsäure auch biotechnologisch durch Fermentation gewinnen. So können verschiedene Mikroorganismen Bernsteinsäure aus Kohlenhydraten oder Proteinen synthetisieren – allerdings nur in kleinen Mengen. Um künftig mit den etablierten petrochemischen Synthesen mithalten zu können, muss die Ausbeute der Fermentation erhöht und die Bildung von Nebenprodukten wie Milchsäure und Ethanol verringert werden. Trotz der Hindernisse wächst das Interesse daran, die Grundchemikalie Bernsteinsäure biotechnologisch zu produzieren (Abbildung 5-12). 2013 wurde in Leuna in Sachsen-Anhalt eine Pilotanlage zur großtechnischen Herstellung von Bernsteinsäure eröffnet.

ABBILDUNG 5-11

Folgeprodukte auf Bernsteinsäure-Basis

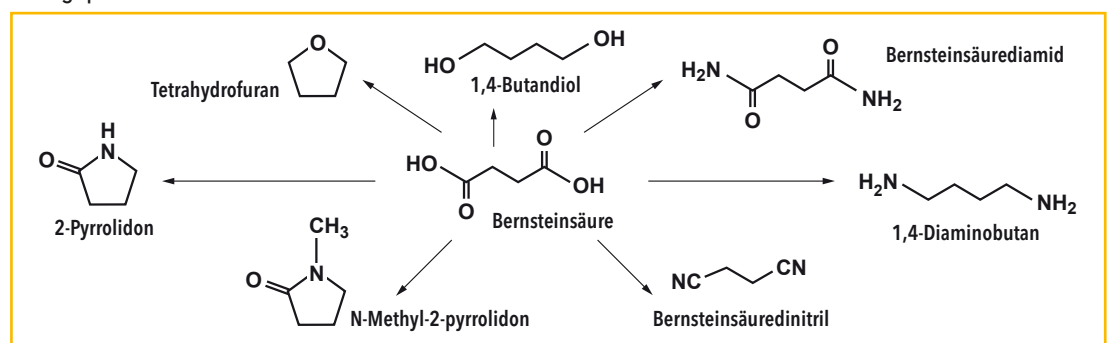
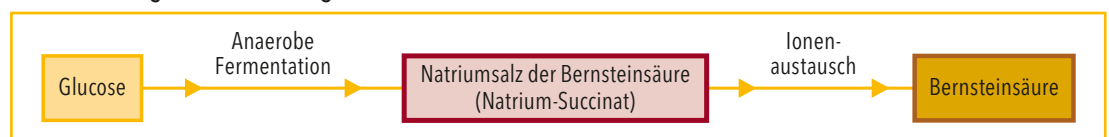


ABBILDUNG 5-12

Biotechnologische Herstellung von Bernsteinsäure



5.5 C5-Synthesebausteine

C5-Bausteine aus nachwachsenden Rohstoffen spielten lange Zeit aufgrund aufwendiger Verfahrenstechnik, geringen Materialausbeuten und der eingeschränkten Verfügbarkeit und schwierigen Handhabung der geeigneten Rohstoffe eine untergeordnete Rolle. Eine Ausnahme bildet hier das Furfural (Abbildung 5-14). Diese Verbindung leitet sich vom Furan, einem heterocyclischen aromatischen Fünfring mit einem Sauerstoff im Ring ab. Es kann zum Beispiel in Kondensationsreaktionen mit Formaldehyd, Phenol, Aceton oder Harnstoff zu Harzen umgesetzt werden.

Insbesondere im Hinblick auf das keineswegs zu unterschätzende Potenzial des C5-Bausteins Furan für die Herstellung von Polyethylenfuranoat deutet sich eine immense Zunahme der Bedeutung organischer C5-Verbindungen an. Durch die Erforschung neuer Methoden der Rohstoffaufbereitung für die Gewinnung von C5-Zuckern, beispielsweise aus lignocellulosischen Rohstoffen, gilt dies auch für andere C5-Bausteine. So arbeiten Forscher in Leuna an einer Pilotanlage, in der durch Aufschluss und Fraktionierung aus Holz, Rinde und weiteren Reststoffen (Lignin, Cellulose und Hemicellulose) sogenannte C5-/C6-Zucker gewonnen werden, aus denen später Säuren und Alkohole entstehen. Am Ende des Prozesses stehen Basischemikalien für Aromaten, Phenolharze und Polyurethane.

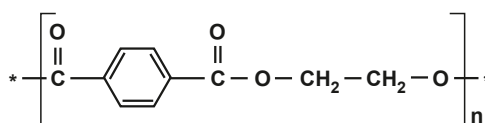
5.6 Spitzenplatz für C6-Synthesebausteine

„Unkaputtbar“ – damit warb die Getränkeindustrie Anfang der 1990er Jahre für die neuen Getränkeflaschen aus Kunststoff. Nicht zuletzt wegen des griffigen Schlagwortes wurden Flaschen aus Polyethylenterephthalat, sogenanntem PET (Abbildung 5-13), zum Erfolg. Sie sind leicht und – verglichen mit der Glasflasche – tatsächlich nahezu „unkaputtbar“. PET ist ein Polyester aus Terephthalsäure und Ethylenglycol und ein ausgesprochen vielseitiger Kunststoff, aus dem sich auch schnell trocknende Sportkleidung oder atmungsaktive Lebensmittelverpackungen herstellen lassen. Bislang wird PET aus fossilen Rohstoffen gewonnen. Doch es gibt eine Alternative auf der Basis nachwachsender Rohstoffe.



ABBILDUNG 5-13

Polyethylenterephthalat (PET)

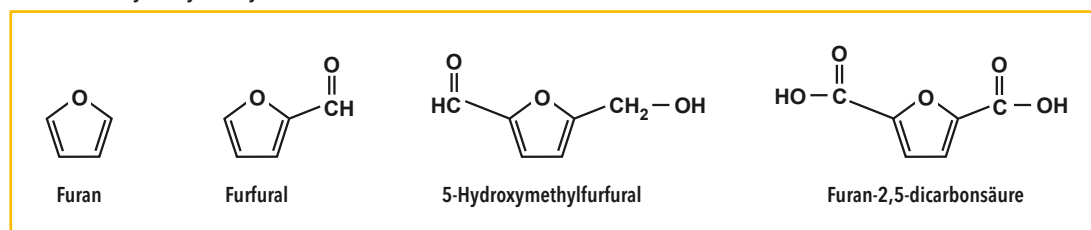


Polyester auf der Basis von Furandicarbonsäure

Durch Dehydratisierung von Hexosen (Zuckern mit einem C6-Gerüst) lässt sich 5-Hydroxymethylfurfural gewinnen. Es besitzt mit der Hydroxy- und der Aldehydgruppe zwei funktionelle Gruppen mit unterschiedlicher Reaktivität. Durch Oxidation des 5-Hydroxymethylfurals erhält man beispielsweise die Furan-2,5-dicarbonsäure (Abbildung 5-14).

ABBILDUNG 5-14

Furan, 5-Hydroxymethylfurfural und Furan-2,5-dicarbonsäure



Vergleicht man die Strukturen der Furan-2,5-dicarbonsäure und der im PET enthaltenen Terephthalsäure, werden entscheidende Ähnlichkeiten deutlich (Abbildung 5-15). Beide sind aromatische Dicarbonsäuren. Sie besitzen auch vergleichbare physikalische Eigenschaften, zum Beispiel ähnliche Schmelzpunkte. Um zu prüfen, ob die Furan-2,5-dicarbonsäure die Terephthalsäure ersetzen kann, muss man unterschiedliche aus Furan-2,5-dicarbonsäure hergestellte Polymere mit auf petrochemischer Basis erzeugten Polymeren vergleichen. Abbildung 5-16 führt einige dieser interessanten aus Furan-2,5-dicarbonsäure hergestellten Verbindungen auf.

Das aus Furan-2,5-dicarbonsäure und Ethylenglycol bestehende Polymer (Polyethylenfuranolat Abbildung 5-16) besitzt einen Schmelzpunkt von 205 bis 210 °C. Dieser liegt zwar etwas niedriger als der von PET, befindet sich aber immer noch in einem für viele Anwendungen interessanten Bereich. Fachleute gehen deshalb davon aus, dass sich Polyethylenfuranolat aufgrund seiner Eigenschaft, ähnlich wie PET Fasern zu bilden, durchaus für vergleichbare Anwendungsbereiche wie die Herstellung von Flaschen, Folien und Kunstfasern für Textilien eignet.

Mit 25 Millionen Euro fördert seit 2017 die EU, gemeinsam mit elf Industrieunternehmen der biobasierten Industrie, den Bau einer 50.000-Tonnen-Referenzanlage zur Gewinnung von biobasierten Rohstoffen, Chemikalien und Materialien auf Basis von Polyethylenfuranolat (PEF).

Nach Einschätzung der Beteiligten werden die auf erneuerbaren Rohstoffen basierenden Produkte aus PEF erheblich dazu beitragen, Verpackungsmaterialien aus fossilen Ressourcen zu ersetzen und Treibhausgasemissionen zu senken.

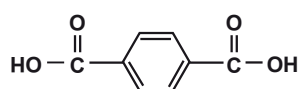
In den Niederlanden befindet sich seit 2011 eine Pilotanlage zur Herstellung von Furan-2,5-dicarbonsäure (FDCA). Am Chemiestandort Antwerpen ist eine Produktionsanlage mit einer Kapazität von 50.000 Tonnen pro Jahr geplant, die voraussichtlich 2022 in Betrieb geht. In den USA gibt es weitere Unternehmen, die FDCA herstellen und an der Kommerzialisierung dieses Bausteins für die Produktion von Polyethylenfuranolat (PEF) arbeiten. Ein großer Getränkehersteller unterstützt die Entwicklung des neuen Materials für den Einsatz bei Getränkeflaschen mit dem Ziel, weltweit seine Flaschenproduktion und alle weiteren Kunststoffverpackungen darauf umzustellen.

Die Reaktion von Furan-2,5-dicarbonsäure mit einem aromatischen Diamin führt zu Polyamiden. Die zum Beispiel mit p-Phenylendiamin zugänglichen Polyamide haben sehr hohe Schmelzpunkte sowie eine hohe Stabilität. Somit könnten sie durchaus eine Alternative zu auf Terephthalsäure basierenden analogen Kunststoffen wie Kevlar sein, deren besondere Eigenschaften sich in der Anwendung in schusssicheren Westen oder Hochleistungsseilen widerspiegeln.

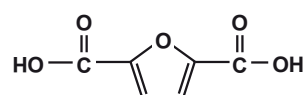


ABBILDUNG 5-15

Struktur der Terephthalsäure und der Furan-2,5-dicarbonsäure

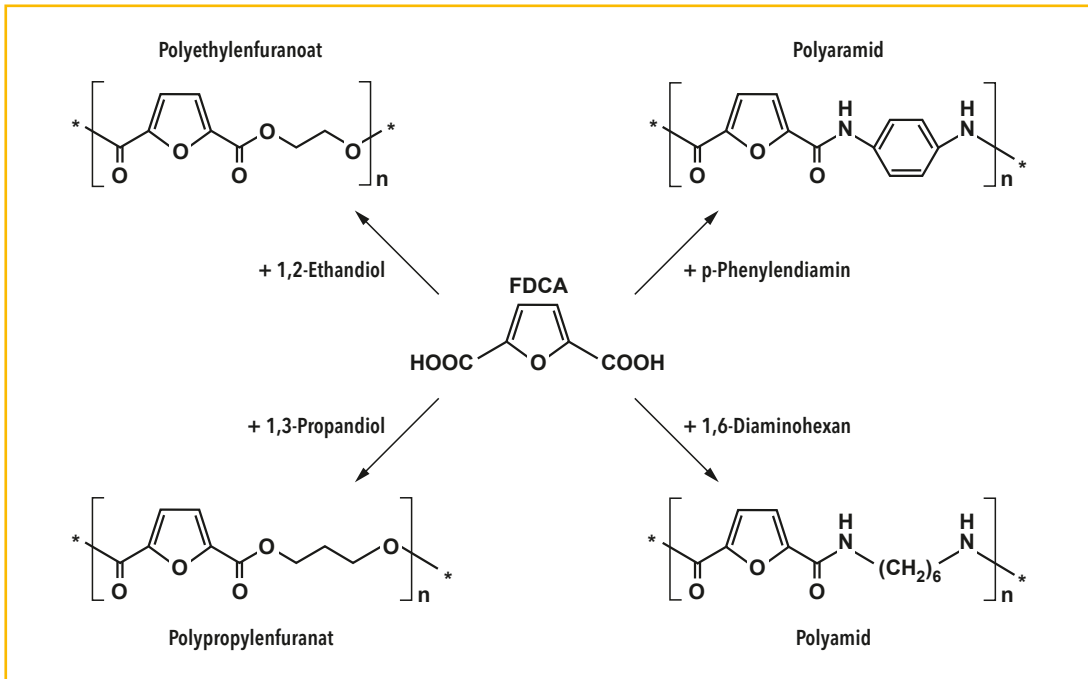


Terephthalsäure



Furan-2,5-dicarbonsäure

Polymere auf Basis von Furan-2,5-dicarbonsäure (FDCA)

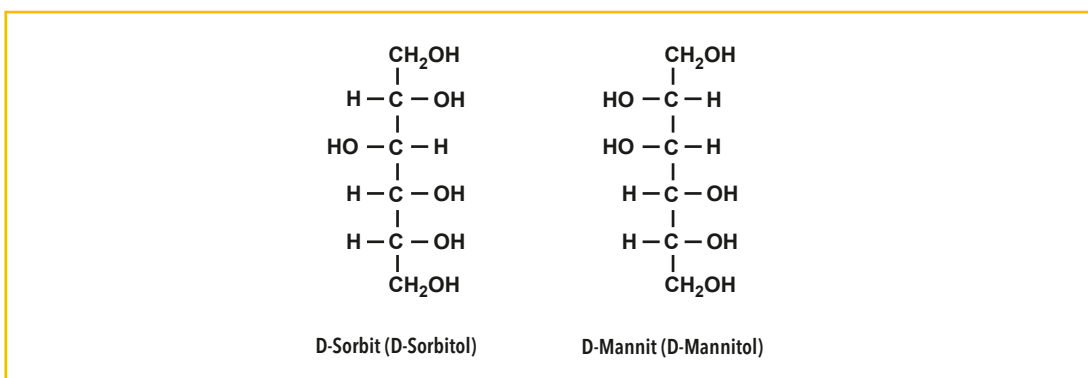


Das große Potenzial des C₆-Bausteins Furan-2,5-dicarbonsäure hat übrigens auch das amerikanische Energieministerium erkannt. Im Jahre 2004 veröffentlichte es einen Bericht, der sich mit der Auswahl interessanter Verbindungen auf Basis nachwachsender Rohstoffe befasst. Eine der vielversprechendsten Chemikalien ist die Furan-2,5-dicarbonsäure: Sie landete auf Listenplatz 12 der wichtigsten aus nachwachsenden Rohstoffen synthetisierbaren Verbindungen.

Vom Zuckersatz zum Plastikrohstoff

Sorbit und Mannit werden häufig als Zuckeraustauschstoffe eingesetzt und begegnen uns so tagtäglich – in Lebensmitteln oder Zahnpasta zum Beispiel. Wer einen Blick auf die Etiketten und Inhaltsstoffe von sogenannten Light-Lebensmitteln wirft, wird erstaunt sein, wie oft die beiden Stoffe mit im Spiel sind. Sorbit und Mannit (Abbildung 5-17) gehören zu den Hexitolen, 6-wertigen Zuckeralkoholen.

Strukturformel von Sorbit und Mannit





HINWEIS

Sorbit und Mannit

Sorbit kommt in der Natur in größeren Mengen vor, zum Beispiel in den Früchten der Eberesche und des Weißdorns. Ferner ist es in Kern- und Steinobst enthalten. Andere Früchte, etwa Ananas und Banane, enthalten kein Sorbit. Dadurch kann es als Indikator eingesetzt werden, um nachzuweisen, ob Beerensäfte mit Säften anderer Früchte verfälscht wurden.

Bakterien der Mundflora greifen Sorbit fast gar nicht an, wodurch kaum kariesfördernde Polysaccharide und Säure gebildet werden. Daher findet Sorbit eine breite Anwendung im Bereich der Zuckeraustauschstoffe – unter anderem auch in kalorienreduzierten Lebensmitteln und in Lebensmitteln für Diabetiker. Sorbit ist ein wichtiger Ausgangsstoff für die Produktion von L-Ascorbinsäure (Vitamin C). Es wird für die Stabilisierung von Vitaminen, Enzymen, von kosmetischen und pharmazeutischen Präparaten und für die Synthese von Polyethern, Tensiden oder Lacken genutzt.

Mannit ist Bestandteil vieler Pflanzen. Im Manna, dem erstarrten Saft der Manna-Esche, stellt es den Hauptbestandteil dar. In Algen, Pilzen und Flechten wird es als Reservestoff gespeichert. Anwendung findet Mannit als Zuckeraustauschstoff und als Feuchthaltemittel in kosmetischen Produkten (zum Beispiel Zahnpasta). In Anwendungen außerhalb der Lebensmittel- und Kosmetikindustrie dient Mannit zur Produktion synthetischer Harze sowie als Schmiermittel und Stabilisator.

Vom Zucker zum Zuckeraustauschstoff

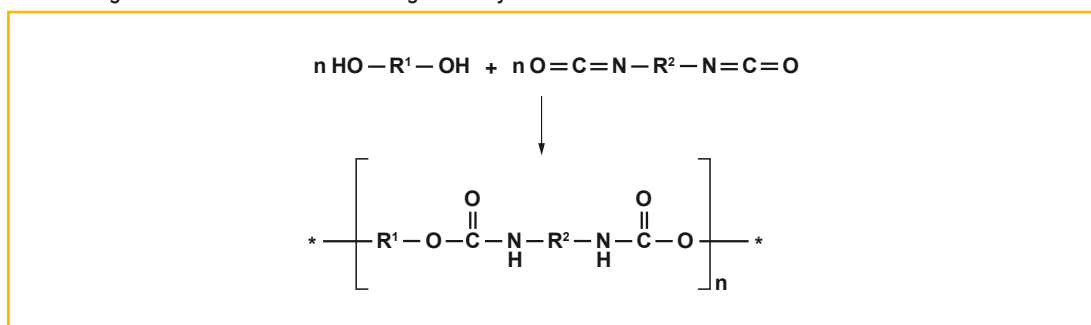
Der Großteil des Sorbits wird heutzutage noch auf chemischem Weg, durch katalytische Hydrierung von D-Glucose, erzeugt. Allerdings ist bei diesem Verfahren eine aufwendige Reinigung zur Abtrennung des Katalysators nötig. In einem Forschungsprojekt wurde deshalb ein neuer Prozess zur Synthese von Zuckeralkoholen entwickelt, der kontinuierlich arbeitet. Eine Reinigung nach Abschluss der chemischen Reaktion ist nicht mehr nötig. Das neue Verfahren wandelt Glucose in nur fünf Minuten sehr ergiebig in Sorbit um.

Mannit wird, analog zu Sorbit, durch Hydrierung des Fructose-Anteils von Invertzucker hergestellt. Da Invertzucker neben der Fructose noch geringe Glucose-Anteile enthält, fällt Mannit großtechnisch immer im Gemisch mit Sorbit an.

Mannit und Sorbit eignen sich direkt oder nach chemischer Modifikation als Polyole für die Herstellung von Polyurethan. Diese werden allgemein durch eine Polyaddition von (Poly)Isocyanaten mit (Poly)Alkoholen hergestellt (Abbildung 5-18). Je nach eingesetzten Ausgangsverbindungen und Reaktionsbedingungen erhält man elastische oder harte Schäume für zum Beispiel Isolationen oder Polsterungen oder weiche bis harte Thermoplaste für Schuhsohlen, Skistiefel und viele weitere Produkte.

ABBILDUNG 5-18

Grundlegende Reaktion zur Herstellung von Polyurethanen



METHODISCHE ANMERKUNG

Im Chemieunterricht hat die Oxidation von primären und sekundären Alkoholen zu Aldehyden beziehungsweise Ketonen einen festen Platz. Da es sich bei Glucose um einen Aldehyd und bei der Fructose um ein Keton handelt, müssen diese Stoffe entsprechend reduziert werden, um zu den Zuckeralkoholen zu gelangen. Am Beispiel der Zuckeralkohole Sorbit und Mannit lässt sich zeigen, dass Aldosen und Ketosen durch die gleichen Reduktionsmittel reduziert werden, die auch Aldehyde und Ketone zu Alkoholen reagieren lassen. D-Glucose (Aldohexose) kann zu Sorbit reduziert werden. Bei der Reduktion von D-Fructose (Ketohehexose) bilden sich zwei optisch aktive Produkte ([D-Sorbit](#), [D-Mannit](#), siehe Arbeitsblatt 12).

Auf Basis von Sorbit und Citronensäure beziehungsweise Sorbit und Phthalsäureanhydrid kann im Reagenzglas ein Polyester hergestellt werden (siehe Experiment 5).

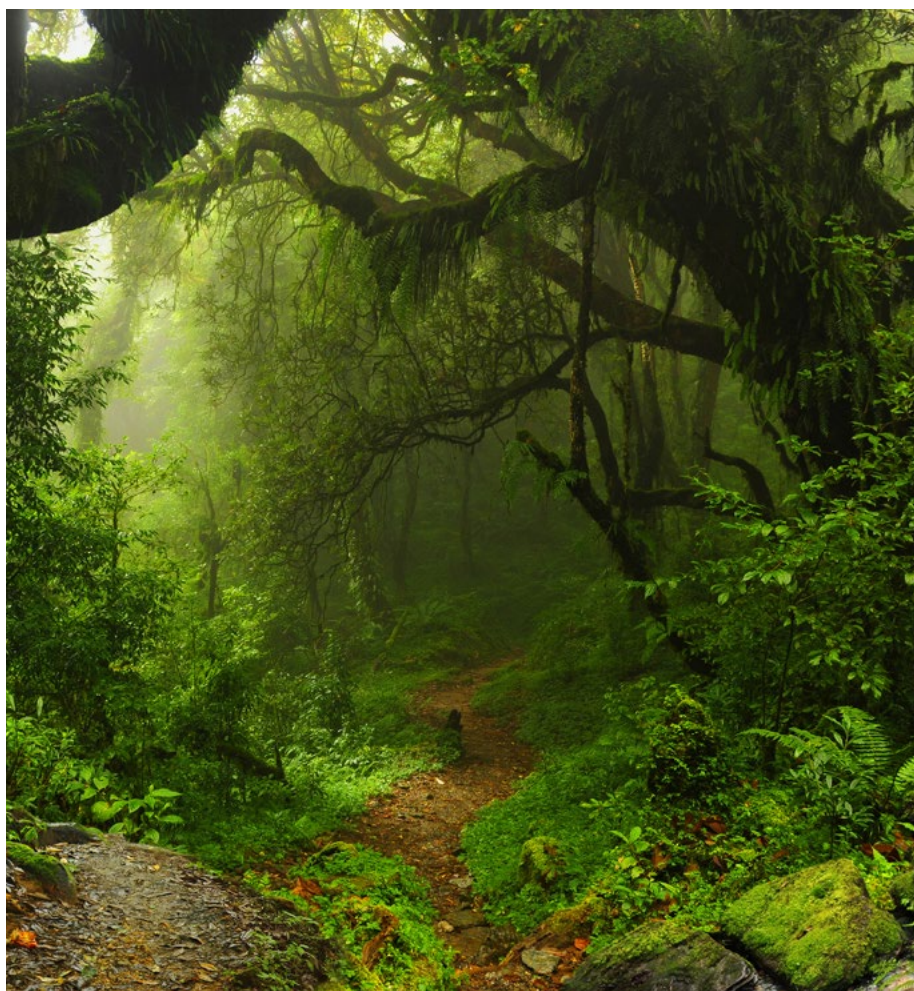
Glucose, Saccharose und Sorbit lassen sich als Polyole mit Polyisocyanaten zu einem Polyurethan umsetzen (siehe Experiment 6).

