

DOI: 10.1002/ckon.202000010

Zur Schülerwahrnehmung von Low-Cost-Experimentiermaterialien. Die Destillation im Kleinmaßstab

Laura Bögge* und Arnim Lühken*[a]

Zusammenfassung: Von medizintechnischem Zubehör wie Kunststoffspritzen, Kanülen und Ampullengläsern bis hin zu Blisterpackungen oder Teelichthüllen – Experimentiervorschläge, die mit *Low-Cost*-Materialien realisiert werden, sollen eine kostengünstige, zeitökonomische, umweltfreundliche und zugleich motivierende Alternative für Schülerexperimente auch bei hohen Schülerzahlen sein. Bisher gibt es jedoch keine fachdidaktischen Studien, die den praktischen Einsatz solcher Materialien hinsichtlich genannter Aspekte auch empirisch untersuchen. Präsentiert wird daher eine Studie mit $N=89$ Schülerinnen und Schülern einer Realschule, die eine *Low-Cost*-Destillation durchgeführt haben und anschließend zu ihren praktischen Erfahrungen sowie ihrer Wahrnehmung hinsichtlich der Materialien befragt wurden. Die Ergebnisse der qualitativen Erhebung werden kategorisiert dargestellt und genutzt, um praktische Implikationen für den generellen Einsatz von *Low-Cost*-Materialien im Unterricht ableiten zu können.

Stichworte: Low-Cost · Experimentiermaterial · Destillation · Schülerwahrnehmung

On students' perception of low-cost experimental equipment. Distillation in small-scale

Abstract: From medical technology like plastic syringes, cannulas and ampoules to blister packs or tea light cups – experimental instructions using *low-cost* equipment are supposed to be a solution for cost- and time-efficient, environmentally friendly as well as motivating lab work even with high numbers of students. However, there are no empirical studies in science education that evaluate the use of such equipment with regard to these aspects. Therefore, a study is presented with $N=89$ secondary school students who have carried out a low-cost distillation and were questioned afterwards about their practical experiences and their perception towards the equipment. The results of the qualitative survey are presented in a category system, which will then be used to derive practical implications for the general application of low-cost equipment in science teaching.

Keywords: low-cost · experimental equipment · distillation · student perception

1. Einleitung

Dem Schülerexperiment wird im Rahmen des naturwissenschaftlichen Unterrichts eine zentrale Bedeutung zugeschrieben [1]. Daher soll es *möglichst häufig* stattfinden und *alle Schülerinnen und Schüler einbeziehen*, sodass es gleichzeitig *möglichst schnell*, aber trotzdem *sicher* umzusetzen sein muss. Diesen Erwartungen gerecht zu werden, stellt sich aus der Perspektive von Lehrkräften als oftmals problematisch heraus. Neben einem chronischen Zeitmangel durch volle Lehrpläne geben Lehrkräfte knappe Lehrmittel-Budgets, nicht ausreichend vorhandene Fachräume sowie dürftig ausgestattete Materialien- und Chemikaliensammlungen bei gleichzeitig hohen Schülerzahlen als Hürden in der praktischen Umsetzung von Schülerexperimenten in ihrem Unterrichtsalltag an [2]. Aus diesen Problemen heraus wächst der Bedarf an Experimentiermaterialien, die ein zügiges Vor- und Nachbereiten von Experimenten sowie eine schnellere Durchführung im Unterricht ermöglichen und in großen Mengen preiswert zu beschaffen sind. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wurde eine Reihe sogenannter *Low-Cost*-Experimentieranleitungen entwickelt [3,4]. Diese greifen auf Alltagsmaterialien wie Teelichter, Bleistiftminen und Blisterpackungen oder Einwegarti-

kel aus der Medizintechnik zurück, um kostengünstige Varianten gängiger Schülerexperimente umzusetzen. In Europa sind vor allem *Low-Cost*-Anleitungen des SALiS-Projektes (Student Active Learning in Science) bekannt, das Lehrkräfte aus Ländern mit mangelhafter materieller Ausstattung im Einsatz solcher *Low-Cost*-Experimente aus- und fortbildet, um die Häufigkeit von Schülerexperimenten im naturwissenschaftlichen Unterricht zu erhöhen (bspw. in Moldavien oder Georgien) [5]. Darüber hinaus stammt der Großteil an Untersuchungen zu *Low-Cost*-Materialien aus Ländern wie Ghana, Tansania, den Philippinen oder Teilen Südafrikas, in denen der Rückgriff auf kostengünstige Materialien aufgrund schlechter Grundausstattung oftmals die einzige Möglichkeit darstellt, überhaupt Schülerexperimente in großer Zahl durchführen zu können [6,7]. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse dieser Studien auf Schülerinnen und Schüler deutscher Schulen – beispielsweise hinsichtlich einer Veränderung des Interesses an den Naturwissenschaften – ist allerdings fraglich, da diese in der Regel das Experimentieren mit klassischen Labormaterialien gewohnt sind. Berichte über die Eignung von *Low-Cost*-Materialien für den Chemieunterricht an deutschen Schulen sind überwiegend positiv [8,9], basieren aber weitgehend auf Meinungen von Einzelpersonen und sind nicht ausreichend empirisch fundiert. Um neben Kostenvorteilen weiterhin einen auch experimentell und didaktisch gelungenen Chemieunterricht garantieren zu können, untersucht diese Forschungsarbeit vor dem Hintergrund fachdidaktischer Anforderungen an ein gelungenes Experiment, wie Schülerinnen und Schüler einer weiterführenden Schule in Deutschland den

[a] L. Bögge, A. Lühken
Goethe-Universität Frankfurt/Main
Max-von-Laue-Str. 7
60438 Frankfurt/Main
* E-Mail: boegge@chemie.uni-frankfurt.de
luehken@chemie.uni-frankfurt.de

Tab. 1: Fachdidaktische Anforderungen an ein gelungenes Schulexperiment, zu denen ein Zusammenhang zum Experimentiermaterial untersucht wird.

