

FCI
FONDS DER
CHEMISCHEN
INDUSTRIE

Unterrichtsmaterial Chiralität

DIE WELT IM SPIEGEL

Kennen Sie die Unterrichtsförderung des Fonds? Mit ihr soll der experimentelle Chemieunterricht gestärkt werden. Bis zu 5.000 Euro können allgemeinbildende Schulen erhalten, an denen Chemie unterrichtet wird. Auch für berufsbildende Schulen, die das Fach Chemie bzw. chemieaffine Lernfelder anbieten, ist die Unterrichtsförderung offen. Der experimentelle Sachunterricht an Grundschulen kann ebenfalls durch die Unterrichtsförderung gestärkt werden. Mit dem Geld können Chemie- bzw. Sachunter-

richtslehrkräfte die Dinge anschaffen, die sie brauchen, um einen anschaulichen und spannenden experimentellen Unterricht zu gestalten.

[Unterrichtsförderung | FCI](#) Besuchen Sie uns im Internet unter: www.vci.de/fonds und senden Sie uns Ihre Fragen und Anmerkungen per Mail: fonds@vci.de

Arbeitsblätter	Thema	Niveau	Kapitel
1	Recherche von Beispielen aus Natur und Technik	SEK I / SEK II	2.
2	Drehspiegelachse	SEK II	2.1
3	Chirale Zentren in Beispielmolekülen finden	SEK II	2.1
4	Enantiomere, Diastereomere, Konformere	SEK II	2.2
5	Recherche zu Cinchonidin und weiteren industriell relevanten chiralen Verbindungen	SEK II	3.
6	Recherche zur Substanz Carvon	SEK II	3.
7	Enantioselektive Synthese	SEK II	4.2
8	Zur Forschung über Chiralität	SEK II	7.3

Experiment	Thema	Niveau	Kapitel
1	Messung der optischen Aktivität	SEK II	6.



Die Liste der Arbeitsblätter, VR-Animationen und das Experiment sind verlinkt. Klicken Sie auf den gewünschten Inhalt, und Sie gelangen direkt dorthin. Möchten Sie wieder zurück, klicken Sie rechts oben auf das Home-Icon.

INHALTSVERZEICHNIS

1.	DIDAKTISCHES VORWORT	4
2.	CHIRALITÄT – DIE WELT IM SPIEGEL	6
2.1	Chiralität und Achiralität	7
2.2	Konformere und Enantiomere	9
2.3	Beispiele für chirale Moleküle	11
3.	VORKOMMEN UND BEDEUTUNG VON CHIRALITÄT	13
4.	KONTROLLE DER CHIRALITÄT	15
4.1	Synthese	15
4.2	Vorteile und Herausforderungen der Trennverfahren	17
5.	VERSCHIEDENE FORMEN VON LICHT: LINEAR POLARISIERTES LICHT UND LASERLICHT	18
6.	OPTISCHE AKTIVITÄT UND CHIRALITÄT	21
6.1	Anwendungen in der Chemie und Pharmazie	21
6.2.	Zirkulardichroismus – eine weitere Art der Interaktion chiraler Moleküle mit Licht	21
7.	AKTUELLE FORSCHUNG IM BEREICH CHIRALITÄT	23
7.1	Chiralität durch Laserlicht erkennen	23
7.2	Enantiomere durch Energie umwandeln und anreichern	23
7.3	Mit der Coulomb-Explosion chirale Moleküle aus achiralen Molekülen erzeugen	24
8.	AUSBLICK	25
9.	ÜBERSICHTSPLAN DER EINZELNEN VR-STATIONEN	26
10.	EINSATZMÖGLICHKEITEN IM UNTERRICHT	28
11.	QUELLEN ZUR RECHERCHE	29
12.	LITERATURVERZEICHNIS	30
	IMPRESSUM	31
	ANHANG	
	Arbeitsblätter	
	Experiment	
	Gefährdungsbeurteilung	



Das Inhaltsverzeichnis ist verlinkt.



Chiralität ist ein wichtiges Phänomen in den Naturwissenschaften und spielt eine zentrale Rolle in der Chemie, in der Natur und in industriellen Prozessen. Das Verständnis der Chiralität ist daher essenziell für ein vertieftes Verständnis der Chemie. Das Thema findet sich in unterschiedlicher Breite und Tiefe auch in allen wesentlichen Bildungsplänen und Kerncurricula zur Chemie der Sekundarstufe II und wird meist im Zusammenhang mit dem Thema Zucker behandelt, was aber die Sicht auf das deutlich umfassendere Phänomen der Chiralität einschränkt. Das Verständnis von Chiralität ist oft herausfordernd, da es ein hohes Maß an räumlichem Vorstellungsvermögen erfordert. Technische und physikalische Aspekte der Chiralität können den Lernenden einen guten Einblick in die dynamische Natur der submikroskopischen Ebene der Materie geben.

Dieses Material legt den Fokus auf die Interaktion zwischen chiralen Teilchen und Licht. Es vermittelt grundlegende chemische Aspekte und bietet Einblicke in die Anwendung chiraler Verfahren. Schließlich macht ein exemplarischer Blick in aktuelle Forschungsvorhaben den Lernenden deutlich, wie interdisziplinär moderne Forschung zur Chiralität ist und dass gerade dieser interdisziplinäre Blick dabei helfen kann, das Phänomen umfangreicher und angemessener zu verstehen.

Besonders hervorzuheben ist hierbei, dass die Physik und die Chemie die Chiralität eines Moleküls auf unterschiedlichen Zeitskalen betrachten, so dass in der Chemie typischerweise als achiral identifizierte Moleküle aus Sicht der Physik zu bestimmten Zeitpunkten sehr wohl als chiral anzusehen sind.

Um diese anspruchsvollen und abstrakten Lern- und Verstehensprozesse zu unterstützen, wurde über das hier vorliegende analoge Material hinaus thematisch passendes digitales Material in Form einer VR-Lernumgebung entwickelt, das mit einer VR-Brille genutzt werden kann. Nachdem die Umgebung auf die VR-Brille geladen wurde, können in ihr Aspekte von Chiralität auch immersiv und räumlich betrachtet werden. Auf diese Weise können Lernende die räumliche Situation in chiralen Teilchen in der virtuellen Realität entdecken, was beim Verständnis unterstützen kann.

Derzeit (Stand: August 2025) ist die VR-Lernumgebung mit den VR-Systemen Meta Quest 2 und Meta Quest 3 nutzbar. Der Download der VR-Umgebung findet sich auf der Seite der Chemiedidaktik der Universität Kassel. www.uni-kassel.de/go/chirality-vr Dort finden Sie auch weitere Anweisungen zum Download. Welche Inhalte in der VR-Umgebung abgebildet und wo diese zu finden sind, können Sie dem [Übersichtsplan](#) am Ende dieses Materials entnehmen. Zu welchen Inhalten es VR-Material und/oder Aufgaben gibt, ist in den verschiedenen Kapiteln jeweils ausgewiesen.



➤ 1

Die einzelnen Kapitel des vorliegenden Materials sind so konzipiert, dass sie aufeinander aufbauen, es können aber auch einzelne Inhalte aufgegriffen und separat behandelt werden. Darüber hinaus stehen in jedem Kapitel Aufgaben mit verschiedenen Schwierigkeitsgraden zur Verfügung. Um eine flexible Nutzung zu erleichtern, können die Aufgaben unabhängig voneinander gelöst werden – sie bauen nicht aufeinander auf. Außerdem sind zu den konzipierten Rechercheaufgaben Quellen angeführt, die erste Informationen für das Lösen der Aufgaben bereitstellen.

in den Blick genommen werden. Im Bereich der Erkenntnisgewinnungskompetenz ist die Nutzung von und die Arbeit mit Modellen im Zusammenhang mit diesem Thema besonders bedeutsam und erhält mit der Nutzung der VR-Umgebungen noch einen neuen Fokus.

In Bezug auf die Kommunikationskompetenz liegt ein Schwerpunkt auf der Recherche zur Chiralität in analogen und digitalen Quellen.



Das gesamte Material ist auf die SEK II ausgelegt, da das Thema Chiralität curricular auch hier verortet ist. Darüber hinaus gibt es im einleitenden Kapitel einige Informationen und eine erste Aufgabe (Arbeitsblatt 1), die bereits in der Sekundarstufe I behandelt werden kann. Ebenso wird ein VR-Element bereitgestellt, das auf der makroskopischen Ebene einen Zugang zum Phänomen der Chiralität bietet. Das Material bietet zudem Ansätze, um die hier verfügbaren Inhalte auch in der Hochschule zu nutzen.

Bezüglich der Bildungsstandards fokussiert sich das Material auf die Sachkompetenz, indem neben dem grundlegenden Konzept der Chiralität zahlreiche chirale Moleküle mit ihren unterschiedlichen Anordnungsprinzipien mehrfach

Der Kompetenzbereich Bewertung wird schließlich angesprochen, wenn die Bedeutung des Phänomens der Chiralität in Alltag, Forschung und Industrie und seine Nutzbarmachung im Bereich des chemischen Arbeitens adressiert werden.

Wir wünschen Ihnen viel Freude bei der Lektüre und hoffen, unser erweiterter Blick auf das Thema Chiralität findet breiten Anklang und Anwendung in der Praxis.



Chiralität beschreibt in der Chemie die charakteristische Eigenschaft bestimmter Moleküle, sich – gerade so wie linke und rechte Hand – durch Drehungen in der Ebene nicht mit ihrem Spiegelbild in Übereinstimmung bringen zu lassen.

Ein anderes Beispiel sind Schneckenhäuser. Es gibt rechtsgewundene (dextrale) oder linksgewundene (sinistrale) Gehäuse.

Die Gehäuse sind chiral, weil Bild und Spiegelbild nicht identisch sind. Man kann ein rechtsgewundenes Haus nicht einfach drehen, um ein linkes daraus zu machen.



Chiralität ist ein seit Langem bekanntes Phänomen – und gleichzeitig ein spannendes Feld aktueller Forschung. Sie begegnet uns in Natur und Technik gleichermaßen.

Dieses Unterrichtsmaterial führt Schülerinnen und Schüler in die Grundlagen der Chiralität auf submikroskopischer Ebene ein. Durch den Einsatz von Virtual-Reality-Technik wird die räumliche Struktur von Molekülen erlebbar, und aktuelle Forschungsergebnisse lassen sich anschaulich in den Unterricht integrieren.

Der Begriff Chiralität leitet sich von dem griechischen Wort „cheir“ ab, was so viel wie „Hand“ bedeutet – ein Hinweis darauf, dass man das Prinzip gut an der linken und der rechten Hand erkennen kann: spiegelbildlich, aber nicht



deckungsgleich. Chiralität ist in der Natur an vielen Stellen präsent und spielt außerdem im naturwissenschaftlichen Labor und in der chemisch-pharmazeutischen Industrie eine wichtige Rolle. Chiralität bei Molekülen beruht darauf, dass die Atome in bestimmter Weise räumlich unsymmetrisch angeordnet sind. Dieses Phänomen hat großen Einfluss auf die Eigenschaften der Moleküle, ihre Wechselwirkungen mit ihrer Umgebung und damit auf die Eigenschaften der chemischen Substanzen, die aus diesen Molekülen bestehen.

Chiralität prägt daher nicht nur das Verständnis der Chemie, sondern spielt zum Beispiel auch in der Astrophysik eine Rolle, wo sie Einblicke in das Verhalten von Molekülen im Universum gewährt.

Bei uns auf der Erde ist Chiralität in biologischen Prozessen, medizinischen Anwendungen und damit auch in der Pharmaindustrie von Bedeutung, denn die Chiralität beeinflusst die Wirkungen von Arzneimitteln, die Effizienz von Katalysatoren und die Funktionalität von Enzymen. So hat es in der Vergangenheit Fälle gegeben, in denen die eine Form des Moleküls als Medikament hoch wirksam war, sein Spiegelbild aber zu schweren unerwünschten Nebenwirkungen geführt hat. Möglichkeiten, die verschiedenen Spiegelbilder zu unterscheiden, zu trennen oder gezielt nur eines der beiden herzustellen sind daher für Forschung und Wissenschaft sowie für die chemische und pharmazeutische Industrie von größter Bedeutung.

INFO FÜR LEHRKRÄFTE

ARBEITSBLATT 1:

Chiralität ist ein spannendes Phänomen, das in ganz verschiedenen Bereichen eine Rolle spielt – in der Natur genauso wie in der Technik. Recherchieren Sie mindestens vier verschiedene Beispiele aus unterschiedlichen Bereichen, in denen das Phänomen der Chiralität vorkommt. Erklären Sie an jedem Beispiel das Phänomen und die Bedeutung der Chiralität.

VR-ANIMATION 1: Wendeltreppen

2.1 Chiralität und Achiralität

Chiralität und – als Gegenteil davon – Achiralität sind Konzepte, die die räumliche Anordnung und Symmetrie von Molekülen beschreiben.

Achiralität

Moleküle, die sich durch Drehung mit ihrem Spiegelbild in Übereinstimmung bringen lassen, nennt man achiral. Voraussetzung für die Achiralität von Molekülen ist, dass sie eine Drehspiegelachse aufweisen, durch die Symmetrie gegeben ist. Diese Symmetrie bleibt bei der Spiegelung erhalten und sorgt dafür, dass das gespiegelte Molekül dem Ausgangsmolekül gleich ist.

