



Umweltbildung im Schülerlabor NatLab (FU Berlin)

Projektbericht **Az 34746**

Kritische Metalle in Smartphone & Co **Botschafter für die Intensivierung der Kreislaufwirtschaft**

Projektleitung

Dr. Katharina Kuse
Schülerlabor NatLab
Freie Universität Berlin - Fachbereich BCP
Fabeckstr. 34-36
14195 Berlin
E-Mail: katharina.kuse@fu-berlin.de

Projektmitarbeiterin:

Dr. Carmen Lawatscheck
Schülerlabor NatLab
Tel.: 030 838 67717
Freie Universität Berlin
Fabeckstr. 34-36
14195 Berlin
E-Mail: c.lawatscheck@fu-berlin.de

Berlin, Januar 2021

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Inhaltsverzeichnis | 2 |
| Abkürzungsverzeichnis | 3 |
| Abbildungsverzeichnis | 3 |
| 1. Zusammenfassung | 6 |
| 2. Motivation und Zielsetzung | 9 |
| 3. Theoretische Grundlagen | 10 |
| 3.1. Lithium-Ionen-Akkumulatoren von Smartphones | 10 |
| 3.1.1. Aufbau eines Lithium-Ionen-Akkumulators | 10 |
| 3.1.2. Funktionsweise eines Lithium-Ionen-Akkus | 12 |
| 3.1.3. Recycling von Cobalt und Lithium aus Lithium-Ionen-Akkus | 12 |
| 3.2. Displays und Touchscreens von Smartphones | 13 |
| 3.1.1. Aufbau von Smartphone-Displays | 13 |
| 3.1.2. Recycling von Indium und Zinn aus Smartphone-Displays | 13 |
| 4. Bericht der Ergebnisse | 14 |
| 4.1. Entwicklung neuer Chemie-Schülerexperimente | 14 |
| 4.1.1. Recycling von Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkus | 14 |
| 4.1.2. Recycling von Indium und Zinn aus Displays/Touchscreens | 28 |
| 4.1.3. Recycling von Neodym aus Handy-Lautsprechern (Serious Game) | 34 |
| 4.2. Interaktiver Rohstoffatlas | 56 |
| 4.3. Öffentlichkeitsarbeit | 59 |
| 4.3.1. Veröffentlichungen | 59 |
| 4.3.2. Vorträge | 60 |
| 4.3.3. Postervorstellungen..... | 61 |
| 4.3.4. Workshops..... | 63 |
| 4.3.5. Tagungen | 68 |
| 4.3.6. Newsletter..... | 68 |
| 4.3.7. Veröffentlichungen in Zeitschriften..... | 71 |
| 4.4. Einschränkungen des Projekts durch die Corona-Pandemie | 72 |
| 5. Literaturverzeichnis | 73 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---|---|
| Akku | Akkumulator |
| CMR | krebserzeugend, erbgutverändernd und fruchtbarkeitsgefährdend (engl.: cancerogen mutagen reprotoxic) |
| Co(OH) ₂ | Cobalhydroxid |
| CoO(OH) | Cobalhydroxidoxid |
| DMSO | Dimethylsulfoxid |
| Li | Lithium |
| LiCl | Lithiumchlorid |
| Li ₃ PO ₄ | Lithiumphosphat |
| LCO/LiCoO ₂ | Lithiumcobaltoxid |
| LuL | Lehrerinnen und Lehrer |
| min | Minuten |
| NaCl | Natriumchlorid |
| NaOH | Natriumhydroxid |
| Na ₃ PO ₄ · 12 H ₂ O | Natriumphosphatdodecahydrat |
| NMP | <i>N</i> -Methylpyrrolidon |
| PVDF | Polyvinylidenfluorid |
| SuS | Schülerinnen und Schüler |
| XRD | Röntgenbeugung (englisch X-Ray Diffraction) |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Übersicht der Entwicklung neuer Schülerexperimente des NatLabs zum Thema Recycling von kritischen Rohstoffen aus Smartphones. | 9 |
| Abbildung 2: Übersicht verschiedener Zelldesigns von Lithium-Ionen-Akkus (a) zylindrische Zelle (b) Knopfzelle (c) prismatische Zelle (d) flexible Lithium-Polymer-Zelle. (Abgebildet mit Erlaubnis von 5)..... | 11 |
| Abbildung 3: Funktionsweise eines Lithium-Ionen-Akkus beim Entladevorgang und Ladevorgang. ¹³ | 12 |
| Abbildung 4: Aufbau der Laminierung der ITO-Schicht eines LCD-Panels. | 13 |