Phase	fachdidaktische Anforderungen
Unterrichtsvorbereitung	– geeignete Rahmenbedingungen: Materialverfügbarkeit und finanzielle Anschaffungsmöglichkeiten
Versuchsaufbau und praktische Durchführung	– angemessener Grad der Herausforderung: manuelle Fähigkeiten und kognitive Kapazitäten – Autonomieerleben durch Offenheit der praktischen Erfahrung
Versuchsbeobachtung phasenübergreifend	– hohe Gelingenswahrscheinlichkeit: deutlicher Effekt, angemessene Ergebnisqualität – Motivation und Interesse wecken – angemessener Zeitaufwand: effiziente Nutzung der Unterrichtszeit, realistische Vor- und Nachbereitungsdauer – Einhaltung der Arbeitssicherheit – Kompetenzerleben durch angemessenen Grad der Herausforderung und hohe Gelingenswahrscheinlichkeit – Durchschaubarkeit der Apparatur und einzelner Bestandteile sowie deren Bedienung

Einsatz von Low-Cost-Materialien im Unterricht wahrnehmen. Damit leistet diese Arbeit einen Beitrag zur Identifikation von Chancen und Grenzen von Low-Cost-Materialien als Alternative zu klassischem Labormaterial.

2. Theoretische Einordnung und Fragestellung

Zur Abgrenzung des Forschungsgegenstandes dieser Arbeit muss zunächst der Begriff ‚Low-Cost-Material‘ definiert werden. Low-Cost-Materialien bezeichnen alle Materialien außerhalb des gängigen Laborbedarfs, die geeignet sind 1.) bestimmt für das Experimentieren relevante Funktionalitäten abzudecken, auch wenn sie ursprünglich nicht für diesen Zweck entwickelt wurden, und 2.) für einen deutlich geringeren Preis bezogen werden können als klassische Labormaterialien, die den gleichen oder einen ähnlichen Zweck erfüllen. Beispiele für Low-Cost-Materialien sind günstig produzierte Massenware aus der Medizintechnik (v. a. Kunststoffspritzen und Kanülen als Ersatz für Kolbenprober und Büretten) oder teilweise umfunktionierte Alltagsgegenstände wie Büroklammern und Bleistiftminen als Elektroden und Teelichthüllen oder Blisterpackungen als Chemikaliengefäße. Nicht zu verwechseln sind Low-Cost-Materialien mit Materialien für sogenannte Micro-Scale- oder Small-Scale-Experimente, bei denen Standardapparaturen mit dem wesentlichen Ziel miniaturisiert werden, die verwendete Chemikalienmenge zu reduzieren und auf diese Weise anfallende Kosten zu senken. Auch Vorschläge wie beispielsweise das Minilabor [10] fallen nicht unter Low-Cost-Materialien im Sinne der hier angelegten Definition, da die Materialien explizit für den Einsatz im experimentellen Kontext entwickelt wurden und weiterhin mit hohen Anschaffungskosten verbunden sind. Entsprechende Micro-Scale-Materialien werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, da Experimente mit Low-Cost-Materialien sowohl mit reduzierten Chemikalienmengen durchgeführt werden als auch die Materialien als solche kostengünstig zu beschaffen sind. Damit bieten sie das größere Potential zur Umsetzung von Schülerexperimenten auch bei mangelnder materieller Ausstattung und finanziellen Möglichkeiten einer Schule. Diesem Vorteil der Kostensenkung stehen jedoch fehlende empirische Untersuchungen bezüglich ihrer fachdidaktischen Eignung für den Unterricht entgegen. Da auch Low-Cost-Experimente grundlegend den Ansprüchen an ein gelungenes Experiment gerecht werden müssen, wurde in einem ersten Schritt eine Literaturrecherche zu theoretisch beschriebenen fachdidaktischen Anforderungen an ein gelungenes Experiment im Chemieunterricht durchgeführt [11,12]. Daraus resultierten 18 Anforderungen, die anschließend drei Expertinnen und Experten des Instituts für Didaktik der Chemie der Goethe-Universität Frankfurt vorgelegt und mittels kommuni-

kativer Validierung unter den Beteiligten auf diejenigen reduziert wurden, zu denen ein Zusammenhang zum Experimentiermaterial vermutet werden kann. Ein Beispiel für eine in diesem Schritt exkludierte Anforderung ist die nachvollziehbare Einbettung des Experiments in den Unterrichtsgang. Alle beibehaltenen Anforderungen sind in Tabelle 1 dargestellt. Auf ihre ausführliche Definition muss an dieser Stelle aus Gründen des Umfangs verzichtet werden, exemplarisch genannt seien die Durchschaubarkeit der Versuchsapparatur und der Funktion ihrer einzelnen Bestandteile, ein deutlicher Effekt bei der Versuchsbeobachtung oder auf organisatorischer Ebene die Einhaltung von Sicherheitsstandards. Mit diesen Anforderungen als Grundlage stellt sich folgende Forschungsfrage:

F: Wie nehmen Schülerinnen und Schüler das Experimentieren mit Low-Cost-Materialien wahr?

Das methodische Vorgehen zur Beantwortung dieser Frage wird im folgenden Abschnitt näher erläutert.



Laura Bögge studierte von 2010 bis 2016 die Fächer Chemie und Deutsch für das Lehramt an Gymnasien an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. Seit 2017 arbeitet sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Didaktik der Chemie der Goethe-Universität Frankfurt/Main im Arbeitskreis von Prof. Dr. Arnim Lühken. In ihrer Promotion beschäftigt sie sich mit einem Vergleich von alternativen und klassischen Experimentiermaterialien aus fachdidaktischer Perspektive.



Arnim Lühken studierte Chemie und Biologie für das Lehramt an Gymnasien an der Universität Frankfurt/Main und legte 1999 das 1. Staatsexamen ab. Nach der Promotion im Arbeitskreis von Prof. Dr. Hans Joachim Bader und dem 2. Staatsexamen am Studienseminar Frankfurt/Main war er von 2005 bis 2008 als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Arbeitskreis von Prof. Dr. Ilka Parchmann an der Universität Oldenburg tätig. Im April 2008 nahm er einen Ruf auf die C1-Professur für Didaktik der Chemie an der Goethe-Universität Frankfurt/Main an. Ebenda wurde er im August 2011 zum W2-Professor ernannt.