Die meisten einfachen organischen Moleküle sind achiral. Ein Beispiel dafür ist das Methanmolekül (CH_4). Es besteht aus einem zentralen Kohlenstoffatom, das mit vier Wasserstoffatomen verbunden ist. Aufgrund der tetraedrischen Anordnung der Wasserstoffatome um das zentrale Kohlenstoffatom besitzt das Methanmolekül eine Drehspiegelachse und ist dementsprechend achiral. Diese Drehspiegelachse existiert auch im Spiegelbild und sorgt dafür, dass man dieses durch Drehung in das Ausgangsmolekül überführen kann.

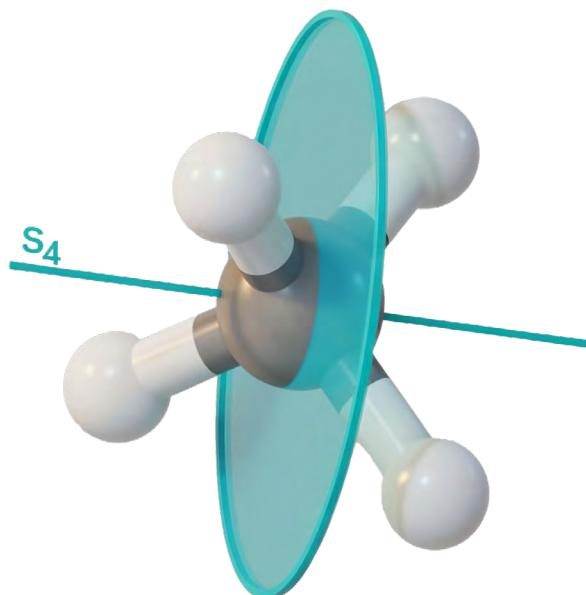


Abbildung 1: Methanmolekül

2

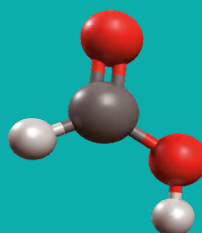
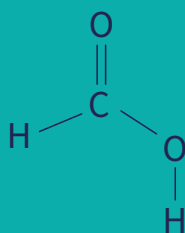
Die Moleküle der Verbindung Methansäure (Ameisensäure) sind ebenfalls achiral. Ameisensäure mit der chemischen Formel HCOOH ist die einfachste Carbonsäure. Achiral sind die Moleküle

der Ameisensäure aufgrund ihrer planaren Struktur. Alle Atome liegen in einer Ebene, daher kann man das Molekül durch Rotation um 180° in sein Spiegelbild überführen.

INFO FÜR LEHRKRÄFTE

ARBEITSBLATT 2:

Zeichnen Sie in einer der Molekülabbildungen der Ameisensäure eine Drehspiegelachse ein.



Chiralität

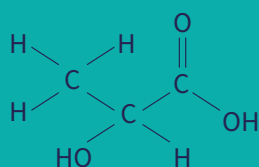
Ein Molekül wird als chiral betrachtet, wenn es ein spiegelbildliches Molekül gibt, das nicht mit ihm identisch ist. Diese beiden Moleküle, also Bild und Spiegelbild, bezeichnet man als Enantiomere. Enantiomer leitet sich aus dem griechischen „enantios“ ab und bedeutet „entgegengesetzt“. Das Wort Enantiomer bezieht

sich also auf den Bild-Spiegelbild-Charakter von Molekülen. Dieses Phänomen tritt zum Beispiel immer dann auf, wenn ein Atom – häufig ist es ein Kohlenstoffatom – vier verschiedene Substituenten trägt. Ein solches Atom nennt man „chirales Zentrum“, es ist „unsymmetrisch substituiert“. Ein Molekül ist dann ein chirales Molekül, wenn es ein oder mehrere chirale Zentren besitzt.

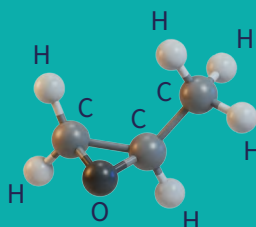
INFO FÜR LEHRKRÄFTE

ARBEITSBLATT 3:

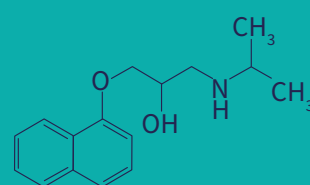
Finden Sie ein oder mehrere chirale Zentren in den Molekülen folgender molekularer Verbindungen und markieren Sie diese.



a. Milchsäure



b. Propylenoxid



c. Propranolol

VR-ANIMATION 2: Enantiomere

2

Enantiomere sind die spiegelbildlichen Formen von chiralen Molekülen. Sie haben dieselbe chemische Zusammensetzung, das heißt, enthalten dieselben Atome in derselben Zahl und in derselben Reihenfolge miteinander verknüpft, aber ihre räumliche Anordnung unterscheidet sich. Gerade weil die enantiomeren Moleküle auf den ersten Blick so ähnlich sind, ist es so überraschend, dass sich ihre physikalisch-chemischen Eigenschaften unterscheiden. Gleichzeitig sind sich die Enantiomere hinreichend ähnlich, so dass diese Unterschiede oft nicht sehr groß sind. Ein Gemisch, das zu gleichen Teilen aus den beiden Enantiomeren eines chiralen Moleküls besteht, nennt man racemisches Gemisch oder Racemat.

Eine besondere Eigenschaft chiraler Moleküle ist, dass sie die Ebene von polarisiertem Licht drehen. Enantiomere drehen dabei gleich stark, aber in unterschiedliche Richtungen, sodass das racemische Gemisch in Summe keinen Einfluss auf die Ebene von polarisiertem Licht hat, aber die reinen Enantiomere durch ihre Wechselwirkung mit dem polarisierten Licht unterschieden werden können. Je nachdem, ob ein Enantiomer die Ebene des polarisierten Lichts nach rechts oder links dreht, wird es (D)- oder (L)-Enantiomer genannt. Da diese Bezeichnung aber lediglich zeigt, in welche Richtung die entsprechenden Enantiomere die Ebene des polarisierten Lichts drehen, nicht aber, wie die räumliche Anordnung der Atome im Molekül wirklich ist, gibt es in der Chemie noch eine weitere Art, Enantiomere zu unterscheiden, die sogenannte R/S-Nomenklatur.

INFO FÜR LEHRKRÄFTE

VR-ANIMATION 3:

Chirale, achirale Moleküle und ihre Symmetrieeigenschaften

2.2 Konformere und Enantiomere

Die räumliche Anordnung von Atomen in Molekülen wird unter dem Begriff der Stereoisomerie behandelt. Sie beschäftigt sich mit Molekülen, deren Atome in derselben Reihenfolge aneinandergelagert sind, sich jedoch in ihrer räumlichen Anordnung unterscheiden – solche Moleküle nennt man Stereoisomere. Dabei werden in der Chemie verschiedene Gruppen von Stereoisomeren charakterisiert, wovon hier nur drei Erwähnung finden:

Die beiden nicht überlagerbaren Spiegelbilder eines chiralen Moleküls werden als Enantiomere bezeichnet. Die bekanntesten Beispiele hierfür sind D- und L-Glucose. Ein anwendungsbezogenes Beispiel: Bei Betablockern wirkt das (S)-Enantiomer selektiv auf das Herz, das (R)-Enantiomer hingegen an den Zellmembranen des Auges. Diastereomere hingegen sind Stereoisomere, die keine Enantiomere sind. Sie entstehen meist, wenn ein Molekül mindestens zwei chirale Zentren besitzt, wobei sich die Konfiguration an mindestens einem, aber nicht an allen chiralen Zentren unterscheidet. Daher verhalten sie sich zueinander nicht wie Bild und Spiegelbild und haben unterschiedliche physikalische Eigenschaften, etwa Schmelzpunkt und Löslichkeit. Beispiele dafür sind die Zucker D-Glucose und L-Galactose.

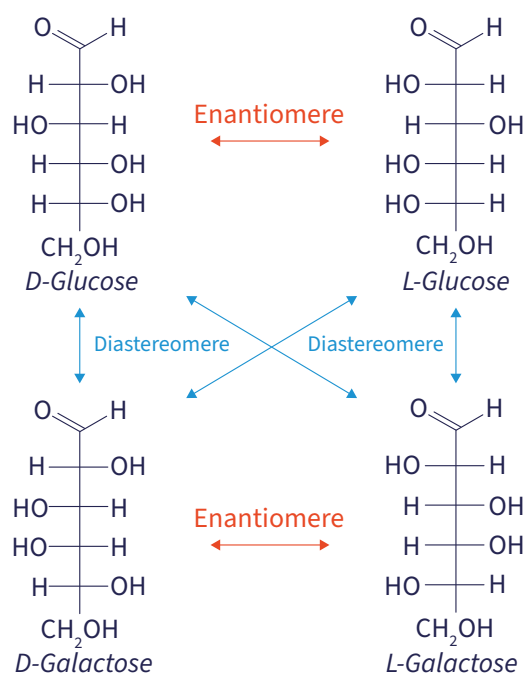


Abbildung 2: Enantiomere und Diastereomere zweier Zucker

➤ 2

Konformere haben ebenfalls denselben räumlichen Aufbau und dieselbe atomare Zusammensetzung und werden durch Eigenrotation um Einfachbindungen ineinander überführt. Da diese Rotation dynamisch ist, ist eine bestimmte Konformation eines Moleküls nur eine kurze Momentaufnahme wie beispielsweise beim Cyclohexan-Molekül.



Abbildung 3: Konformere des Cyclohexan-Moleküls

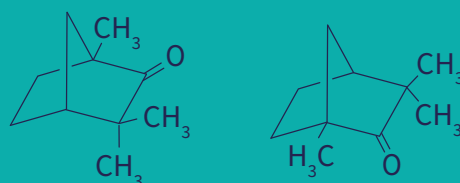
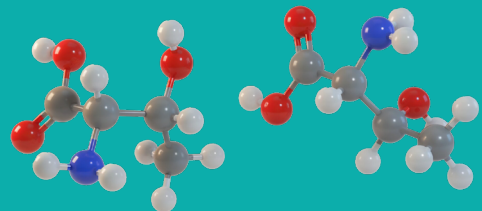
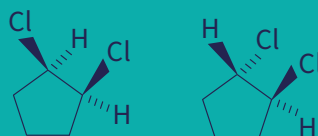
INFO FÜR LEHRKRÄFTE

ARBEITSBLATT 4:

Moleküle lassen sich entweder als Enantiomere, Diastereomere oder Konformere definieren.

- Ordnen Sie die folgenden Molekülpaare einander zu.
- Bestimmen Sie, welche der folgenden Paare als Enantiomere, Diastereomere oder Konformere definiert werden.
- Begründen Sie, warum Sie die Molekülpaare entsprechend in die drei Kategorien eingeordnet haben.

Moleküle: Twistform Cyclohexan, 1,2-Dibromethan, 1,2-Dichlorcyclopentan, Threonin, Fenchon



2

2.3 Beispiele für chirale Moleküle

Glucose

Glucose ist ein Einfachzucker (Monosaccharid) und gehört zu den sogenannten Hexosen, da es sechs Kohlenstoffatome besitzt. Die Summenformel lautet $C_6H_{12}O_6$, die molare Masse (M) beträgt 180,16 g/mol. Es gibt zwei Enantiomere, D-Glucose und L-Glucose. Glucose ist ein wichtiger Energieträger für den menschlichen Organismus, wobei nur eines der Enantiomere, die D-Glucose, für den Stoffwechsel bedeutsam ist.

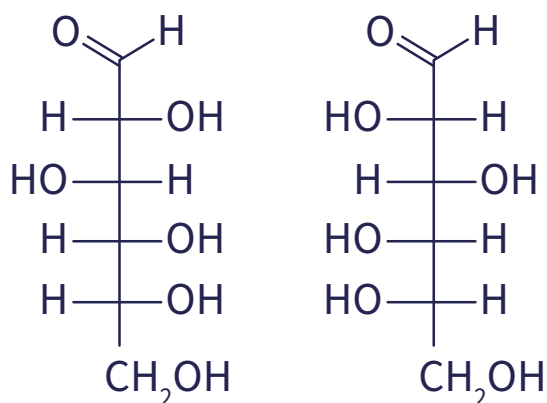


Abbildung 4: D- und L-Glucose

Fenchon

Natürlich kommt (-)-Fenchon in Fenchelölen vor und ist Bestandteil weiterer ätherischer Öle. Es tritt in Form zweier Enantiomere auf. In Wasser ist es unlöslich, in Ethanol ist es gut löslich. Die Summenformel von Fenchon lautet: $C_{10}H_{16}O$, die molare Masse (M) beträgt 152,24 g/mol. Und während Menschen die beiden Enantiomere geruchlich kaum unterscheiden können, gelingt dies zum Beispiel Totenkopffaffen. Chemisch betrachtet ist Fenchon ein sogenanntes bicyclisches Monoterpen-Keton.

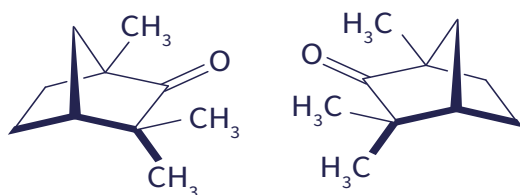


Abbildung 5: Moleküldarstellung von (+)-Fenchon und (-)-Fenchon

Propylenoxid

Propylenoxid ist eine farblose Flüssigkeit mit ätherischem Geruch. Diese chemische Verbindung ist leicht entflammbar und in Wasser und Ethanol löslich. Die Summenformel lautet C_3H_6O , die molare Masse (M) beträgt 58,08 g/mol. Propylenoxid ist eine heterocyclische organische Verbindung aus der Gruppe der Epoxide, die auch Oxirane genannt werden.