Hier steht die Frage im Vordergrund, wie man aus Lignin dennoch möglichst vielseitig verwendbare Synthesebausteine gewinnen kann.

Chemisch interessant ist Lignin vor allem weil es ein aus phenolischen Bausteinen aufgebautes aromatisches Polymer ist, also eine Phenolquelle aus nachwachsenden Rohstoffen darstellt. Ziel ist es, Phenolderivate, die sich direkt durch den Abbau von Lignin gewinnen lassen, für die Produktion von Kunststoffen, Harzen, Klebstoffen und anderen Produkten einzusetzen.

5.7 Synthesebausteine aus dem Wald: Die andere Seite des Lignins

Klebstoff, Bremsbeläge und Anstrichfarben – aus Ligninbausteinen könnte man theoretisch eine Menge machen. Aber die Aufbereitung des Lignins ist wegen seiner komplexen Struktur knifflig – sowohl die Gewinnung von Monomerbausteinen durch chemisch-technische Prozesse wie Pyrolyse oder chemisch-katalytische Spaltung als auch deren Erzeugung durch biotechnologische Prozesse (Abbau durch Pilze, Bakterien, Enzyme).



Die Kunst der Aufbereitung

Bei der Spaltung von Lignin, zum Beispiel durch Pyrolyse oder durch Erhitzen wässriger Lignin-Suspensionen in Gegenwart von Katalysatoren, erhält man ein öliges Gemisch aus vielen verschiedenen phenolischen Verbindungen. Eine Auftrennung dieses Öls in einzelne Substanzen erscheint nach dem heutigen Stand der Technik nicht sinnvoll, da sie aufwendig und teuer wäre. Die Abbildungen 5-19 und 5-20 geben einen kleinen Ausschnitt der vielen bei der Spaltung von Lignin entstehenden Verbindungen wieder.

Das Öl mit seiner Vielzahl von Spaltprodukten ist viskos und gelblich braun. Es riecht typischerweise nach Holzrauch (Räuchern). Die nach dem heutigen Stand der Technik erzielbaren Ölausbeuten betragen bis zu 75 Prozent der Trockensubstanz des eingesetzten Holzes. Bei Verwendung von Einsatzstoffen wie Stroh wird die Ölausbeute durch den katalytischen Effekt der vorhandenen Aschebestandteile vermindert. Der Großteil des Lignins wandelt sich in flüchtige Carbonsäuren (Ameisensäure, Essigsäure), Alkohole (Methanol, Ethanol), Gase (Kohlendioxid, Alkane, Alkene) und kohleartige Feststoffe um.

ABBILDUNG 5-19

Ausgewählte monomere Produkte aus der Lignin-Spaltung

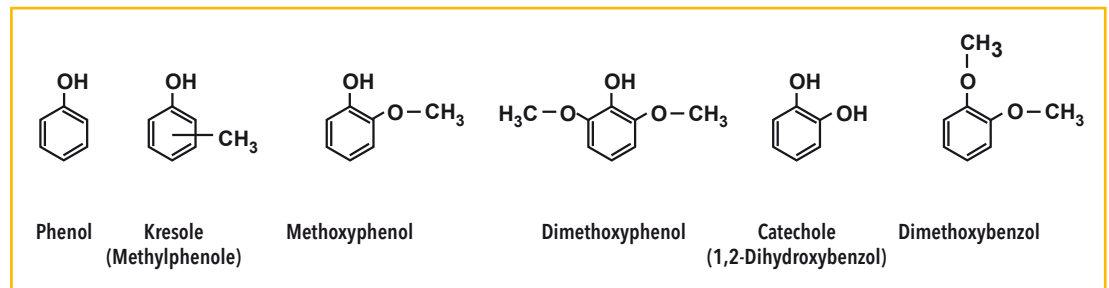


ABBILDUNG 5-20

Polyole auf Basis von Lignin zur Herstellung von Polyurethanen

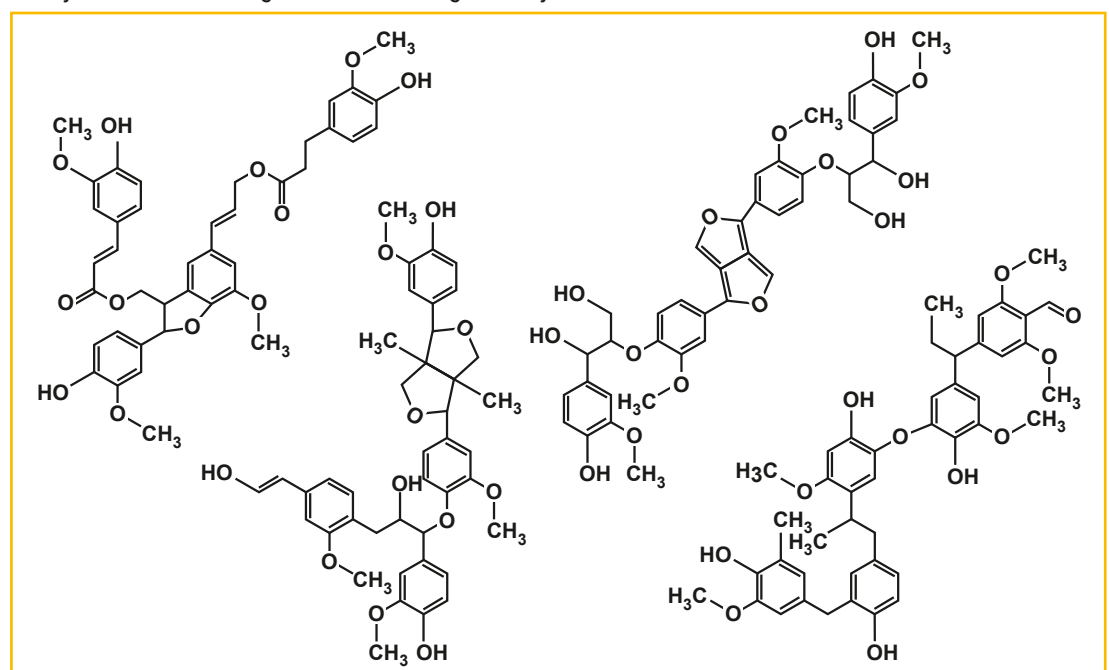
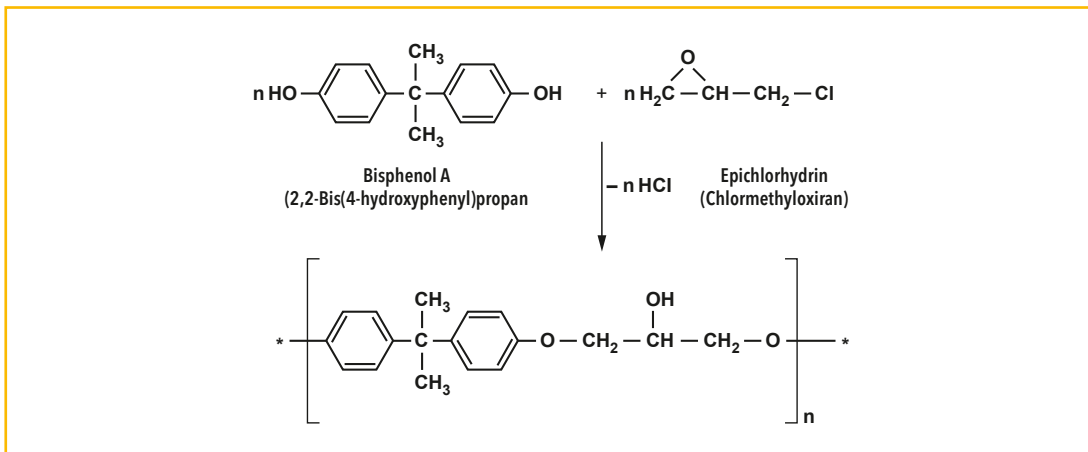


ABBILDUNG 5-21

Bildung eines Epoxidharzes (schematisch)



Immerhin ist es inzwischen möglich, die Reaktion so zu steuern, dass vor allem Ölbestandteile entstehen – insbesondere o-Hydroxyphenyl-Derivate. Voraussetzung dafür ist allerdings der Einsatz von schwefelfreiem Lignin, das man zum Beispiel durch Organosolvprozesse (Aufschluss des Holzes mit Ethanol/Wasser) gewinnen kann. Der hoch funktionalisierte und aromatische Charakter von Lignin bietet das Potenzial für die direkte Herstellung von Spezial- und Feinchemikalien auf Aromatenbasis.

Forscher arbeiten daran, Lignin-Spaltprodukte verstärkt als Grundstoff zum Beispiel für die Herstellung von Spezialprodukten (Kleber, Anstrichfarben, Bremsbeläge, Schleifscheiben, duroplastische Werkstoffe, Schäume) einsetzen zu können. Das Ziel ist auch hier, erdölbasierte Komponenten teilweise oder vollständig zu ersetzen. Dies soll am Beispiel der Epoxidharze näher dargestellt werden.

Neue Epoxidharze

Epoxidharze werden heute vor allem aus Erdöl hergestellt. Der bedeutendste Syntheseweg ist die Umsetzung von Bisphenol A mit Epichlorhydrin (Abbildung 5-21). Breite Anwendung finden Epoxidharze als hoch belastbare Zweikomponentenklebstoff und in Beschichtungssystemen. Epoxidharze sind ein wichtiger Bestandteil von faserverstärkten Bauteilen etwa bei Kunststoffbooten oder Leichtbaukomponenten. Biobasiertes Epichlorhydrin kann durch Konversion von Glycerin hergestellt werden, ein

Nebenprodukt der Biodieselherstellung. Das Glycerin wird dabei mit Salzsäure umgesetzt. Es werden keine weiteren Lösemittel benötigt, das Verfahren wird generell als sehr saubere Technologie beschrieben. Das biobasierte Epichlorhydrin kann als Baustein für (teilweise) biobasierte Epoxidharze genutzt werden.

Wie Forscher gezeigt haben, lassen sich auch bestimmte Spaltprodukte des Lignins zu Harzen umsetzen, die den Epoxidharzen ähneln – sogenannte „erweiterte“ Harze (advanced resins). Voraussetzung dafür ist, dass die Lignin-Spaltprodukte im Mittel mehr als eine aromatisch gebundene Hydroxy-Gruppe pro Molekül besitzen und damit eine dem Bisphenol A vergleichbare Reaktion eingehen können. So ist es beispielsweise möglich, ein niedermolekulares Epoxidharz, wie es in Abbildung 5-21 dargestellt ist (n = 1), mit solchen Lignin-Spaltprodukten reagieren zu lassen und damit neue Makromoleküle herzustellen. Welche Eigenschaften derartige aus Lignin erschaffene polymere Werkstoffe haben können, wird weiter intensiv erforscht. Erste Ergebnisse sind vielversprechend. Und es ist davon auszugehen, dass sich der Rohstoff aus dem Wald schon bald in vielen unserer Produkte finden wird – in Lacken und Oberflächenversiegelungen, Klebstoffen, Bauteilen wie Fensterrahmen, Armaturen und Verkleidungen, in Wärme- und Feuchtigkeitsisolierungen sowie in Präzisionsgehäusen und Fassungen.



- Bader H.J., Nick S., Melle I., *Nachwachsende Rohstoffe - Die Natur als chemische Fabrik*, Schroedel Verlag, Hannover 2001
- Behr A., Seidensticker T., *Einführung in die Chemie nachwachsender Rohstoffe*, Springer Verlag, Berlin, 2018
- Bertau M., Ulber R., *Bioraffinerien*, Chem. Ing. Tech. 2020, Vol.92 (11), 1637-1958, 2020
- BMBF/BMEL, *Bioökonomie in Deutschland - Chancen für eine biobasierte und nachhaltige Zukunft*, Berlin, 2014
- Bundesministerium für Bildung und Forschung, *Schub durch Doppel-Null-Raps*
<http://www.pflanzenforschung.de/biosicherheit/basisinfo/271.schub-doppel-null-raps.html>
(22.10.2020)
- Chemie Technik, *Basischemikalien aus nachwachsenden Rohstoffen*
<https://www.chemietechnik.de/basischemikalien-aus-nachwachsenden-rohstoffen/>
(22.10.2020)
- Deutsche Industrievereinigung Biotechnologie, *Zirkuläre Wirtschaft und Rohstoffbasis*
<https://www.vci.de/dib/themen/biooekonomie/zirkulaere-wirtschaft/info.jsp>
(20.02.2020)
- Busch R., Hirth T., et.al., *Nutzung nachwachsender Rohstoffe in der industriellen Stoffproduktion*, Chemie Ingenieur Technik Volume 78, Issue 3, 2006
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cite.200500178>
(21.10.2020)
- CHEManager, *Ethylen:Produktion wächst, Preis sinkt*
<https://www.chemanager-online.com/themen/management/ethylen-produktion-waechst-preis-sinkt>
(21.10.2020)
- Diepenbrock W., *Nachwachsende Rohstoffe*, UTB, 2014
- European bioplastics *Bioplastics market data*
<https://www.european-bioplastics.org/market/>
(20.02.2020)
- Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe, *Biokunststoffe*
<https://mediathek.fnr.de/biokunststoffe.html>
(20.02.2020)
- Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe, *Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe*
<https://mediathek.fnr.de/broschuren/nachwachsende-rohstoffe/marktanalyse.html>
(21.10.2020)
- Karlsruher Institut für Technologie (KIT), *bioliq®*
<https://www.bioliq.de/>
(01.04.2020)
- Nordhoff S.,Dr., *Die Bedeutung nachwachsender Rohstoffe in der chemischen Industrie*, Chemie Ingenieur Technik, Volume 78, Issue 9, 2006
- Pflanzenforschung.de, *Von der Pusteblume zum Autoreifen*
<https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/journal/von-der-pusteblume-zum-autoreifen-ein-unkraut-wird-zum-10476>
(11.03.2020)
- Reinhard S., *Nachwachsende Rohstoffe: Eine mögliche Basis für eine zukünftige stoffliche Ressource der Industrie*, Igel Verlag, 2014
- Statistica, *Statistiken zu Kautschuk*
<https://de.statista.com/themen/4832/kautschuk/>
(20.02.2020)
- Statistica, *Weltweite und europäische Produktionsmenge von Kunststoff in den Jahren von 1950 bis 2018*
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167099/umfrage/weltproduktion-von-kunststoff-seit-1950/>
(20.02.2020)
- Türk O., *Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe*, Vieweg+Teubner Verlag, 2014
- Umweltbundesamt, *Zellstoff- und Papierindustrie*
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriestoffe/holz-zellstoff-papierindustrie/zellstoff-papierindustrie>
(21.10.2020)

VCI, Chancen und Grenzen des Einsatzes nachwachsender Rohstoffe in der chemischen Industrie

<https://www.vci.de/themen/rohstoffe/chancen-und-grenzen-des-einsatzes-nachwachsender-rohstoffe-in-der-chemischen-industrie-vci-positions-papier.jsp>

(20.02.2020)

VCI, Chemiewirtschaft in Zahlen online

<https://www.vci.de/die-branch/zahlen-berichte/chemiewirtschaft-in-zahlen-online.jsp>

(24.02.2020)

VCI, Einsatz nachwachsender Rohstoffe in der chemischen Industrie unter der Anwendung von Massenbilanzansätzen

<https://www.vci.de/themen/rohstoffe/einsatz-nachwachsender-rohstoffe-in-der-chemischen-industrie-anwendung-von-massenbilanz-ansaetzen-integration-in-bestehende-produktions-und-lieferketten.jsp>

(24.02.2020)

VCI, Rohstoffbasis der Chemieindustrie

<https://www.vci.de/top-themen/rohstoffbasis-chemieindustrie.jsp>

(12.03.2020)

VDM, Holzfaserprodukt Zellstoff

<https://www.wellpappe-wissen.de/wissen/papier/papierherstellung/holzfaserprodukt-zellstoff-zellulose.html>

(21.10.2020)

Herausgeber

Fonds der Chemischen Industrie im Verband
der Chemischen Industrie e. V. (FCI),
Mainzer Landstraße 55, 60329 Frankfurt am Main
www.vci.de/fonds, Tel. 069 2556-0

Erstauflage: August 2009

Überarbeitete Neuauflage: 2021
24.000 Exemplare

Alle Rechte vorbehalten

Autoren der 1. Auflage

Prof. Dr. Hans Joachim Bader, Dr. Stefan Horn
Goethe-Universität Frankfurt am Main

Dr. Ulrich Fehrenbacher, Otto Grosshardt,
Kristian Kowolik, Ute Pohnsner, Dr. Detlef Schmiedel,
Rainer Schweppe, Gerd Unkelbach
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT)

Prof. Dr. Thomas Hirth
Fraunhofer-Institut für Grenzflächen und
Bioverfahrenstechnik (IGB) und Institut für
Grenzflächenverfahrenstechnik (IGVT)
der Universität Stuttgart

Autoren der 2. Auflage

Peter Wiedemann - Zeitbild Verlag Berlin

Methodisch-didaktisches Konzept

Prof. Dr. Hans Joachim Bader,
Goethe Universität, Frankfurt
Prof. Dr. Marco Beeken, Universität Osnabrück
Prof. Dr. Bernd Ralle, TU Dortmund

Redaktion und Gesamtkoordination

Birgit Kullmann, FCI Frankfurt

Bildquellen

Adobe Stock: Titelseite (Maciej Czekajewski), Seiten 9
(AVTG, minzpeter, bfdcy2008, Katarzyna M. Wächtertock),
10 (zcy), 12 (Artinun, Aleks Kend, mashe, cherylvb,
AlenKadr, pixelrobot), 16 (Marvin Simchen, kellyreekoli-
bry, Michael Gray, Thaut Images), 17 (zcy), 19 (_italo_),
22 (Philippe Gillotte), 23 (Julia Shilova, Ximinez, PRILL
Mediendesign), 24 (Syda-Productions, Dario Lo Presti),
25 (Jelena Voronova, fotoneurotic), 27 (yujing shi-EyeEm,
Creatus, Simona72, Ina-Schoenrock), 29 (PRILL Medi-
endesign), 30 (juland), 35 (Timmarty), 36 (Lab_Photo,
nattanan), 37 (krispetkong), 38 (Coprid, NICOLAS
LARENTO), 39 (picsfive), 43 (stockphoto mania, PRILL
Mediendesign), 44 (Miroslava Holasová, Hamik, luSh),
45 (James Steidl), 46 (vltnn), 48 (indigolotos), 49 (Photo
Sesaon, Giedrius), 52 (Maxim Loskutnikov, krasyyuk,
Jean-Paul Demolin, Ljupco Smokovski), 54 (cobaltstock,
Maksymiv Iurii), 55 (Terry Morris), 56 (Daniel Etzold),
58 (anitasstudio), 61 (buket bariskan, sablinstanislav,
rockpix)

Fotolia: Seiten 5 (vlad61_61), 8 (Mihai Simonia),
23 (Zorro12), 25 (Andreas-Vogler), 39 (Gunnar Assmy),
42 (Andreas Rueff), 50 (Dmitry-Lobanov), 51 (smereka),
59 (quickshooting)

iStock: Seiten 39 (Darren Curzon), 40 (Pawarun)

Alle anderen Abbildungen und Fotos FCI

Gestaltung

Seippel & Weihe Kommunikationsberatung GmbH
Bernardstraße 14-16, 63067 Offenbach am Main
www.seippel-weihe.com

Produktion

bk betterkonsult
Königsteiner Straße 2, 61440 Oberursel/Taunus
www.betterkonsult.de

Druck

Klimaneutral gedruckt auf Papier aus nachhaltiger
Waldwirtschaft.



