

Mit Messdaten optische Aktivität erschließen: Schülergeeignete Low-Cost Polarimeter



ALEXANDER FRITZ – HOLGER HINTZ – BENJAMIN PÖLLOTH

Chiralität ist ein zentrales Konzept der Natur und Gegenstand aktueller chemischer Forschung. Im Chemieunterricht wird sie allerdings häufig als abstrakt wahrgenommen. Zur anschaulichen Erschließung der optischen Aktivität chiraler Moleküle anhand von Messdaten werden zwei schülergeeignete und kostengünstige Selbstbau-Polarimeter vorgestellt. Mit beiden Polarimetern lassen sich verlässliche Drehwinkel messen und Einblicke in das Prinzip der Polarimetrie gewinnen.

1 Chiralität im Chemieunterricht

Chiralität stellt eine der zentralen Eigenschaften für den Aufbau des bekannten Lebens dar. In der Natur liegen viele Bausteine des Lebens – z.B. Kohlenhydrate oder Proteine – nur in der Form eines der beiden möglichen Enantiomere (Spiegelbilder) vor. Deshalb ist es auch eine bedeutende Herausforderung

der aktuellen chemischen Forschung, gezielt bestimmte Enantiomere eines Stoffes zu synthetisieren. Dies wird z.B. durch die „asymmetrische Organokatalyse“ (LIST, 2007) ermöglicht, für deren Entwicklung BENJAMIN LIST und DAVID MACMILLAN 2021 mit dem Nobelpreis in Chemie ausgezeichnet wurden. Trotz dieser herausragenden Bedeutung in Natur und chemischer Forschung ist Chiralität ein abstraktes Thema für viele



Abb. 1. Beispiele für Chiralität im Alltag

Lernende. Dabei spielt das Phänomen der Chiralität auch im Alltag eine Rolle: Ein linker Fuß kann nur in einen linken Schuh gesteckt werden, Schneckenhäuser von Weinbergschnecken winden sich fast ausschließlich im Uhrzeigersinn und ein achiraler Korkenzieher könnte seine Funktion nicht erfüllen. Auch Bezüge zur Chiralität von Molekülen können im Alltag begegnen: So wird rechtsdrehende Milchsäure auf Joghurtverpackungen angepriesen oder „Invertzuckersirup“ auf den Zutatenlisten von Lebensmitteln abgedruckt (RÜGER et al., 2012).

Aus welchem Grund erscheint die Chiralität von Molekülen also vielen Schüler/innen abstrakt? Es mag dabei zumindest eine Rolle spielen, dass sich chirale Moleküle weder über ihre typischen physikalischen noch über ihre chemischen Eigenschaften direkt unterscheiden lassen. Zwei Enantiomere unterscheiden sich nur in ihrer optischen Aktivität und bezüglich ihrer Reaktivität mit anderen chiralen Stoffen. Um Enantiomere unterscheiden zu können, ist also immer instrumentelle Analytik nötig. In der Forschung werden dafür z.B. chirale Derivatisierungsreaktionen zu Diastereomeren oder HPLC (Hochleistungsflüssigkeitsschromatographie) Messungen mit chiralem Säulenmaterial genutzt. Diese Messverfahren eignen sich jedoch aufgrund ihrer Komplexität und der hohen Kosten nicht für den Schulunterricht, sodass dort fast ausschließlich polarimetrische Messungen zur Unterscheidung von Enantiomeren genutzt werden können. Alle genannten Methoden vereint, dass die Stoffe nicht aufgrund direkter Beobachtungen, sondern allein durch Messdaten unterschieden werden. Ein solcher Umgang mit Daten mag für viele Lernende zunächst fremd erscheinen. Dennoch spiegelt er den wissenschaftlichen Alltag authentisch wider und bietet eine Lerngelegenheit zum wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn.

Die Bildungsstandards für die allgemeine Hochschulreife (Kultusministerkonferenz, 2020) sehen die Behandlung von optisch aktiven Naturstoffen (z.B. Aminosäuren, Saccharide etc.) vor. Für das erhöhte Anforderungsniveau wird auch die Behandlung von Chiralität gefordert. Aufgrund der oben beschriebenen Herausforderungen scheint eine Unterrichtseinheit ohne die experimentelle Unterscheidung von chiralen Molekülen durch ihren Drehwinkel kaum möglich. Da wissenschaftliche Polarimeter für den Einsatz in der Schule im Allgemeinen zu teuer sind, ist die Entwicklung schulgeeigneter Polarimeter nötig. Nach einem Überblick über bereits entwickelte Schulpolarimeter beschreiben wir den Bau und Einsatz von zwei neuen Umsetzungen von kostengünstigen Polarimetern.