3. Methodisches Vorgehen

3.1 Untersuchungskontext

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurde eine qualitative Interviewstudie unter vier 10. Klassen einer hessischen Realschule ($N=89$ Schülerinnen/Schüler) durchgeführt. Dazu haben alle Schülerinnen und Schüler im Rahmen ihres regulären Chemieunterrichts eine im nächsten Abschnitt beschriebene Low-Cost-Destillation durchgeführt. Für das Projekt wurde gezielt eine Klassenstufe gewählt, die die Destillation theoretisch bereits behandelt und als Demonstrationsexperiment gesehen hat, da der Fokus der Untersuchung, und damit auch der Fokus der Schülerinnen und Schüler, nicht auf dem Fachinhalt, sondern auf der Handhabung und Wahrnehmung der Low-Cost-Materialien liegen soll. Trotzdem wurden die relevanten Aspekte der Versuchsbeobachtung zum Stundeneinstieg wiederholt. Anschließend, noch vor Experimentierbeginn, wurden die Schülerinnen und Schüler im Sinne der Warentest-Methode in die Lage von Produkt-Testern versetzt [13]. Dazu wurde den Schülerinnen und Schülern kommuniziert, dass es ihre Aufgabe sei die Experimentiermaterialien zu testen und ihre Meinung im Anschluss als ‚Testurteil‘ abzugeben. Der Begriff ‚Low-Cost‘ wurde den Schülerinnen und Schülern gegenüber stets vermieden, um einen Einfluss des Kostenfaktors auf die Beurteilung der Materialien nicht hausgemacht zu initiieren. Im Gegensatz zur Warentest-Methode wurden keine Bewertungsdimensionen vorgegeben, auch wenn durch die theoretische Vorarbeit bereits ein Bewertungssystem bestanden hätte. Durch diesen Ansatz wurde sichergestellt, dass die Schülerinnen und Schüler nicht auf vorgegebene Kriterien fokussieren, sondern diejenigen Aspekte identifiziert werden, die von Schülerinnen und Schülern beim Experimentieren mit Low-Cost-Materialien als überhaupt relevant empfunden bzw. welche ohne Vorgabe überhaupt nicht genannt werden. Außerdem bleibt Raum für Aspekte, die durch die theoretisch beschriebenen Anforderungen nicht abgedeckt sind. Im Anschluss führten die Schülerinnen und Schüler als Vorbereitung auf die eigentliche Datenerhebung in Partnerarbeit ein Low-Cost-Experiment durch. Die Auswahl des Experiments sowie dessen materieller Aufbau werden im nächsten Abschnitt detaillierter umrissen.

3.2 Experiment- und Materialauswahl

Mit der Destillation eines Alkohol-Wasser-Gemischs wurde für diese Untersuchung ein Standardexperiment zur Stofftrennung gewählt, das üblicherweise zwar auch mit klassischen, in Schülerhänden jedoch kostenintensiven Labormaterialien durchgeführt werden kann; eine Low-Cost-Variante könnte demnach eine Kostenerleichterung darstellen. Das Verfahren der Destillation eignet sich für diese Studie besonders, da es als Schülerexperiment etabliert und weit verbreitet ist. Darüber hinaus umfasst die Versuchsdurchführung verschiedenste Schritte wie das Abmessen, Umfüllen, Erhitzen und Entzünden von Chemikalien; außerdem müssen die Materialien sowohl Aggregatzustandsänderungen, den Transport und das Abkühlen eines Dampfes als auch das Eintropfen und Sammeln einer Flüssigkeit ermöglichen. Diese Breite benötigter

Funktionalitäten ermöglicht den Schülerinnen und Schülern umfassende Eindrücke zu den Materialien.

Konkret wird auf eine von El-Marsafy und Schwarz [14] publizierte Low-Cost-Apparatur zurückgegriffen, die in Form einer Experimentierbox und eines Begleitheftes auch als Lehrmittel angeboten wird [15].¹

Anders als bspw. der Vorschlag von Obendrauf [16] zur Destillation im Reagenzglas, handelt es sich bei dieser Variante um die einzig publizierte Destillationsapparatur, die vollständig auf Low-Cost-Materialien nach der beschriebenen Definition aufbaut. Da sowohl die Box als auch das Begleitheft seit längerer Zeit über das Internet vertrieben werden, ist anzunehmen, dass sie für den praktischen Einsatz im Unterricht hinreichend getestet sind und eingesetzt werden können. Außerdem kann somit davon ausgegangen werden, dass auch Lehrkräfte auf diese Variante der Destillation zurückgreifen, sodass die Ergebnisse der Studie ebenso als Rückmeldung auf unterrichtspraktischer Ebene dienen. Dem Experimentieranschlag folgend, lagen den Schülerinnen und Schülern die Materialien aus Abbildung 1 sowie eine Versuchsanleitung inklusive einer Skizze der Apparatur vor (Abb. 2). Das Material wurde ihnen in Form von zusammengestellten Experimentierkisten bereitgestellt. Die Apparatur als solche besteht aus zwei mit einem Draht verbundenen Ampullen- bzw. Rollrandgläsern, die jeweils mit einem Gummistopfen verschlossen werden. Durch beide Stopfen wird vorab eine um die oberste Einheit gekürzte, dadurch weiter geöffnete Pipettenspitze gesteckt, auf die anschließend jeweils ein Ende eines Silikon Schlauches gesetzt wird. Durch den Gummistopfen der Vorlage wird zum Zwecke des Druckausgleichs eine Kanüle gesteckt, die den Vorschlägen für einen sicheren Einsatz von Kanülen im Unterricht entspricht [17]. Für die Versuchsdurchführung werden mit einer Kunststoffpipette 3 ml einer alkoholhaltigen Flüssigkeit (hier Campari: 25 Vol.-%) in das Destillier-Gläschen gegeben und erhitzt. Dazu wird die Apparatur mit einer Tiegelflange mittig am Verbindungsdraht angehoben und das Destillier-Gläschen über einem Teelicht positioniert. Da diese Experimentvariante lediglich den Trenneffekt zeigen soll, wird das Ende der Destillation durch die Angabe einer Destillatmenge [ca. 0,5 cm] vorgegeben. Zur Durchführung der Brennprobe wird das Destillat in eine Teelichthülle gegeben und entzündet.



Abb. 1: Für die Low-Cost-Destillation eingesetzte Materialien.