Arbeitsblätter & Experimente

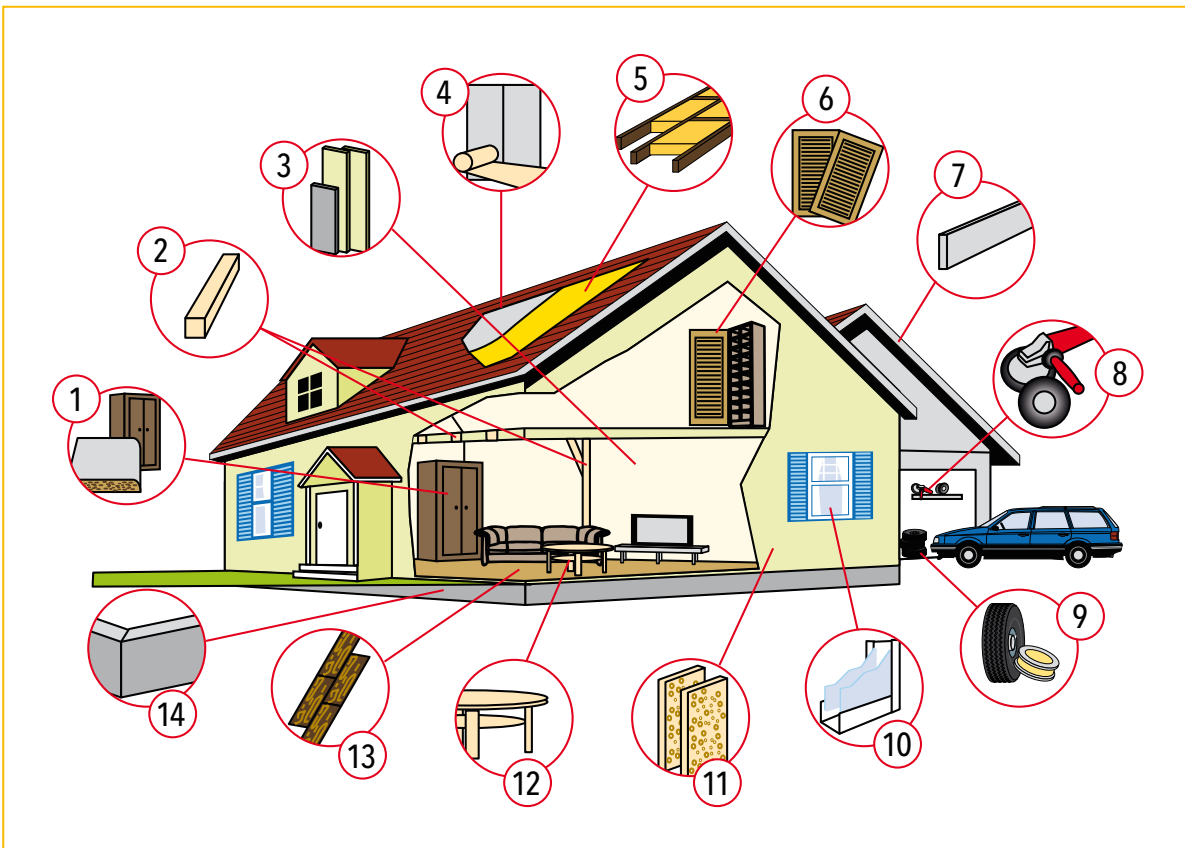
Nachwachsende Rohstoffe im Alltag

Nachwachsende Rohstoffe finden sich in vielen Produkten, mit denen wir es im Alltag zu tun haben. In jedem Haushalt gibt es eine Vielzahl von Gegenständen, die ganz oder teilweise aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt wurden (Arbeitsblatt 1, Seite 1,2). Stärke ist ein nachwachsender Rohstoff, der auch im Lebensmittelbereich vielfältig eingesetzt wird, sei es in nativer oder in modifizierter Form (Arbeitsblatt 1, Seite 3).

a) Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen im Haushalt

Die Abbildung zeigt die vielfältige Palette von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen, die im Innen- und Außenbereich von Wohnungen und Häusern eingesetzt werden können.

1 Benennen Sie die Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen anhand der Zeichnung.



Nachwachsende Rohstoffe im Alltag

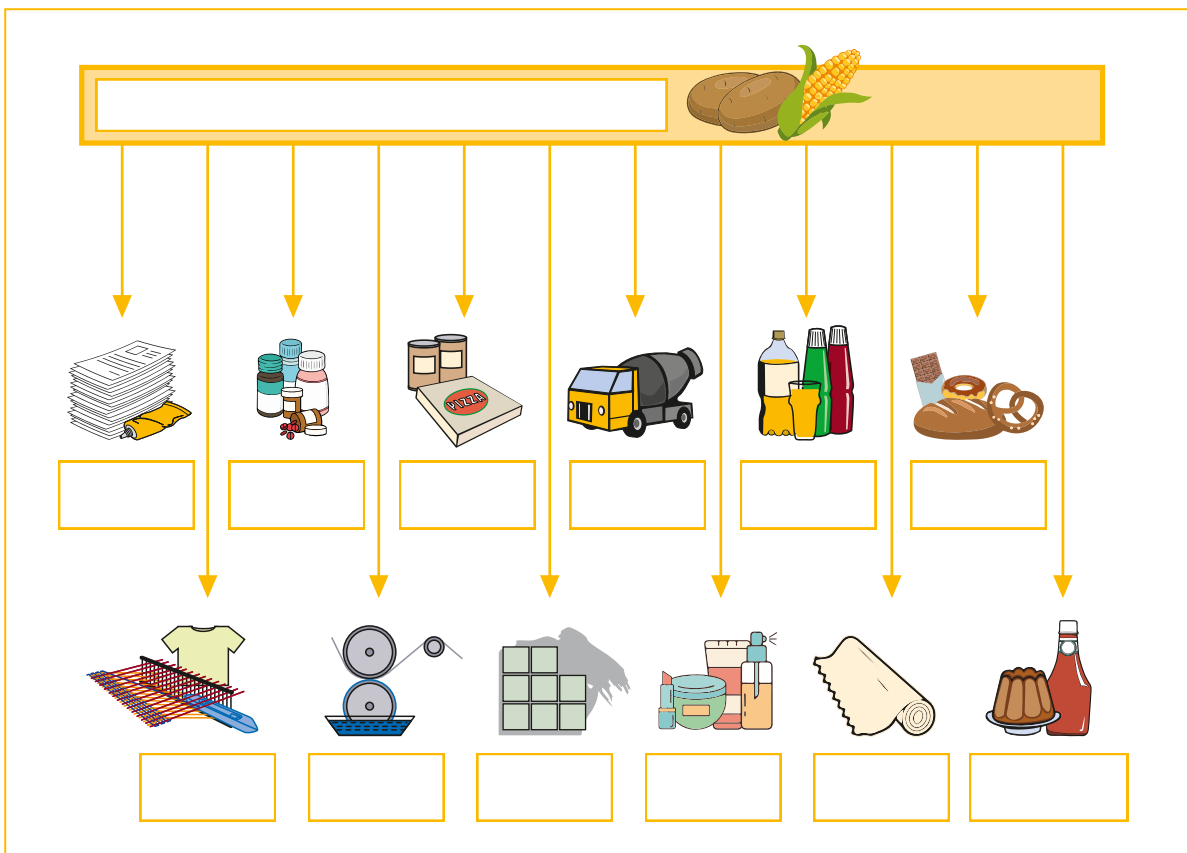
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	

Nachwachsende Rohstoffe im Alltag

b) Verwendung von Stärke

Stärke ist ein beliebter und vielseitiger nachwachsender Rohstoff, der vor allem aus Kartoffeln, Weizen und Mais gewonnen wird. Sie kann nativ (unverändert), chemisch modifiziert oder nach Verzuckerung (z. B. als Glucosesirup) in vielfältiger Weise eingesetzt werden.

2 Beschriften Sie die Abbildung.



Teller-Tank-Debatte – Kraftstoffe aus Biomasse

Kraftstoffe aus Biomasse

Als Biokraftstoffe werden flüssige und gasförmige Kraftstoffe bezeichnet, deren Produktion aus nachwachsenden Rohstoffen wie Ölpflanzen, Zuckerrüben und Getreide erfolgt. Bekannte Vertreter von Biokraftstoffen sind z.B. Biodiesel und Bioethanol. Anfang der 2000er Jahre hatte insbesondere der Biodiesel als Autokraftstoff aus nachwachsenden Rohstoffen einen hohen Beitrag für die Versorgung des Verkehrssektors in Deutschland und anderen Teilen der Europäischen Union geleistet. Er galt lange Zeit als klimaschonende Alternative zum Mineralkraftstoff und wird zu den Biokraftstoffen der 1. Generation gezählt. Die wachsende Nachfrage führte zu einem steigenden Anbau von Ölpflanzen in der Landwirtschaft, und zwar nicht allein in Deutschland, sondern international. Die Folge war, dass im Laufe der Jahre in der Landwirtschaft Nutzflächen für die Nahrungs- und Futtermittelproduktion zum Anbau von Ölpflanzen umgewandelt wurden. Zudem kam es vor allem in Entwicklungsländern zu einer Ausweitung der landwirtschaftlichen Nutzflächen etwa durch Brandrodung.



Die Folge dessen war eine große gesellschaftliche Diskussion, die sogenannte „Teller-Tank“-Debatte. Es zeigte sich, dass die Akzeptanz eines flächendeckenden Anbaus der zur Herstellung von Biomasse benötigten nachwachsenden Rohstoffe im Wesentlichen davon abhängt, wie nachhaltig die Gewinnung erfolgt, in welcher Konkurrenz diese zu der existentiell notwendigen Nahrungsmittelproduktion steht und welche ökologischen Folgen (z.B. Artensterben) der Anbau mit sich bringen könnte.

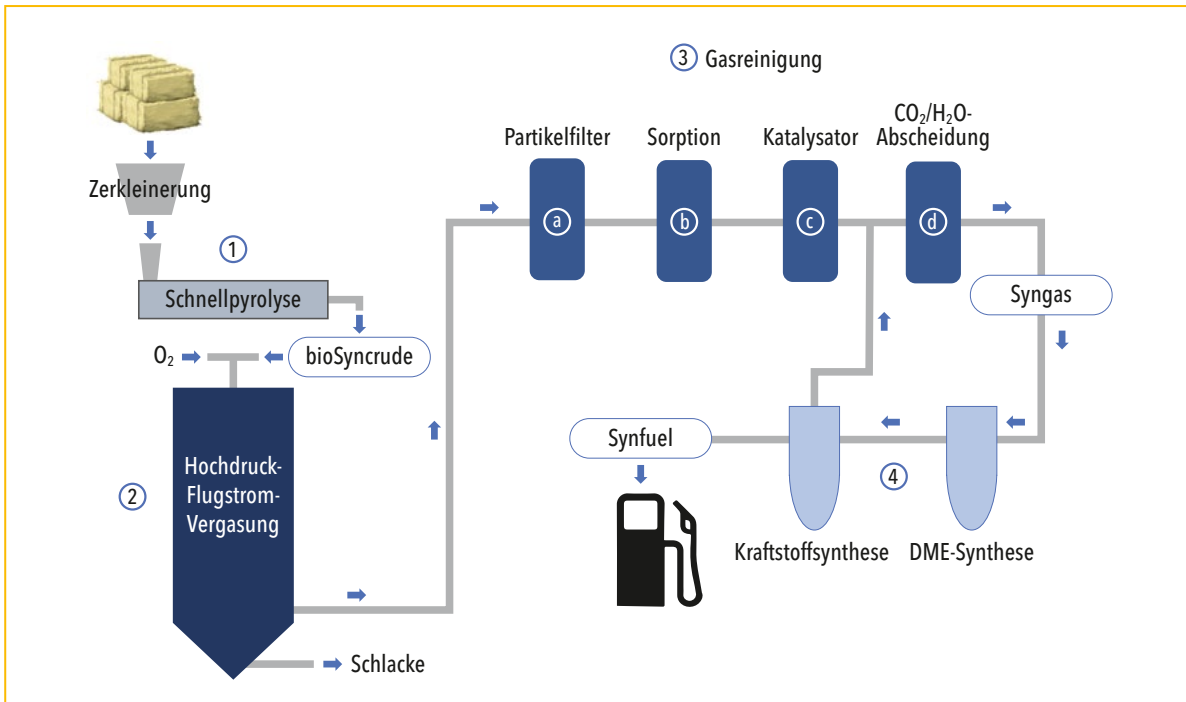
Während Anfang der 2000er Jahre Autofahrer noch reinen Biodiesel tanken konnten, findet sich dieser heutzutage nur als 7–10 %ige Beimischung zum Mineralöl-Kraftstoff an der Zapfsäule wieder. Zudem wurde 2013 die steuerliche Förderung für Kraftstoffe der 1. Generation beendet. Derzeit werden große Anstrengungen unternommen, Biokraftstoffe der 2. und 3. Generation zu erzeugen, für deren Herstellung ausschließlich auf Biomasse zurückgegriffen wird, die nicht für Nahrungsmittel oder Futtermittel Verwendung findet. Ein Prozess, der das Ziel verfolgt, die sogenannten Biomass to Liquid (BTL) Kraftstoffe herzustellen, ist das „bioliq®“-Verfahren.

Mögliche Informationsquellen:

- <https://www.bioliq.de/24.php> (abgerufen am 22.11.2019)
- <https://biokraftstoffe.fnr.de/kraftstoffe/btl-biomass-to-liquid/> (abgerufen am 13.10.2020)
- <https://www.greengear.de/sunfuel-btl-biomass-to-liquids/> (abgerufen am 13.10.2020)

Teller-Tank-Debatte – Kraftstoffe aus Biomasse

Schema des bioliq®-Verfahrens



Aufgaben

- Die Abbildung zeigt schematisch das „bioliq®“-Verfahren. Erläutern Sie dieses, nutzen Sie dazu die vorgeschlagenen Informationsquellen und gehen Sie dabei wie folgt vor:
 - Erklären Sie die Funktion von Schritt ①. Wo wird dieser durchgeführt? Erläutern Sie mögliche Vorteile dadurch.
 - Nennen Sie die zwei (Haupt-)Bestandteile des Syngases. Formulieren Sie eine Reaktionsgleichung für die bei ② ablaufende, unvollständige Vergasung/Verbrennung. Nehmen Sie dabei für das bioSynchrude vereinfacht $C_3H_4O_2$ an.
 - Ordnen Sie zu, welche Nebenprodukte bei der Gasreinigung ③ in den einzelnen Schritten a, b, c & d gefiltert werden.
 - Stellen Sie für die zweistufige Synthese ④ von Synfuel (vereinfacht: nCH_2) Reaktionsgleichungen auf: Syngas \rightarrow DME \rightarrow Synfuel. Begründen Sie anhand dieser Reaktionsgleichungen, die Umleitung des nicht reagierten Syngases durch den Filter ③ d.
 - Erstellen Sie mithilfe der Abb. 1 und den Erkenntnissen aus a.- d. ein Fließdiagramm, welches das „bioliq®“-Verfahren zusammenfasst.
- Recherchieren Sie Informationen über die Bemühungen Bioethanol auf alternativen Wegen herzustellen.
- Worin unterscheiden sich Biokraftstoffe der 2. und 3. Generation hinsichtlich ihrer Herstellung? Stellen Sie zusätzlich stichwortartig die technischen und logistischen Herausforderungen zusammen, die für einen breiten Einsatz dieser Kraftstoffe bewältigt werden müssen.

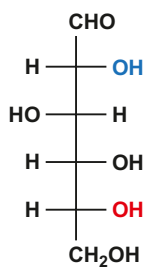
Von der Fischer-Projektion zur Haworth-Formel

Es gibt verschiedene Formeldarstellungen für Kohlenhydrate. Oft wird die Fischer-Projektion verwendet. Die Kette von Kohlenstoff-(C)-Atomen wird von oben nach unten gezeichnet. Das am höchsten oxidierte C-Atom steht oben. Horizontale (waagerechte) Linien zeigen aus der Papierebene nach vorne, vertikale (senkrechte) Linien zeigen nach hinten.

Für die Formel-Darstellung von beispielsweise Glucose oder Fructose in Ringform wird bevorzugt die Haworth-Schreibweise verwendet. Das Molekül wird als planares Sechs- bzw. Fünfeck gezeichnet, dessen unterer Teil aus der Papierebene nach vorne zeigt, der obere Teil nach hinten. Im Fall der Glucose sind das C₁- und das C₅-Atom über eine Sauerstoffbrücke miteinander verbunden.

Die Fischer-Projektion eines Moleküls lässt sich in die Haworth-Schreibweise überführen. Dabei gilt, dass die in der Fischer-Projektion nach rechts weisenden Hydroxygruppen in der Haworth-Schreibweise unten, die nach links weisenden oben stehen.

- Überführen Sie die Fischer-Projektion von Glucose in die Haworth-Schreibweise. Stellen Sie ferner das Produkt dar, das durch Reaktion der Aldehydgruppe mit der OH-Gruppe am C₂-Atom entsteht. Zur besseren Orientierung ist die OH-Gruppe am C₂-Atom rot und die am C₅-Atom blau markiert.



Die Gewinnung von Zellstoff aus Holz

Die Gewinnung von Zellstoff aus Holz ist ein aufwendiger technischer Prozess.

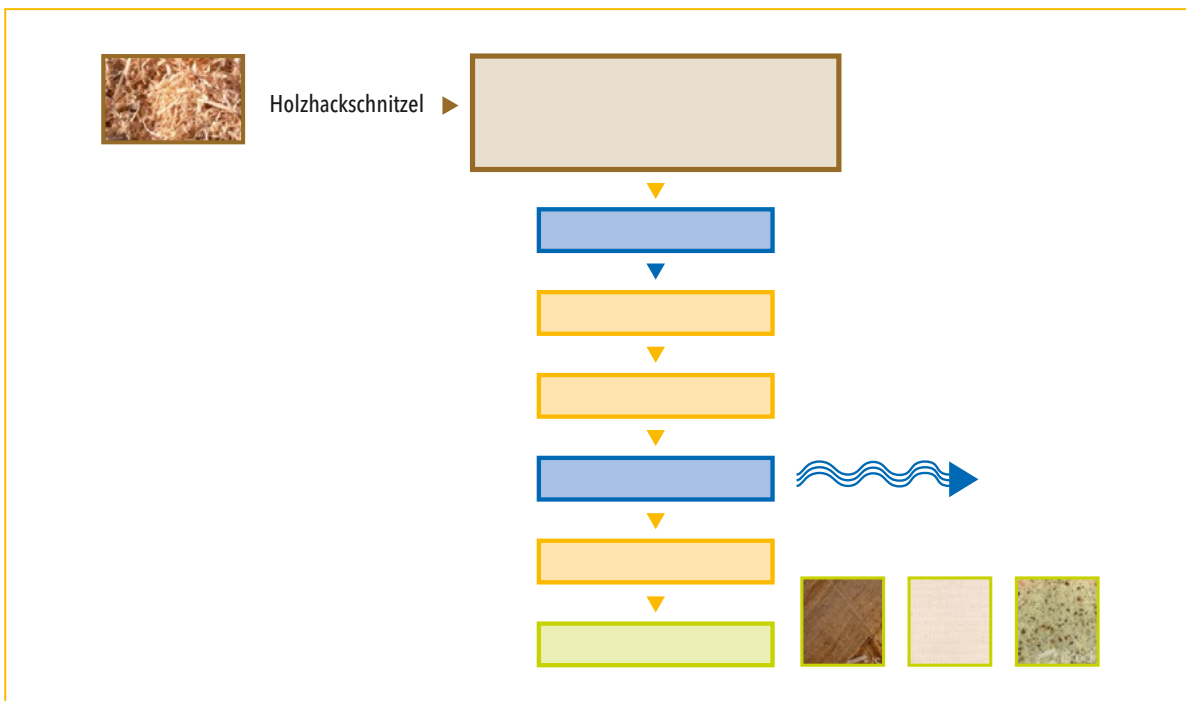
Die Abbildung zeigt vereinfacht die verschiedenen Schritte der Zellstoffherstellung. Jedes Kästchen steht für einen relevanten Schritt.

Vereinfachte Beschreibung der Gewinnung von Zellstoff aus Holz:

Es existieren verschiedene Verfahren, um aus Holz Zellstoff zu produzieren. Dominierend ist das Sulfatverfahren. Hierbei wird das entrindete und gehackte Holz (Holzhackschnitzel) mit einer alkalischen Natriumsulfidlösung durchtränkt und gekocht, wobei Lignin und andere nicht gewünschte Bestandteile in Lösung gehen. Nach dem Aufschluss wäscht man den in Fasern vorliegenden Zellstoff und entfernt eventuell vorhandene kleine Holzstückchen, die nicht aufgeschlossen wurden.

Durch die Behandlung mit Chlor, Sauerstoff oder Wasserstoffperoxid wird der Zellstoff gebleicht. Der gewünschte Weißgrad kann genau eingestellt werden. Der noch feuchte Zellstoff wird entwässert und getrocknet. Der fertige Zellstoff wird aufgerollt und in die gewünschte Breite geschnitten. Verpackt und mit Draht verschnürt kommt er in den Versand.

1 Schreiben Sie die Namen für jeden Schritt in das jeweilige Kästchen.



Zur chemischen Struktur von Fetten und Ölen

Fette und Öle sind chemisch gesehen Ester des Glycerins mit drei Molekülen Fettsäure (Triglyceride). Fettsäuren sind unverzweigte langkettige Monocarbonsäuren, die ungesättigt bzw. gesättigt sein können.

1 Was sind die strukturellen Merkmale einer Fettsäure?

2 Definieren Sie die Begriffe „gesättigt“ und „ungesättigt“ im chemischen Sinne.

3 Welches Fett/Öl besitzt einen hohen bzw. niedrigen Gehalt an ungesättigten Fettsäuren?

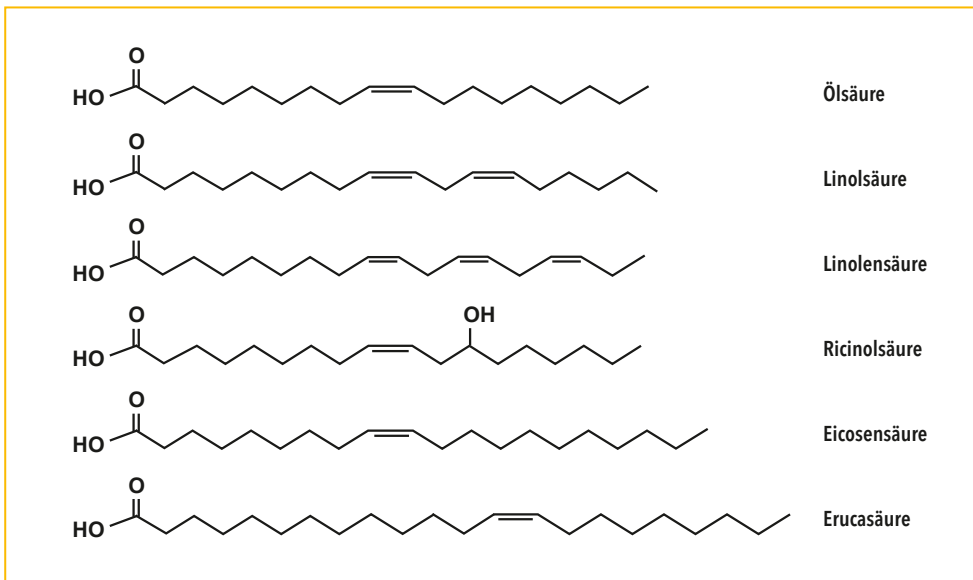
Prozentuale Fettsäurezusammensetzung einiger Ölpflanzen

Fett/Öl	Gehalt [%]									
	10:0	12:0	14:0	16:0	18:0	18:1	18:2	18:3	20:1	22:1
Rapsöl (low erucic)	-	-	-	1-5	1-4	50-65	15-30	5-13	1-3	0-2
Rapsöl (high erucic)	-	-	-	2-3	1-4	12-24	12-16	7-10	4-6	45-53
Sonnenblumenöl (alte Sorte)	-	-	-	3-10	1-10	14-65	20-75	-	-	-
Sonnenblumenöl (high oleic)	-	-	-	3-4	1-2	90-91	3	-	-	-
Leinöl	-	-	-	5-8	2-4	15-25	12-16	50-60	-	-
Kokosfett	5-10	45-53	15-21	7-11	2-4	6-8	1-3	-	-	-
Palmkernöl	3-5	40-52	14-18	6-10	1-4	9-16	1-3	-	-	-
Palmöl	-	-	0-2	38-48	3-6	38-44	9-12	-	-	-
Sojaöl	-	-	-	7-14	1-5	19-30	44-62	4-11	0-1	-
Erdnussöl	-	-	0-1	6-16	1-7	36-72	13-45	0-1	0-2	-

4 Worin unterscheidet sich Rapsöl „low erucic“ von Rapsöl „high erucic“?

Zur chemischen Struktur von Fetten und Ölen

5 Bestimmen Sie für die unten abgebildeten Fettsäuren das Verhältnis „Anzahl C-Atome zu Anzahl Doppelbindungen“. Geben Sie auch die Stellung der OH-Gruppe sowie die Summenformel an.