2 Fachlicher Hintergrund zur Polarimetrie

Polarimetrie ist eine instrumentelle Analysemethode zur Bestimmung des Drehwinkels einer optisch aktiven Probesubstanz. Dabei wird das Licht einer monochromatischen Lichtquelle durch einen Polarisationsfilter¹ gestrahlt und dadurch in linear polarisiertes Licht konvertiert. Durchstrahlt linear pola-

riertes Licht eine Probe, kommt es zur Wechselwirkung der Lichtwellen mit den Molekülen. Das Elektronensystem eines Moleküls wird durch den oszillierenden elektrischen Feldvektor der Lichtwelle in eine erzwungene Schwingung versetzt. Diese Elektronenbewegung erzeugt wiederum eine Sekundärwelle, die sich mit der erregenden Lichtwelle kohärent überlagert. Dadurch ergibt sich eine neue Schwingungsebene, die gegenüber der ursprünglichen Ebene um einen Winkel gedreht erscheint. Trifft diese Lichtwelle allerdings auf das Spiegelbild des Moleküls, ergibt sich eine Drehung um den Winkel $360^\circ - \alpha$. Durch die unzähligen Moleküle in einer Probelösung heben sich somit die Einzeldrehungen gegenseitig auf und die Schwingungsebene des Lichts erscheint nach dem Durchstrahlen der Probe unverändert. Enthält die Lösung jedoch nur (oder überwiegend) Moleküle eines Enantiomers eines chiralen Moleküls, ist das Spiegelbild des Moleküls per Definition nicht (oder weniger) enthalten. Die Einzeldrehungen heben sich deshalb nicht gegenseitig auf und die Schwingungsebene des linear polarisierten Lichts scheint nach dem Durchgang durch die Probe um einen gewissen Betrag gedreht (NAUMER & HELLER, 1997).

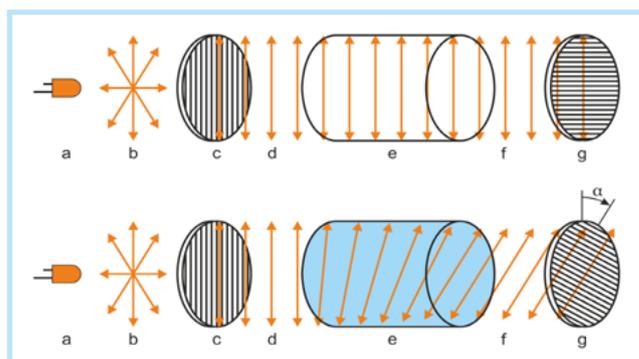


Abb. 2. Schematische Funktionsweise eines Polarimeters. Oben: Leere Küvette. Unten: Küvette mit optisch aktiver Probelösung. a) Monochromatische Lichtquelle, b) Unpolarisiertes Licht, c) Polarisationsfilter (die Striche symbolisieren dabei die Polarisationsrichtung), d) Linear polarisiertes Licht, e) Küvette, f) Linear polarisiertes Licht mit gedrehter Schwingungsebene, g) Analysator: Um die eigene Achse drehbarer Polarisationsfilter

Dieser Drehwinkel der Schwingungsebene kann durch einen zweiten, drehbaren Polarisationsfilter gemessen werden, durch den das Licht nach Passieren der Probelösung gestrahlt wird. Dieser wird vor der Messung (ohne optisch aktive Probe) so eingestellt, dass die beobachtbare Lichtintensität ein Minimum aufweist, also die Polarisations Ebenen der beiden Filter senkrecht zueinanderstehen (Abb. 2 oben). Nach dem Einfüllen einer optisch aktiven Probe wird der zweite Filter nun so lange gedreht, bis wieder ein Intensitätsminimum des Lichtes auftritt. In diesem Fall steht die Schwingungsebene des Lichtes erneut senkrecht zum Polarisationswinkel des Filters (Abb. 2 unten).

¹ Es sollte beachtet werden, dass der Begriff „Polarisationsfilter“ in diesem Zusammenhang etwas irreführend ist. Der Begriff „Filter“ impliziert, dass alle Lichtwellen blockiert werden, die nicht exakt der Polarisations Ebene des Filters entsprechen. Tatsächlich lässt sich linear polarisiertes Licht, das im Winkel α zum Polarisator steht, in einen Anteil entlang der Durchlassrichtung ($\cos \alpha$) und einen dazu horizontalen Anteil ($\sin \alpha$) aufteilen. Nur der erstgenannte Anteil kann den Polarisator passieren, die Intensität des Lichts nimmt deshalb proportional mit $\cos^2 \alpha$ ab (ROTH & STAHL, 2019).