| Abbildung 5: Li- Polymer-Akku-Typen: Typ 1 enthält durchgängige Elektroden- und Elektrolytfolien: Vollständiger Akku vor der Entmantelung (links) und Kathodenfolie nach der Entmantelung (rechts). | 15 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 6: Li-Polymer- Akku-Typen: Typ 2 enthält mehrere Elektrodeneinheiten. Vollständiger Akku vor der Entmantelung (links) und einzelne Elektrodeneinheiten nach der Entmantelung (rechts)..... | 16 |
| Abbildung 7: Manuelle Entladung eines Lithium-Polymer- Akkus über einen ohmschen Widerstand. | 17 |
| Abbildung 8: Übersicht verschiedener Materialklassen nach der Entmantelung eines Li-Polymer-Akkus eines iPhones. | 18 |
| Abbildung 9: Sortierung der verschiedenen Materialklassen nach der Entmantelung eines Li-Polymer-Akkus eines iPhones. (links). Kathodenmaterial aus Aluminium; (Mitte) Anodenmaterial aus Kupfer; (rechts) Plastikabfälle, Kontakte und Separator- und Elektrolytfolien. | 18 |
| Abbildung 10: Übersicht der experimentellen Prozedur der Gewinnung von Aktivmaterial aus der Kathode eines Li-Polymer-Akkus eines iPhones. (a) Versuchsaufbau; (b) Trennung von Aluminium und aktivem Material mittels Büchnertrichter; (c) im Kolben verbliebene Aluminiumstücke; (d) gewonnenes aktives Material der Kathode. | 20 |
| Abbildung 11: Aufbau des Laugungs-Prozesses des aktiven Materials eines Li-Polymer-Akkus eines iPhones. | 21 |
| Abbildung 12: Ausfällung von Cobalt aus der Lösung des LiCoO ₂ -Laugungs-Prozesses (a) Co ²⁺ -haltige Lösung (b) brauner Feststoff nach Fällung mit NaOH. | 22 |
| Abbildung 13: XRD- Messung von LiCoO ₂ und Vergleich mit dem Literaturspektrum. | 23 |
| Abbildung 14: XRD- Messung von Co(OH) ₂ und Vergleich mit dem Literaturspektrum. | 23 |
| Abbildung 15: XRD-Messung von Li ₃ PO ₄ und Vergleich mit dem Literaturspektrum. | 24 |
| Abbildung 16: Charakteristische rote Flammenfärbung von Li ₃ PO ₄ | 24 |
| Abbildung 17: Erste Durchführung des neu entwickelten Versuchs „Recycling von Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkus“ mit SuS eines Chemie-Leistungskurses. | 25 |
| Abbildung 18: SuS eines Chemie-Leistungskurses gewinnen die Metalle Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkus zurück. (a) Entmantlungsprozedur; (b) Sortierung des Materials; (c) Lösen von LiCoO ₂ von der Kathode; (d) Dekantieren; (e,f) Ausfällung von Co(OH) ₂ | 25 |
| Abbildung 19: Die Durchführung des Kurses in zwei Gruppen ermöglichte eine intensive Betreuung der SuS sowie das gleichzeitige praktische Arbeiten mehrerer SuS. | 26 |
| Abbildung 20: Evaluation des Kurses „Recycling von Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkus“. Angaben zum Geschlecht der Teilnehmenden (links) und der Gesamtbewertung des Versuchs (rechts)..... | 26 |
| Abbildung 21: Evaluation des Kurses „Recycling von Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkus“. Angaben zum Lernzuwachs bzgl. chemischen Arbeiten im Labor und Nachhaltigkeit. | 27 |
| Abbildung 22: Übersicht verschiedener Leaching-Methoden zum Recycling von Indium aus Displays. | 30 |
| Abbildung 23: XRD-Spektren von Rückständen der Laugungsverfahren..... | 32 |
| Abbildung 24: Vergleich UV/VIS Absorptionsspektrum (links) In ₂ O ₃ (Fluka, abcr), In(OH) ₃ (abcr) und Literaturspektrum (rechts) In(OH) ₃ (+Methoxyethanol), Copyright 2016, American Chemical Society. | 33 |
| Abbildung 25: UV/VIS Absorptionsspektrenschar der Indium-Leachingergebnisse..... | 33 |
| Abbildung 26: Arbeitsbereiche im Spiel: Laborbank (oben), Whiteboard (Mitte) und Abzug (unten). | 35 |