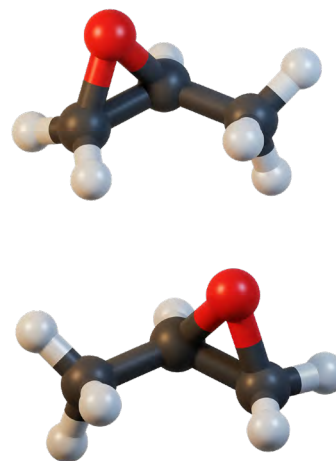


Abbildung 6: Moleküldarstellung von S- und R-Propylenoxid

HINWEIS

Das Propylenoxid-Molekül ist das erste chirale Molekül, das außerhalb unseres Sonnensystems nachgewiesen wurde.

WICHTIGE EIGENSCHAFTEN UND CHARAKTERISTIKA VON CHIRALITÄT

Unüberlappbarkeit: Ein charakteristisches Merkmal chiraler Moleküle ist, dass ihre spiegelbildlichen Formen nicht durch Drehung ineinander überführt werden können. Das führt zu unterschiedlichen biologischen Aktivitäten und chemischen Eigenschaften der Enantiomere.

Chirale Zentren: Chiralität ist oft mit der Anwesenheit von chiralen Zentren verbunden, meistens Kohlenstoffatomen, die vier unterschiedliche Substituenten tragen. Die Anordnung dieser Substituenten um das chirale Zentrum verleiht dem Molekül seinen chiralen Charakter. Wenn ein Molekül also mindestens ein Chiralitätszentrum besitzt, ist es immer chiral. Chirale Moleküle besitzen keine Drehspiegelachse.

Asymmetrie: Chirale Moleküle sind asymmetrisch, da sie keine Drehspiegelachse besitzen, die ihre spiegelbildlichen Formen miteinander verbindet.

Selektive Wechselwirkungen: Chirale Moleküle interagieren selektiv mit anderen chiralen Molekülen, insbesondere in biologischen Prozessen. Enzyme erkennen oft nur eine der spiegelbildlichen Formen eines chiralen Moleküls, was zu spezifischen Reaktionen führt.

Pharmazeutische Anwendungen: In der pharmazeutischen Industrie werden heute fast nur noch chirale Medikamente hergestellt. Die Unterscheidung zwischen Enantiomeren ist entscheidend, um Medikamente mit den gewünschten Wirkungen zu erhalten und unerwünschte Nebenwirkungen zu vermeiden.

Optische Aktivität: Chirale Moleküle drehen die Ebene polarisierten Lichts. Enantiomere drehen sie dabei um den gleichen Betrag in entgegengesetzte Richtungen, so dass ein racemisches Gemisch in Summe keine Änderung der Ebene polarisierten Lichts bewirkt. Die Tatsache, dass Enantiomere die Ebene von polarisiertem Licht in unterschiedliche Richtungen drehen, ermöglicht die Unterscheidung zwischen den spiegelbildlichen Formen. Darauf wird in Kap. 7 noch einmal ausführlich eingegangen.



Chiralität ist ein Phänomen, das in Natur, Wissenschaft und Technik eine große Bedeutung hat. Sie wird in den wissenschaftlichen Disziplinen Chemie, Biologie und Physik erforscht und spielt in der Medizin, der Pharmazie, den Materialwissenschaften, der Lebensmittelchemie und in der chemischen Industrie eine bedeutende Rolle. Mit ihren besonderen Eigenschaften nehmen chirale Moleküle häufig Einfluss darauf, dass Prozesse in Natur und Technik selektiv ablaufen.

INFO FÜR LEHRKRÄFTE

ARBEITSBLATT 5:

Recherche zu Cinchonidin und weiteren industriell relevanten chiralen Verbindungen.

Aminosäuren und Proteine

Einige Bausteine von Proteinen – zum Beispiel Aminosäuren wie Alanin oder Arginin – sind chiral. In natürlichen Proteinen kommt fast ausschließlich das L-Enantiomer vor. Warum die Natur ausgerechnet diese „linkshändigen“ Versionen bevorzugt, ist bis heute ungeklärt und ein aktuelles Thema in der Forschung.

Chemische Reaktivität

Die Chiralität von Molekülen beeinflusst stark ihre chemische Reaktivität. Enantiomere haben unterschiedliche Wechselwirkungen mit anderen Molekülen, insbesondere mit biologischen Rezeptoren.

Geschmack und Geruch

In vielen Lebensmitteln und Aromastoffen spielt Chiralität eine Rolle bei der Wahrnehmung von Geschmack und Geruch. Enantiomere können unterschiedliche sensorische Eigenschaften haben. Ein Beispiel dafür ist der Aromastoff Carvon: Das eine seiner Enantiomere riecht nach Kümmel, das andere nach Minze.

INFO FÜR LEHRKRÄFTE

ARBEITSBLATT 6:

Recherche zur Substanz Carvon.

Bedeutung der Chiralität für die chemische Industrie

Ob Medikamente oder Feinchemikalien – viele Produkte der chemischen Industrie enthalten chirale Moleküle. Und genau da wird es spannend: Denn oft macht es einen riesigen Unterschied, ob ein Molekül „rechts-“ oder „linkshändig“ ist. Nur eines der beiden Enantiomere wirkt wie gewünscht – das andere kann im besten Fall nutzlos, im schlimmsten Fall sogar schädlich sein. Deshalb ist die gezielte Kontrolle der Chiralität bei der Synthese enorm wichtig. Und nicht nur das: Chirale Synthesen sind oft auch ein Pluspunkt in Sachen Nachhaltigkeit. Sie helfen dabei, Rohstoffe effizienter zu nutzen und Prozesse umweltfreundlicher zu gestalten.

Denn wenn gezielt nur das wirksame Enantiomer eines Moleküls hergestellt wird (statt beider Formen als Racemat), spart man Rohstoffe, Energie und Zeit – und reduziert Abfälle und Nebenprodukte.

Entwicklung und Produktion von Arzneimitteln

Viele der heute zugelassenen Arzneimittel enthalten chirale Wirkstoffe (60 Prozent). Achirale Wirkstoffe sind mit 35 Prozent vertreten und Racemate (beide Enantiomere im Verhältnis 1:1) mit nur 5 Prozent. Chiralität bestimmt dabei die biologischen Interaktionen von Wirkstoffen mit Rezeptoren, Proteinen und DNA und charakterisiert somit ihre Sicherheit und Wirksamkeit.

Die selektive Produktion und Verwendung von Enantiomeren ist daher von größter Bedeutung, um die gewünschten therapeutischen Wirkungen zu erzielen und Nebenwirkungen zu minimieren.

➤ 3

Ein tragisches Beispiel ist Thalidomid (Contergan), das als Racemat eingesetzt wurde: Nur ein Enantiomer wirkte beruhigend, das andere führte zu schweren Fehlbildungen – Ursache des Contergan-Skandals der 1950er und -60er Jahre.

Ein positives Beispiel ist Thyroxin: Die linksdrehende Form wird als Schilddrüsenhormon eingesetzt, die rechtsdrehende Form hat dagegen eine cholesterinsenkende Wirkung.

Pestizide und Herbizide

Chirale Moleküle sind auch in der Pestizid- und Herbizidherstellung entscheidend: Die gezielte Synthese des wirksamen Enantiomers steigert die Effizienz und reduziert unerwünschte Nebenwirkungen – ein Plus für Umwelt und Nachhaltigkeit.

Beispiel: (S)-Metolachlor ist ein weitverbreitetes Herbizid. Früher wurde es als Racemat eingesetzt, obwohl nur das (S)-Enantiomer biologisch wirksam ist. Heute wird gezielt nur das wirksame Enantiomer produziert – dadurch braucht man weniger Wirkstoff, spart Ressourcen und verringert die Umweltbelastung deutlich.

Lebensmittelchemie

In der Lebensmittelindustrie kann Chiralität Einfluss auf den Geschmack und das Aroma von Lebensmitteln haben. Ein Beispiel dafür ist Aspartam: Ein Enantiomer schmeckt um ein Vielfaches süßer als Haushaltszucker, während das andere Enantiomer als bitter empfunden wird.

Analytik

In der analytischen Chemie sind die Unterscheidung und die Trennung von Enantiomeren von großer Bedeutung. Chromatographische und spektroskopische Methoden haben dazu beigetragen, Enantiomere genauer zu analysieren und zu charakterisieren.



Die enantioselektive oder auch asymmetrische Synthese von enantiomerenreinen Verbindungen ist in den letzten Jahrzehnten zu einem integralen Bestandteil der Synthesechemie herangereift. Insbesondere bei der Arzneimittel-Entwicklung und -Produktion ist die Unterscheidung zwischen Enantiomeren von großer Bedeutung, da diese die biologische Aktivität und Toxizität eines Arzneimittels beeinflussen können. Angesichts der hohen Kosten für die Zulassung von Medikamenten kann die frühe Entscheidung bezüglich der Chiralität von Wirkstoffen im Entwicklungsprozess zu erheblichen Kosteneinsparungen führen.

4.1 Synthese

Asymmetrische Synthese: Unter einer asymmetrischen Synthese versteht man eine oder mehrere hintereinander ablaufende Reaktionen bei denen die enantiomeren Produkte in ungleichen Mengen entstehen. Man erhält also ein enantiomerenangereichertes oder sogar enantiomerenreines Produkt. Die asymmetrische Synthese ermöglicht also die effiziente Herstellung von chiralen Verbindungen in hohen Reinheitsgraden. Eine treffendere Bezeichnung wäre an dieser Stelle enantioselektive Synthese. Viele dieser Reaktionen benötigen ebenso einen Katalysator.

Chirale Katalysatoren: In der chemischen Synthese werden chirale Katalysatoren verwendet, um asymmetrische Synthesen zu fördern und so Enantiomerenüberschüsse zu erzeugen. Dies ist beispielsweise in der pharmazeutischen Industrie relevant, wenn als Wirkstoff nur eines der beiden Enantiomere hergestellt werden soll. Ein Beispiel für solche chiralen Katalysatoren sind homogene Edelmetallkatalysatoren, in denen chirale Bis(oxazolin)-Liganden gebunden sind. Durch die chiralen Liganden wird am katalytisch aktiven Edelmetallzentrum eine chirale Umgebung geschaffen, die nur die Synthese eines Enantiomers zulässt.

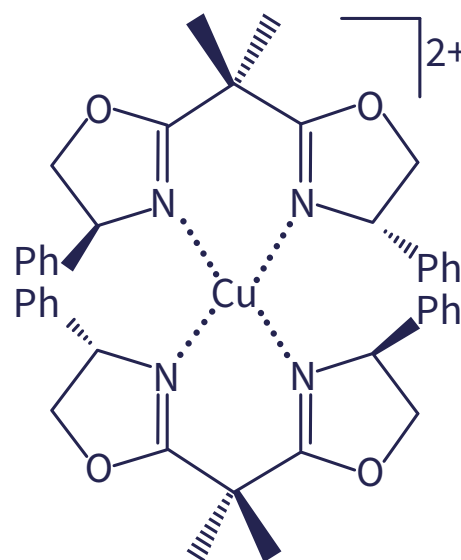


Abbildung 7: Beispiel eines chiralen Edelmetallkatalysators

Die Abbildung zeigt einen chiralen Katalysator. Als Edelmetallzentrum fungiert hier ein Kupfer(II)-Ion, das an zwei Bis(oxazolin)-Liganden komplex gebunden ist.

Racematspaltung – chemische Trennverfahren chiraler Moleküle

Nicht immer ist eine Kontrolle der Chiralität im Herstellungsprozess heute schon möglich. Viele Herstellungsverfahren chiraler Moleküle führen daher noch immer zu racemischen Gemischen, was bedeutet, dass eine Mischung beider Enantiomere im Verhältnis 50:50 vorliegt. Wie oben bereits erläutert, ist es in der Chemie oder der Pharmazie allerdings häufig notwendig, dass jeweils nur mit einem Enantiomer gearbeitet wird, was eine Trennung der jeweiligen Gemische erfordert. Dafür gibt es verschiedene Trennverfahren.

Kristallisationsverfahren

Manchmal können Enantiomere in ihren spiegelbildlichen Kristallstrukturen enantiomerenrein auskristallisieren. Die entstehenden Kristalle werden dann nach Augenschein manuell getrennt. Allerdings ist dies eine eher selten angewendete Methode, da sie sehr zeitintensiv und nur bei kleinen Mengen rentabel ist.