Aus der Drehung des Polarisationsfilters kann somit abgeleitet werden, um welchen Winkel α die Schwingungsebene des linear polarisierten Lichts durch die optisch aktive Substanz gedreht wurde. Da dieser Drehwinkel α außer von der Art der enthaltenen Moleküle auch noch von der Massenkonzentration β (in g/mL), der Länge der durchstrahlten Küvette l (in dm), der Temperatur T , der Längswelle λ (oft D für $\lambda = 589$ nm) und vom Lösungsmittel abhängt, wird im Allgemeinen der spezifische Drehwinkel $[\alpha]_{\lambda}^T$ berechnet:

$$[\alpha]_{\lambda}^T = \frac{\alpha}{l \cdot \beta}$$

Der spezifische Drehwinkel ist eine charakteristische Eigenschaft eines Stoffes, der auch heute noch zur Beschreibung optisch aktiver Substanzen gemessen und in wissenschaftlichen Publikationen standardmäßig berichtet wird.

3 Didaktische Analyse zur Polarimetrie im Unterricht

Es ist eine besondere didaktische Herausforderung die unbekannte Teilcheneigenschaft Chiralität über die ebenfalls unbekannte Stoffeigenschaft optische Aktivität einzuführen. Ein phänomenologischer Einstieg kann trotzdem gelingen, z.B. indem dreidimensionale Kinofilme besprochen werden. Der dreidimensionale Eindruck entsteht, da gleichzeitig zwei Filme aus leicht versetzten Perspektiven abgespielt werden. Diese beiden Filme werden mit unterschiedlich polarisiertem Licht projiziert. Da es sich bei vielen 3D-Brillen um nichts Anderes als zwei Polarisationsfilter handelt, erreicht jeweils nur ein Film das entsprechende Auge. 3D-Brillen² können zusammen mit einem Smartphone – als Quelle von linear polarisiertem Licht – einen alltagsnahen Einstieg zur optischen Aktivität bieten (THOMSON, 2018). In ähnlicher Weise werden in der Schulpraxis auch häufig Demonstrationspolarimeter genutzt, die als Lichtquelle einen Overhead-Projektor verwenden (KNAUER, 1989). Diese Polarimeter haben jedoch den Nachteil, dass sie sich

zwar zur Erläuterung und Veranschaulichung des Phänomens der optischen Aktivität eignen, quantitative oder qualitative Messungen aber nur sehr eingeschränkt ermöglichen. Dabei stellt gerade die Polarimetrie eine seltene Möglichkeit dar, im Schulunterricht einfach quantitative Daten mit instrumenteller Analytik zu messen, auszuwerten und zu interpretieren. Aufgrund der zentralen Bedeutung instrumenteller Analytik in der Fachwissenschaft Chemie erscheint es sinnvoll, solche Methoden auch im Chemieunterricht einzusetzen. Dadurch kann die Kompetenz zur naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung gefördert und ein authentischeres Wissenschaftsbild vermittelt werden (MILNER-BOLOTIN, 2012). Die Wahrnehmung inhaltlicher Relevanz wird dabei nicht nur bei der Benutzung von wissenschaftlichen Messgeräten gefördert, sondern kann auch durch Low-Cost-Messgeräte erreicht werden (SCHÜTTLER, WATZKA, GIRWIDZ & ERTL, 2021). Das eigenständige Durchführen von polarimetrischen Messungen kann also nicht nur Chiralität anschaulich demonstrieren, sondern erlaubt auch die Auseinandersetzung mit Prinzipien der qualitativen und quantitativen instrumentellen Analyse.

Der Bau von kostengünstigen und einfachen Polarimetern für die Lehre wird von der fachdidaktischen Forschung bereits seit mindestens 90 Jahren verfolgt (KIPLINGER, 1930). Dabei entstand eine Vielzahl an unterschiedlichen Geräten und Ansätzen: In der Literatur finden sich z.B. Beschreibungen zu aufwändig konstruierten Polarimetern. Ihre Konstruktion verlangt sowohl handwerkliches Geschick, Zeit als auch spezielle Bauteile (JOSEPH, BUDDEN, CISEK & TOKARZ, 2018). Diese Anforderungen stellen für den Einsatz an der Schule eine große Hürde dar, da oft Werkzeug, Material oder technische Fertigkeiten fehlen. Auf der anderen Seite wurden auch einige Polarimeter aus Gegenständen des täglichen Lebens in unterschiedlichster Weise realisiert. Darunter fallen Polarimeter aus Klemmbausteinen (KVITTINGEN & SJURSNES, 2020), einer Schuhschachtel (MEHTA & GREENBOWE, 2011) oder aus Schaschlikspießen, Geodreieck und Labormaterial (HELFFENSTELLER & FLINT, 2022). Sie sind in der Regel billig, einfach zu konstruieren und zeigen den