| | |
|--|-----------|
| Abbildung 27: Flurbereich des Serious Games Neodym. | 36 |
| Abbildung 28: Abrufbare Informationen rund um das Serious Game Neodym..... | 36 |
| Abbildung 29: Geschicklichkeitsspiele: (a) Erhitzen mit dem Bunsenbrenner; (b) Einstellung des pH-Werts; (c) Schütten von Flüssigkeiten; (d) Mörsern; (e) Befüllen einer Zentrifuge; (f) Filtrieren. ... | 37 |
| Abbildung 30: Animierte Darstellung der Inhalte der Wissensblöcke in Ergänzung zu sprachlicher und schriftlicher Vermittlung..... | 38 |
| Abbildung 31: Auswahlmöglichkeiten zwischen Sekundarstufe 1 und 2 zur Beantwortung von Fragen zu den Wissensblöcken..... | 38 |
| Abbildung 32: Wissenssicherung – Fragetypen: (a) Multiple Choice; (b) Eintragung der korrekten Lösungen; (c) Lückentext; (d) Verbinden von Zusammengehörigem; (e) Schätzfrage..... | 39 |
| Abbildung 33: Im Serious Game kann eine Gebärdendolmetscherin eingeschaltet werden. | 48 |
| Abbildung 34: Für die Entwicklung der Gebärdenvideos im Serious Game war die Übersetzung zahlreicher chemischer Begriffe in Gebärdensprache notwendig..... | 49 |
| Abbildungen 35: Einzelne Auszüge der Antworten auf Evaluationsfragen (SuS blau, LuL grau).. | 53 |
| Abbildung 36: Interaktive Karte mit Objekten Bagger und Fabriken. | 56 |
| <i>Abbildung 37: Transportwege (hellblau) und Stoffströme (rot)</i> | <i>56</i> |
| Abbildung 38:: Aktivieren der Informationsseiten | 57 |
| Abbildung 39: Erweiterung auf Metalle Indium, Zinn und Neodym | 58 |
| Abbildung 40 Veröffentlichung des Versuchs „Recycling von Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkus“ auf der Plattform „Refubium“ | 59 |
| Abbildung 41: Poster für die 15. LeLa-Jahrestagung am 10.03.2020. Die Erstellung des Posters erfolgte durch Dr. Carmen Lawatscheck, die Vorstellung von Dr. Katharina Kuse. | 61 |
| <i>Abbildung 42: Poster für die Projekttagung am 10/11.06.2021. Die Erstellung des Posters erfolgte durch Dr. Carmen Lawatscheck und Amiera Hadi</i> | <i>62</i> |
| Abbildung 43: Abstract für die 13. BilRess-Netzwerkkonferenz..... | 63 |
| Abbildung 44: Evaluation des Femtec Workshops durch die Teilnehmenden der Veranstaltung.. | 64 |
| Abbildung 45: Ankündigung des Tandemworkshops. | 64 |
| Abbildung 46: Ankündigung des 9. Web-Seminars – BilRess auf Facebook | 65 |
| Abbildungen 47: Ankündigung des Web-Seminars – Lehrkräftefortbildung auf der Webseite a) und auf Facebook b)..... | 66 |
| Abbildung 48: Ankündigung des des Web-Seminars–Nachholtermin LeLa-Tagung vom 08.03.2021 | 68 |
| Abbildung 49: Newsletter-Beitrag für das Netzwerk GenaU zur Bekanntmachung des neu entwickelten Versuchs „Recycling von Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkus.“ | 69 |
| Abbildung 50: Newsletter-Beitrag für das Netzwerk GenaU zur Bekanntmachung des neu entwickelten Versuchs „Recycling von Neodym aus Smartphones.“ | 70 |
| Abbildung 51: Mitteilungen zu den erstellten Angeboten werden über die Webseite des Schülerlabors verbreitet. | 71 |