3.3 Datenerhebung und Stichprobe

Nach der Durchführung des Experiments wurde im Rahmen eines schriftlichen Fragebogens mit Freitextfeldern von 69 der 89 Schülerinnen und Schüler ihre subjektive Wahrnehmung zu

¹ Sowohl auf der Box als auch dem Begleitheft ist die in [14] publizierte Low-Cost-Apparatur abgebildet, die im Heft abgebildete Apparatur weicht jedoch davon ab. In dieser Untersuchung wird sich an der in [14] beschriebenen Apparatur-Variante orientiert, wobei statt Cola ein Alkohol-Wasser-Gemisch gewählt wurde und die Low-Cost-Apparatur nicht mit isoliertem Draht, sondern mit einer Tiegelflange als Hilfsmittel über die Teelichtflamme gehalten wird.

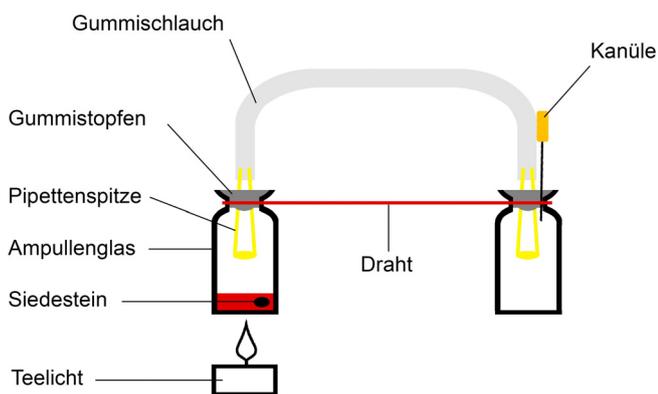


Abb. 2: Skizzierter Versuchsaufbau der Low-Cost-Destillationsapparatur.

den Experimentiermaterialien erhoben. Konkret wurde die Frage gestellt, was ihnen an den Experimentiermaterialien gut bzw. nicht gut gefallen habe. Außerdem liegen von insgesamt sechs zufällig ausgewählten (freiwilligen) Experimentier-Paaren statt dieser Fragebogendaten Audioaufzeichnungen der Experimentiersituation vor. Durch die gewohnte Umgebung sowie den bewussten Verzicht auf Videoaufnahmen wird dabei von weitgehend natürlichen Gesprächssituationen ausgegangen, in denen die Schülerinnen und Schüler ihre Gedanken beim Umgang mit dem Material ungezwungen verbalisieren. Zur Vertiefung der Daten wurden die aufgezeichneten Schülerpaare einer Klasse im Anschluss an die Experimentierphase interviewt. Um dabei ein breiteres Meinungsbild erfassen zu können, nahmen auch weitere Schülerinnen und Schüler der jeweiligen Klasse an dem Interview teil, sodass aus jeder der vier Klassen von durchschnittlich fünf Schülerinnen und Schülern statt schriftlicher Antworten im Fragebogen Aussagen aus leitfadengestützten Gruppeninterviews vorliegen. Nach einem offenen Einstieg zu ihrem ersten Eindruck bezüglich der Materialien richteten sich die Leitfragen gezielt nach Schwierigkeiten und Vorteilen im Vergleich zu aus dem Unterricht bekannten Experimentiermaterialien. Die Stichprobe ist in Tabelle 2 beschrieben. Erhoben wurde die letzte Chemie-Zeugnisnote als Indikator für die Leistung im Fach, über eine bereits bestehende Skala wurde außerdem das Interesse am Experimentieren erhoben [18]. Anhand der Daten ist davon auszugehen, dass die Schülerinnen und Schüler im Mittel ein eher hohes Interesse am Experimentieren sowie eine eher befriedigende Leistung im Fach Chemie zeigen. Da die Untersuchung in Klasse 10 stattfand und beide Lehrkräfte der Klassenangaben regelmäßig Schülerexperimente durchzuführen, sind die Schülerinnen und Schüler entsprechend erfahren im Experimentieren. Beide Lehrkräfte wiesen außerdem darauf hin, in ihrem Unterricht auch mit Low-Cost-Materialien zu arbeiten, darunter Teelichter oder Schnapdeckelgläschen. Auch wenn diese Einzelmaterialien nicht mit vollständi-

Tab. 2: Angaben zur Stichprobe. *Eingesetzt wurde eine 5pt.-Likert-Skala. Für die quantitative Analyse wurden 83 vollständig ausgefüllte Fragebögen berücksichtigt; die Item-Reliabilität liegt für diese Untersuchung bei Cronbachs $\alpha = 0,67$. Da der Wert lediglich der Stichprobenbeschreibung dient und nicht Teil der weiteren Auswertung ist, wird er als akzeptabel betrachtet.

N Schülerinnen/ Schüler	89
davon Freitext ausgefüllt	69
davon interviewt	20
Geschlecht	44 w 45 m
Ø Alter [Jahre]	15,9
Ø Zeugnisnote Chemie	2,8
Ø Interesse am Experimentieren*	4,04

gen Low-Cost-Apparaturen zu vergleichen sind, hat dies den Vorteil, dass den Schülerinnen und Schülern das Experimentieren mit Low-Cost-Materialien nicht gänzlich fremd ist. Neugierigkeitseffekte gegenüber den untersuchten Materialien wirken sich daher vermutlich weniger stark auf die Wahrnehmung der Schülerinnen und Schüler aus, was die Validität der Ergebnisse erhöht. Um auch den Einfluss der Lehrkräfte auf die Datenerhebung möglichst gering zu halten, wurden der Stundenablauf sowie sämtliche Materialien durch die Untersuchungsdurchführenden vorgegeben.