	Aufbau	Einsatzmöglichkeit
KNAUER (1989)	Overhead-Projektor, zwei Polarisationsfolien, Geodreieck	Geeignet für Demonstrationsversuche
MEHTA & GREENBOWE (2011)	Modifizierte Schuhschachtel und Overhead-Projektor	Gleichzeitige Vermessung von Probe und Referenz
THOMSON (2018)	Smartphone, 3D-Brille und Dokumentenkamera	Klar erkennbarer Alltagsbezug, eher qualitative Messung
KVITTINGEN & SJURSNES (2020)	Klemmbausteine und LED	Offener Aufbau in sehr kleinem Maßstab
HELFFENSTELLER & FLINT (2022)	Stativmaterial und Glühbirne	Sehr einfacher Aufbau, benötigt abgedunkelten Raum
<i>Baumarktpolarimeter</i>	<i>Gartenschlauchzubehör und LED</i>	<i>Robuste Konstruktion, anschaulicher Zugang</i>
<i>3D-gedrucktes Polarimeter</i>	<i>3D-gedruckte Teile und LED</i>	<i>Sehr schneller Aufbau, genaue Messung</i>

Tab. 1. Vergleich ausgewählter Selbstbau-Polarimeter

² Hinweis: Viele Kinos verwenden heute zirkular statt linear polarisiertes Licht. 3D-Brillen mit Polarisationsfilter für linear polarisiertes Licht lassen sich aber z.B. problemlos im Optikerbedarf bestellen.

Schüler/inne/n, dass Naturphänomene auch jenseits komplizierter wissenschaftlicher Geräte beobachtbar sind. Allerdings sind sie anfällig für Beschädigungen, da die Ausgangsmaterialien oft nicht sehr stabil sind.

Um eine Brücke zwischen diesen verschiedenen Ansätzen zu schlagen, werden hier zwei schülergeeignete Polarimeter vorgestellt, die sich durch einfache Handhabung, einen stabilen und unkomplizierten Aufbau, gute Nachvollziehbarkeit des Messvorgangs sowie geringe Baukosten auszeichnen: Zum einen ein Polarimeter aus Gartenschlauchzubehör aus dem Baumarkt (Abb. 3) und zum anderen ein Polarimeter aus dem 3D-Drucker (Abb. 5). Einen Überblick über literaturbekannte und neu entwickelte Polarimeter mit möglichen Einsatzmöglichkeiten bietet Tabelle 1.

4 Bau eines Polarimeters aus Baumarktteilen

Zum Bau des Polarimeters werden Teile aus dem Garten- und Aquariumbau verwendet, die in nahezu jedem Baumarkt sowie im Onlinehandel zu finden sind. Andere Komponenten wie Leuchtdioden, Kabel, etc. können ebenfalls online bestellt werden. Beim Bau von zehn Polarimetern belaufen sich die Kosten pro Exemplar auf weniger als 8 €. Der Zusammenbau ist ohne weitere handwerkliche Kenntnisse und mit einfachen Werkzeugen (Säge, Heißklebepistole und Lötkolben) in ca. einer Stunde pro Polarimeter möglich.

Der grundlegende Aufbau erfolgt aus Gartenschlauchverbindern, Hahnverbindungsstücken und Kunststoffrohren: Zwei Schlauchverbinder werden auf die beiden Enden eines ca. 8 cm langen Kunststoffrohres gesteckt und festgeschraubt. Hiervon werden zwei Stück gefertigt und auf einem Laborstativ jeweils senkrecht über und unter einer Küvette montiert. Auf die beiden zur Küvette zeigenden Enden werden Hahnverbindungsstücke aufgesteckt, auf denen jeweils eine mit Polarisationsfilter versehene Kotflügelscheibe geklebt wurde (Abb. 3, rechts). Eines der Hahnverbindungsstücke wird zusätzlich mit einem Zeiger versehen, der beim Drehen des Verbindungsstückes den Drehwinkel auf einer darunter montierten Winkelscheibe anzeigt. Auf das noch oben zeigende Ende des Polarimeters wird ein Hahnverbindungsstück aufgesteckt, in das eine LED geklebt wurde. Als Küvette eignen sich alle Glasgefäße mit flachem Boden, wie z.B. Bechergläser, Standzylinder oder Schnappdeckelgläschen (Abb. 3, links). Optional besteht die Möglichkeit auf das andere Ende ein weiteres Hahnverbindungsstück aufzustecken, in das eine Fotodiode montiert wurde.

Alternativ dazu besteht die Möglichkeit, die Komponenten auf einer Regalschiene zu befestigen und damit das Polarimeter vertikal aufzubauen (Abb. 4). Dazu lässt sich aus einem Stück des zur Konstruktion benötigten Kunststoffrohres eine Küvette bauen, die dann ebenfalls in die Regalschiene eingeklemmt wird. Detailliertere Darstellungen, eine ausführliche Bauanleitung sowie ein Video für den Zusammenbau und die Bedienung befinden sich im Online-Material.