6 Was ist der Unterschied zwischen cis- und trans-Fettsäuren?

Gewinnung von Öl aus Raps

Raps ist eine seit Jahrhunderten angebaute Nutzpflanze. Aus dem Samen kann man etwa 40 % Rapsöl und 60 % Rapsschrot gewinnen. Rapsöl wird im Nahrungsmittelbereich, z. B. als Speiseöl, eingesetzt. Für den Kraftstoffbereich kann entweder direkt Rapsöl bzw. das Derivat Rapsölmethylester (Biodiesel) verwendet werden. Ferner dient Rapsöl als Ausgangsstoff für Tenside und Schmierstoffe. Rapsschrot wird als Tierfutter verwertet.

Beschreibung des Ablaufs:

Zunächst wird die Rapssaat gereinigt und zerkleinert. Durch die Zerkleinerung wird die Oberfläche stark vergrößert. Das ist wichtig für den nächsten Schritt, die Konditionierung, bei der die zerkleinerte Saat in Wärmepfannen mit Wasserdampf behandelt wird. Das im Gewebe vorhandene Öl wird dadurch dünnflüssiger. Anschließend wird der größte Teil des Öls mittels mechanischen Pressens (Schneckenpresse) gewonnen. Ein Rest verbleibt jedoch noch im Presskuchen.

Im Extrakteur wird der Presskuchen mit heißem Lösemittel, z. B. Hexan, behandelt. Hierdurch wird restliches Öl nahezu vollständig aus dem pflanzlichen Gewebe gelöst. Zurück bleibt entöltes Rapsschrot. Das Hexan-Öl-Gemisch wird mittels Destillation getrennt. Zurückgewonnenes Lösemittel kann wieder zur Extraktion verwendet werden.

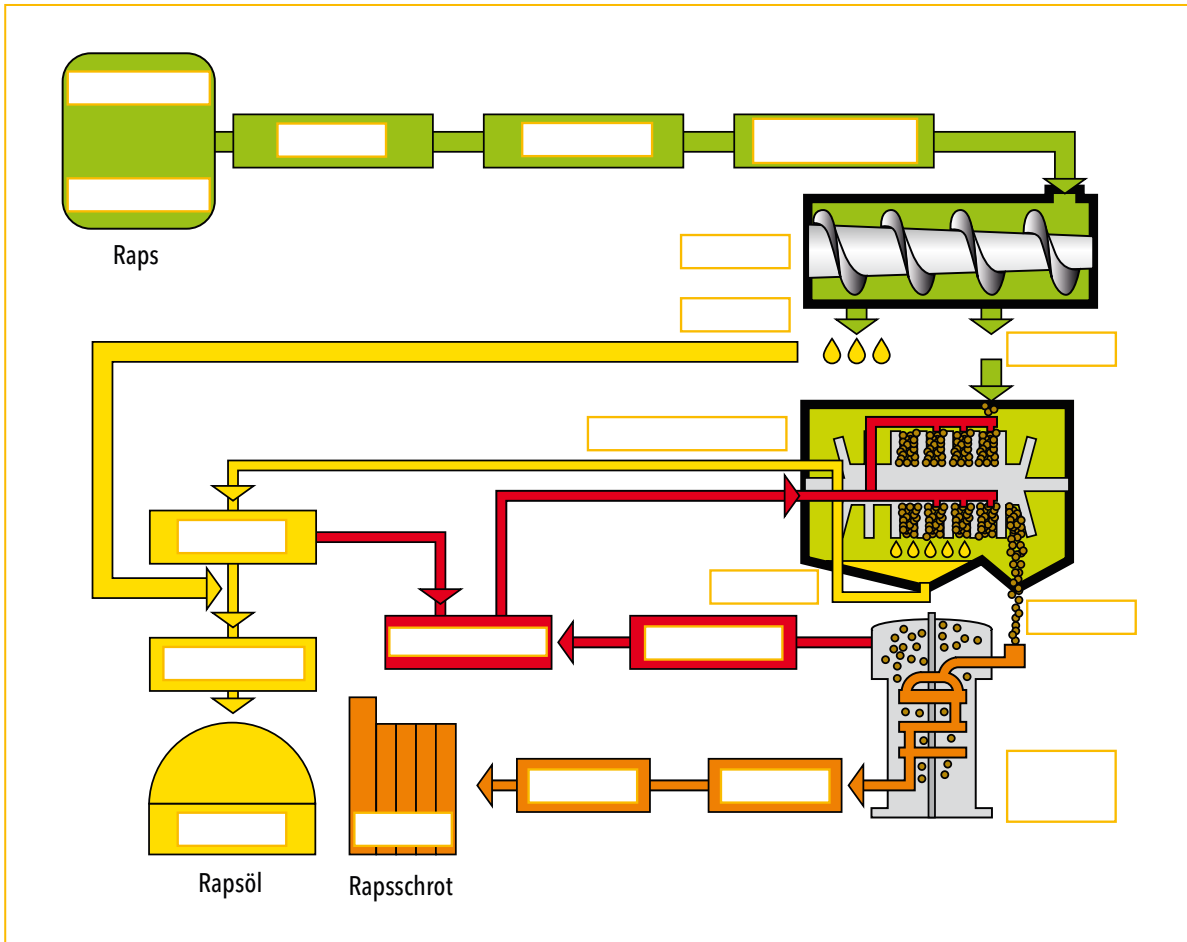
Das so erhaltene Rapsöl enthält noch eine ganze Reihe von Begleitstoffen, die durch verschiedene Reinigungsschritte entfernt werden müssen. Beispielsweise werden Proteine abgetrennt („Entschleimung“). In einem Rohöltank wird das Rapsöl bis zum Abtransport oder zur Weiterverarbeitung aufbewahrt.

Die im Schrot noch vorhandenen Reste an Lösemittel werden im „Toaster“ durch Zuführen von überhitztem Wasserdampf entfernt (das gasförmige Lösemittel wird später im Kondensator zurückgewonnen). Nach Trocknung und Kühlung wird der Rapsschrot in einem Silo eingelagert.

Gewinnung von Öl aus Raps

- 1 Die Abbildung zeigt die einzelnen Schritte der Verarbeitung von Weichsaaten am Beispiel von Raps. Das Schema gilt in ähnlicher Weise auch für Sonnenblumen und Lein. Benennen Sie die einzelnen Schritte sowie die Maschinen.

Verarbeitung von Raps



Grundlagen der Chromatographie

Die Chromatographie ist ein in der Chemie häufig eingesetztes Trennverfahren. Die zu trennenden Stoffe – d. h. die Komponenten eines Stoffgemisches – verteilen sich allgemein zwischen einer ruhenden (stationären) Phase und einer beweglichen (mobilen) Phase. Letztere führt das Substanzgemisch mit sich. Es gibt verschiedene Varianten, zum Beispiel die Papier-, Dünnschicht-, Säulen- und Gaschromatographie. Die ersten beiden chromatographischen Verfahren werden auch im Chemieunterricht eingesetzt.

Es werden vereinfacht zwei physikalisch-chemische Vorgänge für die chromatographische Trennung genutzt: Adsorption und Verteilung. Demgemäß spricht man auch von Adsorptionschromatographie und Verteilungschromatographie. Adsorption und Verteilung können aber auch zusammen eine Rolle spielen.

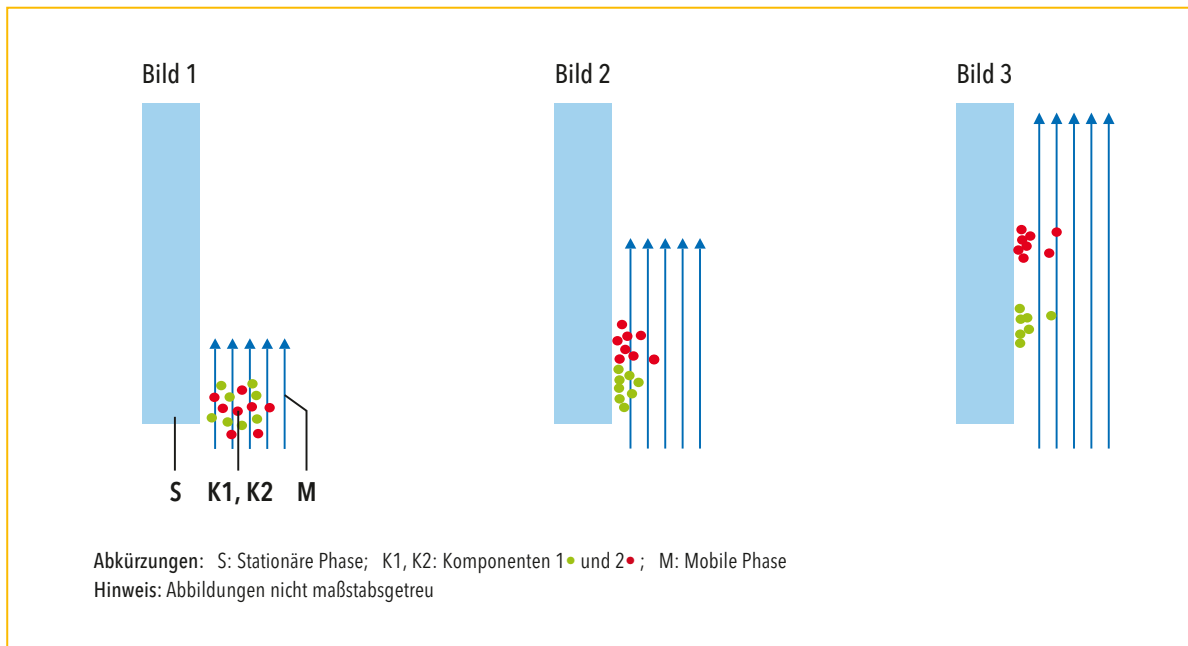
Die Adsorptionschromatographie beruht auf der Adsorption, d. h. der Anreicherung eines Stoffes (aus dem zu trennenden flüssigen oder gasförmigen Stoffgemisch) an der Oberfläche einer festen Substanz. Der Grad der Adsorption ist für jeden Stoff unterschiedlich. Zwischen der festen, stationären Phase und der mobilen Phase stellt sich ein Adsorptionsgleichgewicht ein. Als Adsorptionsmittel wird beispielsweise Aluminiumoxid oder Kieselgel verwendet. Ein typisches Beispiel für die Adsorptionschromatographie ist die Dünnschichtchromatographie.

Ein typischer Vertreter der Verteilungschromatographie ist die Papierchromatographie. Hier ist ein dünner Wasserfilm auf dem Papier die eigentliche stationäre Phase. Die Verteilung der zu trennenden Stoffe entsteht aufgrund ihrer unterschiedlichen Löslichkeit in der stationären und mobilen Phase. Dies setzt voraus, dass beide Phasen nicht miteinander mischbar sind und dass die Komponenten des Stoffgemisches in beiden Phasen unterschiedlich löslich sind. Zwischen der stationären Phase (dünner Wasserfilm auf Papier) und der mobilen Phase (Fließmittel) stellt sich ein Verteilungsgleichgewicht ein.

Grundlagen der Chromatographie

- 1 Beschreiben Sie die in der Abbildung exemplarisch ausgewählten Schritte für die Gleichgewichtsvorgänge bei der Adsorptionschromatographie. Verwenden und erklären Sie die in der Abbildung benutzten Begriffe.

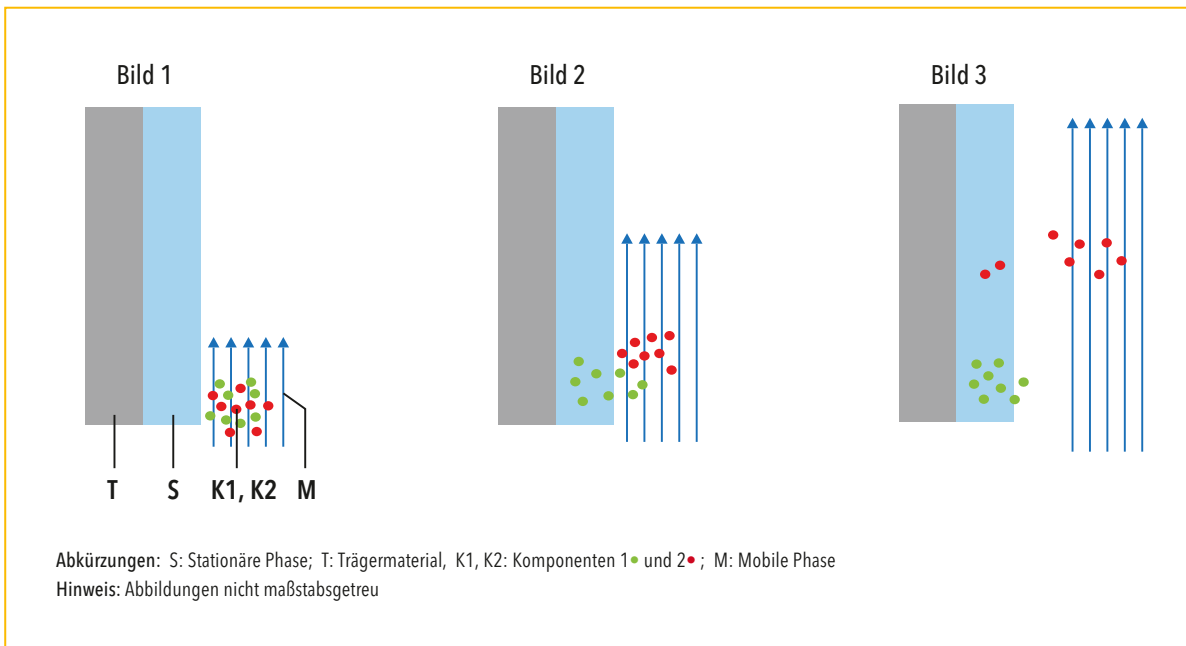
Schema einer Adsorptionschromatographie



Grundlagen der Chromatographie

- 2 Beschreiben Sie die in der Abbildung exemplarisch ausgewählten Schritte für die Gleichgewichtsvorgänge bei der Verteilungschromatographie. Verwenden und erklären Sie die in der Abbildung benutzten Begriffe.

Schema der Verteilungschromatographie



Trivialnamen

In der Chemie wurden schon immer einfache und griffige Trivialnamen genutzt. Diese werden trotz der Einführung systematischer IUPAC-Nomenklaturregeln bis heute verwendet – denn oft sind systematische Bezeichnungen für größere Moleküle recht kompliziert.

1 Ergänzen Sie zu dem angegebenen Trivialnamen den jeweiligen IUPAC-Namen.

Trivialname	IUPAC-Name
Acetaldehyd	
Aceton	
Acetylen	
Ameisensäure	
Buttersäure	
Chloroform	
Essigester	
Essigsäure	
Ether	
Ethylalkohol	
Ethylen	
Ethylenglycol	
Formaldehyd	
Fruchtzucker	
Glycerin	
Haushaltszucker	
Methylalkohol	
Milchsäure	
Propionsäure	
Traubenzucker	

Funktionelle Gruppen der organischen Chemie

Als funktionelle Gruppe wird in der organischen Chemie eine Gruppe von Atomen bezeichnet, die dem Molekül, an dem sie sich befindet, charakteristische Stoff- und Reaktionseigenschaften verleiht.

1 Ergänzen Sie die jeweils fehlenden funktionellen Gruppen oder Strukturen.

funktionelle Gruppe	Struktur
	$R-CH_2-CH_2-R'$
Alkene	
Alkine	
	$R-OH$
	$R-X, X = F, Cl, Br, I$
Ether	
Peroxide	
Aldehyde	
	$R-CO$
	$R-COOH$
	$R-COOR'$
Carbonsäureanhydride	
Peroxy-carbonsäuren	

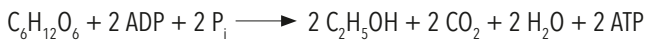
funktionelle Gruppe	Struktur
	$R-NH_2$
Säureamide	
	$R-NO_2$
	$R-N=O$
Azoverbindungen	
Cyanate	
	$R-NCO$
	$R-SH$
Thioether	
Thioester	
	$R-O-SO_3Na$
	$R-SO_3H$

Mechanismus der alkoholischen Gärung

Ethanol ist ein einfach gebauter Alkohol mit der Summenformel C_2H_6O . Er entsteht auf natürlichem Weg bei der alkoholischen Gärung, wie sie aus der Herstellung von Bier und Wein bekannt ist. Die alkoholische Gärung lässt sich aber auch gezielt einsetzen, um Ethanol als C_2 -Baustein für weitere chemische Synthesen herzustellen.

Für Mikroorganismen ist die alkoholische Gärung neben der Zellatmung eine weitere Möglichkeit, Energie in Form von Adenosin-triphosphat (ATP) zu gewinnen. ATP ist ein universeller Energiespeicher und -überträger. Pro Molekül Glucose werden lediglich zwei Moleküle ATP gebildet (dagegen 36 Moleküle ATP bei der Zellatmung).

Die vereinfachte Reaktionsgleichung der alkoholischen Gärung lautet:



In der folgenden Abbildung ist die Gärung schematisch dargestellt.

1 Ergänzen Sie die Namen der Verbindungen und die der beteiligten Enzyme.

Bei der Glycolyse wird über mehrere Stufen ein Molekül Glucose in zwei Moleküle Pyruvat umgewandelt und zwei Moleküle ATP gebildet. Anschließend erfolgt die Decarboxylierung des Pyruvats (es wird CO_2 abgespalten). Zuletzt reduziert NADH das Acetaldehyd zu Ethanol. Alle Schritte werden durch Enzyme katalysiert.

Erläuterung der Abkürzungen: ADP, ATP: Adenosin- bzw. -triphosphat (Energieträger)
 NAD⁺, NADH+H⁺: Nicotinamid-Adenin-Dinucleotid (Cosubstrat für enzymatische Redox-Reaktionen)

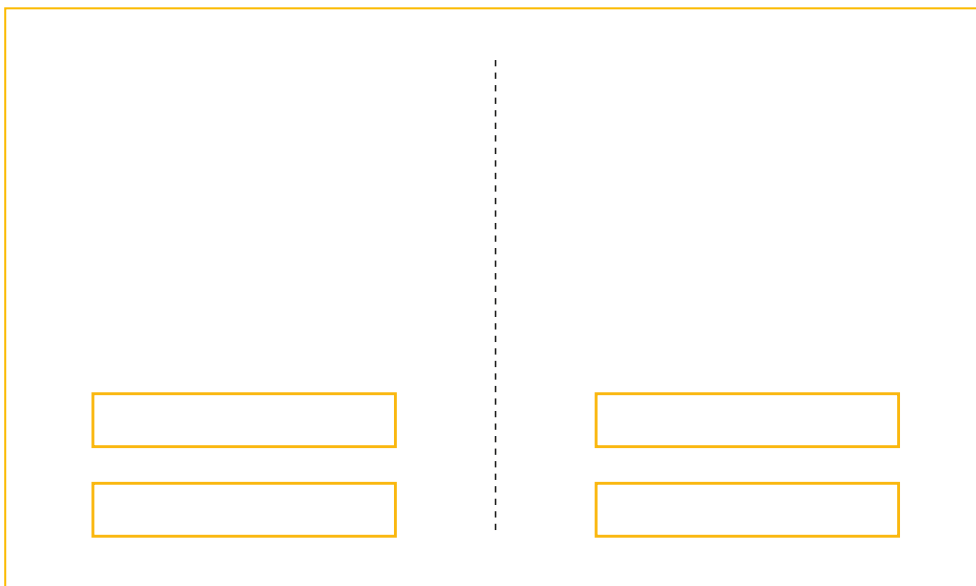
Spiegelbild-Isomere der Milchsäure

Die Eigenschaft einer chemischen Verbindung hängt zum einen von ihrer Zusammensetzung ab, das heißt von Art und Anzahl der Atome, aus denen sie besteht (was sich in der Summenformel ausdrückt); zum anderen von der räumlichen Anordnung der Atome.

Verbindungen, die die gleiche Summenformel besitzen, aber eine unterschiedliche Raumstruktur, bezeichnet man als Isomere. Eine besondere Form der Isomerie tritt bei der Chiralität auf. Chiralität liegt immer dann vor, wenn ein Molekül so gebaut ist, dass es sich mit seinem Spiegelbild nicht durch Drehen zur Deckung bringen lässt. Chirale Moleküle, die sich zueinander wie Bild und Spiegelbild verhalten, werden Enantiomere genannt.

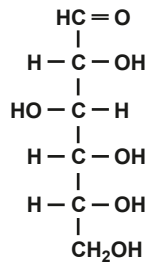
Chiralität tritt dann auf, wenn eine organische Verbindung mindestens ein asymmetrisches Kohlenstoffatom (d. h. mit vier unterschiedlichen Substituten) enthält. Ein Beispiel für eine chirale Verbindung ist Milchsäure.

- 1 Zeichnen Sie die beiden Enantiomere der Milchsäure (2-Hydroxypropansäure) jeweils in der Darstellungsform der Keilstrichformel wie auch in der Fischer-Projektion. Benennen Sie die Strukturen nach der Fischer-Nomenklatur sowie nach der Cahn-Ingold-Prelog-Konvention (CIP-Regeln).

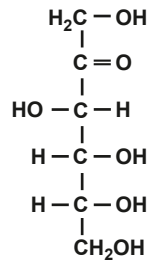


Darstellung von Sorbit und Mannit

Sorbit (Glucitol, Sorbitol) sowie Mannit (Mannitol) sind sechswertige Zuckeralkohole. Sie werden als Zuckeraustauschstoffe verwendet. Sorbit ist außerdem ein wichtiger Ausgangsstoff für die Produktion von L-Ascorbinsäure (Vitamin C). Mannit wird auch als Feuchthaltemittel eingesetzt.