1. Zusammenfassung

Nachhaltigkeit, Upcycling, Recycling - hochaktuelle Schlagwörter, die auf den bewussten Umgang mit Ressourcen, Produkten und Müll abzielen. Besonders auch im Hinblick auf Metalle und metallische Rohstoffe spielen diese Punkte eine bedeutende Rolle. Das Schülerlabor NatLab an der Freien Universität Berlin, das als außerschulischer Lernort von Schüler:innen (SuS) aller Jahrgangsstufen besucht wird, bietet „kritische Metalle“ als ein Schwerpunktthema an. Zu früherem Zeitpunkt wurden fünf Experimente zu den Seltenen Erdmetallen fertig gestellt. In diesem Projekt, dem Bildungsmodul „Kritische Metalle in Smartphone & Co - Botschafter für die Intensivierung der Kreislaufwirtschaft“, liegt der Fokus auf vier weiteren Metallen, die von der Europäischen Union (EU) als „kritisch“ eingestuft wurden.¹ Kritisch deshalb, da es sich um nicht nachwachsende, also endliche Rohstoffe, handelt. Es wird angenommen, dass zukünftig weltweit mit einem Versorgungsrisiko gerechnet werden muss. Entstanden sind zwei neue chemische Experimente für Schüler:innen (SuS) der Sekundarstufen, in welchen vornehmlich die Wiedergewinnung der Metalle Lithium und Cobalt bzw. Indium und Zinn aus defekten Smartphones thematisiert wird.

Das Schülerexperiment zum Recycling-Prozess von Cobalt und Lithium aus Lithium-Akkus, die in Smartphones verbaut sind, wurde vollständig entwickelt, mit SuS durchgeführt, evaluiert und anschließend veröffentlicht. Als geeigneter Akku-Typ, ergab sich der in iPhones der Firma Apple eingesetzte Akku. Es handelt sich um einen Lithium-Polymer-Akku, der anstelle eines flüssigen Elektrolyten einen festen Elektrolyten, eine Kunststoffolie enthält. Brandrisiken und Toxizitäten, die von anderen Akkus ausgehen, können damit verringert werden. In diesen geeigneten Akkus sind keine flüssigen, organischen Lösungsmittel enthalten, die potentiell zu elektrischen Kurzschlüssen führen könnten und auch kein gesundheitsgefährdendes Leitsalz, wie Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6) das durch Zugabe von Wasser giftige Gase entwickeln kann. Bevor ein Akku von SuS entmantelt werden konnte, musste er elektrisch entladen vorliegen. Das Entladen erfolgte über das Anlegen eines ohmschen Widerstandes ($1,5 \Omega$). Die Cobalt- und Lithium-enthaltenden Bestandteile des Akkus wurden in Kathoden- und Anodenfraktion geteilt und die restlichen Bestandteile wie Zellgehäuse und Separatoren aussortiert. Zur Gewinnung des aktiven Materials, des Lithium-Cobalt(III)-oxid (LiCoO_2 , LCO) aus der Kathode, wurde dieses zunächst im Lösungsmittel N-Methyl-2-pyrrolidon (NMP) erhitzt, so dass das teflonähnliche Bindemittel Polyvinylidenfluorid (PDVF) entfernt werden konnte. Im Zuge der Versuchsentwicklung konnte dieses gesundheitlich bedenkliche Lösungsmittel durch das unbedenklichere Dimethylsulfoxid (DMSO) ersetzt werden. Das gewonnene aktive Material wurde in einem Laugungsprozess mit Salzsäure (HCl) behandelt und der gelöste Anteil in Folge mit Natronlauge (NaOH) gerührt, um das gesuchte Cobalt-(II)-hydroxid (Co(OH)_2) auszufällen.² Anschließend konnte aus dem Rückstand der Co(OH)_2 - Gewinnung das lithiumhaltige, wasserunlösliche Salz Lithiumphosphat (Li_3PO_4) durch Zugabe von Natriumphosphatlösung (Na_3PO_4) ausgefällt werden. Alle isolierten Zwischen- und Endprodukte – LiCoO_2 , Co(OH)_2 und Li_3PO_4 – konnten in reiner Form erhalten und analytisch mithilfe von Röntgenbeugungs(XRD) - Spektroskopie wie auch Flammenfärbung nachgewiesen werden. Bis jetzt wurde der Versuch bereits mit 40 SuS der Grund- und Leistungskurse im Fach Chemie erfolgreich durchgeführt. Die im Anschluss an die Kurse erstellten 17 Evaluationsbögen zeigten seitens der SuS eine sehr positive Bewertung.