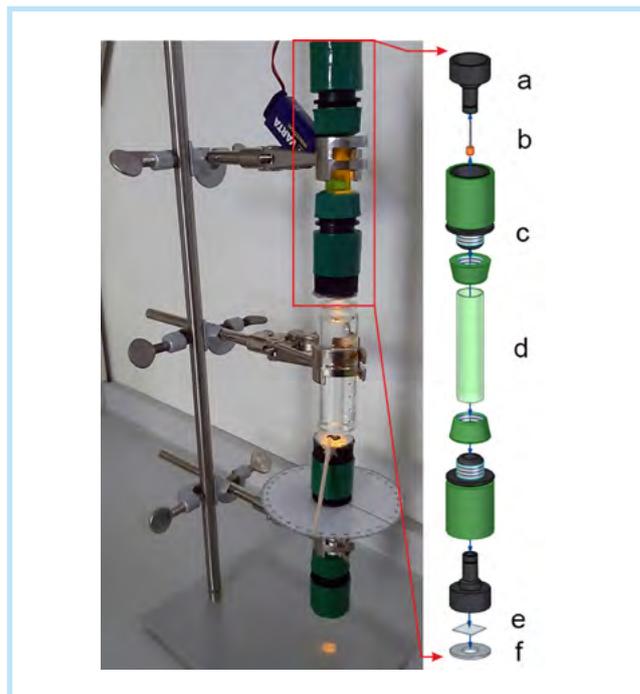


Abb. 3. Polarimeter aus Baumarktteilen. Links: Fotografie. Rechts: Explosionszeichnung der oberen Baugruppe. a) Gartenschlauch-Hahnadapter, b) LED, c) Schlauchverbinder, d) Kunststoffrohr, e) Polarisationsfilter, f) Unterlegscheibe

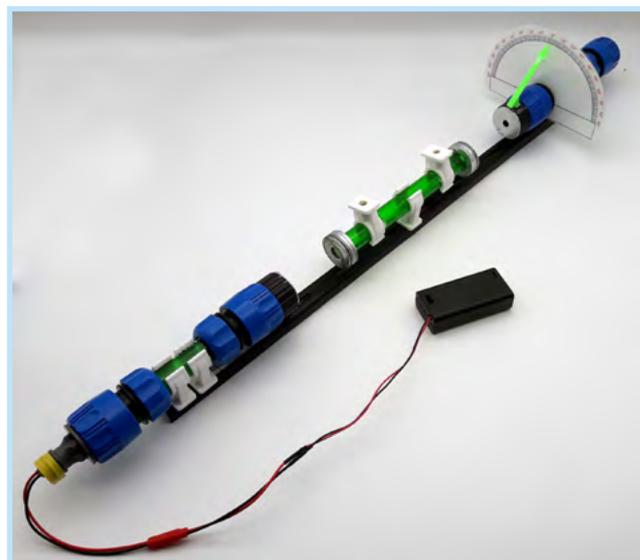


Abb. 4. Vertikaler Aufbau des Polarimeters aus Baumarktteilen

5 Konstruktion eines Polarimeters aus 3D-gedruckten Bauteilen

3D-Drucker sind heutzutage relativ kostengünstig zu erwerben, einfach zu bedienen und stehen deshalb an vielen Schulen zur Verfügung. Auch in den Naturwissenschaftsdidaktiken wurden verschiedenste Modelle, Hilfsmittel oder Laborgegenständen mit Hilfe von 3D-Druckern produziert; das MNU-Themenheft „3D-Druck“ 02/22 oder die Review zu 3D-Druck in der Chemie-didaktik von PINGER, GEIGER & SPENCE (2020) geben einen Über-

blick über die breiten Anwendungsmöglichkeiten. Schon BERNARD & MENDEZ (2020) entwickelten ein Schülerpolarimeter aus 3D-gedruckten Teilen. Für eine visuelle Messung muss bei diesem Polarimeter jedoch direkt in die LED geblickt werden. Da relativ lichtstarke LED verwendet werden, entspricht dies u.U. nicht den in Deutschland gültigen Empfehlungen der *Richtlinien zur Sicherheit im Unterricht* (Kultusministerkonferenz, 2019) zum Umgang mit LED. Das hier vorgestellte Polarimeter (Abb. 5) umgeht diese Einschränkung, indem die LED von oben nach unten die Küvette durchstrahlt und damit die Lichtintensität indirekt als unterschiedlich heller Lichtpunkt auf dem Tisch gemessen wird. Das neu entwickelte 3D-gedruckte Polarimeter weist außerdem einige weitere Vorteile auf: Im Gegensatz zum Modell von BERNARD & MENDEZ wird weniger Material und eine geringere Druckzeit benötigt, da die Küvette selbst als stützendes Element dient und somit kein zusätzliches Gehäuse nötig ist. Dies ermöglicht es, eine größere Winkelscheibe anzubringen und damit die Ablesegenauigkeit zu erhöhen, ohne das Gehäuse vergrößern zu müssen. Zusätzlich erlaubt die Konstruktion des Polarimeters, statt der 3D-gedruckten PLA-Küvette ein Schnappdeckelglas als Küvette zu verwenden, in der auch Lösungen mit organischen Lösungsmitteln vermessen werden können. Auch hier ist eine Messung mittels Fotodiode möglich, die von unten in das Polarimeter gesteckt werden kann.