D-Glucose



D-Fructose

- Formulieren Sie jeweils eine Reaktionsgleichung zur Herstellung von Glucose bzw. Fructose aus Sorbit und Mannit. Ermitteln Sie unter Zuhilfenahme der Oxidationszahlen, ob eine Reduktion oder eine Oxidation vorliegt.

Rätsel

1. Kreuzworträtsel zur IUPAC-Nomenklatur
2. Kreuzworträtsel zu Trivialnamen
3. Suchsel (mit Lösungswort)

Hinweis für Lehrerinnen und Lehrer:

Es stehen jeweils Kreuzworträtsel zur neuen und zur alten IUPAC-Nomenklatur zur Verfügung, da an einigen Schulen auch noch die alte Nomenklatur unterrichtet wird.

1 Kreuzworträtsel zur IUPAC-Nomenklatur

Mit den nachfolgenden Kreuzworträtseln und dem Suchsel lässt sich die IUPAC-Nomenklatur anhand einfacher Beispiele aus der Organischen Chemie spielerisch wiederholen.

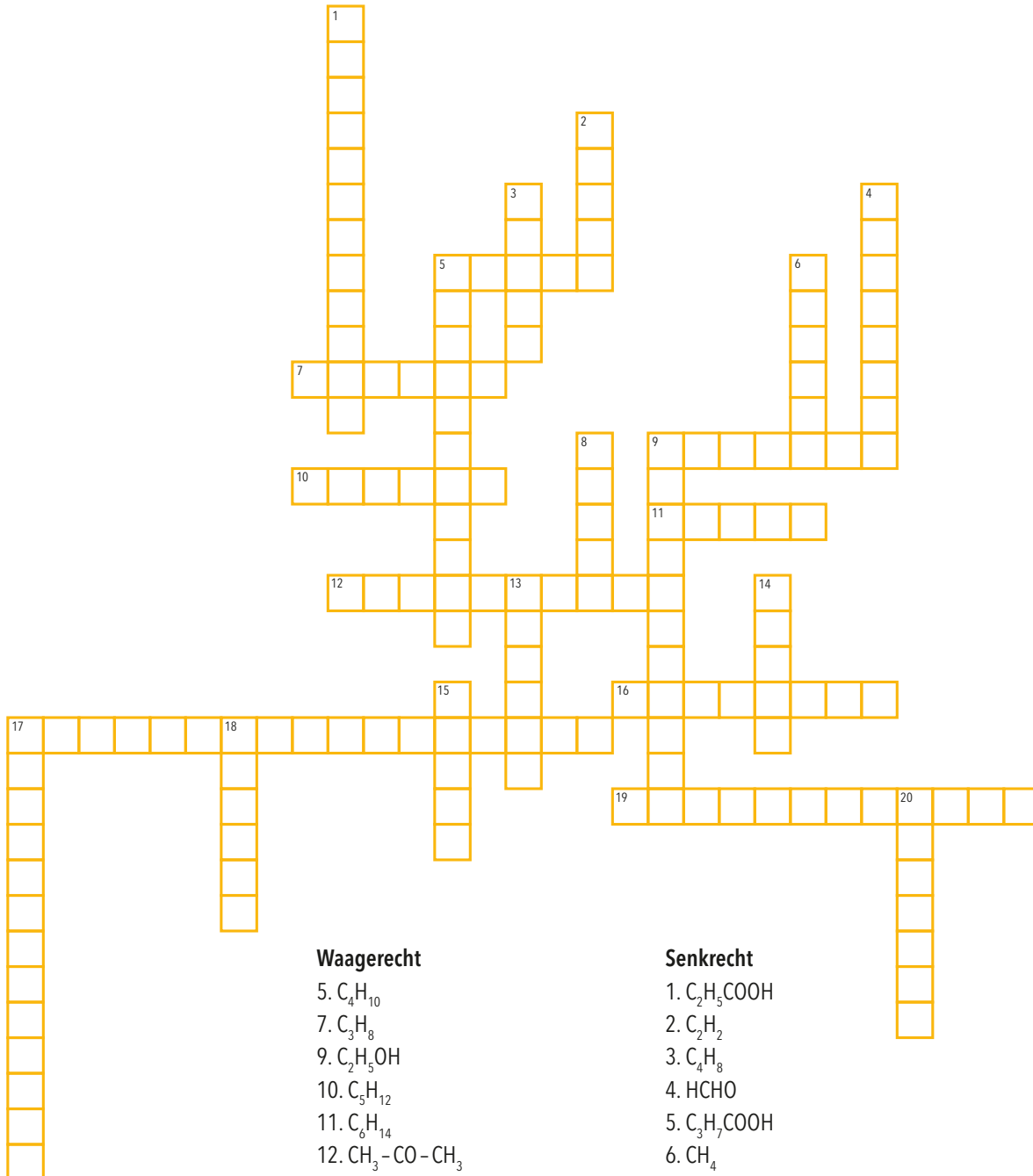
Suchen Sie für die unten aufgeführten Verbindungen ausgehend von Halbstrukturformeln bzw. Summenformeln den richtigen IUPAC-Namen. Dieser ist in die jeweilige Kästchenreihe einzutragen. Die vor der Formel stehende Zahl gibt die senkrechte oder waagerechte Kästchenreihe an. Der Name der Verbindung muss in eine Kästchenreihe passen, es dürfen weder leere Kästchen in einer Reihe übrig bleiben noch darf der Name abgekürzt werden. Am Ende müssen alle Kästchen ausgefüllt sein. Bindestrich, Komma oder Ziffer zählen als ein Zeichen. Umlaute sind aufzulösen (z. B. ae statt ä).

Beispiel: $\text{CH}_2(\text{OH})-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}_2(\text{OH})$ ist die Summenformel von 1,2-Ethandiol.

1
,
2
-
E
T
H
A
N
D
I
O
L

Rätsel

Alternative 1 (alte IUPAC-Nomenklatur)



Waagerecht

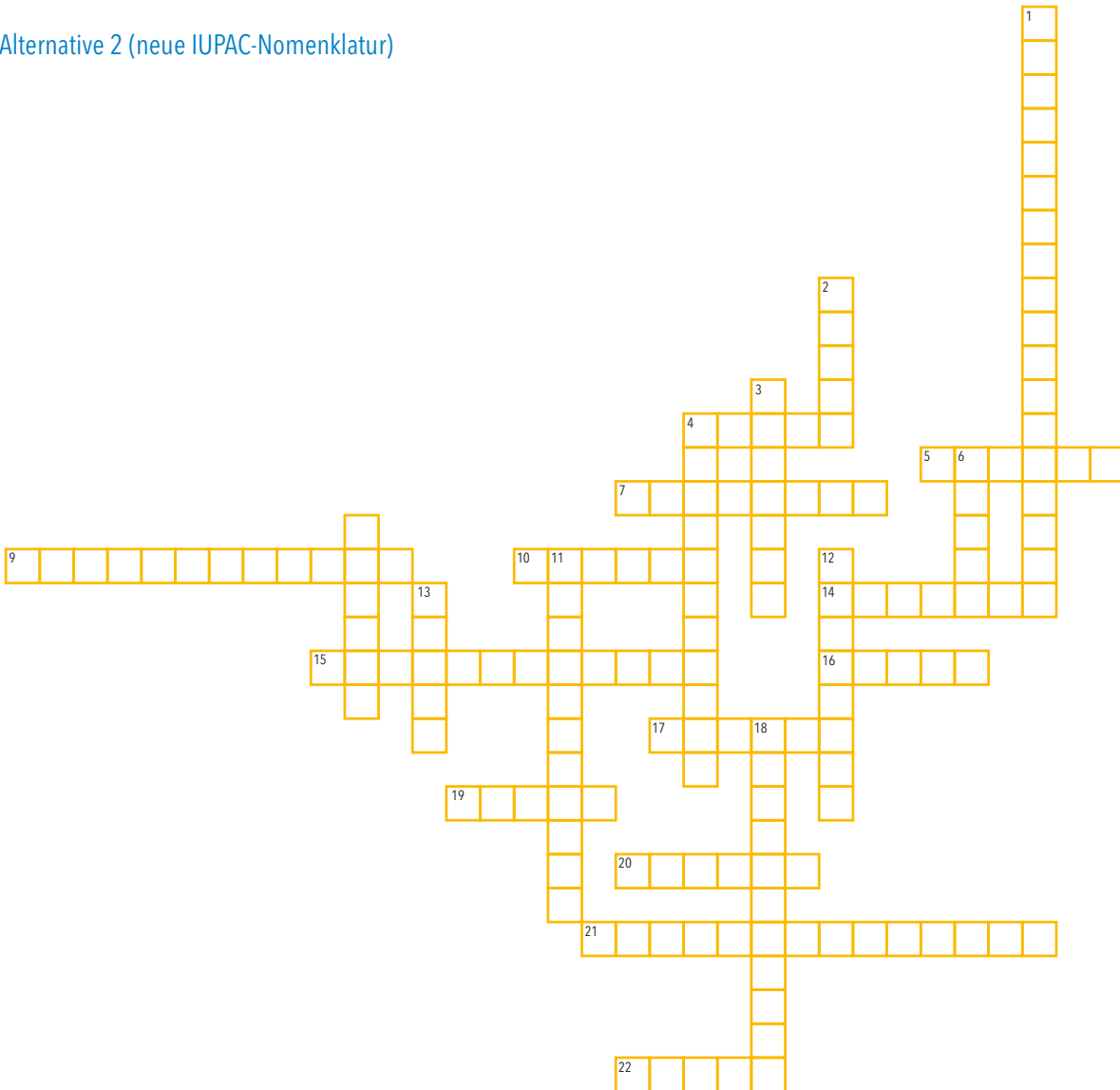
- 5. C_4H_{10}
- 7. C_3H_8
- 9. C_2H_5OH
- 10. C_5H_{12}
- 11. C_6H_{14}
- 12. $CH_3-CO-CH_3$
- 16. CH_3OH
- 17. $CH_2(OH)-CH(OH)-CH_2(OH)$
- 19. $HCOOH$

Senkrecht

- 1. C_2H_5COOH
- 2. C_2H_2
- 3. C_4H_8
- 4. $HCHO$
- 5. C_3H_7COOH
- 6. CH_4
- 8. C_4H_6
- 9. CH_3COOH
- 13. C_3H_4
- 14. C_2H_6
- 15. C_2H_4
- 17. $CH_2(OH)-CH_2(OH)$
- 18. C_3H_6
- 20. CH_3CHO

Rätsel

Alternative 2 (neue IUPAC-Nomenklatur)



Waagerecht

4. C_4H_6
5. C_5H_{12}
7. HCHO
9. C_2H_5COOH
10. CH_4
14. CH_3CHO
15. HCOOH
16. C_6H_{14}
17. C_3H_4
19. C_4H_8
20. C_3H_8
21. $CH_2(OH)-CH_2(OH)$
22. C_2H_4

Senkrecht

1. $CH_2(OH)-CH(OH)-CH_2(OH)$
2. C_4H_{10}
3. C_2H_5OH
4. C_3H_7COOH
6. C_2H_2
8. C_3H_6
11. CH_3COOH
12. CH_3OH
13. C_2H_6
18. $CH_3-CO-CH_3$

Rätsel

2 Kreuzworträtsel zu Trivialnamen

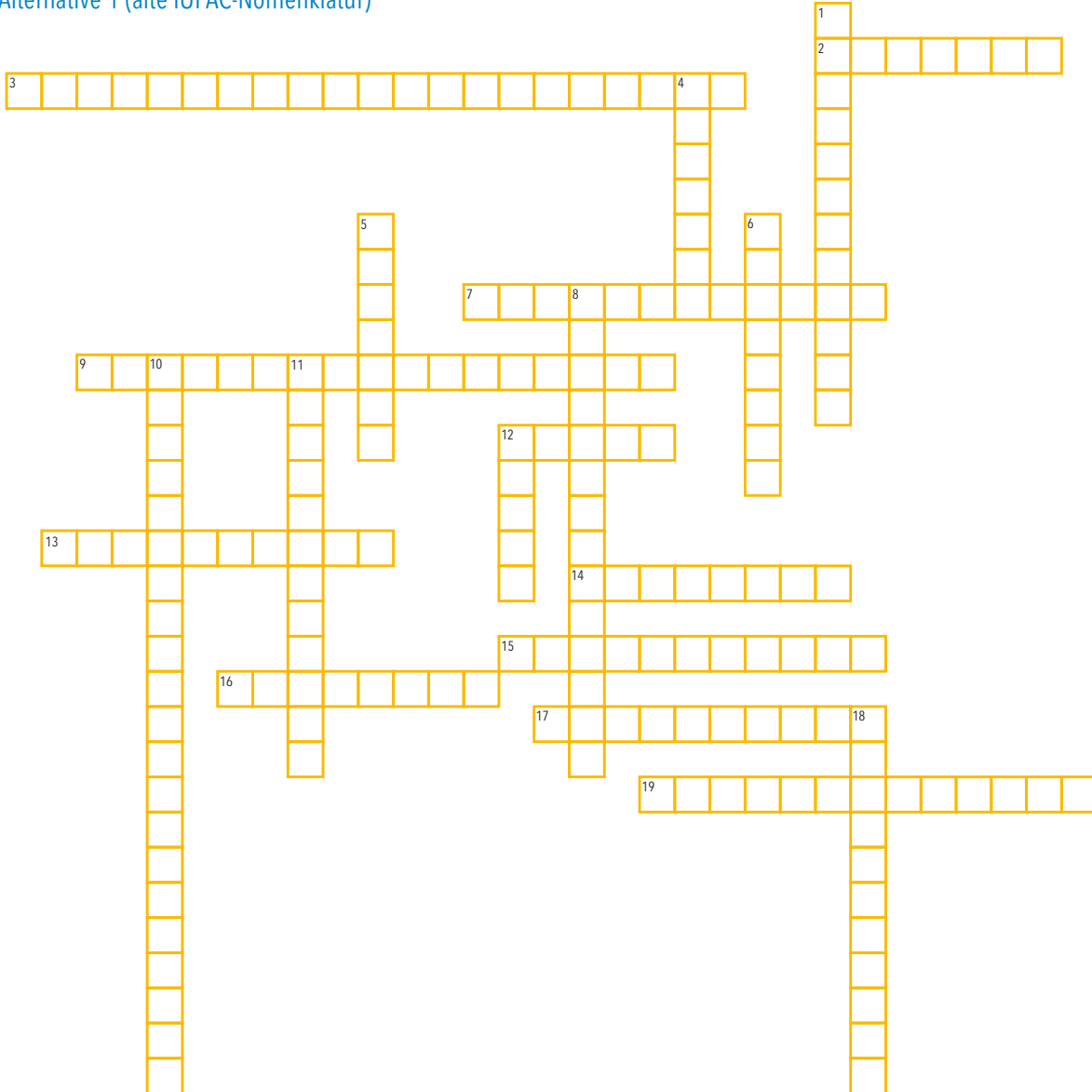
In diesem Kreuzworträtsel geht es darum, für bestimmte Trivialnamen von organischen Verbindungen den richtigen IUPAC-Namen zu finden. Dieser ist in die jeweilige Kästchenreihe einzutragen. Die vor der Formel stehende Zahl gibt die senkrechte oder waagerechte Kästchenreihe an. Der Name der Verbindung muss in eine Kästchenreihe passen, es dürfen weder leere Kästchen in einer Reihe übrig bleiben noch darf der Name abgekürzt werden. Am Ende müssen alle Kästchen ausgefüllt sein. Bindestrich, Komma oder Ziffer zählen jeweils als ein Zeichen. Umlaute sind aufzulösen (z. B. ae statt ä).

Beispiel: Methylalkohol ist der Trivialname für Methanol.

M
E
T
H
A
N
O
L

Rätsel

Alternative 1 (alte IUPAC-Nomenklatur)



Waagrecht

- 2. Ethylalkohol
- 3. Essigester
- 7. Ether
- 9. Glycerin
- 12. Ethylen
- 13. Aceton
- 14. Formaldehyd
- 15. Buttersäure
- 16. Fruchtzucker
- 17. Haushaltszucker
- 19. Ethylenglykol

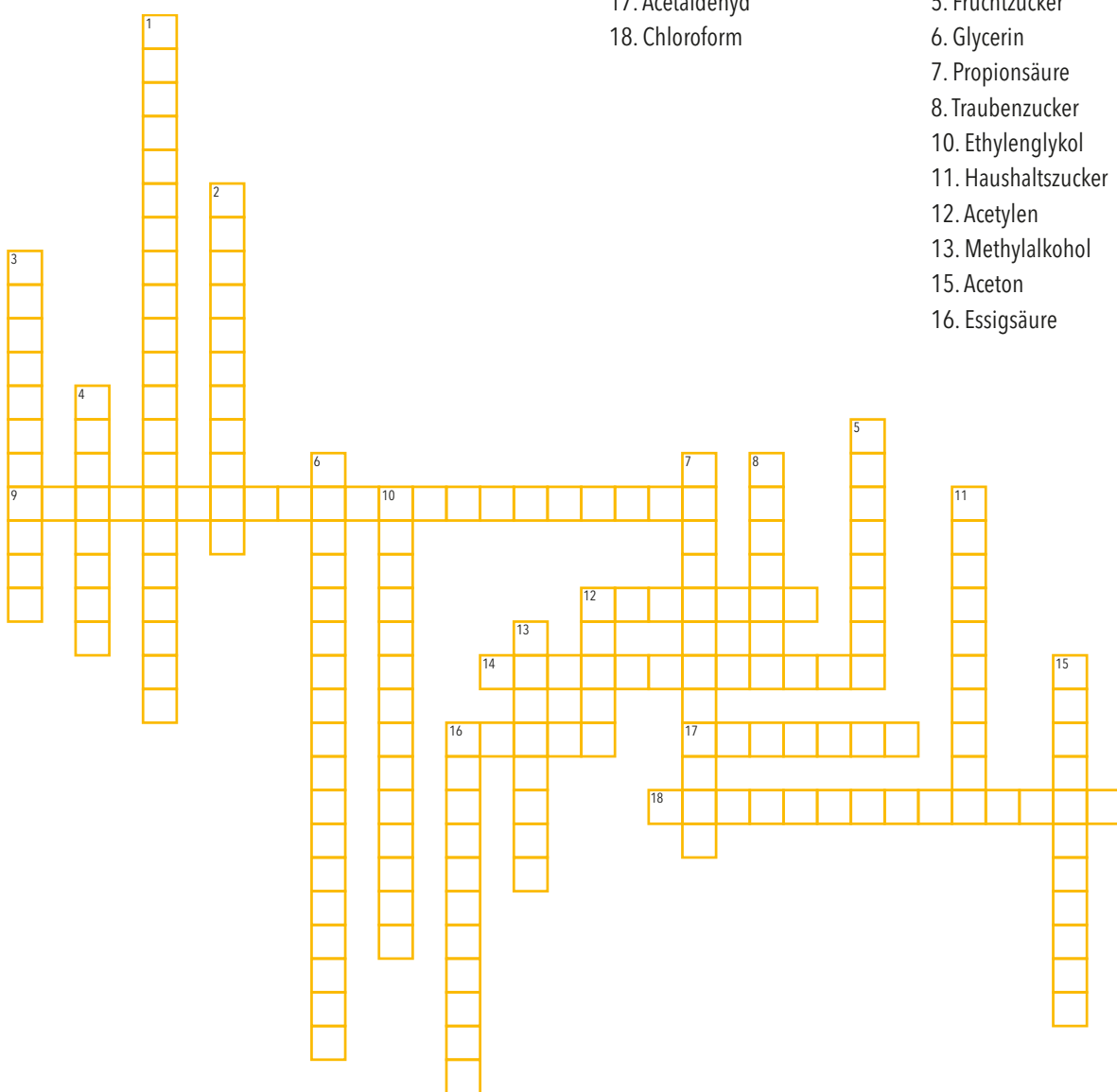
Senkrecht

- 1. Ameisensäure
- 4. Acetaldehyd
- 5. Traubenzucker
- 6. Methylalkohol
- 8. Chloroform
- 10. Milchsäure
- 11. Propionsäure
- 12. Acetylen
- 18. Essigsäure

Rätsel

Alternative 2 (neue IUPAC-Nomenklatur)

Waagrecht	Senkrecht
9. Essigester	1. Milchsäure
12. Ethylalkohol	2. Ether
14. Ameisensäure	3. Buttersäure
16. Ethylen	4. Formaldehyd
17. Acetaldehyd	5. Fruchtzucker
18. Chloroform	6. Glycerin
	7. Propionsäure
	8. Traubenzucker
	10. Ethylenglykol
	11. Haushaltszucker
	12. Acetylen
	13. Methylalkohol
	15. Aceton
	16. Essigsäure



The crossword puzzle grid consists of yellow-outlined squares. The starting points for the clues are numbered 1 through 18. The grid is oriented horizontally and vertically. The clues are: 1. Milchsäure (vertical, 10 squares), 2. Ether (vertical, 6 squares), 3. Buttersäure (vertical, 8 squares), 4. Formaldehyd (vertical, 4 squares), 5. Fruchtzucker (vertical, 6 squares), 6. Glycerin (vertical, 10 squares), 7. Propionsäure (vertical, 6 squares), 8. Traubenzucker (vertical, 6 squares), 9. Essigester (horizontal, 10 squares), 10. Ethylenglykol (horizontal, 10 squares), 11. Haushaltszucker (vertical, 6 squares), 12. Acetylen (horizontal, 6 squares), 13. Methylalkohol (horizontal, 6 squares), 14. Ameisensäure (horizontal, 6 squares), 15. Aceton (vertical, 6 squares), 16. Ethylen (horizontal, 6 squares), 17. Acetaldehyd (horizontal, 6 squares), 18. Chloroform (horizontal, 10 squares).

Rätsel

3 Suchsel

Bei einem Suchsel haben Sie zunächst einen scheinbar wahllos aufgeschriebenen Haufen Buchstaben vor sich. In diesem Haufen sind jedoch Wörter versteckt, die gesucht werden müssen. Die zu suchenden Wörter können senkrecht, waagrecht oder diagonal, sowohl vorwärts als auch rückwärts angeordnet sein. Außerdem können Buchstaben auch von mehreren Wörtern gemeinsam genutzt werden. Wenn Sie ein Wort entdeckt haben, markieren Sie dieses, wie am Beispiel gezeigt.

Sind alle Wörter gefunden, ergeben die übrig gebliebenen nicht genutzten Buchstaben aus den Zeilen eins bis zehn von oben nach unten gelesen ein zweiteiliges Lösungswort.