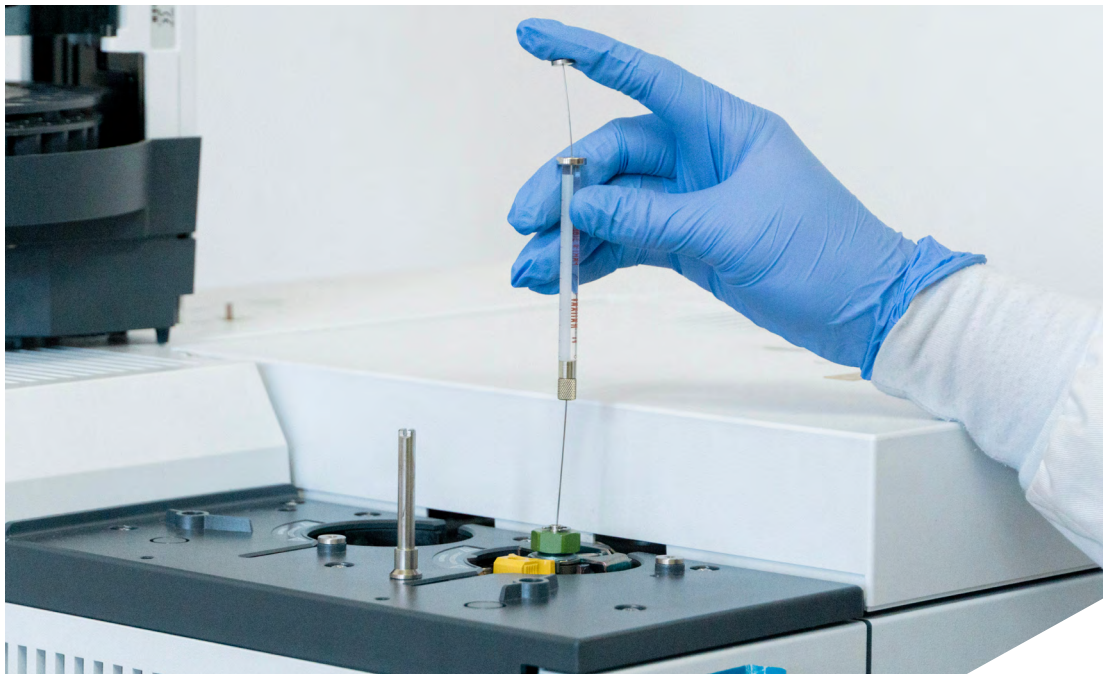
4

Chromatographie

Enantiomergemische lassen sich durch Hochleistungsflüssigchromatographie (HPLC = High Performance Liquid Chromatography) trennen. Dazu wird eine chirale stationäre Phase benötigt, die mit den beiden Enantiomeren unterschiedlich stark wechselwirkt, wodurch die Enantiomere unterschiedlich schnell wandern und getrennt werden. Die molekulare Erkennung funktioniert durch diverse Wechselwirkungen der Enantiomere mit der stationären Phase, darunter H-Brückenbindungen, Ladungen und Dipole oder Van-der-Waals-Wechselwirkungen. Diese selektiven Interaktionen führen zu den unterschiedlichen Retentionszeiten für die Enantiomere.

Diastereomeren-Bildung durch chemische Reaktion

Es besteht die Möglichkeit, racemische Gemische mit einer chiralen Verbindung umzusetzen, wobei Diastereomere gebildet werden. Diese haben im Gegensatz zu den Enantiomeren unterschiedliche physikalische Eigenschaften, zum Beispiel eine andere Löslichkeit oder andere Siedepunkte. Daher können sie durch geeignete Trennverfahren, zum Beispiel fraktionierte Destillation, getrennt werden. Aus den Diastereomeren spaltet man anschließend die optisch aktive „Zusatzverbindung“ wieder ab und erhält so die reinen Enantiomere. Ein Beispiel dafür ist ein racemisches Gemisch von 3-Butin-2-amin. Dieses wird mit Weinsäure zur Reaktion gebracht, wodurch diastereomere Salze entstehen. Das eine kristallisiert aus der Lösung aus, das andere verbleibt in Lösung, sodass sie getrennt werden können und die Enantiomere nach Abspaltung der Weinsäure separiert vorliegen.



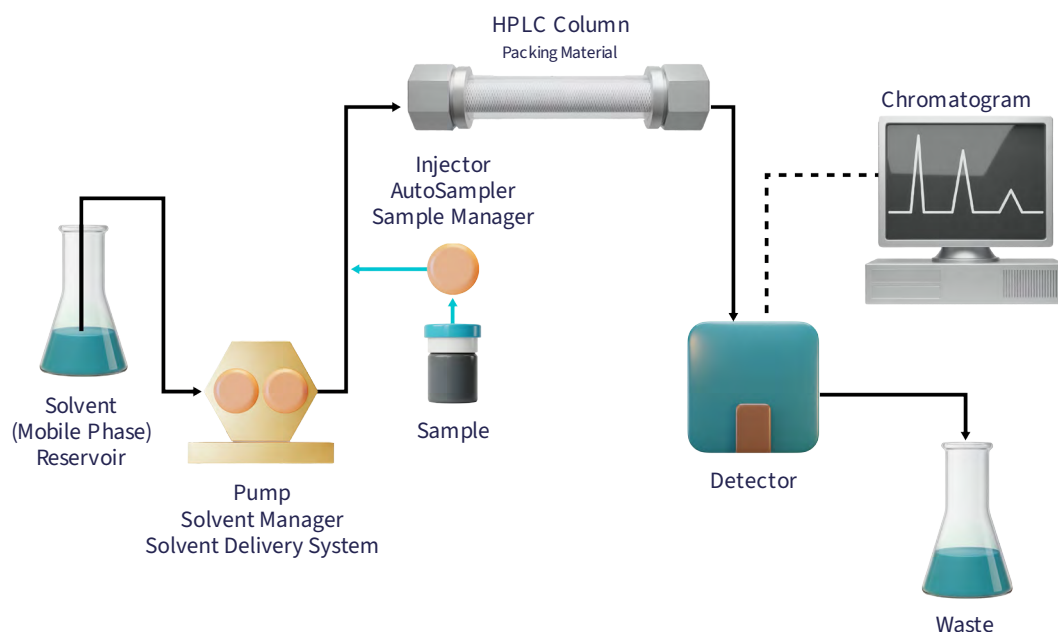


Abbildung 8: Schematischer Aufbau der Hochleistungsflüssigkeitschromatographie

4.2 Vorteile und Herausforderungen der Trennverfahren

Selektivität und Effizienz

Klassische Trennmethode liefern bei Enantiomeren oft akzeptable Ausbeuten, kommen aber schnell an ihre Grenzen: Vollständige Trennung gelingt nicht immer, Aufwand und Kosten können hoch sein. Die Wahl des Verfahrens sollte daher stets dem konkreten Ziel und dem weiteren Prozess angepasst werden.

Gerade die Racematspaltung ist meist aufwendig, und viele asymmetrische Synthesen sind noch nicht ausreichend etabliert. Der Forschungsbedarf ist also groß – nur ein tieferes Verständnis der Eigenschaften chiraler Moleküle wird es ermöglichen, Trenn- und Syntheseprozesse effizienter zu gestalten. Im nächsten Abschnitt stehen daher ihre optischen Eigenschaften und aktuelle Forschungsansätze im Mittelpunkt.

INFO FÜR LEHRKRÄFTE

ARBEITSBLATT 7: Enantioselektive Synthese

Viele Verbindungen werden großindustriell im Tonnenmaßstab durch enantioselektive Synthese hergestellt. Sie ist in den letzten Jahrzehnten zu einem integralen Bestandteil der synthetischen organischen Chemie herangereift.

Licht ist eine elektromagnetische Welle und kann in verschiedenen Formen auftreten – je nachdem, wie sich seine elektrischen und magnetischen Feldvektoren verhalten. Besonders spannend im Zusammenhang mit Chiralität sind zwei Formen: linear polarisiertes Licht und Laserlicht.

Linear polarisiertes Licht

Gewöhnliches Licht kann man als elektromagnetische Welle beschreiben, deren elektrische und magnetische Feldvektoren im rechten Winkel zueinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Lichts schwingen. Dabei können die Feldvektoren in alle Richtungen des Raums weisen. Linear polarisiertes Licht hingegen ist eine Form von Licht, bei der die Schwingungsrichtung der elektromagnetischen Welle auf eine einzige Ebene beschränkt ist.

Gewöhnliches Licht kann auf verschiedene Weisen linear polarisiert werden, zum Beispiel durch Reflexion oder durch Doppelbrechung.

Bei der Polarisation durch Reflexion trifft der elektrische Feldvektor von unpolarisiertem Licht auf eine Grenzfläche zwischen zwei Medien mit unterschiedlichem Brechungsindex. Bei einem bestimmten Winkel, dem sogenannten Brewster-Winkel (oder auch Polarisationswinkel), besteht der reflektierte Strahl dann aus vollständig linear polarisiertem Licht.

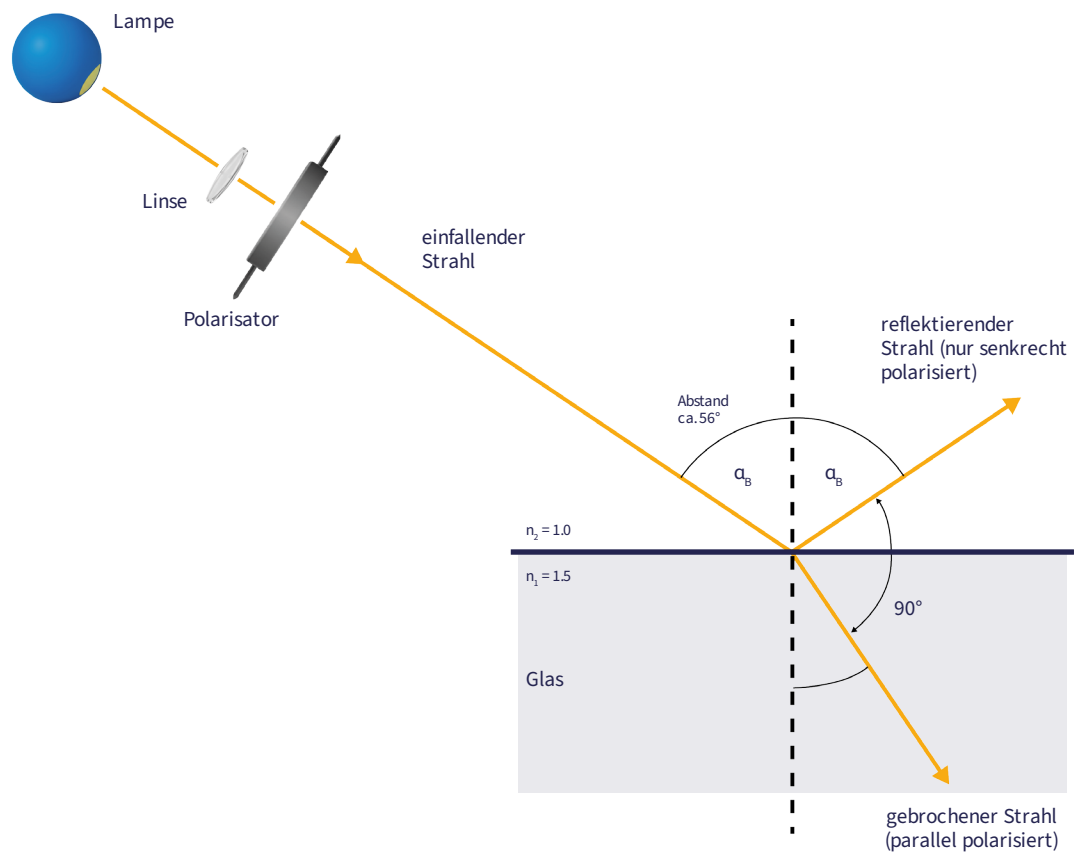


Abbildung 9: Schematische Darstellung Brewster-Winkel

5

Die Polarisation durch sogenannte Doppelbrechung kann beobachtet werden, wenn unpolarisiertes Licht senkrecht beispielsweise auf einen Kalkspatkristall gelenkt wird. Eigentlich würde man bei senkrechtem Lichteinfall erwarten, dass das Licht das Medium geradlinig durchdringt. Bereits 1669 beobachtet man, dass das Licht im Kristall in zwei Teilbündel aufgespalten wird. Untersucht man nun die Polarisationsrichtung der beiden Teilbündel, so stellt man fest, dass beide linear polarisiert sind, mit senkrecht zueinander orientierten Polarisationsrichtungen. Das für die Polarisation von Licht häufig verwendete Nicolsche Prisma funktioniert nach diesem Prinzip. Abbildung 11 zeigt einen möglichen Aufbau und den Strahlengang in einem Nicolschen Prisma.

Ein Nicolsches Prisma ist folgendermaßen aufgebaut: Ein Kalkspatkristall wird diagonal zersägt und anschließend mit Kanadabalsam zusammengefügt. Dann werden die Außenwände geschwärzt. Bei Einfall des Lichts werden nun der ordentliche und der außerordentliche Strahl unterschiedlich stark gebrochen. Der ordentliche Strahl wird an der diagonalen Klebefläche reflektiert und an der Außenwand absorbiert. Der außerordentliche Strahl tritt, nachdem er die Trennfläche passiert hat, aus dem Prisma aus. Somit entsteht linear polarisiertes Licht.