Das zweite neue Laborexperiment für SuS dient der Rückgewinnung von Indium aus Displays und Touchscreens. Hier erfolgt die Gewinnung der metallhaltigen Glasscheiben manuell über Demontage, der Abtrennung der Indium-Zinn-Oxid (ITO) - Schicht, aus Althandys, die erst zerstoßen werden, um dann mit einer Kugelmühle zu einem Feststoff zermahlen werden. Über eine fest-flüssig Extraktion mit Säure wird das Metall Indium herausgelöst.³ Zinn kommt nur in geringen Mengen (10%) als Dotierungsmittel zur Steigerung der elektrischen Leitfähigkeit in ITO - Gläsern vor. Zinn konnte noch nicht nachgewiesen werden. Die Analytik des gewonnenen Metallsalzes Indium erfolgt durch Röntgenbeugungs (XRD)- Spektroskopie, wie auch Photospektroskopie (UV/VIS).

Ergänzend zu diesem Versuch wurde mit der Software „Unity 3D“, einer Spiel-Engine (Laufzeit- und Entwicklungsumgebung für Spiele) ein interaktiver Online-Rohstoffatlas zu den beiden in Akkus enthaltenen Metallen Lithium und Cobalt programmiert. In einer erworbenen 2D-Weltkarte wurden die Gewinnung der Rohstoffe, deren Verarbeitung und Transportwege eingetragen. Verschiedene Informationen zu den Rohstoffminen, der Entsorgung von elektronischem Müll und Smartphone-Produktionsstätten können mithilfe der Karte übersichtlich und schnell abgerufen werden. Koordinaten von Orten, wie z.B. Erzminen, sind abrufbar und Popup-Fenster mit Informationen und Gedankenanstregungen erscheinen innerhalb der Karte und können auch individuell ausgewählt werden.

Im Rahmen eines Fremdauftrags wurde der bereits im Jahr 2015 (im Zeitraum 2015 - 2018 führten mehr als 1000 SuS das Experiment in Präsenz im Labor durch²) entwickelte Schülerversuch zu den Seltenerdmetallen „Rückgewinnung von Neodym aus alten Smartphones“ von der Firma Villa Hirschberg Online GmbH ebenfalls über Unity-3D in ein umfangreiches Serious Game „Neodym“ übersetzt. Die große Attraktivität und Interesse an dem „analogen“ Laborversuch lies eine online-nutzbare digitale Anwendung an dieser Stelle sinnvoll erscheinen. Die Entwicklung, Erprobung, Evaluierung und Veröffentlichung des virtuellen Laborversuchs ist erfolgreich abgeschlossen. Inhaltlich gehört die Gestaltung der drei Arbeitsbereiche, Geschicklichkeitsspiele, Einbindung einer professionellen Sprecherin, Einbindung einer Gebärdendolmetscherin, Gestaltung des Flurbereichs mit Bestenliste, Evaluationsbriefkasten, Witzetafel, Einstellungsmöglichkeiten, Liste der Entwickler und einer Infotafel zum NatLab dazu. Der Spielablauf teilt sich in praktische Laborarbeit zur physikalischen und chemischen Rückgewinnung von Neodym einerseits und theoretischer Wissensvermittlung sowie deren Sicherung andererseits. Dazu wurden drei Wissensblöcke zu den Themen kritische Rohstoffe, Säure- und Base-Theorie und Redoxreaktionen entwickelt. Im Spiel können für effizientes und ressourcenschonendes Arbeiten im Labor auch Nachhaltigkeitspunkte erworben werden. Damit erweitert sich der Einzugsradius für Anwender:innen enorm und neue Zielgruppen können einbezogen werden. Grundsätzlich können jetzt weltweit Spielende, die die deutsche Sprache, bzw. deutsche Gebärdensprache beherrschen, diese Anwendung mit Nachhaltigkeitsbezug nutzen. Mit dem Vorteil, dass keine Verletzungsgefahr besteht, können essentielle praktische Laborarbeiten kennen gelernt werden. Die im Spiel enthaltenen gesprochenen Wissensseinheiten wurden außerdem von einer Gebärdensprachdolmetscherin übersetzt. Besonders gut kann das Serious Game „Neodym“ im Flipped Classroom Format eingesetzt werden. SuS erhalten in diesem Fall als Hausaufgabe den Auftrag das Spiel mit „ernstem Hintergrund“ zu Hause spielen, dessen Inhalte anschließend in der Präsenzzeit in der Schule zusammen mit der Lehrkraft im Unterricht nachbesprochen werden können.