Abb. 5. Polarimeter aus dem 3D-Drucker. Links: Fotografie. Rechts: Schnittdarstellung. a) LED, b) Polarisationsfilter, c) Mikroskop-Deckgläschen, d) Polarisationsfilter

Der 3D-Druck eines solchen Polarimeters benötigt ca. 69 g PLA-Filament und dauert ca. 7,5 Stunden (Druckermodell: Creality Ender 3 V2). Da der Grundriss der verwendeten 3D-gedruckten Küvette 1 cm² beträgt, entspricht 1 mL Probelösung

1 cm Schichtdicke, mit einer maximal möglichen Schichtdicke von 10 cm. Die Bauanleitung, Druckdateien und ein Video zum Zusammenbau und zur Bedienung befinden sich im Online-Material.

6 Validierung und Vergleich der beiden Polarimeter

Die beiden neu entwickelten Polarimeter wurden im Schulunterricht in zwei 11. Klassen ($N = 25$) getestet. Um einen Vergleich der Polarimeter zu ermöglichen, erhielt jeweils die Hälfte der Schülergruppen in beiden Klassen das 3D-gedruckte Polarimeter, während die anderen Gruppen mit dem Baumarkt-polarimeter arbeiteten. Dabei sollten die Schüler/innen die Massenkonzentration von drei unterschiedlich konzentrierten Saccharose-Lösungen durch die optische Drehung bestimmen. Die Messwerte der Schülergruppen wurden gesammelt und sind in Abbildung 6 dargestellt. Es zeigt sich dabei, dass die Schülergruppen mit dem 3D-gedruckten Modell eine leicht höhere Messgenauigkeit erzielten als die Gruppen mit dem Polarimeter aus Baumarktteilen. Interessanterweise führte die Verwendung einer Fotodiode statt der visuellen Messung nur zu einem geringfügig besseren Messergebnis (Tabelle 2). Für beide Polarimeter zeigt sich jedoch, dass selbst bei geringen Konzentrationen ausreichend genaue Messergebnisse möglich waren.

Die Schüler/innen wurden außerdem gebeten, einen kurzen Feedbackbogen auszufüllen. Sie betonten dabei insbesondere die einfache und unkomplizierte Bedienung der Polarimeter. Auf einer sechsstufigen Likert-Skala stimmten 90 % der Aussage voll zu oder zu, dass „die Messung des Drehwinkels einfach und problemlos“ war. 77 % der Schüler/innen stimmten (voll) zu, dass sie „während der Messung gut nachvollziehen [konnten], wie das Polarimeter funktioniert“. Auch wenn sich einige Unterschiede bei der Verwendung der verschiedenen Polarimeter andeuten, erlaubt die kleine Stichprobengröße keine vertiefte Diskussion. Zusammenfassend stellte ein/e Schüler/in fest: „Man konnte das Experiment sehr gut nachvollziehen. Außerdem hat es viel zum Verständnis beigetragen.“ Ein/e andere/r Schüler/in betonte, dass der Einsatz der Low-Cost Polarimeter „[s]innvoll [ist], da es sehr visuell ist und gezeigt wird, dass nicht immer teure/komplizierte Geräte für chemische Versuche/Messung vonnöten sind.“

7 Einsatzmöglichkeiten im Unterricht

Im Schulunterricht bieten sich polarimetrische Messungen insbesondere bei der Behandlung von chiralen Naturstoffen an.

	$B = 0,1 \text{ g/mL}$	$B = 0,3 \text{ g/mL}$	$B = 0,5 \text{ g/mL}$
Baumarkt	2,02°	1,96°	3,43°
3D-Druck (visuell)	0,35°	2,05°	1,25°
3D-Druck (Fotodiode)	0,35°	0,05°	1,5°

Tab. 2. Abstände der Mediane der Messwerte der Schüler/innen zum theoretischen Drehwinkel