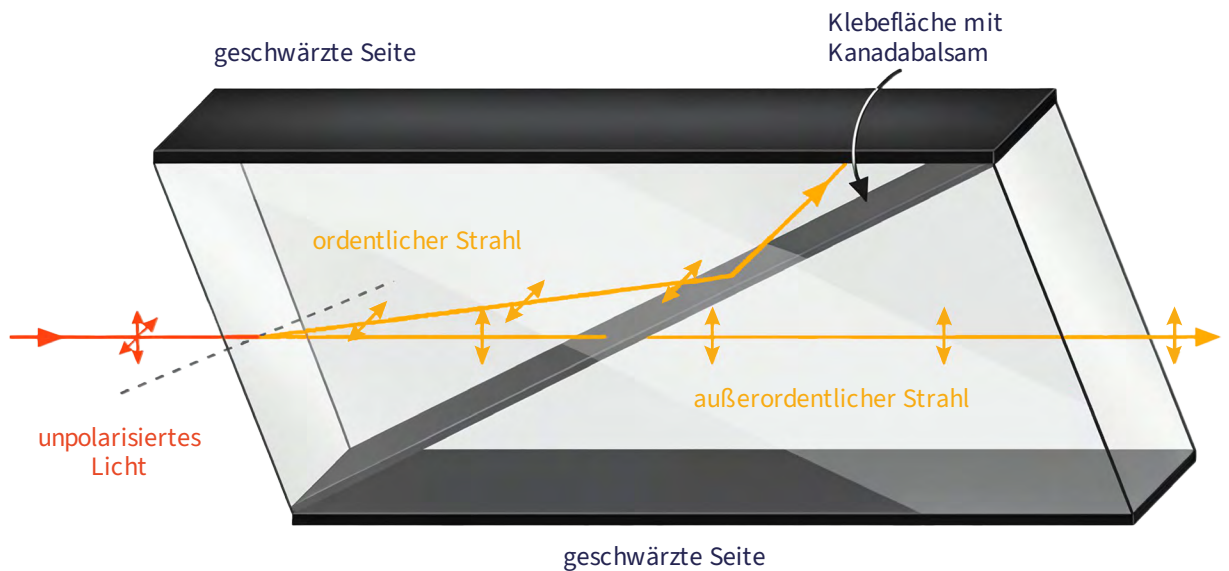


Abbildung 10: Schema eines Nicolschen Prismas

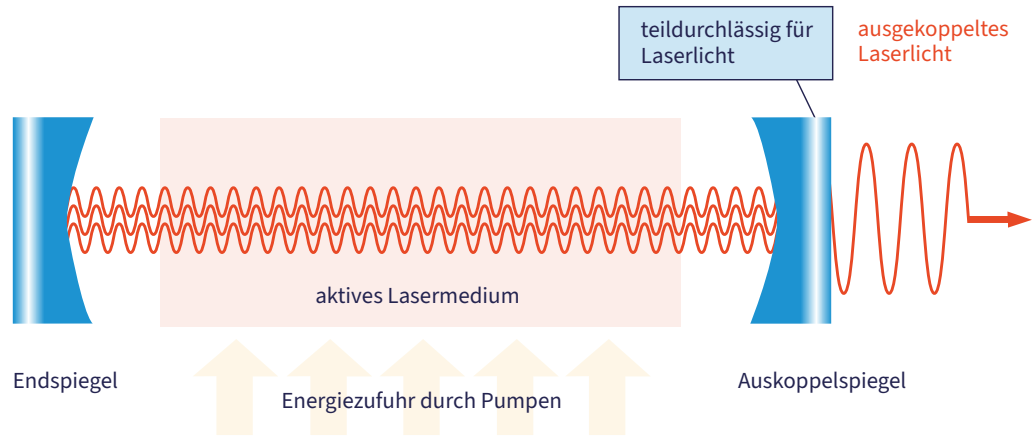


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Erzeugung von Laserlicht

Laserlicht

Laserlicht oder „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ (Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung) zeichnet sich durch Einfarbigkeit (Monochromatizität), Kohärenz und hohe Intensität aus, was es für eine Vielzahl von Anwendungen in Wissenschaft, Medizin und Industrie interessant macht. Kohärenz bedeutet, dass alle Wellenfronten des Lichts „phasenverknüpft sind“: Die Abstände zwischen den Wellenbergen und Wellentälern unterschiedlicher Lichtbündel sind konstant. Dass die Wellenlängen aller Lichtbündel wegen der Monochromatizität gleich sind, bewirkt stationäre Interferenzen, also verstärkende oder auslöschende Wechselwirkungen zwischen verschiedenen kohärenten Wellen, was die Bildung eines eng fokussierten intensiven Lichtstrahls ermöglicht. Laserlicht ist sehr gut zu bündeln, daher können hohe Leistungsdichten im Fokus erreicht werden, und der Durchmesser des Strahls ist auch bei großer Entfernung von der Quelle sehr gering. Laserlicht ist linear polarisiert, das heißt, der elektrische Feldvektor schwingt in einer festen Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, der magnetische Feldvektor schwingt senkrecht dazu.

Das Lasermedium dient zur Erzeugung des Laserlichts. Als Lasermedium können unterschiedliche Stoffe dienen. Es gibt feste, flüssige und gasförmige Varianten, dementsprechend spricht man von Festkörper-, Farbstoff- oder Gaslaser. Das Lasermedium emittiert Licht, wenn es energetisch angeregt wird. Diese Anregung nennt man „pumpen“. Die Spiegel verstärken den Laserstrahl und richten ihn aus. Beide zusammen werden auch als Resonator bezeichnet. Die Spiegel werden parallel zueinander angeordnet, zwischen ihnen befindet sich das Lasermedium.

Verwendung: Lineare Polarisation findet Anwendung in der Optik und Bildgebung, während Laserlicht für eine breite Palette von Anwendungen, darunter Schnitttechnologien, Datenübertragung und medizinische Anwendungen, verwendet wird.

INFO FÜR LEHRKRÄFTE

VR-ANIMATION 4:

Laserlicht und seine Eigenschaften



Optische Aktivität ist ein Phänomen, das eng mit der Chiralität von Molekülen verbunden ist. Optische Aktivität beschreibt die Fähigkeit eines Moleküls, die Schwingungsebene polarisierten Lichts zu drehen. Chirale Moleküle können durch diese spezifische Wechselwirkung mit polarisiertem Licht identifiziert werden, denn achirale Moleküle sind optisch inaktiv, beeinflussen die Schwingungsebene des polarisierten Lichts also nicht.

Die beiden Enantiomere einer Verbindung drehen die Ebene des polarisierten Lichts um den gleichen Betrag in die jeweils entgegengesetzte Richtung entweder nach links oder nach rechts. Dadurch können die Enantiomere charakterisiert und benannt werden. Dreht ein Enantiomer die Ebene des polarisierten Lichts nach links, wird es mit einem L oder einem (-) vor seinem Namen versehen, dreht ein Enantiomer die Ebene des polarisierten Lichts nach rechts, wird dem Namen der chemischen Substanz ein D oder ein (+) vorangestellt.

Messung der optischen Aktivität

Die optische Aktivität von Substanzen kann mit einem Polarimeter gemessen werden, das nach folgendem Prinzip funktioniert: Monochromatisches Licht wird durch ein Nicolsches Prisma geleitet und somit linear polarisiert. Dieser Strahl wird anschließend durch die Messzelle geleitet, die eine Probe der zu messenden Substanz enthält. Der nun folgende Analysator besteht ebenfalls aus einem Nicolschen Prisma. Dieses wird so lange gedreht, bis der linear polarisierte Lichtstrahl durchgelassen wird. Die gegenseitige Stellung der beiden Prismen zeigt dann den sogenannten Drehwert α an, also um welchen Winkel die Substanz die Ebene des polarisierten Lichts gedreht hat. Der Drehwert α hängt von der Konzentration und Struktur der Substanz in der Probe, der Länge der Messzelle, der Wellenlänge des Lichts, dem entsprechenden Lösungsmittel und der Temperatur ab. Um die Werte verschiedener Substanzen vergleichbar zu machen, bildet man den sogenannten spezifischen Drehwert. Dieser ist eine physikalische Konstante einer optisch aktiven Verbindung und damit für die jeweilige Substanz charakteristisch.

6.1 Anwendungen in der Chemie und Pharmazie

Qualitative und quantitative Analyse von Verbindungen

Die optische Aktivität wird häufig zur Analyse von chiralen Verbindungen verwendet. Durch Messung des spezifischen Drehwertes, also des Winkels, um den optisch aktive Substanzen linear polarisiertes Licht „verdrehen“, kann man die vorhandene chirale Verbindung identifizieren. Ist das vorliegende Enantiomer bekannt, kann man über die Messung des Drehwertes seine Konzentration ermitteln.

Pharmazeutische Industrie: In der pharmazeutischen Industrie ist die Kontrolle der Chiralität entscheidend. Die gemessene optische Aktivität kann bei der Herstellung von Arzneimitteln verwendet werden, um die Reinheit und Wirksamkeit sicherzustellen.

INFO FÜR LEHRKRÄFTE

EXPERIMENT 1:

Messung der optischen Aktivität

6.2 Zirkulardichroismus – eine weitere Art der Interaktion chiraler Moleküle mit Licht

Die oben beschriebene optische Aktivität chiraler Moleküle verdeutlicht die enge Beziehung zwischen der räumlichen Struktur von Molekülen und ihrer Wechselwirkung mit Licht.

Ein spannender Effekt bei der Wechselwirkung von Licht mit chiralen Molekülen ist der zirkuläre Dichroismus.

Anders als bei der oben beschriebenen Art der optischen Aktivität wird hier die Wechselwirkung chiraler Moleküle mit zirkular polarisiertem Licht

➤ 6

betrachtet. Bei dieser Polarisation dreht sich die Ebene des polarisierten Lichts wie bei einer Schraube entweder rechts- oder linksherum. Die Erzeugung von zirkular polarisiertem Licht erfolgt typischerweise durch die Verwendung von zirkular polarisierten Synchrotronstrahlen oder Laserquellen. Betrachtet man nun die Wechselwirkung von chiralen Stoffen mit zirkular polarisiertem Licht stellt man fest, dass die beiden Enantiomere zirkular polarisiertes Licht unterschiedlich stark absorbieren, man spricht von einer "differentiellen Absorption". Der zirkulare Dichroismus ist spezifisch für die Chiralität eines Moleküls und ermöglicht die Unterscheidung von Enantiomeren und die Bestimmung ihrer Konzentration.

Dieser Effekt wird daher auch als spektroskopische Methode genutzt, bei der die Messung der differentiellen Absorption von links bzw. rechts zirkular polarisiertem Licht Informationen über die Eigenschaften chiraler Moleküle liefert: Ein optisch aktives Molekül absorbiert das verwendete, zirkular rechts polarisierte Licht im Vergleich zu dem zirkular links polarisierten Licht unterschiedlich stark. Diese Differenz wird für jede Wellenlänge gemessen und man erhält ein Spektrum, das für die Enantiomere eines Moleküls spiegelbildlich ausfällt.

Beide Effekte, sowohl die Messung des spezifischen Drehwertes als auch der zirkulare Dichroismus, können zur Identifikation chiraler Moleküle verwendet werden.

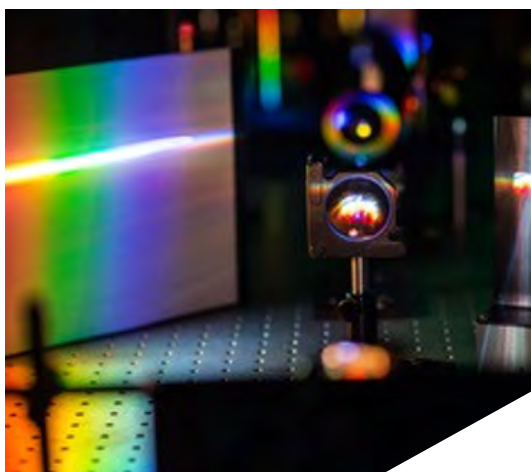
INFO FÜR LEHRKRÄFTE

VR-ANIMATION 5:
Zirkulardichroismus

Der Begriff Chiralität wurde von Lord Kelvin (William Thomson) 1894 geprägt. Aber schon um 1811–1815 entdeckte Jean-Baptiste Biot, dass bestimmte Substanzen (z. B. Lösungen von Weinsäure) polarisiertes Licht drehen – also optisch aktiv sind. Obwohl Chiralität also schon seit Langem bekannt ist, wird in Physik und Chemie immer noch intensiv daran geforscht.

7.1 Chiralität durch Laserlicht erkennen

Eine Forschergruppe des Sonderforschungsbereichs „Extremes Licht für die Analyse und Kontrolle von molekularer Chiralität“ (SFB ELCH) untersucht seit einigen Jahren das Phänomen des Photoelektronenzirkulardichroismus (PECD) in Bezug auf chirale Moleküle. Unter Photoelektronen versteht man allgemein Elektronen, die freigesetzt werden, wenn Licht auf Materie trifft (Photoeffekt) – diesen Effekt kennt man zum Beispiel von Solarzellen. Werden chirale Moleküle mit zirkular polarisiertem Licht bestrahlt, werden ebenfalls Photoelektronen freigesetzt. Dabei tritt der „PECD“ genannte Effekt auf, der besagt, dass sich die Ausbeute an Photoelektronen je nach Enantiomer ändert, wenn beide mit zirkular polarisiertem Licht bestrahlt werden.



Der PECD-Effekt dient als leistungsfähige Sonde für chirale Moleküle, denn indem man die aus der Wechselwirkung von zirkular polarisiertem Licht mit chiralen Molekülen resultierenden Photoelektronen analysiert, kann man Rückschlüsse auf die räumliche Anordnung der Atome in den

Molekülen ziehen. Das ermöglicht nicht nur die Unterscheidung zwischen Enantiomeren, sondern eröffnet auch die Möglichkeit, subtile Unterschiede in der Chiralitätsverteilung eines Moleküls zu erkennen.

Die Forschenden versuchen nun, PECD-Effekte gezielt auszulösen und zu kontrollieren, um sie für die Analyse chiraler Moleküle und Molekülmischungen nutzen zu können. Als Referenzmolekül, an dem sie ihre Messungen durchführen, dient das Fenchon. Dazu wird mit verschiedenen Laserquellen und deren Pulslängen experimentiert, um Messungen und Messergebnisse des PECD-Effekts weniger störanfällig und somit zuverlässiger zu machen. Dadurch soll eine zuverlässigere Methode geschaffen werden, die Chiralität von Molekülen zu erkennen.

INFO FÜR LEHRKRÄFTE

VR-ANIMATION 6:

Photoelektronenzirkulardichroismus

7.2 Enantiomere durch Energie umwandeln und anreichern

Eine andere Forschergruppe des SFB ELCH beschäftigt sich damit, durch eine spezielle Kombination von Infrarotlicht und Mikrowellenstrahlung die Händigkeit von Molekülen zu verändern und damit einen Überschuss eines Enantiomers zu erzeugen. Das Grundprinzip besteht darin, dass selektiv nur ein Enantiomer durch die Strahlung in einen angeregten Zustand überführt wird, sodass es racemisiert. Dadurch werden 50 Prozent des selektiv angeregten Enantiomers in das andere Enantiomer überführt.