Es gibt zwei Evaluationsbögen für das Serious Game „Neodym“ für SuS und Lehrer:innen (LuL) á 36 Fragen. Diese befinden sich jeweils als Link im Flurbereich, im roten Briefkasten des Spiels und sind erst nach vollständig durchgeführtem Spiel ausfüllbar. Erstellt wurden die Bögen mit „votingo“, der Umfragesoftware der Freien Universität Berlin.

Veröffentlicht wurde das Versuchsskript zum Lithium-Cobalt Akku, gemeinsam mit Begleitmaterialien für Lehrende auf der Publikations-Plattform „Refubium“ der Freien Universität Berlin.

Das Serious Game „Neodym“ wurde auf der Konferenz „Digitale NAWI-gation von Inklusion“ in Jena 2021 Online vorgestellt und im Anschluss daran ein Artikel für den Tagungsband verfasst. Für die österreichische Zeitschrift „Plus Lucis“ wurde ebenfalls ein Artikel verfasst. Beide werden voraussichtlich im Frühjahr/Sommer 2022 publiziert. Für den Friedrich Verlag wird aktuell an einem Artikel für die Zeitschrift „digital unterrichten BIOLOGIE“ gearbeitet, der im Herbst 2022 in den Druck gehen soll.

Aufgrund der Pandemie, die beinahe den gesamten Projektzeitraum begleitete, konnten bei weitem nicht die geplanten Schülerzahlen in das Schülerlabor kommen und die neu entwickelten Versuche

durchführen. Erst nach Beginn des Schuljahres 2021/2022 in Berlin und Brandenburg wurden wieder nennenswert Schulklassen für Schülerkurse in Präsenz vor Ort begrüßt. Das Interesse, insbesondere an dem Lithium-Cobalt-Akku Versuch ist sehr groß und das spiegeln auch die Buchungszahlen wider. Der Versuch wird bevorzugt zusammen mit weiteren zum Thema passenden Versuchen aus dem Gebiet der Elektrochemie gebucht.

2. Motivation und Zielsetzung

Anhand von neuen Laborexperimenten des Schülerlabors NatLab wird SuS der Sekundarstufen die Vielfalt der in Smartphones eingesetzten Rohstoffe verdeutlicht. Die Metalle Lithium und Cobalt, als meistverwendete Bestandteile in Smartphone-Akkus, wie auch die Metalle Indium und Zinn, die in Displays oder auch Touchscreens vorkommen, werden auf experimentellem Weg, über physikalische und chemische Abläufe, wiedergewonnen. Für Schüler, die aus verschiedenen Gründen nicht am Versuch vor Ort teilnehmen können, wurde der bereits im Jahr 2015 entwickelte Recyclingprozess von Neodym aus Smartphone-Lautsprechern digitalisiert, sodass ein Recyclingverfahren für SuS auch außerhalb der Labore des NatLabs virtuell und online stattfinden kann (**Abb. 1**).

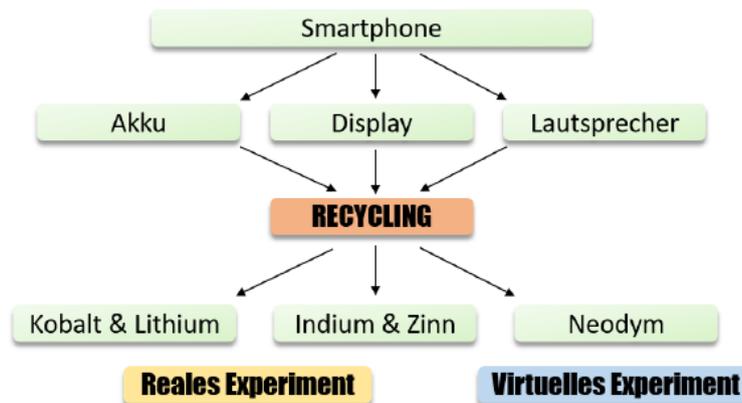


Abbildung 1: Übersicht der Entwicklung neuer Schülerexperimente des NatLabs zum Thema Recycling von kritischen Rohstoffen aus Smartphones.