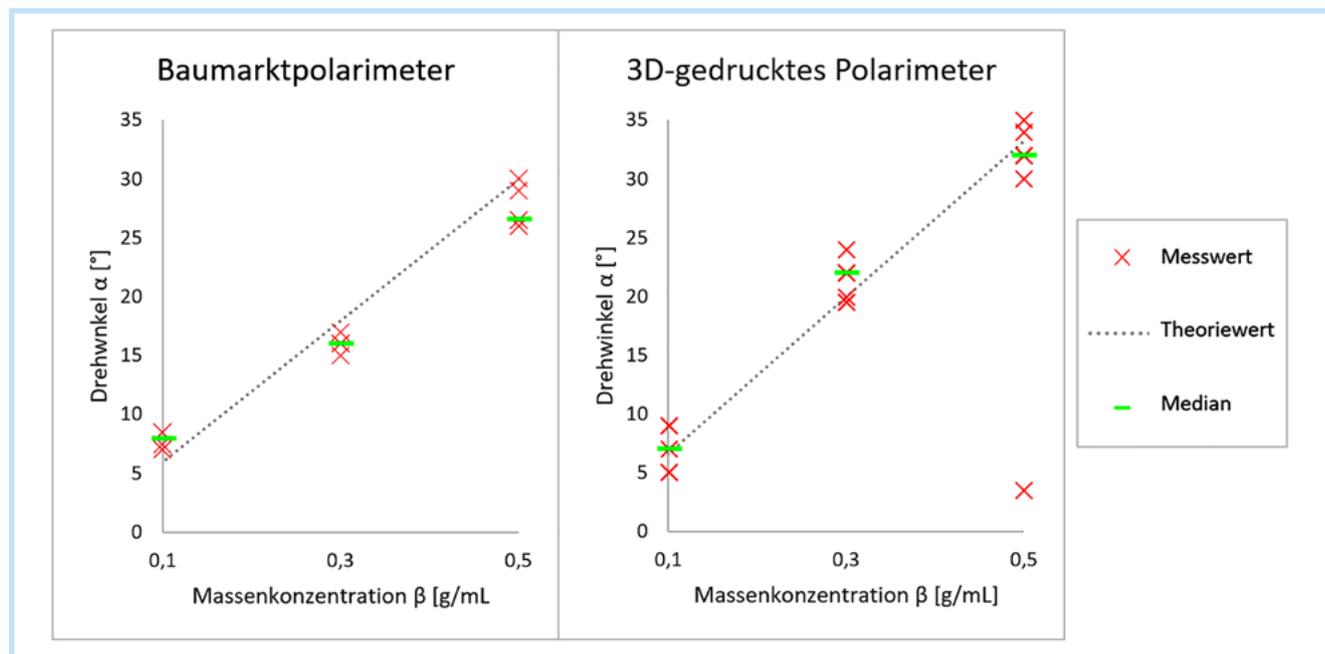


Abb. 6. Messwertverteilung von jeweils sieben Schülergruppen ($N = 25$) bei Benutzung des Polarimeters aus Baumarktteilen (links) und des 3D gedruckten Polarimeters (rechts) mit drei Massenkonzentrationen. Der Median ist jeweils in grün eingezeichnet, der Theoriewert als gepunktete graue Linie.

Vor allem Zuckerlösungen lassen sich aufgrund der großen spezifischen Drehwinkel von Sacchariden gut vermessen. Neben der Identifikation von unbekanntem Zuckern oder Konzentrationsmessungen, können auch zwei besondere Eigenschaften der Saccharide durch die Polarimetrie beobachtet werden: Ein mögliches Schülerexperiment ist das Untersuchen der Rohrzuckerinversion, wobei Saccharose säurekatalysiert in Glucose und Fructose gespalten wird. Der Reaktionsverlauf kann mit einem Polarimeter durch den sich mit der Zeit verändernden Drehwinkel der Lösung verfolgt werden. Durch eine grafische Auswertung der Messdaten lassen sich vor allem kinetische Aspekte (momentane vs. mittlere Reaktionsgeschwindigkeit) aufzeigen. In einem anderen Experiment kann die Mutarotation von Glucose in wässrigen Lösungen nachverfolgt werden: Auch hier können aus polarimetrischen Untersuchungen erhaltene Messdaten grafisch aufgetragen, ausgewertet und interpretiert werden, um die Einstellung eines dynamischen Gleichgewichts anschaulich zu demonstrieren. Bei beiden Experimenten liegt der didaktische Schwerpunkt darauf, aus abstrakten Messdaten wie dem Drehwinkel durch eine sorgfältige Auswertung Rückschlüsse über schwer wahrnehmbare chemische Phänomene ziehen zu können. Ausführliche Versuchsbeschreibungen und beispielhafte Messdaten sind im Online-Material in den Abschnitten 3.2 und 3.3 zu finden. Die Polarimeter bieten das Potential, weitere chirale Reaktionen in Anlehnung an die Bildungsstandards experimentell für den Chemieunterricht zu erschließen.