3.4 Kategorienbildung

Die Daten wurden mittels Qualitativer Inhaltsanalyse nach Mayring [19] ausgewertet. Für die Auswertung wurde das gesamte Datenmaterial aus sechs Transkripten der Audioaufzeichnungen aus dem Unterricht, vier Interview-Transkripten sowie schriftliche Antworten aus 69 ausgefüllten Fragebögen herangezogen. Das Interview sowie die Unterrichtsaufzeichnung der jeweiligen Klassen werden dabei als Kontexteinheit betrachtet; für die Interpretation der Interview-Aussagen konnten also die Aufzeichnungen aus der Experimentiersituation hinzugezogen werden und umgekehrt. Dies bot sich an, wenn die Schülerinnen und Schüler im Interview auf eine konkrete Situation während des Experimentierens Bezug nehmen, die mit Hilfe der Unterrichtsaufzeichnung besser nachvollzogen werden konnte. Mit Blick auf die Forschungsfrage wurde das gesamte Textmaterial anschließend auf Aussagen hin analysiert, in denen die Schülerinnen und Schüler begründete positive wie negative Zusammenhänge zwischen ihrer Wahrnehmung der Experimentiersituation und den Low-Cost-Materialien beschreiben. Ein Zusammenhang zu fachdidaktischen Anforderungen an ein gelungenes Experiment musste dabei nicht gegeben sein; diese werden erst in der Ergebnisinterpretation relevant. Im Rahmen einer induktiven Kategorienbildung wurden dann inhaltlich äquivalente Textstellen unter einem Kategoriennamen zusammengefasst, der den Inhalt der Textstellen beschreibt. Bei der Kategorienbezeichnung wurde soweit abstrahiert, dass die gebildeten Kategorien sich nicht auf die Schülerwahrnehmung der Low-Cost-Destillation im Speziellen beziehen, sondern bei entsprechender Forschung potentiell auch auf weitere Low-Cost-Experimente übertragen werden können. Um die Güte der Kodierung und des Kategoriensystems sicherzustellen, wurden 50% des Datenmaterials von zwei Personen kodiert; die daraus berechnete Interkoder-Übereinstimmung liegt bei einem Cohens Kappa von $\kappa = 0,84$, was auf eine hohe Reliabilität der Ergebnisse hindeutet [20].

4. Zur Schülerwahrnehmung

Das Ergebnis der Kodierung besteht aus elf Kategorien (*Kat.*) zur Schülerwahrnehmung von Low-Cost-Materialien, die im Folgenden dargestellt werden. Gleichzeitig werden Bezüge zwischen den Kategorien und dem theoretischen Hintergrund zu fachdidaktischen Anforderungen an ein gelungenes Experiment hergestellt und jeweils in Klammern (FA) hervorgehoben.

Einfachheit (Kat. 1): Die Schülerinnen und Schüler nehmen das Experimentieren mit Low-Cost-Materialien vor allem als ‚einfach‘ wahr. Begründet wird mit der Handlichkeit der Materialien (FA: Handhabbarkeit) und der Einfachheit der Reinigung aufgrund des reduzierten Chemikalieneinsatzes (FA: Effizienz). Mit Blick auf das Verständnis der Schülerinnen und Schüler ist außerdem interessant, dass sie das Low-Cost-Experiment im Vergleich zu Experimentiersituationen mit klassischem Labormaterial als einfacher wahrnehmen, da alltagsbekannte Materialbezeichnungen statt chemischer Fach-

termini verwendet werden (FA: Durchschaubarkeit). Zusätzlich wird der Umgang mit den Materialien als intuitiv beschrieben, hier bezogen auf das Teelicht:

Beim Brenner muss man halt viel mehr beachten so mit der Reihenfolge und so. Das Teelicht ist halt einfach einfacher. Nur anzünden, fertig. Da kommt man besser klar, das versteht man so besser. (SchülerIn 17)

Schnelle Orientierung (Kat. 2): Die Schülerinnen und Schüler nehmen sich im Vergleich zu sonstigen Experimentiersituationen als schneller orientiert wahr, einerseits aufgrund des Kistenprinzips (FA: Effizienz), andererseits sei auch die Arbeitsfläche durch den kleinen Aufbau für sie besser überschaubar. *Irritation durch Funktionstransfer (Kat. 3):* Hingegen irritiert zeigen sie sich mit Blick auf diejenigen Materialien, die im experimentellen Kontext eine andere Funktion innehaben als die aus dem Alltag bekannte (FA: Durchschaubarkeit). Im Falle der Destillation beziehen sich die Schülerinnen und Schüler dabei auf die Teelichthülle als Chemikaliengefäß bei der Brennprobe oder auf die Kanüle zum Druckausgleich; stellenweise wird das Experimentieren mit Low-Cost-Materialien auch als ungewohnt wahrgenommen (*Ungewohntheit, Kat. 4*). Darüber hinaus beschreiben die Schülerinnen und Schüler eine *Unklarheit über die Wiederverwendung (Kat. 5)* der Materialien: Nicht nur als Einwegartikel bekannte Kanülen, sondern auch Teelichthüllen, verrußte Gläser oder die Gummistopfen werden stellenweise als Wegwerfprodukte wahrgenommen; den Transkripten aus dem Unterricht sind Aussagen zu entnehmen wie: „Ach komm, schmeiß das Ding [Kontext: Rollrandglas] einfach weg“ (SchülerIn 20). Nichtsdestotrotz wird durch den Einsatz von Low-Cost-Experimenten auch das Potential gesehen Ressourcen und Chemikalienmengen einzusparen (*erkanntes Ressourcen-Sparpotential, Kat. 6*). Als größte Schwierigkeiten der eingesetzten Low-Cost-Materialien und des Gesamtaufbaus nehmen die Schülerinnen und Schüler ihre *Instabilität und Fehleranfälligkeit (Kat. 7)* sowie ein generell *unsauberes Experimentieren (Kat. 8)* wahr. Dabei wird häufig beschrieben, dass einzelne Gläser aus Versehen umgestoßen und die teilweise erhitzten Gläser beim ‚reflexartigen‘ Wiederaufstellen berührt werden (FA: Sicherheit). Im Interview wird die Experimentiersituation als „chaotisch“ (SchülerIn 2) und „nicht so sauber“ (SchülerIn 14) beschrieben, unterstützt durch stark verrußte Materialien oder Spielereien mit dem Kerzenwachs:

Ich hatte meine ganzen Hände und Sachen schwarz, sogar am Mund. Und [Verweis auf MitschülerIn] hat die ganze Zeit mit diesem Wachs gespielt und ja, unser Tisch war einfach voll das Chaos. (SchülerIn 1)