Nach nur sieben Wiederholungen dieses Prozesses wären so bereits rund 99 Prozent des ursprünglich angeregten Enantiomers in das andere überführt.

INFO FÜR LEHRKRÄFTE

VR-ANIMATION 7:

Enantiomere durch Laserlicht
umwandeln und somit anreichern

7.3 Mit der Coulomb- Explosion chirale Moleküle aus achiralen Molekülen erzeugen

Die Coulomb-Explosion ist ein experimenteller Ansatz, bei dem Moleküle hochintensiver Laserstrahlung ausgesetzt werden, um etwas über ihre strukturellen Zustände im Submikrokosmos herauszufinden und so mehr über ihre Eigenschaften zu erfahren. Dieser Prozess ermöglicht eine ultraschnelle und präzise Erkennung und Umwandlung von Molekülen.

So ist es Forschenden aus dem SFB ELCH in einem Experiment mit der Coulomb-Explosion gelungen, eine ganz neue Eigenschaft des Moleküls der Ameisensäure zu erkennen.

Die Coulomb-Explosion ist eine spektroskopische Methode, bei der Moleküle im Gasstrom hochfrequenter Laserstrahlung ausgesetzt werden.

INFO FÜR LEHRKRÄFTE

VR-ANIMATION 8:

Die Coulomb-Explosion von
Ameisensäure

Durch diese Strahlung werden die Moleküle in diverse Schwingungszustände versetzt. Der Laserpuls schießt Elektronen aus den Molekülen heraus, was zur Zerstörung der Moleküle und zur Bildung stark positiv geladener Moleküle führt. Die Coulomb-Abstoßung zwischen den positiv geladenen Fragmenten führt dazu, dass die Molekülbruchstücke explosionsartig auseinanderfliegen.

Der Nachweis über die strukturellen Zustände, in denen sich die Moleküle vor ihrer Zerstörung befanden, wird durch Detektoren erwirkt. Ein Detektor detektiert die Elektronen aus dem Molekül, der andere die Ionen. Die Forschenden messen die Zeit, bis die Molekültrümmerteile auf die Detektoren treffen, und den Ort, an dem dies geschieht. Aus diesen Daten können sie dann den Zustand der vormals intakten Moleküle rekonstruieren.

Mit derselben Methode entdeckten Forschende, dass Ameisensäure, welche eine planare Struktur besitzt und aus Sicht der traditionellen Chemie an sich achiral ist, tatsächlich auch in chiralen Zuständen in Form beider Enantiomere vorliegen kann.

INFO FÜR LEHRKRÄFTE

ARBEITSBLATT 8:

Recherche zu aktuellen
Forschungsprojekten über Chiralität

Im Experiment wird das Molekül der Ameisensäure so angeregt, dass die beiden Wasserstoffatome aus der Molekülebene herausschwingen und zwei Enantiomere gebildet werden. Natürlich handelt es sich dabei nur um kurze Momentaufnahmen – die chiralen Zustände existieren jeweils nur für winzige Bruchteile einer Sekunde, bevor die Moleküle zerstört werden.



Wie die Forschung schon jetzt unseren Blick auf Chiralität verändert hat

Am Beispiel der Ameisensäure zeigt sich: Auch Moleküle, die wir als achiral kennen, können in ultrakurzen Momenten chiral sein. Denn ihre Atome sind ständig in Bewegung – sie schwingen. Wenn dabei zum Beispiel zwei Wasserstoffatome kurzzeitig aus der Molekülebene heraustreten, entsteht für einen winzigen Augenblick ein chirales Zwischenstadium. Im Mittel bleibt das Molekül aber achiral.

Solche Erkenntnisse zeigen: Selbst scheinbar „feststehende“ naturwissenschaftliche Fakten können sich durch neue Messmethoden weiterentwickeln. Formen von Licht – wie zirkular polarisiertes Laserlicht – erlauben es, Moleküle je nach Händigkeit gezielt anzuregen, zu erkennen oder zu trennen. Ziel ist es, Chiralität besser zu kontrollieren – etwa für die Medizin, die Chemie oder die Materialwissenschaft.

Diese Forschung eröffnet völlig neue Einblicke in die Welt der Moleküle – und zeigt, wie viel noch unentdeckt ist, gerade im Bereich der Chiralität.

Forschende arbeiten interdisziplinär und mit unterschiedlichen methodischen Ansätzen daran, das Phänomen der Chiralität besser zu verstehen und gezielt nutzbar zu machen. Das vorliegende Unterrichtsmaterial zeigt exemplarisch einige Forschungsansätze und macht deutlich, wie vielfältig und bedeutsam die Auseinandersetzung mit diesem Thema ist.

Trotz jahrzehntelanger erfolgreicher Forschung und eines stetig wachsenden Verständnisses scheint das Potenzial der Chiralitätsforschung noch längst nicht ausgeschöpft. Es bleibt viel zu entdecken. Derzeit wird beispielsweise untersucht, ob das Molekül Wasserstoffperoxid infolge seiner Eigenrotation ein drittes Enantiomer bilden könnte. Sollte sich dies bestätigen, müsste das bisherige Grundlagenverständnis von Enantiomeren überdacht und erweitert werden.

Ein weiteres Forschungsfeld betrifft die sogenannte Paritätsverletzung. Sie untersucht, ob sich spiegelbildliche Moleküle möglicherweise stärker in ihren Eigenschaften unterscheiden als bislang angenommen.

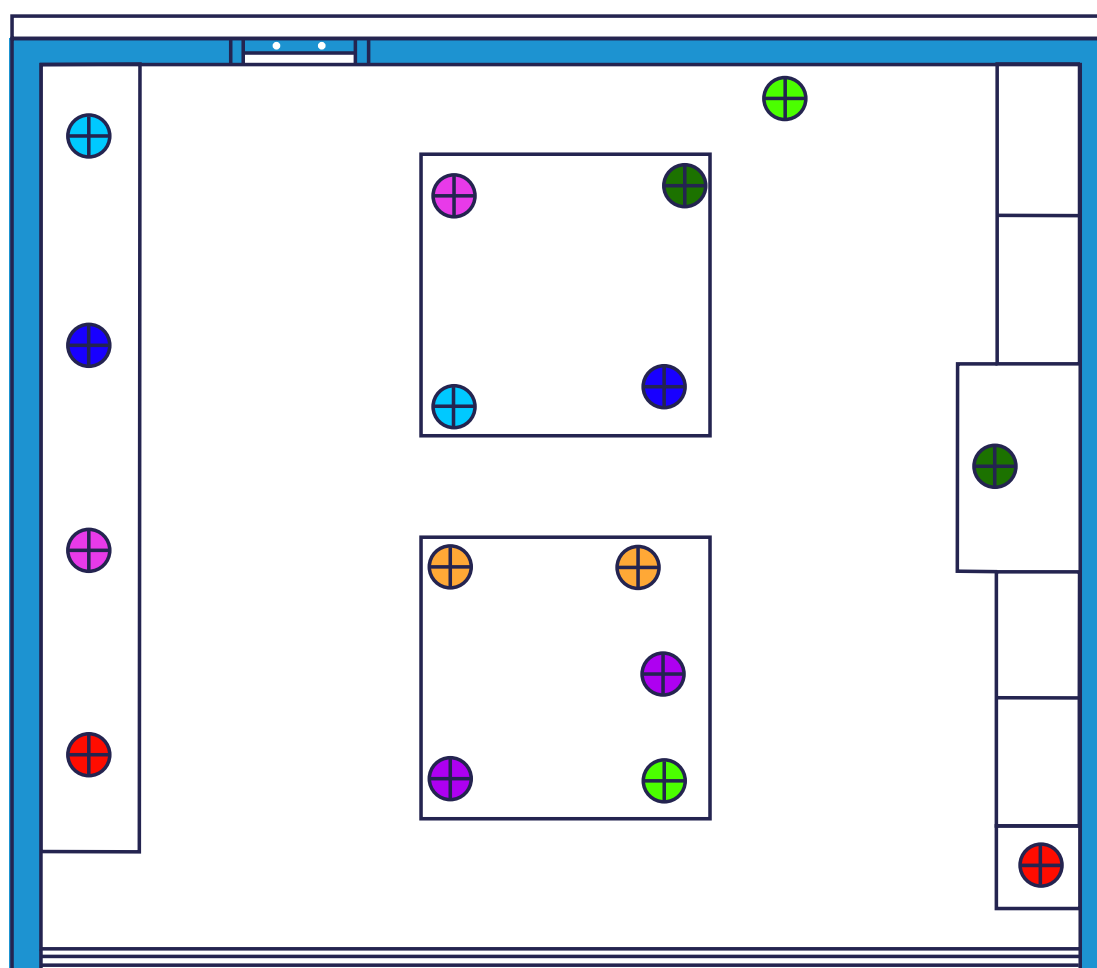
Fazit

Die bisherigen Erkenntnisse zur Chiralität verdeutlichen einmal mehr: Naturwissenschaftliche Erkenntnis ist kein statischer Zustand. Sie entwickelt sich fortlaufend weiter und wird angepasst oder ersetzt, wenn neue Beobachtungen und Theorien bestehende Modelle infrage stellen.

9. ÜBERSICHTSPLAN DER EINZELNEN VR-STATIONEN

Der hier aufgeführte Plan zeigt, wo die einzelnen VR-Animationen im VR-Raum zu finden sind. Farblich gleiche Symbole zeigen die Zugehörigkeit der jeweiligen Stationen (Paare). Die Tabelle gibt die Positionen der Animationen sowie der dazugehörigen Audiotexte an. Audiostationen und Animationsstationen werden in Bezug auf die Draufsicht des Plans in Links und Rechts unterschieden.

Die Anfangsposition in der VR-Umgebung befindet sich in der Mitte des Raums.



9

Farbcode	Fachlicher Inhalt	Audio im Raum	Animation im Raum
Orange	<u>Wendeltreppen</u>	Links im Plan	Rechts im Plan
Dunkelrot	<u>Enantiomere</u>	Links im Plan	Rechts im Plan
Violett	<u>Chirale, achirale Moleküle und ihre Symmetrieeigenschaften</u>	Links im Plan	Rechts im Plan
Dunkelblau	<u>Laserlicht und seine Eigenschaften</u>	Links im Plan	Rechts im Plan
Hellblau	<u>Zirkulardichroismus</u>	Rechts im Plan	Links im Plan
Dunkelgrün	<u>Photoelektronen-zirkulardichroismus</u>	Links im Plan	Rechts im Plan
Hellgrün	<u>Enantiomere durch Laserlicht umwandeln und somit anreichern</u>	Rechts im Plan	Links im Plan
Lila	<u>Die Coulomb-Explosion von Ameisensäure</u>	Rechts im Plan	Links im Plan

HINWEIS

Siehe Übersichtsplan Seite 26



Die Einsatzmöglichkeiten von VR im Unterricht sind so vielseitig wie die Technik selbst. Es gibt nicht den einen richtigen Weg, Virtual Reality sinnvoll in den Schulalltag einzubinden. Je nach Fach, Thema und Lernziel kann die hier vorgestellte VR-Umgebung ganz unterschiedlich genutzt werden. Die folgenden Ideen sollen Anregungen geben, wie sich das Potenzial der Anwendung gezielt ausschöpfen lässt. Wichtig dabei: Es ist nicht nötig, das komplette VR-Erlebnis in den Unterricht zu integrieren – auch einzelne Stationen (siehe Lageplan) können gezielt eingesetzt werden.

Thematische Nutzung

Die VR-Umgebung eignet sich besonders gut, um verschiedene Aspekte der Chiralität anschaulich zu machen. Gerade Themen, die ein gutes räumliches Vorstellungsvermögen erfordern – etwa Enantiomere oder der Unterschied zwischen chiralen und achiralen Molekülen – lassen sich gut visualisieren.

Auch komplexere Themen wie die Coulomb-Explosion oder der Photoelektronenzirkulardichroismus können in der VR-Umgebung behandelt werden. Diese bieten spannende Einblicke in die aktuelle Forschung und knüpfen damit direkt an die Anforderungen vieler Lehrpläne an.

Durch die immersive Darstellung werden abstrakte Inhalte greifbarer – ein Vorteil, der sich nicht nur im Chemie-, sondern auch im Physikunterricht (zum Beispiel beim Thema Laser) nutzen lässt. Mithilfe des oben abgebildeten Lageplans können gezielt einzelne Themenbereiche ausgewählt und vertieft werden.

Methodische Nutzung

Auch methodisch bietet die VR-Anwendung viele Möglichkeiten. Es muss nicht jede Schülerin und jeder Schüler ein eigenes VR-System haben: Die Inhalte können einfach per WLAN auf einen Beamer übertragen und so der ganzen Klasse gezeigt werden – auch wenn dabei der immersive Effekt entfällt.

Sind mehrere VR-Systeme vorhanden, kann in Partnerarbeit gearbeitet werden: Eine Person bewegt sich in der virtuellen Welt, die andere

beobachtet und dokumentiert das Geschehen am Bildschirm. Durch den spielerischen Charakter – das Suchen und Entdecken verschiedener Stationen – lassen sich auch Wettbewerbsformate umsetzen, zum Beispiel wer das Memory am schnellsten löst oder wer die meisten Stationen findet.