Beispiel: H U G HAUS A C G W

```

E E N E A F S F L C Z H E K L
L W F A M I F O E U C T R R E
L E H F A U H O C T A S E A F
O R Z M O O L K T R T B I F F
W D E N K T E B D S E N P T O
M G D L A R S Y N U B M A S T
U A A E R L H H R E U R P T R
A S R O F N F R O A N O A O A
B H H A E S E P B R T N O F K
F R S L E K R E A T S F O F E
C E H B C H E M I E D K P S V
R O Y U E F F O T S T S N U K
K S Z R E K C U Z E R D O E L
N A T U R Z L O H S P A R E T
L F V X C I L F L L A I D O L
  
```

Zu suchende Wörter:

Alkohol
Baum
Baumwolle
Chemie
Erdgas
Erdoel
Farbstoff
Faser
Fett
Holz
Kartoffel
Kohlenhydrate
Kraftstoff
Kunststoffe
Mais
Natur
Oel
Papier
Pflanze
Raps
Rohstoffe
Sonnenblume
Staerke
Zucker
Zuckerrohr
Zuckerruebe

Gewinnung von Zellstoff durch Aufschluss von Holz mit Wasserstoffperoxid und Ameisensäure

Sekundarstufe II







Einführung

Für die Herstellung von Papier wird Zellstoff benötigt. Zellstoff besteht überwiegend aus Cellulose und wird durch Aufschluss von pflanzlichem Material (in der Regel Holz) hergestellt. Die wichtigsten Bestandteile von Holz sind Cellulose (35 – 50 %), Polyosen (Hemicellulosen, 15 – 35 %) und Lignin (20 – 35 %). Weiterhin finden sich Inhaltsstoffe wie Harze, Terpene und Wachse. Ziel des Holzaufschlusses ist es, die gewünschte Cellulose von den übrigen Bestandteilen abzutrennen.

Geräte

Rückflusskühler, Zweihalsrundkolben (250 ml, NS 29, NS 14), Verlängerungsstück mit Schliff (ca. 17 cm), Quickfit (NS 14), Stockthermometer, Heizpilz, Magnetrührer, Rührfisch (ca. 2 cm), Glasstab, 2 Bechergläser (250 ml), Messzylinder (50 ml), Messpipette (5 ml), Pipettierhilfe, Korkring, Pulverrichter, Saugflasche (500 ml) mit Gummikragen, Porzellannutsche (180/70), Rundfilter (Ø 70 mm), Stativmaterial, Waage, Wägeschälchen, Haushaltsschere

Chemikalien

	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze
Ameisensäure (w = 99 - 100 %)	  	H226 H302 H314 H331 EUH071	P210 P280 P303+P361+P353 P304+P340+P310 P305+P351+P338 P403+
Wasserstoffperoxid- Lösung (w = 30 %)	 	H302 H318	P280 P305+P351+P338 P313
Schwefelsäure (w = 98 - 100 %)			P280 P301+P330+P331 P305+P351+P338 P308+P310
Kleintier-Streu			
demin. Wasser			

Sicherheitsvorschriften

Wasserstoffperoxid (C, ätzend), Ameisensäure (C, ätzend), Schwefelsäure (C, ätzend). Holzstaub ist krebserregend (TRK = 2 mg/m³), Peroxoameisensäure ist reizend. Sowohl Aufschluss als auch Vakuumfiltration unter dem Abzug durchführen.

Dauer

90 Minuten

Gewinnung von Zellstoff durch Aufschluss von Holz mit Wasserstoffperoxid und Ameisensäure

Durchführung

Man legt 5 g des Pflanzenmaterials im Rundkolben vor (Rührfisch nicht vergessen).

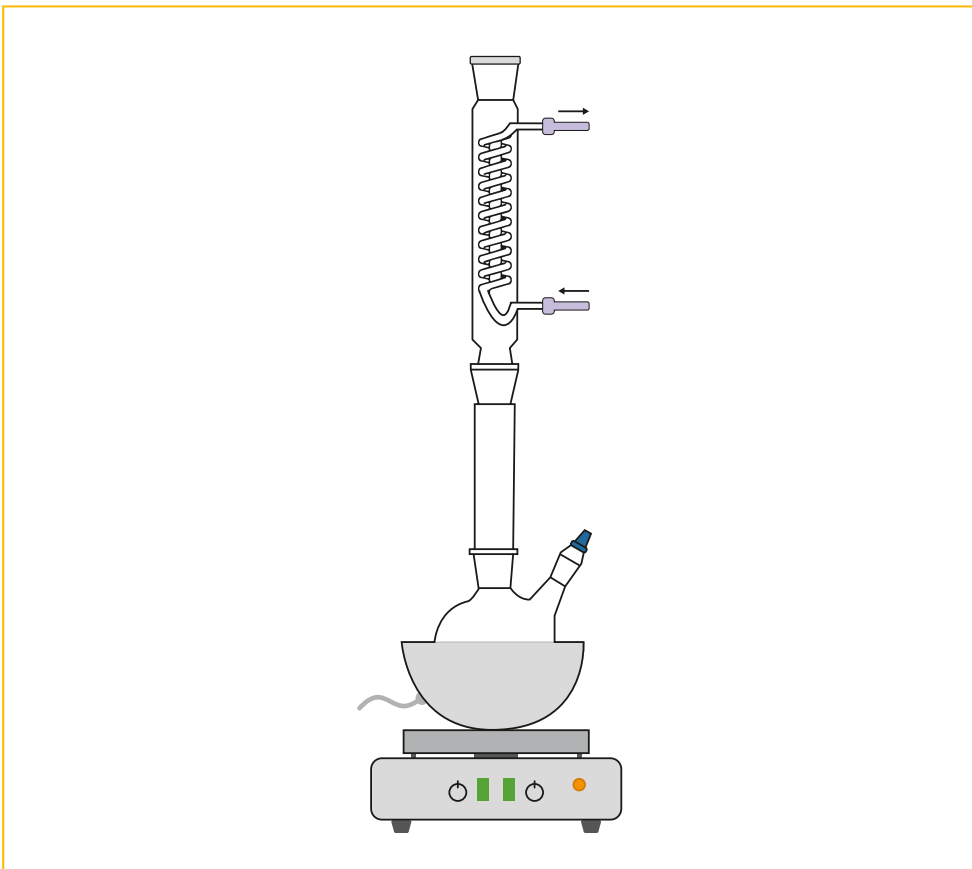
Die Aufschlusslösung wird wie folgt im Becherglas gemischt und dem Material zugesetzt:

- 38 ml Wasserstoffperoxid
- 38 ml Ameisensäure
- 3,8 ml Schwefelsäure

Das aufzuschließende Pflanzenmaterial wird in der Aufschlusslösung für ca. eine Stunde in der Siedehitze unter Rückfluss erhitzt ($TS \approx 101\text{ °C}$).

Man rührt mit einem Magnetrührer. Der Heizpilz wird dabei nur auf Heizstufe 2 betrieben, um eine Verkohlung von Material oberhalb des Flüssigkeitspegels zu vermeiden. Beim Erwärmen reagiert das Gemisch zunächst einige Minuten unter starkem Aufschäumen. Das zwischen Rundkolben und Rückflusskühler eingebaute Verlängerungsstück dient zum Aufnehmen des Schaums.

Nach Beendigung der Reaktion trennt man den erhaltenen Zellstoff sogleich mittels Vakuumfiltration („Abnutschen“) von der noch heißen Lösung ab (Abzug!). Das Produkt wird zweimal mit demin. Wasser gewaschen und anschließend an der Luft oder im Trockenschrank (bei ca. 40 °C) getrocknet.



Gewinnung von Zellstoff nach dem Acetosolv-Verfahren

Sekundarstufe II













Einführung

Im Gegensatz zu dem vorher beschriebenen Verfahren ist hierbei eine separate Bleiche zur Gewinnung von hellem Zellstoff notwendig.

Geräte

2 Rundkolben (250 ml, NS 29), Rundkolben (500 ml, NS 29), Rückflusskühler, Magnetrührer mit Heizplatte, Ölbad, Wasserbad, Thermometer, Messzylinder (100 ml), Messpipette (10 ml), Pasteurpipette, Saugflasche (250 ml) und Büchnertrichter, Destillationsvorrichtung, Vakuumexsikkator

Chemikalien

	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze
Essigsäure (w = 96 %)	 	H226 H314 H290 P210 P280 P301+P330+P331 P305+P351+P338 P308+P310	P210 P280 P301+P330+P331 P305+P351+P338 P308+P310
Salzsäure (w = 36 %)	 	H314 H335 H290	P260 P280 P303+P361+P353 P304+P340+310 P305+P351+P338
Ammoniaklösung (w = 25 %)	  	H290 H314 H335 H400	P260 P273 P280 P301+P330+P331 P303+P361+P353 P305+P351+P338
Wasserstoffperoxid- Lösung (w = 30 %)	 	H302 H318	P280 P305+P351+P338 P313
2-Propanol	 	H225 H319 H336	P210 P233 P240 P305+P351+P338 P403+P235
Kaliumhydroxid		H302 H314 H290	P280 P301+P330+P331 P305+P351+P338 P308+P310
demin. Wasser			
Kleintier-Streu			

Gewinnung von Zellstoff nach dem Acetosolv-Verfahren

Sicherheitsvorschriften

Essigsäure (C, ätzend), Salzsäure (C, ätzend), Ammoniaklösung (C, ätzend; N, umweltgefährlich), Wasserstoffperoxid (Xn, gesundheitsschädlich), 2-Propanol (F, leicht entzündlich; Xi, reizend), Kaliumhydroxid (C, ätzend), Holzstaub ist krebserregend (TRK = 2 mg/m³).

Sowohl Aufschluss als auch Vakuumfiltration unter dem Abzug durchführen.

Dauer

Aufschluss: 90 Minuten, Trocknen über Nacht

Bleiche: 30 Minuten, Trocknen über Nacht

Durchführung

Für den Aufschluss werden 5 g des Pflanzenmaterials ca. eine Stunde in einer Mischung aus 65 ml Essigsäure und 5,5 ml Salzsäure unter Rückfluss im Ölbad erhitzt. Dabei wird stark gerührt.

Nachdem der Reaktionsansatz mit einem Wasserbad auf Raumtemperatur abgekühlt wurde, trennt man den erhaltenen Zellstoff sogleich mittels Vakuumfiltration ab. Dieser Rohzellstoff wird zweimal mit je 15 ml Essigsäure gewaschen und über Nacht im Vakuumexsikkator über Kaliumhydroxid-Plätzchen getrocknet.

Vor der Bleiche wird der Filterkuchen geteilt. Die eine Hälfte des Rohzellstoffs wird in einer Mischung aus 30 ml Ammoniaklösung und 30 ml Wasserstoffperoxidlösung für 15 Minuten auf 70 bis 80 °C erhitzt. Der Ansatz neigt zum Überschaäumen. Man verwendet daher einen großen Rundkolben (500 ml) und setzt der Reaktionsmischung zur Unterdrückung der Schaumbildung etwa 5 ml 2-Propanol oder etwas Siliconschäumer zu. Sollte dennoch eine starke Schaumentwicklung zu beobachten sein, kann dies durch weitere Propanolzugabe unterdrückt werden.

Nach Beendigung der Reaktion wird abgesaugt. Der gebleichte Zellstoff wird zweimal mit je 50 ml Wasser gewaschen und wieder im Vakuumexsikkator über Kaliumhydroxid-Plätzchen getrocknet. Das erhaltene Produkt wird mit dem Rohzellstoff verglichen.

Darstellung von Vanillin aus Ligninsulfonsäure

Sekundarstufe I/II











Einführung

Vanillin ist meist bekannt als wichtigster Aromastoff der Vanille. Technisch kann Vanillin aus Eugenol, Guajacol oder Ligninsulfonsäuren hergestellt werden, wobei die letztere Variante das heute wichtigste Verfahren darstellt. Ligninsulfonsäuren sind Bestandteil der beim Holzaufschluss anfallenden Sulfitlauge. Durch Oxidation mit Luft im alkalischen Medium erhält man aus ihnen Vanillin.

Geräte

Zweihalskolben (100 ml), Rückflusskühler, Heizpilz, Magnetrührer mit Rührkern, Bechergläser (50 ml, 100 ml), Pipetten (5 ml), Uhrgläser, Scheidetrichter, pH-Meter oder Indikatorpapier

Chemikalien

	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze
Natriumhydroxid		H314 H290	P280 P301+P330+P331 P305+P351+P338 P308+P310
Kupfer(II)-sulfat	 	H302 H315 H319 H410	P273 P305+P351+P338 P302+P352
Salzsäure (w = 20%)	 	H315 H319 H335 H290	P261 P280 P305+P338+P310
n-Heptan	   	H 225, 304, 315, 336, 400, 410	P 210, 261, 273, 280.1-3, 301+310, 331, 304+340, 403+235
Vanillin		H319	P305+P351+P338
demin. Wasser			
Ligninsulfonsäure			

Darstellung von Vanillin aus Ligninsulfonsäure

Sicherheitsvorschriften

Natriumhydroxid (C, ätzend), Kupfer(II)-sulfat (Xn, gesundheitsschädlich; N, umweltgefährlich), Salzsäure (w = 20 %) (C, ätzend), n-Heptan (F, leichtentzündlich; Xn, gesundheitsschädlich; N, umweltgefährlich)

Dauer

90 Minuten

Durchführung

Zu Beginn werden zwei Lösungen hergestellt:

- ⊞ 10 g Natriumhydroxid in 20 ml demin. Wasser
(Natriumhydroxid wird vorsichtig, portionsweise dazugegeben)
- ⊞ 12,5 g Kupfer(II)-sulfat in 50 ml demin. Wasser

Beide Lösungen werden unter Rühren vereint. Man gibt noch portionsweise 5 g Ligninsulfonsäure hinzu. Das Gemisch wird für ca. eine Stunde unter Rückfluss erhitzt.

Anschließend entnimmt man 5 ml, lässt es abkühlen, verdünnt durch Zugabe von 10 ml demin. Wasser und stellt durch Zugabe von Salzsäure einen pH-Wert von 8 ein. Riechen Sie vorsichtig an der Lösung. Zur Extraktion versetzt man die Probe mit 20 ml n-Heptan und trennt durch Ausschütteln. Man lässt zehn Minuten absetzen. Die obere organische Phase wird mittels Pipette abgetrennt und auf Uhrgläser verteilt. Das n-Heptan lässt man im Abzug verdunsten. Riechen Sie wieder vorsichtig am Extrakt.

Vergasung von Holz

Sekundarstufe I/II







Einführung

Erhitzt man Holz unter Luftabschluss, erhält man ein Gemisch verschiedener Produkte (Holzkohle, Holzessig und Holzgas). Die jeweilige Zusammensetzung ist u. a. abhängig von der Holzsorte, dem Trocknungsgrad und der Erhitzungstemperatur.

Geräte

Reagenzglas (eventuell altes), U-Rohr, Becherglas (500 ml), Gaswaschflasche, gebogenes Glasrohr mit Rückschlagsicherung, Brenner, Stativmaterial

Chemikalien

	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze
Aceton	 	H225 H319 H336 EUH066	P210 P240 P305+P351+P338 P403+P233
Essigsäure		H315 H319 H290	P210 P233 P280 P302+P352 P304+P340 P308+P310 P403+P235
Methanol	  	H225 H331 H311 H301 H370	P210 P233 P280 P302+P352 P304+P340 P308+P310 P403+P235

Stoffe ohne Einstufung als Gefahrstoff:

Hartholzstaub ist krebserregend, entstehende Gase: Kohlenstoffmonoxid (KMR-Kat 1; extrem entzündbar, giftig, organschädigend), Methan (extrem entzündbar), Wasserstoff (extrem entzündbar), Ethen (extrem entzündbar, betäubend)

Vergasung von Holz

Sicherheitsvorschriften

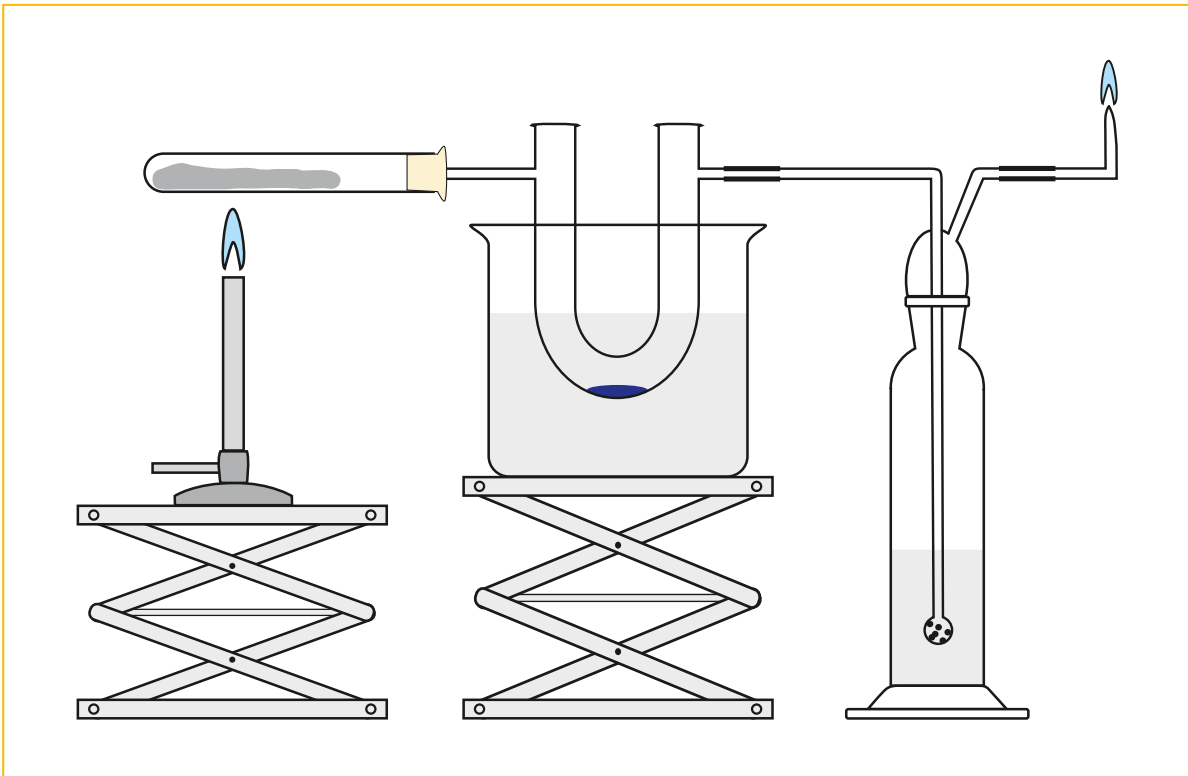
Unter dem Abzug arbeiten.

Durchführung

Ein Reagenzglas wird etwa halb voll mit Holzspänen gefüllt und mit dem Brenner kräftig erhitzt.

Das dabei entstehende Gas wird durch eine Kühlfalle geleitet (U-Rohr in Eiswasserbad).

Das entwickelte Gas wird entzündet.



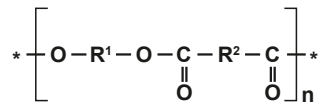
Polyester auf Basis von Sorbit

Sekundarstufe I/II

Einführung

Polyester sind eine Gruppe von Kunststoffen, die durch Polykondensation (unter Abspaltung von Wasser) aus Diolen und Dicarbonsäuren entstehen. Setzt man mehrwertige Alkohole und Carbonsäuren ein, erhält man verzweigte und vernetzte Polyester.

Allgemeine Formel eines verzweigten Polyesters





Polyester können auch auf Basis der Tricarbonsäure Citronensäure und des sechswertigen Sorbits hergestellt werden. Statt einer Carbonsäure kann auch deren reaktiveres Anhydrid verwendet werden (hier Phthalsäureanhydrid).

Geräte

2 Reagenzgläser, Silikonölbad (200 °C), Filterpapier, Bunsenbrenner, Vierfuß mit Keramikplatte, Thermometer (oder Magnetrührer mit Thermofühler), Pulvertrichter, Waage mit Wägeschälchen.

Chemikalien

	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze
Phthalsäureanhydrid		H302 H335 H315 H318 H334 H317	P280 P302+P352 P304+P340 P305+P351+P338 P313
Citronensäure Wasserfrei		H319	P280 P305+P351+P338 P337+P313
Sorbit			

Polyester auf Basis von Sorbit

Sicherheitsvorschriften

Phthalsäureanhydrid (Xn, gesundheitsschädlich), Citronensäure (Xi, reizend)

Dauer

30 Minuten

Durchführung

Je ein Reagenzglas befüllt man wie folgt:

- ⊞ 2,4 g Sorbit und 3 g Phthalsäureanhydrid
- ⊞ 2,6 g Sorbit und 3 g Citronensäure

In jedes der Reagenzgläser führt man einen Pfropf aus gerolltem Filterpapier so ein, dass er etwa 2 bis 3 cm über dem Ansatz verbleibt. Dann erhitzt man sie im Ölbad für etwa 20 Minuten auf 200 °C. Während des Erhitzens wird mehrfach geschüttelt.

EXPERIMENTE KOHLENHYDRATE - 6

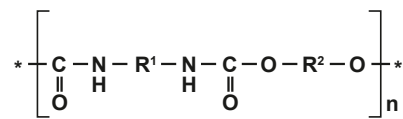
Darstellung eines Polyurethan-Schaums auf der Basis von Glucose, Saccharose oder Sorbit

Sekundarstufe II

Einführung

Polyurethane entstehen durch Polyaddition von zwei- und höherwertigen Alkoholen mit Isocyanaten. Die Anwendungsgebiete sind vielfältig: Es lassen sich sowohl Weichschäume (z. B. Matratzen) als auch Hartschäume (z. B. Wärmedämmplatten) herstellen.

Allgemeine Formel eines Polyurethans








Im folgenden Versuch wird als Isocyanat-Komponente Diphenylmethan-4,4'-diisocyanat eingesetzt. Als Polyol-Komponenten dienen Kohlenhydrate, die pro Molekül mehrere Hydroxygruppen besitzen (z. B. Glucose, Saccharose oder Sorbit).