Nach der Instabilität am häufigsten kodiert wurde die Wahrnehmung des Low-Cost-Experiments als *kein richtiges Experimentieren (Kat. 9)*: Die Materialien werden als „nicht so wie in echt“ (SchülerIn 15) oder als „nicht professionell“ (SchülerIn 14) bezeichnet. In einer der Unterrichtsaufzeichnungen ist explizit eine Enttäuschung formuliert: „Ich hab’ gedacht, wir machen so eine richtige Destillation und dann sowas. Ich bin enttäuscht“ (SchülerIn 8). In Anbetracht der Anforderung, durch Experimente das Interesse am Fach Chemie zu wecken (FA: Interesse), sind solche Empfindungen der Schülerinnen und Schüler ebenso relevant wie ihre Interpretation zu Gründen für den Einsatz von Low-Cost-Materialien. *Interpretation als Misstrauen in Schülerkompetenz (Kat. 10)*: Aufgrund der Gefahrenreduktion und Miniaturisierung, verstehen die Schülerinnen und Schüler der Realschule den Einsatz der Low-Cost-Materialien als Zeichen fehlenden Vertrauens der Lehrkräfte in ihre experimentellen Fähigkeiten. Dabei ziehen sie explizit den Vergleich zu höheren Schulformen: „Tja, wir sind halt Realschule, nicht Gymnasium. Voll der Absturz“ (SchülerIn 17). Da andere Schülerinnen und Schüler gerade in der

Miniaturisierung einen positiv empfundenen *Verniedlichungscharakter (Kat. 11)* sehen („Das sieht irgendwie süß aus, das mag ich“, SchülerIn 12), sind individuelle Präferenzen naheliegender, die anhand der vorliegenden Daten noch nicht weiter spezifiziert werden können.

Diskutiert haben die Schülerinnen und Schüler in den Interviews mit Blick auf die Beobachtbarkeit der Vorgänge (FA: deutlicher Effekt). Einerseits argumentieren die Schülerinnen und Schüler, dass Low-Cost-Experimente aufgrund der insgesamt kleineren Arbeitsfläche von allen Mitgliedern der Gruppe besser zu beobachten seien als größere Versuchsaufbauten mit klassischem Labormaterial. Als Gegenargument fällt jedoch, dass „wenn es größer wäre, [...] man halt die einzelnen Sachen genauer sehen (könnte)“ (SchülerIn 10). Im Sinne der Ganzheitlichkeit einer Versuchsbeobachtung gegenüber der Beobachtung isolierter Einzeleffekte deuten die Argumente auf einen Einfluss der Größe von Low-Cost- bzw. klassischen Experimentiermaterialien auf verschiedene Subaspekte einer Versuchsbeobachtung hin, die in Folgestudien detaillierter untersucht werden sollten. Ein in Form einer Kategorie fixiertes Ergebnis zur Qualität der Beobachtbarkeit von Low-Cost-Experimenten scheint an dieser Stelle nicht sinnvoll. Ebenso diskutiert wird in Bezug auf die empfundene Offenheit der Experimentiersituation (FA: Offenheit). So ist in Abbildung 3 zu sehen, wie eine Schülergruppe durch die Funktionsflexibilität und nicht nötige Passgenauigkeit der Materialien selbstständig einen verbesserten Versuchsaufbau entwickelt. Diese Offenheit, hier im Sinne einer empfundenen Eigenständigkeit, wird von der Schülergruppe positiv hervorgehoben; auch Low-Cost-Vertreter weisen, unabhängig von der Destillation im Speziellen, auf diesen Vorteil der Individualität nicht vorgefertigter Low-Cost-Apparaturen hin [8]. Andere

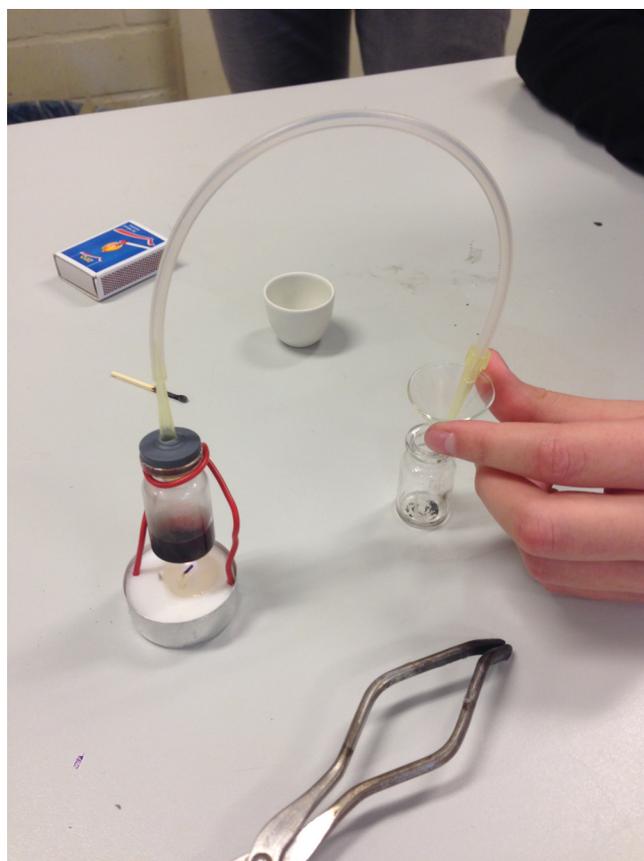


Abb. 3: Kreativer Nutzen der Low-Cost-Materialien zur individuellen Aufbauoptimierung. Zusätzliche Materialien wurden der Schülergruppe auf Nachfrage bereitgestellt.

Schülerinnen und Schüler argumentieren dagegen und beschreiben bspw., dass ihnen der regulierbare Bunsenbrenner, die für sie gängigste Heizquelle beim Experimentieren, deutlich eher das Gefühl eigenständiger Experimentierentscheidungen vermitteln könne als das hier eingesetzte Teelicht. Solch unterschiedliche Facetten in der Wahrnehmung sprechen für einen Einfluss sowohl alternativer als auch klassischer Materialien auf die beim Experimentieren empfundene Offenheit, dem in Zukunft näher nachgegangen werden muss.