Da die Anwendung recht umfangreich ist, kann es sinnvoll sein, je nach Leistungsstand der Lernenden nur bestimmte Stationen freizuschalten oder mithilfe des Lageplans gezielte Hinweise zu geben. Das erleichtert die Orientierung und senkt mögliche Einstiegshürden.

Didaktische Einbettung

Wie bei allen digitalen Medien gilt auch hier: Die VR-Umgebung sollte sinnvoll eingebettet und nicht isoliert genutzt werden. Sie kann als anschaulicher Einstieg in ein neues Thema dienen oder zur Vertiefung und Festigung bereits erarbeiteter Inhalte. Beide Varianten sind didaktisch sinnvoll und flexibel kombinierbar.

Abgesehen von den technischen Voraussetzungen sind mit der Nutzung der VR-Umgebung keine weiteren Bedingungen verbunden. Ziel ist ein erweiterter, sinnlich erfahrbarer Zugang zum Thema Chiralität und zu den damit verbundenen Lichtwechselwirkungen. Die VR-Anwendung ergänzt das vorhandene Unterrichtsmaterial um eine immersive Dimension und eröffnet dadurch ganz neue Perspektiven.



Allgemeine Informationen zum Thema Chiralität

In den folgenden Links lassen sich Informationen über Chiralität finden, die die Grundlagen dieses Phänomens erläutern:

<https://www.chemie.de/lexikon/Chiralit%C3%A4t.html> (27.08.2025)

[https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Chiralit%C3%A4t_\(Chemie\)](https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Chiralit%C3%A4t_(Chemie)) (27.08.2025)

<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/chiralitaet/13513> (27.08.2025)

Kricheldorf, H. (2019). Die Bedeutung der Chiralität. In: Leben durch chemische Evolution?. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-57978-7_10 (27.08.2025)

https://www.cumschmidt.de/s_chiralitaet_und_symmetrie.htm (27.08.2025)

Bestimmte chirale Verbindungen

In den folgenden Links lassen sich Informationen zu diversen im Unterrichtsmaterial vorkommenden Verbindungen finden:

<https://www.chemie.de/lexikon/Carvon.html> (28.08.2025)

<https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Cinchonidin> (28.08.2025)

<https://www.carlroth.com/de/de/chirale-bausteine-auxiliare/cinchonidin/p/8872.1> (28.08.2025)

Enantioselektive Synthesen

Im folgenden Link lassen sich Informationen zur Synthese und Katalysatoren von (S)-Metolachlor finden:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/1615-4169%28200201%29344%3A1%3C17%3A%3A41D-ADSC17%3E3.0.CO%3B2-8> (28.08.2025)

Laser

In folgendem Link lassen sich Informationen über Laser finden:

<https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/licht/konventionelle-laser/laser-wie-funktioniert-ein-laser/> (28.08.2025)

Aktuelle Forschung im Bereich Chiralität

Folgende Links geben weiterführende Informationen zu Forschungsbereichen bzw. Projekten, die sich mit diversen Fragestellungen bezüglich des Themas Chiralität beschäftigen:

<https://crc325.de/fuer-alle/der-trr-325-erklart/chiralitaet> (28.08.2025)

<https://www.uni-kassel.de/forschung/sfb/sfb-1319-elch> (28.08.2025)

<https://mbi-berlin.de/de/forschung/highlights/details/scientists-decipher-the-contribution-of-electrons-to-molecular-chirality> (28.08.2025)

<https://mbi-berlin.de/research/highlights/details/let-there-be-a-new-light-scientists-synthesized-light-with-new-intrinsic-chirality-to-tell-mirror-molecules-apart> (28.08.2025)

https://www.atom.uni-frankfurt.de/research/50_chirality/ (28.08.2025)



- Brückner R. (2015). Reaktionsmechanismen: Organische Reaktionen, Stereochemie, moderne Synthesemethoden. 3. Auflage, Nachdruck. Berlin: Springer Spektrum.
- Fehre K., Eckart S., Kunitski M., Pitzer M., Zeller S., Janke C., Trabert D., Rist J., Weller M., Hartung A., Schmidt L. P. H., Jahnke T., Berger R., Dörner R., Schöffler M. S., (2019). Enantioselective fragmentation of an achiral molecule in a strong laser field. *Sci. Adv.* 5, eaau7923
- Frevert M., Di Fuccia D.-S. (2021). Possibilities of Learning Contemporary Chemistry via Virtual Reality. *World Journal of Chemical Education.*; 9(1): 1–7. doi: 10.12691/wjce-9-1-1
- Graf, T. (2015). *Laser: Grundlagen der Laserstrahlerzeugung, überarbeitete und erweiterte Auflage, Lehrbuch 2.,* Wiesbaden: Springer Vieweg.
- <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C64186&Mask=800> (10.11.2025)
- https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/umweltgifte/umweltgifte_pestizidatlas_2022.pdf (26.10.2025)
- https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-BildungsstandardsAHR_Chemie.pdf (22.10.2025)
- <https://www.uni-kassel.de/forschung/sfb/sfb/sfb-1319-elch/forschungsprojekte/projektbereiche-zweite-foerderperiode.html> (25.03.2026)
- Kounlaxay, K., Yao, D., Ha, M.W., Kim, S.K. (2022). Design of virtual reality system for organic chemistry. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 31(2), 1119–1130. <https://doi.org/10.32604/iasc.2022.020151> (22.10.2025)
- Liu, D., Dede, C., Huang, R., & Richards, J. (Eds.). (2017). *Virtual, augmented, and mixed realities in education.* Springer Singapore Pte. Limited.
- Lux, C., Wollenhaupt, M., Bolze, T., Liang, Q., Köhler, J., Sarpe, C. and Baumert, T. (2012). Circular Dichroism in the Photoelectron Angular Distributions of Camphor and Fenchone from Multiphoton Ionization with Femtosecond Laser Pulses. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 51: 5001–5005. <https://doi.org/10.1002/anie.201109035> (11.11.2025)
- McVicker R. U., O’Boyle N. M. (2024). Chirality of New Drug Approvals (2013–2022): Trends and Perspectives. *Journal of Medicinal Chemistry* 67 (4), 2305–2320
DOI: 10.1021/acs.jmedchem.3c02239
- Otto, M. (2011). *Analytische Chemie. 4. überarbeitete und ergänzte Auflage.* Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Schäfer B. (2020) *Naturstoffe der chemischen Industrie. Lehrbuch. Softcover-Ausgabe.* Berlin, Germany: Springer Spektrum.
- Peter Martin Teubner, Vergleichende Untersuchungen zum geruchlichen Diskriminationsvermögen von Totenkopffaffen (*Saimiri sciureus*) und Menschen für strukturell verwandte Duftstoffe: https://edoc.ub.uni-muenchen.de/2659/1/Teubner_Peter.pdf (22.10.2025)
- Vollhardt K. P. C., Schore N. (Hrsg.) (2005). *Organische Chemie*, VCH: Weinheim.

Herausgeber

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

Redaktion und Gesamtkoordination

Birgit Kullmann, FCI, Frankfurt

Autoren

Dr. Dr. Mareike Frevert, Universität Kassel
Prof. Dr. David Di Fuccia, Universität Kassel

**Wissenschaftliche
und fachdidaktische Beratung**

Prof. Dr. Bernd Ralle

Fachliche Beratung

Dr. Dietmar Reichert, Evonik

**Umsetzung und Programmierung
der VR-Umgebung**

Raumkapsel Animation, Kassel

Gestaltung

mon idée, Marketing/Kommunikation,
Monika Nieth, Königstein
zündung GmbH Werbeagentur,
Frankfurt am Main

Bildquellen**Fotos**

Titelseite
AdobeStock ©ArpPSIqee
Seite 5
AdobeStock ©Dennis
Seite 6
Pixabay ©Fleischturbine
AdobeStock ©Aleksander Savelev
Seite 14
AdobeStock ©Vadym
Seite 16
AdobeStock ©envivopanama
Seite 23
©Agentur Blåfield

Abbildungen

Abb. 4
PD Dr. Klaus Schaper: https://www.schelm.hhu.de/scheLM_3D/Cyclohexan/Cyclohexan_JS.html
(22.09.2025)

Abb. 8
Waters Cooperation: <https://www.waters.com/nextgen/de/de/education/primers/beginner-s-guide-to-liquid-chromatography/how-does-high-performance-liquid-chromatography-work.html> (22.09.2025)

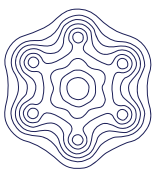
Abb. 10
Dr. Alexey Chizhik: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/4722> (22.09.2025)

Alle anderen Abbildungen: FCI

Alle Rechte vorbehalten

Das gesamte Unterrichtsmaterial ist über das
Internet abrufbar: [Unterrichtsmaterial | FCI](#)

Publiziert: 2026



FCI
FONDS DER
CHEMISCHEN
INDUSTRIE

Fonds der Chemischen Industrie im
Verband der Chemischen Industrie e. V.

Mainzer Landstraße 55
60329 Frankfurt am Main

Telefon: +49 69 2556-0

E-Mail: fonds@vci.de

Weitere Informationen auch im Internet:
www.vci.de/fonds

CHIRALITÄT – DIE WELT IM SPIEGEL

Inhaltsverzeichnis

Arbeitsblätter	Thema	Niveau	Kapitel
1	Recherche von Beispielen aus Natur und Technik	SEK I /SEK II	2.
2	Drehspiegelachse	SEK II	2.1
3	Chirale Zentren in Beispielmolekülen finden	SEK II	2.1
4	Enantiomere, Diastereomere, Konformere	SEK II	2.2
5	Recherche zu Cinchonidin und weiteren industriell relevanten chiralen Verbindungen	SEK II	3.
6	Recherche zur Substanz Carvon	SEK II	3.
7	Enantioselektive Synthese	SEK II	4.2
8	Zur Forschung über Chiralität	SEK II	7.3

Experiment	Thema	Niveau	Kapitel
1	Messung der optischen Aktivität	SEK II	6.
	Gefährdungsbeurteilung zu Experiment 1		



Das Inhaltsverzeichnis ist verlinkt. Klicken Sie auf den gewünschten Inhalt, und Sie gelangen direkt dorthin. Möchten Sie wieder zurück, klicken Sie rechts oben auf das Home-Icon.



RECHERCHE VON BEISPIELEN AUS NATUR UND TECHNIK

Information

Das Phänomen der Chiralität findet man nicht nur auf der Ebene der Moleküle, sondern in vielen Bereichen unseres Alltags und in der Natur. Ein Beispiel dafür sind unsere rechte und unsere linke Hand. Wenn wir versuchen, beide Hände zur Deckung zu bringen, erkennen wir, dass dies nicht funktioniert. Sie verhalten sich zueinander wie Bild und Spiegelbild.

Aufgabe

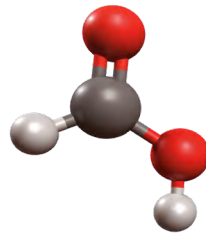
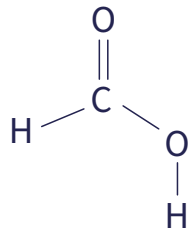
Das Phänomen der Chiralität tritt an ganz unterschiedlichen Stellen in Natur und Technik auf. Recherchieren Sie mindestens vier verschiedene Objekte aus unterschiedlichen Bereichen, bei denen das Phänomen der Chiralität vorkommt. Erklären Sie an jedem Objekt das Phänomen und die Bedeutung der Chiralität.



DREHSPIEGELACHSE

Aufgabe

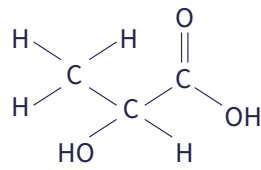
Zeichnen Sie in eine der Molekülabbildungen der Ameisensäure eine Drehspiegelachse ein.



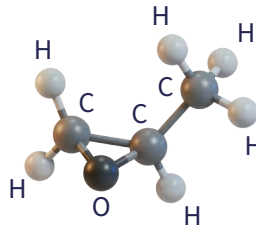
CHIRALE ZENTREN IN BEISPIELMOLEKÜLEN FINDEN

Aufgabe

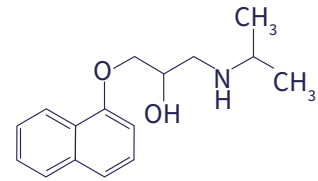
Finden Sie ein oder mehrere chirale Zentren in den Molekülen folgender molekularer Verbindungen und markieren Sie diese.



a. Milchsäure



b. Propylenoxid



c. Propranolol

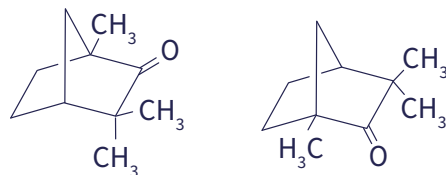
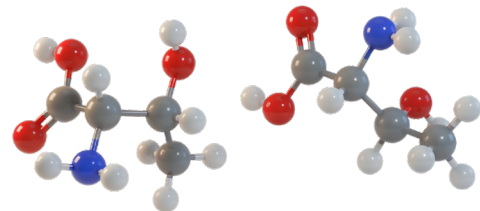
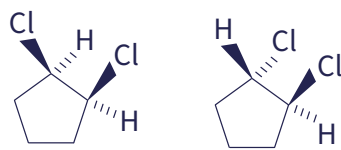
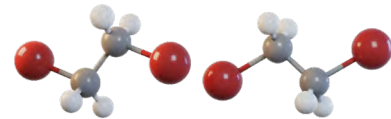
ENANTIOMERE, DIASTEREOMERE, KONFORMERE

Die im Folgenden aufgelisteten Moleküle lassen sich entweder als Enantiomere, Diastereomere oder Konformere definieren.