Geräte

Reagenzglas, Demonstrationsreagenzglas, Glasplatte, Messzylinder (20 ml), Einmalpipette, Waage mit Wägeschälchen, Pulvertrichter, Brenner, Stativmaterial

Chemikalien

	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze
N,N-Dimethylformamid DMF	  	H360D H226 H332 H312 H319	P201 P210 P302+P352 P304+P340 P305+P351+P338 P308+P313
Diphenylmethan-4,4'-diisocyanat MDI	 	H351 H332 H373 H319 H335 H315 H334 H317	P261 P280 P284 P304+P340 P312 P305+P351+P338 P342+P311
D-Glucose			
Saccharose			
Sorbit			

Darstellung eines Polyurethan-Schaums auf der Basis von Glucose, Saccharose oder Sorbit

Sicherheitsvorschriften

N,N-Dimethylformamid (T, giftig), Diphenylmethan-4,4'-diisocyanat (Xn, gesundheitsschädlich)

Dauer

15 Minuten, Filmbildung über Nacht

Durchführung

Unter Erwärmen werden in einem Reagenzglas 2 g Glucose oder 2 g Saccharose oder 1 g Sorbit in 6 ml Dimethylformamid gelöst. Man lässt es kurz abkühlen. Zu der Lösung werden dann 5 g Diphenylmethan-4,4'-diisocyanat gegeben und durch Umschütteln gelöst. Etwa die Hälfte dieser Lösung wird auf eine Glasplatte gegossen. Der Rest wird noch einmal für ca. zwei Minuten zum Sieden erhitzt.

Darstellung eines Biokunststoffs

Sekundarstufe I/II

Einführung

Darstellung eines Biokunststoffes

Geräte

Waffeleisen, Küchenwaage, Becherglas 100 ml, Becherglas 50 ml, Glasstab

Chemikalien

	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze
Natriumalginat			
Speisestärke			
Wasser			
Backpulver			

Sicherheitsvorschriften

Das Produkt und das Waffeleisen sind heiß (Verbrennungsgefahr).

Dauer

15 Minuten

Durchführung

In 40 ml Wasser wird unter Rühren 40 g Speisestärke bis zur gleichmäßigen Verteilung gegeben. Anschließend werden zu dem Gemisch unter Rühren 1 g Backpulver, gefolgt von 1,5 g Natriumalginat, gegeben. Zuletzt wird die Masse (mehrere Portionen, nicht alles auf einmal!) in das Waffeleisen gegeben und ein bis zwei Minuten gebacken. Noch warm wird der entstandene Kunststoff zum Auskühlen aus dem Waffeleisen genommen und kann nach Belieben in jede Form gedrückt werden.

Herstellen eines Kunststoffs aus Milchsäure

Sekundarstufe I/II

Einführung




Milchsäure wird technisch durch Vergärung von Milch oder Molke mithilfe besonderer Lactobazillen hergestellt. Die Verwendung ist vielfältig und reicht vom Einsatz als Säuerungsmittel und Konservierungsmittel bis zum biologisch abbaubaren Kunststoff (Polylactid). Dieses auch als Polymilchsäure bezeichnete thermoplastische Polymer eignet sich sowohl für Verpackungen als auch für chirurgisches Nahtmaterial, das vom Körper nach einiger Zeit resorbiert wird.

Für die Herstellung von Polymilchsäure lässt man Milchsäure (2-Hydroxypropansäure) unter Wasserabspaltung zunächst zu einem Oligomer reagieren. Bei Zugabe eines geeigneten Katalysators ist auch eine Weiterreaktion zum Polymer möglich. Im folgenden Versuch wird sich aus Zeitgründen auf die Darstellung des Oligomers beschränkt.

Geräte

Reagenzgläser, Reagenzglashalter, Bunsenbrenner, Kunststoffschälchen, Siedesteinchen, Mikrospatel, Glasstab

Chemikalien

	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze
Zinn(II)-chlorid		H290 H302 H332 H314 H317 H335 H373 H412	P280 P304+P340 P301+P330+P331 P303+P361+P353 P305+P351+P338
DL-Milchsäure		H318 H315	P280 P305+P351+P338
Kupfer(II)-sulfat		H302 H315 H319 H410	P273 P305+P351+P338 P302+P352

Sicherheitsvorschriften

Zinn(II)-chlorid (Xn, gesundheitsschädlich), Milchsäure (Xi, reizend)

Dauer

20 Minuten

Durchführung

In ein Reagenzglas werden 5 ml Milchsäure, eine Mikrospatelspitze Zinn(II)-chlorid-Kristalle und ein Siedesteinchen gegeben. Es wird für ca. zehn Minuten unter Schütteln kräftig erhitzt (Vorsicht vor Siedeverzügen). Ein Kupfersulfatpapier wird in den entweichenden Dampf gehalten. Bei Einsetzen einer orangebraunen Färbung wird die noch heiße, flüssige Lösung in ein Kunststoffschälchen gegossen. Nach etwa einer halben bis einer Minute lassen sich aus der Lösung mit dem Glasstab Fäden ziehen.

Herstellen einer Folie aus Chitosan

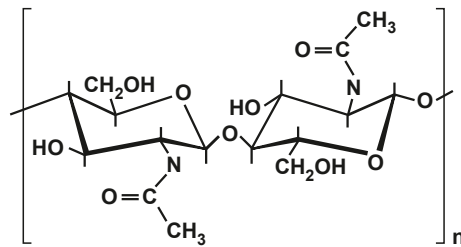
Sekundarstufe I/II

Einführung

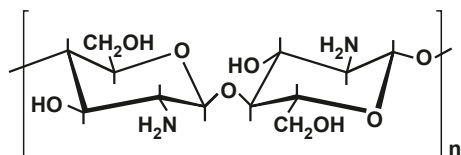
Chitin ist ein Polysaccharid und eng mit Cellulose verwandt (mit 2-Acetamido- anstelle der 2-Hydroxy-Gruppe). Chitin ist Hauptbestandteil des Exoskeletts z. B. von Krebsen und der Zellwand von Pilzen. Unterzieht man Chitin einer alkalischen Hydrolyse, so entsteht Chitosan, das am 2. C-Atom eine primäre Aminogruppe trägt.

Chitosan hat als Makromolekül (ähnlich wie Stärke) auch filmbildende Eigenschaften. Diese kann man zur Herstellung von transparenten Folien nutzen. Dazu ist es notwendig, das Makromolekül zu lösen und dann das Lösemittel auf einer ebenen Fläche verdunsten zu lassen. Es bleibt ein flexibler, nahezu reißfester und transparenter Film zurück.

Strukturformel von Chitin



Strukturformel von Chitosan




Geräte

Becherglas (250 ml), Magnetrührer mit Heizplatte, glatte Kunststoffplatte (optimale Größe ca. 30 x 30 cm)

Herstellen einer Folie aus Chitosan

Chemikalien

	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze
Essigsäure		H290 H315 H319	P280 P362 P332+P313 P337+P313
Chitosan			

Sicherheitsvorschriften

Essigsäure (C, ätzend)

Dauer

30 Minuten

Durchführung

4 g Chitosan werden in 200 ml Essigsäure unter ständigem Rühren und leichtem Erwärmen gelöst. Nach Abkühlen der Lösung gießt man sie auf eine Kunststoffplatte. Die leicht viskose Lösung sollte nicht glattgestrichen werden. Man lässt das Lösemittel über Nacht im Abzug verdunsten.

Untersuchung der Komplexbildungseigenschaften von Chitosan

Sekundarstufe I/II


Einführung

Chitosan besitzt am zweiten C-Atom jeder Zuckereinheit eine Aminogruppe. Diese eignen sich wegen der freien Elektronenpaare bekanntlich hervorragend zur Ausbildung von Bindungen zu Kationen. Das Ammoniakmolekül selbst ist z. B. ein Ligand, der mit Kupfer den stabilen Tetramminkomplex, mit Silber den Diamminkomplex bildet. Analog kann auch Chitosan Kationen komplexieren, was im folgenden Versuch am Beispiel von Kupfer(II)-Ionen demonstriert werden soll.

Geräte

Säule (Höhe 25 cm, Durchmesser 2 cm), Bechergläser (100 ml, 250 ml), Messzylinder (100 ml)

Chemikalien

	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze
Kupfer(II)-sulfat-Lsg. (c = 0,1 mol/l)		H412	P273
Schwefelsäure (c = 2 mol/l)		H290 H314	P280 P301+P330+P331 P305+P351+P338 P308+P310
Chitosan (Flocken)			
demin. Wasser			

Sicherheitsvorschriften

Kupfersulfat (Xn, gesundheitsschädlich; N, umweltgefährlich), Schwefelsäure (C, ätzend)

Dauer

45 Minuten

Durchführung

Die Säule wird etwa 15 bis 20 cm hoch mit Chitosanflocken gefüllt. Dann wird mit demin. Wasser aufgefüllt, in dem man die Flocken fünf Minuten quellen lässt. Anschließend gibt man nach und nach 100 ml Kupfersulfatlösung in die Säule und spült zum Schluss noch mit etwa 50 ml Wasser nach.

Zu Demonstrationszwecken können die Kupferionen mit Schwefelsäure wieder herausgelöst (eluiert) werden.

Darstellung von Ethen aus Ethanol (Schülerexperiment)

Sekundarstufe II



Einführung

Ethen (Ethylen) wird heute durch Cracken von Erdöl oder den gasförmigen Fraktionen bei der Erdöldestillation hergestellt. Es wird z. B. benötigt für die Produktion des Kunststoffes Polyethylen (PE). Da Ethanol heute in großer Menge durch Gärung aus Biomasse gewonnen wird, ist die Dehydratisierung von Ethanol zur Gewinnung von Ethen eine alternative Variante zur petrostämmigen Produktionsweise. Eine besonders elegante Methode ist dabei die Wasserabspaltung an Siliziumdioxid/Aluminiumoxid-Mischkatalysatoren, die als Crackkatalysatoren in der Erdölchemie Verwendung finden.

Geräte

2 Duran-Reagenzgläser (Ø 30 mm) mit durchbohrtem Stopfen und Gasometer, Siedesteine, Schlauchverbinder, Pasteurpipette mit Eisenwolle als Gasableitungsrohr aus dem Gasometer, Bunsenbrenner

Chemikalien

	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze
Ethanol		H225 H319	P280 P301+P330+P331 P305+P351+ P338+ P309+P310
Perlkatalysator (Al ₂ O ₃ / SiO ₂ - Mischkatalysator)			P260
Eisenwolle			
Ethen		H220 H336	P210 P260 P304+P340 P315 P377 P381

Sicherheitsvorschriften

Ethen ist leichtentzündlich, daher ist die Apparatur auf Dichtigkeit zu prüfen.

Dauer

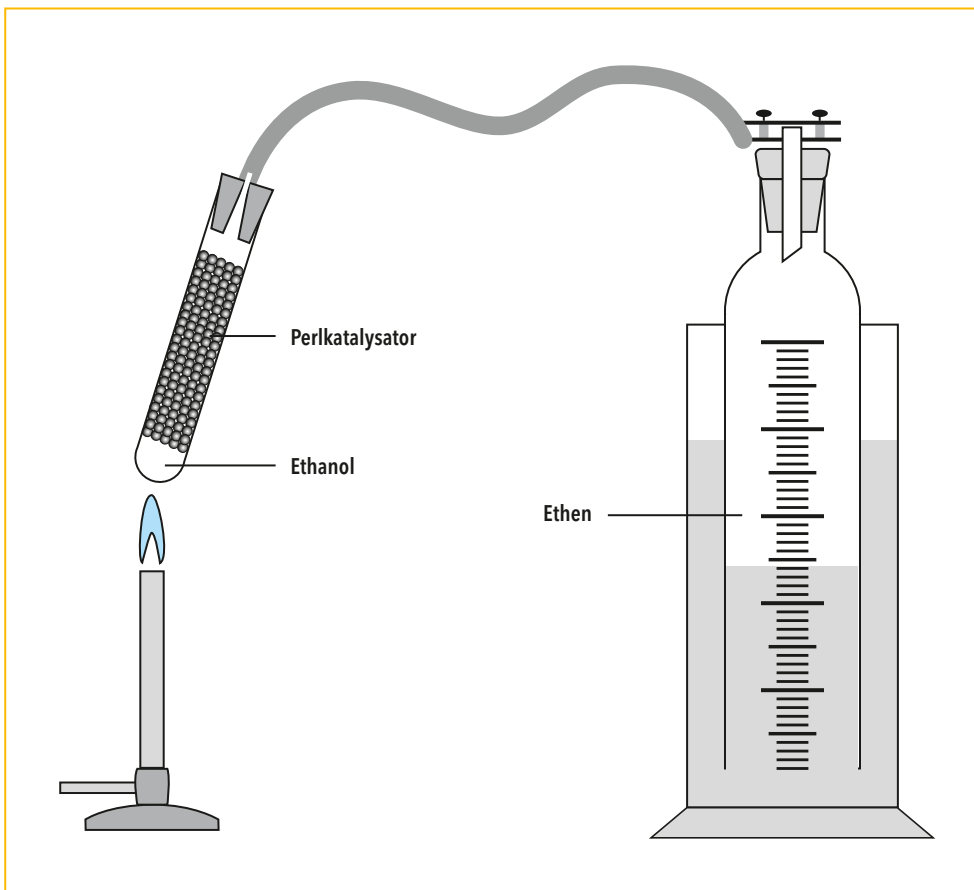
20 Minuten

Darstellung von Ethen aus Ethanol (Schülerexperiment)

Durchführung

Der Perlkatalysator wird vor dem Einsatz durch Erhitzen im Reagenzglas entwässert. Nun baut man die Apparatur wie in der Abbildung dargestellt auf. In ein weiteres Reagenzglas werden nun 10 ml Ethanol gegeben. Anschließend füllt man das Reagenzglas mit dem getrockneten Perlkatalysator bis ca. 3 cm unter der Öffnung auf und verbindet es mit der Apparatur. Nun wird zunächst der Perlkatalysator kräftig erhitzt und schließlich das Ethanol vorsichtig zum Sieden gebracht. Nachdem ca. 200 ml des entstehenden Gases zwecks Verdrängung der noch vorhandenen Luft verworfen wurden, wird weiteres Gas im Gasometer aufgefangen. Ein Teil des schließlich erhaltenen Gases wird abgepackelt.

Hinweis: Auf den Nachweis der Doppelbindung durch Reaktion des Ethens mit Bromwasser wird aus Sicherheitsgründen verzichtet.



Darstellung von Ethen aus Ethanol (Demonstrationsexperiment!)

Sekundarstufe II




Einführung

Ethen (Ethylen) wird heute durch Cracken von Erdöl oder den gasförmigen Fraktionen bei der Erdöldestillation hergestellt. Es wird z. B. benötigt für die Produktion des Kunststoffes Polyethylen (PE). Da Ethanol heute in großer Menge durch Gärung aus Biomasse gewonnen wird, ist die Dehydratisierung von Ethanol zur Gewinnung von Ethen eine alternative Variante zur petrostämmigen Produktionsweise. Eine besonders elegante Methode ist dabei die Wasserabspaltung an Siliziumdioxid/Aluminiumoxid-Mischkatalysatoren, die als Crackkatalysatoren in der Erdölchemie Verwendung finden.

Geräte

Saugrohr mit durchbohrtem Stopfen, Glashahn, Quarz-Reaktionsrohr, Ø 15 mm, 20 cm lang, mit passenden durchbohrten Stopfen, Gasometer, Siedesteine, Schlauchverbinder, Pasteurpipette mit Eisenwolle als Gasableitungsrohr aus dem Gasometer, 2 Gasbrenner, Quarzwolle.

Chemikalien

	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze
Ethanol		H225 H319	P280 P301+P330+P331 P305+P351+P338 +P309+P310
Perlkatalysator (Al ₂ O ₃ /SiO ₂ -Mischkatalysator)			P260
Eisenwolle			
Ethen		H220 H336	P210 P260 P304+P340 P315 P377 P381
Stickstoff		H280	P403

Sicherheitsvorschriften

Ethen ist leichtentzündlich, daher ist die Apparatur auf Dichtigkeit zu prüfen.

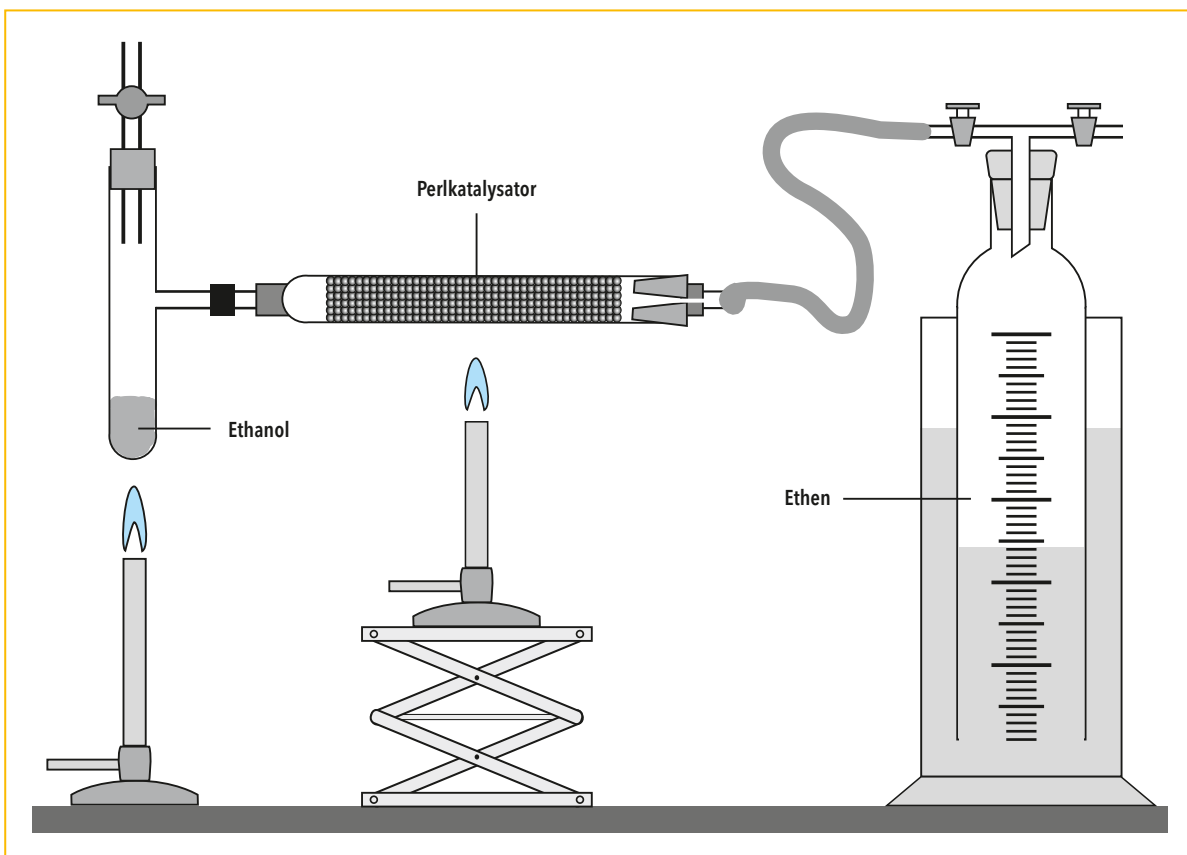
Dauer

30 Minuten

Darstellung von Ethen aus Ethanol (Demonstrationsexperiment!)

Durchführung

Man füllt den Perlkatalysator ins Reaktionsrohr, dichtet beide Seiten mit Quarzwolle ab und erhitzt das Rohr unter Durchleitung mit Stickstoff oder Luft zur Trocknung des Katalysators. Die Apparatur wird wie in der Abbildung dargestellt aufgebaut. 15 ml Ethanol und einige Siedesteine werden ins Saugrohr gegeben und die Apparatur gut mit Stickstoff gespült. Nun erhitzt man den Perlkatalysator kräftig und bringt anschließend das Ethanol zum Sieden. Nachdem man die ersten 200–300 ml des entstehenden Gases zwecks Verdrängung des Stickstoffs verworfen hat, wird weiteres Gas im Gasometer aufgefangen. Ein Teil des schließlich erhaltenen Gases wird abgefackelt.



Gewinnung von Sojaöl aus Sojaschrot

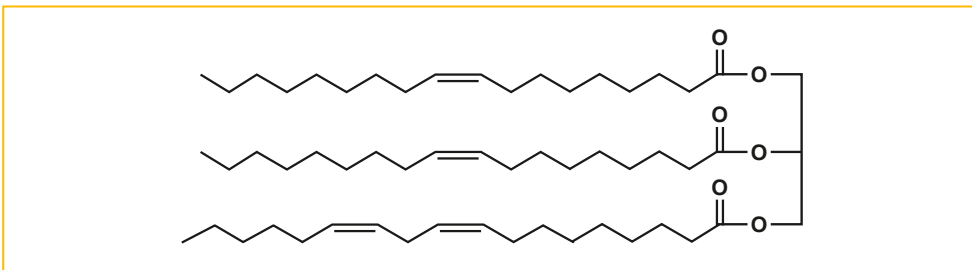
Sekundarstufe I/II

Einführung

Die Sojabohne gehört zu den Hülsenfrüchtlern – wie die bei uns bekannte Gartenbohne oder Erbse. Sojabohnen wurden schon vor Tausenden von Jahren in China aufgrund ihres hohen Gehaltes an Fetten (ca. 18 %) und Eiweißen (ca. 37 %) angebaut.

Das Sojaöl weist eine gelbliche bis bräunliche Farbe auf. Der Anteil an mehrfach ungesättigten Fettsäuren liegt (bezogen auf die gesamten Fettsäuren) bei etwa 55–65 %. Industriell wird das Sojaöl mit Hilfe von Hexan aus geschroteten Sojabohnen extrahiert. Das Lösemittel wird anschließend mittels Vakuumdestillation zurückgewonnen. Der Großteil des Sojaöls wird für die Herstellung von Nahrungsmitteln benötigt (z. B. Margarine). In diesem Experiment wird Sojaöl mit Petrolether aus Sojaschrot extrahiert.

Vereinfachte Darstellung eines Sojamoleküls (mit einfach und mehrfach ungesättigten Fettsäurenestern)




Geräte

Heizmagnetrührer mit Rührkern, Kristallisationsschale als Wasserbad, Rundkolben (250 ml), Glasrichter, Pulvertrichter, Löffel, Spatel, Wägeschälchen, Stativmaterial, Hebebühne, Korkringe, 2 Schließklammern (NS 29), 2 Schließklammern (NS 14,5), Becherglas (100 ml), Liebigkühler, Claisenaufsatz, Vakuumvorstoß, Rundkolben (100 ml), Thermometer, Stopfen (NS 14,5), Stabthermometer, Faltenfilter, Messzylinder (100 ml), Waage, Siedesteine, weißes Papier

Gewinnung von Sojaöl aus Sojaschrot

Chemikalien

	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze
Petrolether (Benzin, Siedebereich 50 – 70 °C)		H224 H304 H315 H336 H411	P210 P301+P310 P331 P370+P378c P403+P235
Natriumsulfat (wasserfrei)			
Sojaschrot (Reformhaus)			

Sicherheitsvorschriften

Petrolether (F, leichtentzündlich; Xn, gesundheitsschädlich; N, umweltgefährlich).