Dieses Projekt leistet als Bildungsmodul einen aufklärenden Beitrag, indem sozioökonomische Verflechtungen, die mit diesen fünf Metallen hinsichtlich Gewinnung, Verarbeitung und Elektronikrecycling bzw. -entsorgung verbunden sind, illustriert werden. Sowohl die Vermittlung von theoretischem Wissen als auch das Aufzeigen von Handlungsempfehlungen und -über die praktische Auseinandersetzung im Präsenzlabor oder virtuellen Labor - auch die Förderung von Handlungskompetenzen führen den SuS und auch den Studierenden vor Augen, dass sie mit diesen und zukünftigen Fragestellungen rund um „kritische Metalle“ umgehen können und selbstwirksam angehen können.

Hauptziel ist daher der Blick auf die Begleitumstände, die mit der Gewinnung von Rohstoffen aus denen Smartphone-Akkus aufgebaut sind, einhergehen. Es geht neben Arbeitsbedingungen auch um Umweltbelastungen, durch den Abbau der Rohstoffe Cobalt, Lithium, Indium, Zinn und auch Neodym. Dabei spielen einerseits der Eingriff in die Böden eine gewaltige Rolle, andererseits auch Transportwege, die mit der Gewinnung einhergehen. Dass heutzutage teilweise noch immer inakzeptable Arbeitsbedingungen in der Wertschöpfungskette innerhalb der Produktion von Smartphones herrschen und auch erhebliche Verschmutzungen der Umwelt in Kauf genommen werden, ist den Nutzern und Endverbrauchern dieser Geräte zu verdeutlichen. Denn nicht nur die Entsorgung, auch das Recycling von Smartphones ist nicht unproblematisch, da z.T. Inhaltsstoffe mit hohem Gefahrenpotential enthalten sind und mit ihnen umgegangen werden muss. Es bestehen stets Risiken beim Transport, der Lagerung und der Entsorgung z.B. von Smartphone-Akkus. Damit die SuS für einen ressourcensensiblen Umgang mit elektronischen Geräten gewonnen werden, wird die Kreislaufwirtschaft, als ein Modell für Produktion und Verbrauch von Gütern, vorgestellt. Zwischen der Effizienz möglicher Recycling-Strategien (Sekundärrohstoffe), dem Einfluss auf die Umwelt und finanziellen Nachteilen gegenüber der herkömmlichen primären Rohstoffgewinnung muss abgewogen werden. Die SuS werden zur weiteren Lektüre auch außerhalb des Schülerlabors ermutigt.

Den hier vorgestellten Versuchen, Anwendungen, Tagungsbeiträgen und Lehrkräftefortbildungen und Workshops gemein ist die Wissensvermittlung in Bezug auf Nachhaltigkeitsaspekte bezüglich Produktion, Verwendung und Entsorgung von Smartphones. Erklärt werden naturwissenschaftliche Grundlagen, die Bedeutung von Elektronikschrott als Sekundärrohstoffquelle und auch das chemisch-technisches Arbeiten im Labor mit seiner strukturierten Arbeitsplanung. Das Experimentieren im Labor auf anspruchsvollem Niveau fördert und stärkt die praktischen Kompetenzen und mit dem theoretischen Hintergrund auch die Handlungskompetenz der Jugendlichen. Auf diese Weise wird Wissen attraktiv vermittelt und chemisches Arbeiten mit technischem Hintergrund in einen Gesamtkontext gesetzt: Anhand der topaktuellen Thematik des Recyclings von Smartphone-Bestandteilen erlernen bzw. festigen SuS Wissen zu physikalischen Grundlagen, lernen chemische Arbeitsmethoden wie das Rückflusskochen, die Vakuumfiltration und Fällungsreaktionen kennen und anzuwenden und können ihr Bewusstsein erweitern.

3. Theoretische Grundlagen

3.1. Lithium-Ionen-Akkumulatoren von Smartphones

3.1.1. Aufbau eines Lithium-Ionen-Akkumulators

In Smartphones kommen Li-Ionen-Akkus zum Einsatz, da sie Charakteristika wie eine hohe Energiedichte bei geringer Materialmasse, einen langen Lebenszyklus und eine geringe Selbstentladung aufweisen.³ Ein Lithium-Ionen-Akku besteht aus 2 Elektroden - Anode und Kathode, dem Separator, dem Elektrolyten und aus der Zellohülle, die dem Schutz der Materialien dient und meist aus Plastik oder Stahl besteht.⁴ Es existieren verschiedene Akku-Bauformen wie die zylindrische Zelle, die Knopfzelle, die prismatische Zelle und die flexible Lithium-Polymer-Zelle (**Abb. 2**).⁵ Sie unterscheiden sich in Hinblick auf ihre Zelleistungen, Größen, Gewichte, Kühlungsmöglichkeiten oder Sicherheiten.⁶