8 Fazit

Beide in dieser Arbeit realisierten Schülerpolarimeter ermöglichen die qualitative und quantitative Einführung der Mess-

größe Drehwinkel im Unterricht. Während beide Polarimeter Messwerte liefern, die nahe an den Literaturwerten liegen, gibt es durchaus unterschiedliche Einsatzszenarien. Das Baumarktpolarimeter ermöglicht einen sehr einfachen, anschaulichen Zugang zu den Bauteilen und deren Funktion im gesamten Messvorgang, während das 3D-Druck Polarimeter sehr schnell aufgebaut werden kann und sich somit auch für die Durchführung weiterführender Experimente im Unterricht eignet. In allen Szenarien sollen Schüler/innen dabei lernen, experimentell Messwerte zu erfassen, auszuwerten und auf Basis dieser Daten Schlussfolgerungen zu treffen.

Eine detaillierte Bauanleitung inkl. Videos, sowie die Dateien für den 3D-Drucker stehen als online Ergänzung zur Verfügung.



Literatur

BERNARD, P. & MENDEZ, J. D. (2020). Low-Cost 3D-Printed Polarimeter. *Journal of Chemical Education*, 97(4), 1162–1166.

HELFFENSTELLER, R. & FLINT, A. (2022). POLARIO – Ein einfaches Low-Cost-Polarimeter für den Schuleinsatz. *CHEMKON*, 29(4), 171–176.

JOSEPH, A., BUDDEN, K., CISEK, R. & TOKARZ, D. (2018). Laser Polarimeter Laboratory for Measuring Scattering in Undergraduate Analytical Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 95(11), 2041–2045.

- KIPLINGER, C. C. (1930). An improvised polarimeter. *Journal of Chemical Education*, 7(9), 2174–2176.
- KNAUER, B. (1989). A demonstration of the optical activity of a pair of enantiomers. *Journal of Chemical Education*, 66(12), 1033–1034.
- Kultusministerkonferenz (2019). *Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht. Beschluss der KMK vom 09.09.1994 i. d. F. vom 14. Juni 2019.*
- Kultusministerkonferenz (2020). *Bildungsstandards im Fach Chemie für die Allgemeine Hochschulreife. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020.*
- KVITTINGEN, L. & SJURSNES, B. J. (2020). Demonstrating Basic Properties and Application of Polarimetry Using a Self-Constructed Polarimeter. *Journal of Chemical Education*, 97(8), 2196–2202.
- LIST, B. (2007). Introduction: Organocatalysis. *Chemical Reviews*, 107(12), 5413–5415.
- MEHTA, A. & GREENBOWE, T. J. (2011). A Shoebox Polarimeter: An Inexpensive Analytical Tool for Teachers and Students. *Journal of Chemical Education*, 88(8), 1194–1197.
- MILNER-BOLOTIN, M. (2012). Increasing Interactivity and Authenticity of Chemistry Instruction through Data Acquisition Systems and Other Technologies. *Journal of Chemical Education*, 89(4), 477–481.
- NAUMER, H. & HELLER, W. (Hg.) (1997). *Untersuchungsmethoden in der Chemie. Einführung in die moderne Analytik.* Thieme: Stuttgart, New York.
- PINGER, C. W., GEIGER, M. K. & SPENCE, D. M. (2020). Applications of 3D-Printing for Improving Chemistry Education. *Journal of Chemical Education*, 97(1), 112–117.
- ROTH, S. & STAHL, A. (2019). *Optik. Experimentalphysik – anschaulich erklärt.* Springer Spektrum: Berlin, Heidelberg.
- SCHÜTTLER, T., WATZKA, B., GIRWIDZ, R. & ERTL, B. (2021). Die Wirkung der Authentizität von Lernort und Laborgeräten auf das situationale Interesse und die Relevanzwahrnehmung beim Besuch eines naturwissenschaftlichen Schülerlabors. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 27(1), 109–125.
- THOMSON, P. (2018). Is That a Polarimeter in Your Pocket? A Zero-Cost, Technology-Enabled Demonstration of Optical Rotation. *Journal of Chemical Education*, 95(5), 837–841.
- ALEXANDER FRITZ ist Student der Chemie und Geschichte im Master of Education an der Eberhard Karls Universität Tübingen.
- Dr. HOLGER HINTZ (holger.hintz@gmx.de) ist Lehrer am HAP Grieshaber Gymnasium im BZN Reutlingen für die Fächer Chemie und Physik und erfüllt einen Lehrauftrag für Didaktik der Chemie an der Universität Tübingen.
- Dr. BENJAMIN PÖLLOTH (benjamin.poelloth@uni-tuebingen.de) ist Postdoktorand in der Didaktik der Chemie an der Eberhard Karls Universität Tübingen, Auf der Morgenstelle 18, 72076 Tübingen. ■□