4.1 Experimentelle Optimierungen

Die Ergebnisse lassen auf ratsame Änderungen an dem Versuchsaufbau der hier gezeigten Destillation schließen, die kurz beschrieben werden sollen. So kommt es häufig vor, dass die Kanüle beim Durchstoßen des Gummis verstopft. Dies ist äußerlich kaum zu erkennen und führt regelmäßig dazu, dass die Apparatur dem aufkommenden Druck nicht standhält. Auch eine hinreichende Stabilität kann durch den Versuchsaufbau nicht gewährleistet werden. Praktische Verbesserungen sind in Teilen auch auf der Homepage der Entwickler angemerkt worden und aktuell dort einzusehen [21]. Neben der Verwendung einer offenen, höheren Vorlage kann zur Stabilisierung das Drahtgestell eines handelsüblichen Sektverschlusses genutzt werden, in dessen Öffnung das Rollrandglas passgenau gesteckt werden kann. Durch preisgünstige Knete kann die gesamte Apparatur zusätzlich am Tisch fixiert werden, ohne dass die geringe Menge Destillat verdeckt wird. Der verbesserte Versuchsaufbau ist in Abbildung 4 dargestellt, Tabelle 3 gibt die dazu benötigten Materialien samt Kosten an. Details wie das Kürzen der Pipettenspitzen oder die Schlauchdicke sind dabei relevant, damit das Destillat tropfen- und nicht stoßweise übergeht. Der Silikonschlauch sollte außerdem nicht bis auf den Boden der Vorlage reichen, um bei Erlischen des Teelichts einen Rückzug des Produkts in das Destillier-Gläschen zu vermeiden.



Abb. 4: Optimierte Low-Cost-Destillationsapparatur.

5. Praktische Implikationen

Da die Schülerinnen und Schüler ihre Wahrnehmung mit Eigenschaften wie der geringen Größe oder der Alltagsbekanntheit von Low-Cost-Materialien begründen, ist anzunehmen, dass viele der beschriebenen Kategorien auch auf weitere Low-Cost-Materialien mit ähnlichen Eigenschaften übertra-

Tab. 3: Material- und Kostenaufstellung der optimierten Low-Cost-Destillation, erhältlich bei Anbietern für Laborbedarf oder gängigen Onlineversandhändlern. Sofern im Voraus gesammelt wird, müssen Teelichthüllen und Sektverschlüsse sicher nicht extra bestellt werden; Knete können die Schülerinnen und Schüler auch selbst herstellen.

Material	Beschreibung	~ Preis
Rollrandglas (breit)	10 ml/ Ø 22–23 mm	30 €/ 100 St.
Rollrandglas (hoch)	5 ml	20 €/ 100 St.
Butyl-Hohlstopfen	passend zu Rollrandglas (breit)	10 €/ 100 St.
Pipettenspitzen	2–200 µl	15 €/ 500 St.
Silikonschlauch	4 × 7 mm zuschneiden auf ca. 18 cm/ St.	1 €/ m
Agraffe	Standard	0,20 €/ St.
Teelichthülle	Standard	2 €/ 100 St.
Knete	–	10 €/ 1,5 kg

gen werden können. Abschließend sollen daher Schlüsse zu Vorteilen und Grenzen, aber auch zur sinnvollen Einbettung von Low-Cost-Materialien in den Unterricht gezogen werden. Es ist positiv hervorzuheben, dass sich das Low-Cost-Experiment aufgrund des umsetzbaren Kistenprinzips, der dadurch beschriebenen schnellen Orientierung sowie der wahrgenommenen Einfachheit von Aufbau und Durchführung problemlos im Rahmen einer 45-minütigen Schulstunde durchführen lässt. Mit Blick auf die Unterrichtszeit soll entstehender Reinigungsaufwand durch das Verrußen der Materialien jedoch nicht unterschlagen werden; ebenso wenig die Notwendigkeit einer Kontrolle zur Vollständigkeit zurückgegebener Materialien, vor allem aufgrund der Unklarheit über ihre Wiederverwendung. Um letztere sicherzustellen und einer potentiell erzeugten Wegwerf-Mentalität entgegenzuwirken, wird eine Schulung im Umgang mit Kanülen sowie der Einsatz von Materiallisten und die Rolle einer/s Materialwächterin/s pro Schülergruppe empfohlen, zumindest in jüngeren Klassenstufen. In Kombination mit der wahrgenommenen Einsparung von Ressourcen kann auf diesem Weg auch an das Umweltbewusstsein der Schülerinnen und Schüler appelliert werden, was in der heutigen Zeit eine Notwendigkeit darstellt. Die beschriebene Ungewohntheit sowie ein Umdenken in Bezug auf den Transfer der Alltagsfunktion der Low-Cost-Materialien auf den experimentellen Kontext sind Aspekte, die durch einen regelmäßigen Umgang mit entsprechenden Materialien und Apparaturen vermutlich nachlassen. Im Unterricht sollte daher eine gewisse Regelmäßigkeit in der Umsetzung von Experimenten mit Low-Cost-Materialien herrschen. Dabei bietet die formulierte Einfachheit, auch durch die Bekanntheit der Materialbezeichnungen, eine potentiell interessante Differenzierungsmöglichkeit im Anforderungsniveau. Nichtsdestotrotz müssen auch negative Aspekte der Schülerwahrnehmung berücksichtigt werden. So deuten die Ergebnisse auf einen Zusammenhang von Experimentiermaterialien und einer gewissen Authentizität der Experimentiersituation hin. Bestehende Forschung zu Schülerlaboren konnte bereits zeigen, dass Authentizität positiv mit dem aktuellen Interesse von Schülerinnen und Schülern korreliert [22]. Ob ein solcher Zusammenhang auch beim Einsatz von Low-Cost- bzw. klassischen Experimentiermaterialien zu beobachten ist, sollte im Rahmen zukünftiger Forschung untersucht werden. Aus pädagogischer Perspektive sicherlich bedenklich ist die Schülerwahrnehmung des Einsatzes von Low-Cost-Materialien als mangelndes Vertrauen von Lehrkräften in ihre experimentellen Fähigkeiten. An dieser Stelle ist Aufklärungsarbeit durch die Lehrkraft erforderlich, durch die vor allem die Materialverfügbarkeit und Möglichkeit der häufigeren Umsetzung von Schülerexperimenten als Gründe für den Einsatz von Low-Cost-Materialien fokussiert werden sollten.