Aufgaben

1. Ordnen Sie die Molekülpaare einander zu.
2. Bestimmen Sie welche Paare als Enantiomere, Diastereomere oder Konformere definiert werden.
3. Begründen Sie, warum Sie die Molekülpaare entsprechend in die drei Kategorien eingeordnet haben.

Moleküle: Twistform Cyclohexan, 1,2-Dibromethan, 1,2-Dichlorcyclopentan, Threonin, Fenchon





RECHERCHE ZU CINCHONIDIN UND WEITEREN INDUSTRIELL RELEVANTEN CHIRALEN VERBINDUNGEN

Aufgaben

1. Recherchieren Sie das Molekül des Cinchonidins. Gehen Sie dabei vor allem auf dessen Struktur, die Eigenschaften und die Verwendung ein.
2. Recherchieren Sie weitere industriell relevante chirale Verbindungen und beschreiben Sie dabei für eine Verbindung, wie diese konkret eingesetzt und mit welchem Ziel sie genutzt wird.



RECHERCHE ZUR SUBSTANZ CARVON

Information

Von der chemischen Verbindung Carvon gibt es zwei Enantiomere. Dabei hat es die Besonderheit, dass das eine Enantiomer nach Kümmel, das andere nach Krauseminze riecht.

Aufgabe

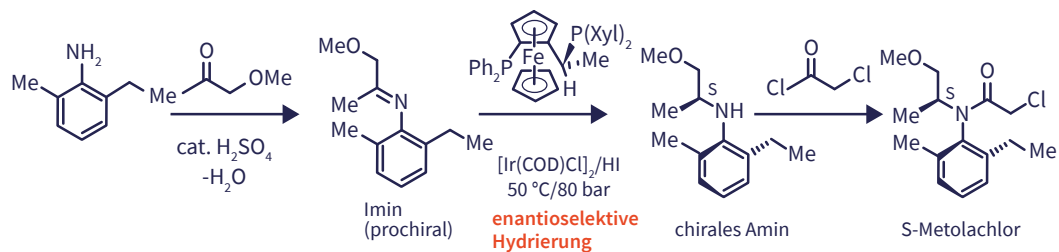
Recherchieren Sie, welches Enantiomer zu welchem Geruch führt.

ENANTIOSELEKTIVE SYNTHESE

Information

Viele Verbindungen werden großindustriell im Tonnenmaßstab durch enantioselektive Synthese hergestellt.

Eine dieser Verbindungen ist S-Metolachlor, ein weltweit eingesetztes Mais-Herbizid, welches durch die Hydrierung eines Imins mit einem chiralen Ir-Katalysator hergestellt wird.



Hier kann man das gängige Reaktionsschema erkennen, mit dem S-Metolachlor synthetisiert wird.

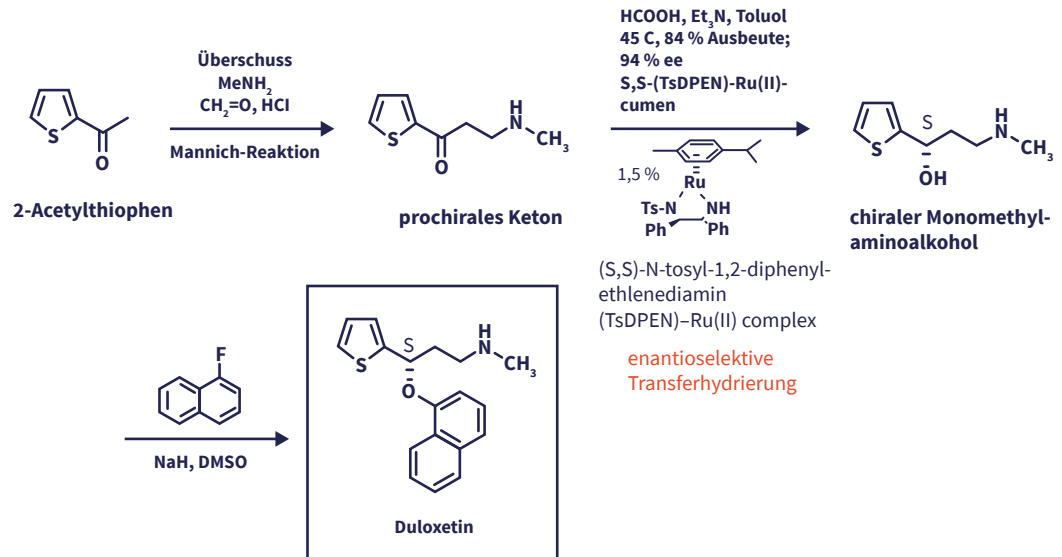
Aufgaben

1. Vollziehen Sie das Reaktionsschema nach, indem Sie die Reaktionszentren markieren und beschreiben, welche Molekülgruppe(n) addiert und welche abgespalten werden.
2. Erläutern Sie, warum das im zweiten Schritt entstehende Imin „prochiral“ genannt wird.
3. Recherchieren Sie zur Katalysatorentwicklung der großindustriellen Synthese des S-Metolachlors (Quelle siehe Quellenverzeichnis) und leiten Sie daraus auch allgemeinere Erkenntnisse für die Entwicklung der Chemie ab.
4. Bestimmen Sie, um welchen Reaktionstyp es sich bei der Hydrierung handelt.

Information

Eine andere Verbindung, die durch enantioselektive Synthese gewonnen wird, ist Duloxetine, ein sehr wirksames Antidepressivum. Ausgehend von der chemischen Verbindung 2-Acetylthiophen wird in einer Mehrstufensynthese unter Zuhilfenahme eines Ruthenium(II)-Komplexes als Katalysator das S-Enantiomer gebildet.

ENANTIOSELEKTIVE SYNTHESE



Hier kann man das Reaktionsschema erkennen.

Aufgaben

1. Vollziehen Sie die einzelnen Synthesestufen nach, indem Sie beschreiben, welche Molekülgruppe(n) addiert und welche abgespalten werden.
2. Benennen Sie die funktionellen Gruppen, die an der Reaktion beteiligt sind, und beschreiben Sie deren Eigenschaften.
3. Bestimmen Sie, um welchen Reaktionstyp es sich bei der Hydrierung handelt.



ZUR FORSCHUNG ÜBER CHIRALITÄT

Aufgaben

1. Informieren Sie sich über Verfahren der Enantiomerentrennung. Recherchieren Sie dabei zum einen ein klassisches/herkömmliches Verfahren und zum anderen ein Verfahren, welches im Forschungsprojekt ELCH entwickelt wurde.
2. Informieren Sie sich im Internet über aktuelle Forschungsprojekte, die sich zentral mit dem Thema „Chiralität“ beschäftigen. Wählen Sie ein Forschungsprojekt aus, beschreiben Sie es und fassen Sie die wesentlichen Inhalte und Ergebnisse zusammen.

Nutzen Sie folgende Links, um erste Informationen zu erhalten.

Aufgabe 1:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ange.201302823>

Schlagworte: Verfahren zur Enantiomerentrennung, Racematspaltung

<https://www.uni-kassel.de/forschung/sfb/sfb-1319-elch>

Schlagworte: aktuelle Forschungsprojekte, extremes Licht, chirale Moleküle

https://www.atom.uni-frankfurt.de/research/50_chirality/

Schlagworte: COLTRIMS, Coulomb-Explosion

Aufgabe 2:

<https://mbi-berlin.de/de/forschung/highlights/details/scientists-decipher-the-contribution-of-electrons-to-molecular-chirality>

Schlagworte: Elektronen, chirale Reaktivität

<https://mbi-berlin.de/research/highlights/details/let-there-be-a-new-light-scientists-synthesized-light-with-new-intrinsic-chirality-to-tell-mirror-molecules-apart>

Schlagworte: synthetisch-chirales Licht, Identifizierung chiraler Moleküle

MESSUNG DER OPTISCHEN AKTIVITÄT

Geräte/Chemikalien:

Polarimeter, Küvetten, dest. Wasser, Zuckerlösungen verschiedener Konzentrationen (z. B. Saccharose, Glucose, Fructose), verschiedene farblose(!) Limonaden, andere Stoffe, die sich in Wasser lösen, z. B. Kochsalz, Zitronensäure, Süßstoffe

Anmerkung: Da es verschiedene Polarimeter (von verschiedenen Herstellern oder auch aus dem Eigenbau) gibt, wird dieser Versuch nicht für ein bestimmtes Polarimeter formuliert und ist entsprechend an vorhandene Geräte anzupassen.

Vorbereitung:

Das Polarimeter ist jeweils mit einer Küvette mit destilliertem Wasser so einzustellen, dass der Analysator 0° zeigt.

Versuchsteil I:

Die verschiedenen Zuckerlösungen werden nacheinander in einer Küvette o. Ä. in das Polarimeter eingeführt. Am Analysator wird der Drehwinkel der jeweiligen Lösung abgelesen und notiert.

Versuchsteil II:

Die verschiedenen in Wasser löslichen Stoffe werden gewogen und anschließend in destilliertem Wasser vollständig gelöst. Nun werden die Küvetten o. Ä. mit den Lösungen befüllt und in das Polarimeter eingeführt. Am Analysator wird der Drehwinkel der jeweiligen Substanz abgelesen und notiert.

Im Anschluss daran wird eine Tabelle erstellt, die auflistet, welche Substanzen optisch aktiv sind und welche nicht.

Versuchsteil III:

Die verschieden farblosen Limonaden werden in die Küvetten o. Ä. gefüllt und in das Polarimeter eingeführt. Am Analysator wird der Drehwinkel der jeweiligen Limonade abgelesen und notiert.

Die Werte aus Versuchsteil I werden mit denen aus Versuchsteil III verglichen und diskutiert.

Versuchsteil IV:

Es werden nur noch die optisch aktiven Substanzen benötigt. Mit diesen werden Lösungen gleicher Konzentration hergestellt. Nun werden, je nachdem wie viele Ausgangssubstanzen vorhanden sind, immer jeweils zwei Lösungen miteinander vermischt. Die Gemische werden in die Küvetten o. Ä. gefüllt und in das Polarimeter eingeführt. Am Analysator wird der Drehwinkel des jeweiligen Gemischs abgelesen und notiert.

Die Werte werden anschließend mit den jeweils zugehörigen Ausgangslösungen verglichen.

GEFÄHRDUNGSBEURTEILUNG

EXPERIMENT MESSUNG DER OPTISCHEN AKTIVITÄT










Durchführung

Es werden verschiedene nichtgesättigte Lösungen hergestellt von 1. verschiedenen Zuckern (Saccharose, Glucose, Fructose), 2. Kochsalz, 3. Zitronensäure, 4. Süßstoffen (Aspartam). Zusätzlich wird farblose Zitronenlimonade verwendet. Die Lösungen werden gemäß Versuchsanleitung für sich oder in Versuchsteil IV als Gemisch, bestehend aus zwei Lösungen, in eine Küvette gefüllt und in ein Polarimeter gegeben. Es wird festgehalten, ob ein Drehwert der jeweiligen Lösungen ermittelt werden kann und ob entsprechende Lösungen optisch aktive Substanzen enthalten.

Geplanter Einsatz:	Lehrerversuch	<input checked="" type="checkbox"/>	Schülerversuch	<input checked="" type="checkbox"/>	besonders schutzbedürftige Personen	<input type="checkbox"/>

Ermittlung der gefährlichen Stoffeigenschaften (Edukte / Produkte / Nebenprodukte)

Stoff / Gemisch	Signalwort	H-Ziffern + H-Sätze
1. Zitronensäure	Achtung	H319 Verursacht schwere Augenreizung. H335 Kann die Atemwege reizen.
2. Kochsalz		
3. Aspartam		
4. Saccharose		
5. Fructose		
6. Glucose		

Werden Gasbrenner verwendet?	ja	<input type="checkbox"/>	nein	<input checked="" type="checkbox"/>					
Piktogramme der beteiligten Stoffe									
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

GEFÄHRDUNGSBEURTEILUNG

MESSUNG DER OPTISCHEN AKTIVITÄT

Beurteilung der Gefahren

Gefahr	zu prüfen mit	vorhanden	nicht vorhanden
durch Haut- und Augenkontakt		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
durch Einatmen		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
durch Brand, Explosion	  	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Sonstige Gefahren		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Ggf. Erläuterungen zu weiteren Gefahren:

Ergebnis der verpflichtenden Substitutionsprüfung nach Gefahrstoffverordnung:

Da von allen Stoffen ein geringes Gefährdungspotenzial ausgeht und diese nicht in hohen Konzentrationen verwendet werden, ist das Ergebnis der Substitutionsprüfung negativ. Kein Stoff muss in der Art und Weise, wie mit ihm gearbeitet wird, substituiert werden.

Beurteilung des Grads der Gefährdung der gesamten Tätigkeit

gering	mittel	hoch	sehr hoch
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

GEFÄHRDUNGSBEURTEILUNG

MESSUNG DER OPTISCHEN AKTIVITÄT

Verwendungsverbote und Tätigkeitsbeschränkungen

für die Personen unter 1. werden beachtet

ja

Festlegung der Maßnahmen für die geplante Tätigkeit

Mindeststandards (TRGS 500) RISU I 3.4.1 RISU III 2.4.1	 Schutzbrille	 Schutzhandschuhe	 Abzug	 Geschlossenes System	 Lüftungsmaßnahmen	 Brandschutzmaßnahmen
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

weitere Maßnahmen:

Laborkittel

Maßnahmen für besonders schutzbedürftige Personen:

Entsorgung (optional)

Im Ausguss

Anlagen (z. B. Versuchsaufbau):

Zuletzt beurteilt von: _____

Datum, Unterschrift: _____