Das gewonnene Öl ist nicht zum Verzehr geeignet.

Dauer

30 Minuten

Durchführung

In einem Rundkolben werden 50 g Sojaschrot und 3 g Natriumsulfat mit etwa 100 ml Petrolether vermischt und 15 Minuten bei Raumtemperatur gerührt oder geschüttelt. Anschließend wird filtriert und das Lösemittel abgedampft.

Mit dem Produkt kann die Fettfleckprobe durchgeführt werden. Geben Sie hierzu einige Tropfen des Öls auf ein Blatt Papier.

Epoxidation von Sojaöl

Sekundarstufe II






Einführung

Sojaöl enthält etwa zur Hälfte ungesättigte Fettsäuren. Die dort vorhandenen reaktionsfreudigen C-C-Doppelbindungen können epoxidiert werden. Das übliche industrielle Verfahren zur Epoxidation erfolgt „in situ“ aus Carbonsäuren (z. B. Ameisensäure) und Wasserstoffperoxid (Peroxoameisensäure-Verfahren). „In situ“ besagt, dass eine (meist reaktive) Verbindung im gleichen Reaktionsgefäß hergestellt und weiterverwendet wird.

Geräte

2 Rundkolben (250 ml), 2 Rundkolben (100 ml), Tropftrichter (50 ml), Einwegspritzen (10 ml; 0,1 ml), Messzylinder (50 ml), Scheidetrichter (250 ml), Becherglas (250 ml), 3 Bechergläser (50 ml), Magnetrührer mit Heizplatte und Kontaktthermometer, Wasserbad (ca. 500 ml), Filtriervorrichtung, Stativmaterial, Destillationsvorrichtung aus Versuch 1

Chemikalien

	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze
Ameisensäure (w = 99 %)		H226 H302 H314 H331 EUH071	P210 P280 P303+P361+P353 P304+P340+P310 P305+P351+P338 P403
Wasserstoffperoxid- Lösung (w = 30 %)		H302 H318	P280 P305+P351+P338 P313
ortho-Phosphorsäure (w = 85 %)		H290 H314	P280 P301+P330+P331 P309+P310 P305+P351+P338
Natronlauge (w = 30 %)		H290 H314	P280 P301+P330+P331 P309+P310 P305+P351+P338
n-Heptan		H 225, 304, 315, 336, 400, 410	
demin. Wasser			
Natriumsulfat (wasserfrei)			
pH-Papier			

Epoxidation von Sojaöl

Sicherheitsvorschriften

Ameisensäure (C, ätzend), Wasserstoffperoxidlösung (Xn, gesundheitsschädlich), ortho-Phosphorsäure (C, ätzend), Natronlauge (C, ätzend), n-Heptan (F, leichtentzündlich; Xn, gesundheitsschädlich; N, umweltgefährlich)

Dauer

Epoxidation (60 Minuten), Isolierung (30 Minuten)

Durchführung

Epoxidation

In einem Rundkolben mit aufgesetztem Tropftrichter werden 35 g Pflanzenöl und 7,5 ml Ameisensäure vorgelegt. Das Reaktionsgefäß wird in ein auf 70 °C temperiertes Wasserbad getaucht. Dann tropft man unter kräftigem Rühren eine Mischung von 0,05 ml (ca. 1 Tropfen) ortho-Phosphorsäure in 35 ml Wasserstoffperoxidlösung mit einer Rate von etwa einem Tropfen/Sekunde hinzu. Zur Vervollständigung der Reaktion wird der Ansatz noch 30 Minuten bei 70 °C weitergerührt.

Isolierung des epoxidierten Pflanzenöls

Nachdem der Reaktionsansatz auf Raumtemperatur abgekühlt ist, werden unter Rühren 20 ml demin. Wasser hinzugegeben. Dann neutralisiert man die enthaltenen Säuren durch Zugabe von etwa 15 ml Natronlauge. Hierbei sollte das Reaktionsgemisch ständig gerührt und mit einem Wasserbad gekühlt werden. Die Mischung wird mit 50 ml n-Heptan ausgeschüttelt und die organische Phase im Scheidetrichter abgetrennt. Man trocknet über Natriumsulfat. Anschließend wird filtriert und das Lösemittel abdestilliert. Das Produkt wird verschlossen im Kühlschrank aufbewahrt.

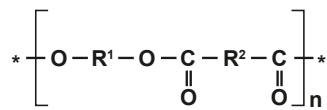
Darstellung eines Polyesters auf Basis von Sojaölepoxyd

Sekundarstufe I/II

Einführung

Polyester sind eine Gruppe von Kunststoffen, die durch Polykondensation (unter Abspaltung von Wasser) aus Diolen und Dicarbonsäuren entstehen. Setzt man mehrwertige Alkohole und Carbonsäuren ein, erhält man verzweigte und vernetzte Polyester.

Allgemeine Formel eines verzweigten Polyesters




Epoxidierte Pflanzenöle reagieren mit Dicarbonsäuren unter Ringöffnung zu Polyestern. Dabei fungiert das Epoxid als Diol- bzw. als Polyolkomponente. Statt Dicarbonsäuren können auch Dicarbonsäureanhydride eingesetzt werden. Diese sind reaktionsfähiger als die Säuren und haben den Vorteil, dass bei der Reaktion kein Wasser freigesetzt wird. Im folgenden Versuch werden das in Versuch 2 gewonnene epoxidierte Sojaöl sowie Phthalsäureanhydrid verwendet.

Geräte

Reagenzglas, Thermometer (Messbereich bis 300 °C), Silikonölbad (im 100-ml-Becherglas, hohe Form), Magnetheizplatte, Mörser mit Pistill, Holzstab, Spatel, Pulvertrichter, Stativmaterial, Waage mit Wägeschälchen, Glasstab

Chemikalien

	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze
Phthalsäureanhydrid		H302 H335 H315 H318 H334 H317	P280 P302+P352 P304+P340 P305+P351+P338 P313
Natriumacetat-Trihydrat			
epoxidiertes Sojaöl			

Darstellung eines Polyesters auf Basis von Sojaölepoxyd

Sicherheitsvorschriften

Phthalsäureanhydrid (Xn, gesundheitsschädlich)

Dauer

15 Minuten

Durchführung

In einem Reagenzglas werden 3,5 g gemörsertes Phthalsäureanhydrid, 5 g epoxidiertes Sojaöl und eine kleine Spatelspitze Natriumacetat-Trihydrat vermengt. Unter gelegentlichem Rühren mit einem Holzstab wird der Ansatz auf 180 bis 200 °C erhitzt. Eventuell im oberen Bereich des Reagenzglases kristallisierendes Phthalsäureanhydrid wird mittels Glasstabes in den Ansatz zurückgegeben.

Darstellung eines Polyurethan-Schaums auf der Basis von Ricinusöl

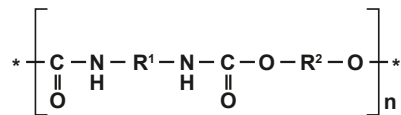
Sekundarstufe II

Einführung

Das schwach gelbe Ricinusöl wird aus den Samen der Ricinusstaude durch Kaltpressen gewonnen. Es besteht zu etwa 80 % aus dem Glycerid der Ricinolsäure (12-Hydroxyölsäure). Aufgrund der enthaltenen OH-Gruppen wird es technisch unter anderem als Polyolkomponente für die Herstellung von Polyurethan-Schäumen eingesetzt.

Polyurethane entstehen durch Polyaddition von zwei- und höherwertigen Alkoholen mit Isocyanaten. Die Anwendungsgebiete sind vielfältig: Es lassen sich sowohl Weichschäume (z. B. Matratzen) als auch Hartschäume (z. B. Wärmedämmplatten) herstellen.






Allgemeine Formel eines Polyurethans



Geräte

Reagenzglas oder Pappbecher, Reagenzglasständer, Spatel, Brenner, Glasstab, Pasteurpipette, Stativmaterial, Waage

Chemikalien

	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze
Diphenylmethan-4,4'-diisocyanat	 	H351 H332 H373 H319 H335 H315 H334 H317	P261 P280 P284 P304+P340 P312 P305+P351+P338 P342+P311
1,4-Diazabicyclo-[2,2,2]octan (DABCO)	  	H228 H302 H315 H318	P261 P280 P284 P304+P340 P312 P305+P351+P338 P342+P311
Ricinusöl			
demin. Wasser			

Darstellung eines Polyurethan-Schaums auf der Basis von Ricinusöl

Sicherheitsvorschriften

Diphenylmethan-4,4'-diisocyanat (Xn, gesundheitsschädlich), 1,4-Diazabicyclo[2,2,2]octan (Xn, gesundheitsschädlich)

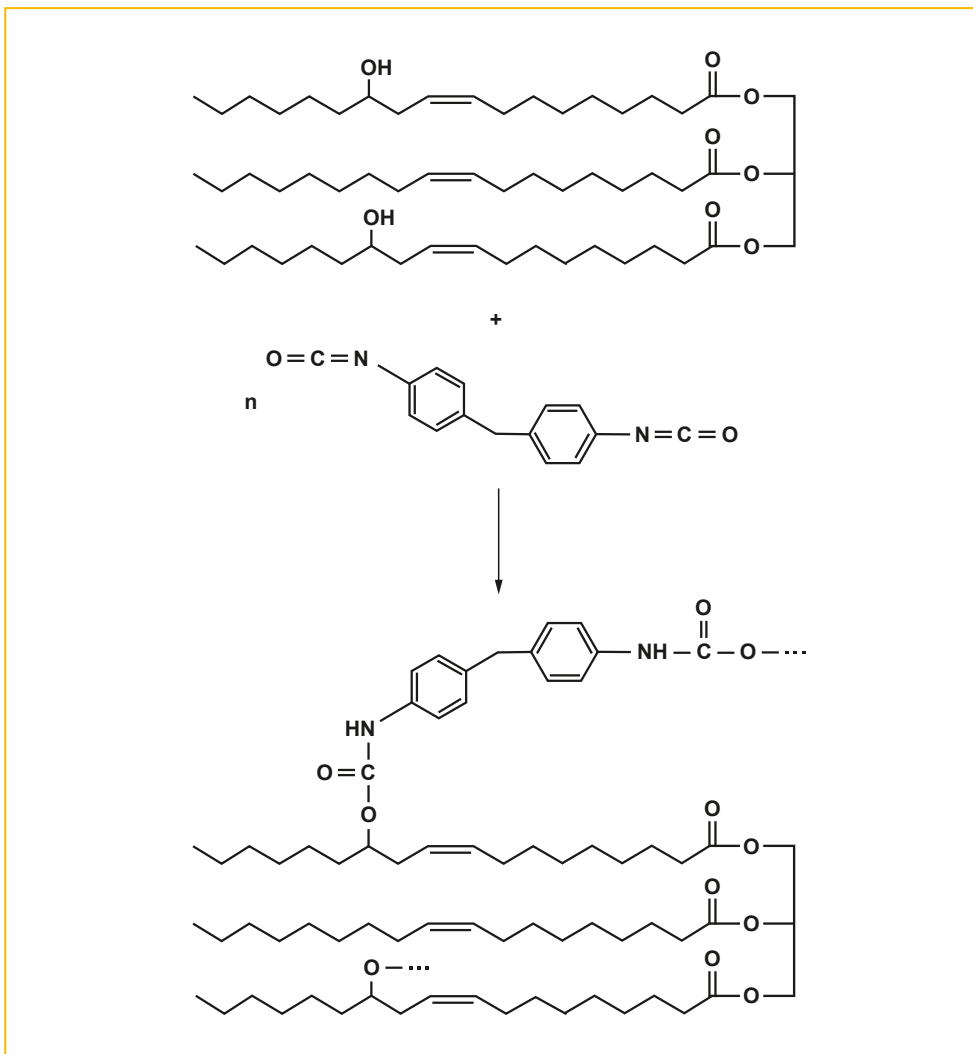
Dauer

15 Minuten

Durchführung

Ein Reagenzglas wird etwa 3 cm hoch mit Ricinusöl und anschließend zusätzlich 1,5 cm hoch mit Diphenylmethan-4,4'-diisocyanat gefüllt. Man gibt einige Kristalle DABCO und acht Tropfen Wasser zu und verrührt innig. Unter weiterem Rühren wird der Ansatz etwa 30 Sekunden lang erhitzt, bis eine Schaumbildung beginnt. Dann stellt man das Reagenzglas ab.

Schematische Darstellung der Bildung eines Polyurethans aus Ricinusöl und Diphenylmethan-4,4'-diisocyanat



Dünnschichtchromatographie von Fetten

Sekundarstufe I/II






Einführung

Die Dünnschichtchromatographie (DC) ist ein chromatographisches Trennverfahren, mit dem Proben auf ihre Zusammensetzung hin untersucht werden können. Man benötigt eine stationäre Phase (z. B. mit Kieselgel beschichtete Platte) und eine mobile Phase (Lösemittel bzw. -gemische als Laufmittel). Die Kieselgelplatten sind im vorliegenden Versuch hydrophobiert (Reversedphase DC). Als Laufmittel wird mit Paraffin gesättigte, konzentrierte Essigsäure eingesetzt. Fette bzw. Öle sind allgemein Ester des Glycerins mit drei Fettsäuren (Triglyceride). Natürliche Fette und Öle sind Mischungen unterschiedlicher Triglyceride. Eine direkte Dünnschichtchromatographie von Fetten und Ölen erlaubt keine Zuordnung einzelner Triglyceride. Dennoch lassen sich zumindest verschiedene Fette und Öle unterscheiden.

Geräte

Schnappdeckelgläser, Chromatographiekammern, dünne Kapillare (1 µl), Jodkammer (z. B. Einmachglas), Filterpapier, Sprühvorrichtung (z. B. Blumenspritze), Trockenschrank, Scheidetrichter

Chemikalien

	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze
Paraffin (dünnflüssig)		H304	P301+P310 P331
Benzin (Siedebereich)		H225 H304 H315 H336 H361f H373 H411	P210 P240 P273 P301+P330+P331 P302+P352 P314 P403+P233
Aceton		H225 H319 H336 EUH066	P210 P240 P305+P351+P338 P403+P233
Iod		H312+H332 H315 H319 H335 H372 H400	P273 P302+P352 P305+P351+P338 P314
Essigsäure (Konzentration siehe Einzelversuch)		H226 H314 H290	P210 P280 P301+P330+P331 P305+P351+P338 P308+P310
Kieselgelplatten (z. B. Polygram Sil g/UV254, Machery-Nagel)			
Zu untersuchende Substanzen			
Stärkelösung			
Öle/Fette			

Dünnschichtchromatographie von Fetten

Sicherheitsvorschriften

Aceton (F, leichtentzündlich; Xi, reizend), Benzin (F+, hochentzündlich; N, umweltgefährlich; Xn, gesundheitsschädlich), Essigsäure (C, ätzend), Jod (Xn, gesundheitsschädlich; N, umweltgefährlich), Paraffin dünnflüssig (Xn, gesundheitsschädlich)

Dauer

Vorbereitung 20 bis 30 Minuten; Durchführung ca. 60 Minuten, davon 40 Minuten Laufzeit.

Durchführung

Die Kieselgelplatte wird in eine Lösung aus Paraffin und Benzin (Mischungsverhältnis siehe Einzelversuch) getaucht und fünf Minuten horizontal gelagert getrocknet. Man löst die zu untersuchenden Substanzen in Aceton (1 Tropfen bzw. 0,05 g in 4 ml). Die Lösungen werden auf gleicher Höhe (ca. 0,5 cm vom Rand) punktförmig auf die Platte aufgetragen. Das Auftragevolumen sollte ca. 1 µL betragen.

Als Laufmittel wird Essigsäure verwendet, die mit Paraffin gesättigt wurde. Dazu gibt man Essigsäure und dünnflüssiges Paraffin in einen Scheidetrichter, schüttelt und lässt das Gemisch zur Phasentrennung etwa fünf Minuten stehen. Da Paraffin die obere Phase bildet, kann die klare, paraffingesättigte Essigsäure unten entnommen werden. Die Lösung sollte immer frisch angesetzt werden.

In die Chromatographiekammer stellt man ein Filterpapier, das mit dem Laufmittel getränkt ist. Die Chromatographie erfolgt über eine Laufhöhe von 5 bis 6 cm. Nach dem Entwickeln trocknet man die Platten zehn Minuten bei 110 °C im Trockenschrank.

Für die Detektion werden die DC-Platten für fünf bis zehn Minuten in eine Jodkammer (z. B. Einmachglas, das einen Bodensatz aus Jod enthält) gestellt. Anschließend lässt man überschüssiges Jod abdampfen, besprüht die Platte mit Stärkelösung (z. B. aus einer Blumenspritze) und lässt sie trocknen.

Die Umesterung von Fetten

Sekundarstufe I/II






Einführung

Die Umesterung mit einem Alkohol bietet weitere Möglichkeiten zur Analytik von Fetten, da die zugrundeliegenden einzelnen Fettsäuren als Methyl ester erhalten werden. Diese können im nächsten Versuch mittels Dünnschichtchromatographie bestimmt werden.

Geräte

Großes Reagenzglas, Kristallisierschale, Magnetrührer, 2 Rührkerne, Thermometer, Scheidetrichter (100 ml) oder Becherglas, Messzylinder (10 ml), Messzylinder (100 ml), Becherglas (20 ml), Spatel, Pipette mit Pipettenhütchen, Stativmaterial, Waage

Chemikalien

	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze
Methanol	  	H225 H331 H311 H301 H370	P210 P233 P280 P302+P352 P304+P340 P308+P310 P403+P235
Natriumhydroxid		H314 H290	P280 P301+P330+P331 P305+P351+P338 P308+P310
Schwefelsäure (c = 1 mol/l)		H290 H319 H315	P280 P301+P330+P331 P305+P351+P338 +P309+P310
demin. Wasser			
pH-Papier			
Öle/Fette			
demin. Wasser			
Kleintier-Streu			

Die Umesterung von Fetten

Sicherheitsvorschriften

Methanol (F, leichtentzündlich; T, giftig), Natriumhydroxid (C, ätzend), Schwefelsäure (C, ätzend)

Dauer

30 Minuten

Durchführung

0,3 g Natriumhydroxid werden in 100 ml Methanol aufgelöst. In ein Reagenzglas werden nun 4 ml der Natriummethanolatlösung gefüllt. Zu dieser gibt man 2 g Öl bzw. Fett und erhitzt das Gemisch unter Rühren in einem etwa 75 °C warmen Wasserbad.

Es bildet sich zunächst eine Emulsion. Das Ende der Reaktion ist daran zu erkennen, dass die Lösung nach zwei bis fünf Minuten klar wird (sollte dies nicht deutlich erkennbar sein, kann die Lösung mit etwas Methanol verdünnt werden).

Anschließend gibt man das Reaktionsgemisch in einen Scheidetrichter bzw. ein Becherglas, auf etwa 20 ml demin. Wasser und säuert mit Schwefelsäure an. Dabei bilden sich zwei Phasen. Die obere Phase enthält das Produkt, die untere, wässrige Phase wird verworfen.






Dünnschichtchromatographie von Fettsäuremethylestern

Sekundarstufe I/II

Geräte

Schnappdeckelgläser, Chromatographiekammern, dünne Kapillare (1 µl), Jodkammer (z. B. Einmach-glas), Filterpapier, Sprühvorrichtung (z. B. Blumenspritze), Trockenschrank, Scheidetrichter

Chemikalien

	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze
Paraffin (dünnflüssig)		H304	P301+P310 P331
Benzin (Siedebereich)		H225 H304 H315 H336 H361f H373 H411	P210 P240 P273 P301+P330+P331 P302+P352 P314 P403+P233
Aceton		H225 H319 H336 EUH066	P210 P240 P305+P351+P338 P403+P233
Iod		H312+H332 H315 H319 H335 H372 H400	P273 P302+P352 P305+P351+P338 P314
Essigsäure (90 %)		H226 H314 H290	P210 P280 P301+P330+P331 P305+P351+P338 P308+P310
Kieselgelplatten (z. B. Polygram Sil g/UV254, Machery-Nagel)			
Zu untersuchende Substanzen			
Methylester der Öle/Fette			
käufliche Referenz- substanzen			

Dünnschichtchromatographie von Fettsäuremethylestern

Sicherheitsvorschriften

Aceton (F, leichtentzündlich; Xi, reizend), Benzin (F+, hochentzündlich; N, umweltgefährlich; Xn, gesundheitsschädlich), Essigsäure (C, ätzend), Jod (Xn, gesundheitsschädlich; N, umweltgefährlich), Paraffin dünnflüssig (Xn, gesundheitsschädlich)

Dauer

Vorbereitung 30 Minuten; Durchführung 90 Minuten, davon 60 Minuten Laufzeit.

Durchführung

Die Kieselgelplatte wird in eine Lösung aus Paraffin und Benzin (Mischungsverhältnis 1:9) getaucht und fünf Minuten horizontal gelagert getrocknet. Man löst die zu untersuchenden Substanzen in Aceton (ein Tropfen bzw. 0,05 g in 4 ml). Die Lösungen werden auf gleicher Höhe (ca. 0,5 cm vom Rand) punktförmig auf die Platte aufgetragen. Das Auftragevolumen sollte ca. 1 µL betragen.

Als Laufmittel wird Essigsäure verwendet, die mit Paraffin gesättigt wurde. Dazu gibt man Essigsäure und dünnflüssiges Paraffin in einen Scheidetrichter, schüttelt und lässt das Gemisch zur Phasentrennung etwa fünf Minuten stehen. Da Paraffin die obere Phase bildet, kann die klare, paraffingesättigte Essigsäure unten entnommen werden. Die Lösung sollte immer frisch angesetzt werden.

In die Chromatographiekammer stellt man ein Filterpapier, das mit dem Laufmittel getränkt ist. Die Chromatographie erfolgt über eine Laufhöhe von 5 bis 6 cm. Nach dem Entwickeln trocknet man die Platten zehn Minuten bei 110 °C im Trockenschrank.

Für die Detektion werden die DC-Platten für fünf bis zehn Minuten in eine Jodkammer (z. B. Einmachglas, das einen Bodensatz aus Jod enthält) gestellt. Anschließend lässt man überschüssiges Jod abdampfen, besprüht die Platte mit Stärkelösung (z. B. aus einer Blumenspritze) und lässt sie trocknen.