6. Limitationen und Ausblick

Die Ergebnisse basieren auf der Analyse eines aus einer Vielzahl weiterer Low-Cost-Experimente. Um die Validität der Ergebnisse auch experimentübergreifend und damit über einzelne Low-Cost-Materialien hinaus testen zu können, werden im Rahmen einer Folgestudie weitere Experimente betrachtet, darunter eine Low-Cost-Elektrolyse in einer Blisterpackung und aus dem Bereich der Medizintechnik ein Experiment zur Gasentwicklung. Im Unterschied zu der hier vorgestellten Untersuchung, führen die Schülerinnen und Schüler dabei die Low-Cost- und die klassische Variante des jeweiligen Experiments im direkten Vergleich durch. Theoretischer Hintergrund dieses Vergleichs bleiben weiterhin fachdidaktische Anforderungen an ein gelungenes Experiment; den hier noch ausgelassenen variierenden Wahrnehmungen der Schülerinnen und Schüler wird dabei intensiver nachgegangen. Da die Repräsentativität der Ergebnisse dadurch eingeschränkt ist, dass die Befragung nur an einer Schule durchgeführt wurde, werden Folgeuntersuchungen zur Prüfung der Generalisierbarkeit der Ergebnisse an verschiedenen Schulen, Schulformen sowie in verschiedenen Jahrgangsstufen durchgeführt.

Dank

Wir bedanken uns für die Kreativität aller Entwicklerinnen und Entwickler von Low-Cost-Experimenten. Ein weiterer Dank geht an die Schülerinnen und Schüler für ihre Bereitschaft zur Teilnahme an dieser Untersuchung; ebenso an die betreuenden Lehrkräfte sowie die Schulleitung, die das Projekt bereitwillig unterstützt haben.

Literatur

- [1] Hessisches Kultusministerium (2016). Bildungsstandards und Inhaltsfelder. Das neue Kerncurriculum für Hessen.
- [2] Schaffer, S., Pfeifer, P. (2011). Ziele von Schülerexperimenten. Von einer Ist-Standanalyse zur Unterrichtsentwicklung. NiU-Chemie 22/126, 10–13.
- [3] Borstel, G. v., Böhm, A. (2004). ChemZ – Chemieunterricht mit medizintechnischem Zubehör. NiU-Chemie 15/81, 48–49.
- [4] Obendrauf, V. (2004). Toxisches Chlor vernünftig dosiert. NiU-Chemie 15/81, 22–27.
- [5] Poppe, N., Markic, S., Eilks, I. (2010). Low-Cost-Experimentier-techniken für den naturwissenschaftlichen Unterricht. Ein Handbuch für Lehrerinnen und Lehrer der naturwissenschaftlichen Fächer. Entwickelt im Rahmen des Projektes SALiS – Student Active Learning in Science. http://www.idn.unibremen.de/chemie-didaktik/salis_zusatz/material_pdf/lab_guide_low_cost_experiments_deutsch.pdf (letzter Zugriff am 25.03.2019).
- [6] Tesfamariam, G. M., Lykknes, A., Kvittingen, L. (2017). “Named Small but Doing Great”: An Investigation of Small-Scale Chemistry Experimentation for Effective Undergraduate Practical Work. Int. J. Sci. Math. Educ. 15, 393–410.
- [7] Mafumiko, F. (2008). The Potential of Micro-scale Chemistry Experimentation in enhancing teaching and learning of secondary chemistry. Experiences from Tanzania Classrooms. J. Int. Educ. Cooperation 3, 63–79.
- [8] Schwarz, P., Lutz, B. (2004). Kreativer Chemieunterricht. Mikrochemische Experimente in der Schule. NiU-Chemie 15/81, 4–9.
- [9] Wloka, K. (2002). Heimexperimente. Erfahrungen mit einem (mobilen) Experimentier-Set. NiU-Chemie 13/70/71, 54–57.
- [10] Büttner, R., Schallies, M., Redeker, J. (1987). Basisoperationen mit neuartigen miniaturisierten Laborglasgeräten für den experimentellen Chemieunterricht (Schülerversuche). PdN-ChiS 36, 7–12.
- [11] Prenzel, M. (1995). Zum Lernen bewegen. Unterstützung von Lernmotivation durch Lehre. Blick in die Wissenschaft 4/7, 58–66.
- [12] Bader, H. J., Lühken, A. (2018). Anforderungen an ein Schulexperiment. In: Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht. Sommer, K., Wambach-Laicher, J., Pfeifer, P. (Hrsg.). Aulis, Seelze, 462–466.
- [13] Burmeister, M., Eilks, I. (2011). Ist ein Bio-Kunststoff immer besser als PVC? Die Warentestmethode und ein Beispiel aus dem Chemieunterricht. PdN-ChiS 60/5, 33–36.
- [14] El-Marsafy, M. K., Schwarz, P., Najdoski, M. (2011). Microscale Chemistry Experiments. Using Water and Disposable Materials. Kuwait Chemical Society, Kuwait.
- [15] Schwarz, P. (2014). Experimente mit Pfiff. Schülerexperimente im Kleinmaßstab. Buchner, Bamberg.
- [16] Obendrauf, V. (1996). Low-Cost-Rektifikation mit der Chembox: Der Topfreiniger als Füllkörper. Chemie & Schule 4.
- [17] Sieve, B. F., Taubert, C., Taubert, R. (2017). Sicherer Umgang mit Kanülen – von Erfahrungen zu Evidenzen. CHEMKON 24/5, 387–390.
- [18] Pawek, C. (2009). Schülerlabore als interesselördernde außerschulische Lernumgebungen für Schülerinnen und Schüler aus der Mittel- und Oberstufe. Dissertation, Universität Kiel.
- [19] Mayring, P. (2014). Qualitative content analysis: theoretical foundation, basic procedures and software solution. Klagenfurt. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-395173> (letzter Zugriff am 06.04.2020).
- [20] Brennan, R. L., Prediger, D. J. (1981). Coefficient kappa: Some uses, misuses, and alternatives. Edu. Psych. Measurement 41, 687–699.
- [21] Schwarz, P. (2017). Experimente mit Einwegmaterialien. Natur und Technik. <https://www.micrecol.de> (letzter Zugriff am 20.01.2020).
- [22] Engeln, K. (2004). Schülerlabors: authentische, aktivierende Lernumgebungen als Möglichkeit, Interesse an Naturwissenschaften und Technik zu wecken. In: Studien zum Physik- und Chemielernen. Niedderer, H., Fischler, H., Sumfleth, E. (Hrsg.). Bd. 36. Logos, Berlin.

Eingegangen am 7. Februar 2020

Angenommen am 27. März 2020

Online veröffentlicht am 5. Juni 2020