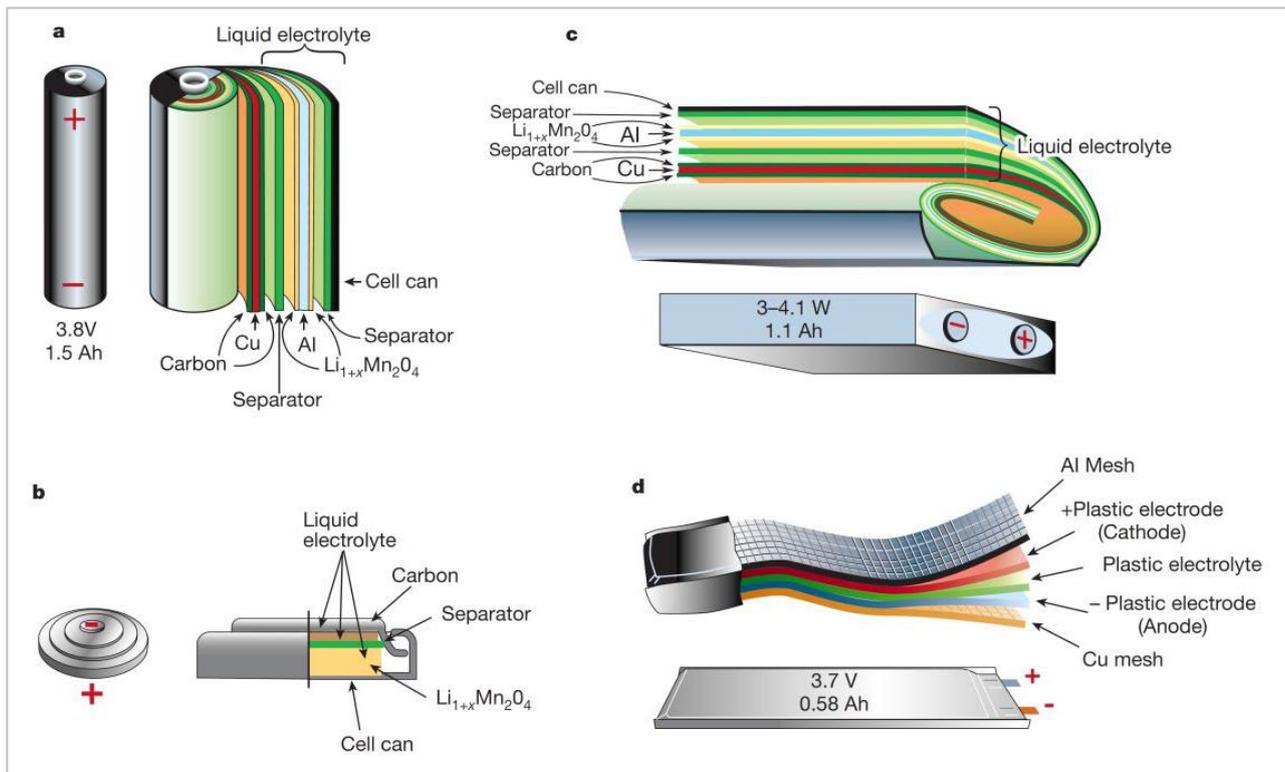


Abbildung 2: Übersicht verschiedener Zelldesigns von Lithium-Ionen-Akkus (a) zylindrische Zelle (b) Knopfzelle (c) prismatische Zelle (d) flexible Lithium-Polymer-Zelle. (Abgebildet mit Erlaubnis von 5).

Die Anode besteht meist aus einer leitenden Kupferplatte, die mit dem aktiven Material Graphit beschichtet ist.⁷ Durch das polymere Bindemittel Polyvinylidenfluorid (PVDF) ist das pulvrige Graphit auf dem Träger Kupfer befestigt.⁸ Auf der Leiterplatte der Kathode, bestehend aus Aluminium, befindet sich aktives Material, das ebenfalls meist mit PVDF befestigt ist. Das aktive Material ist stets eine lithiumhaltige Substanz, meist ein Oxid. Aufgrund seiner hohen Energiedichte und Haltbarkeit wird hauptsächlich Lithiumcobaltoxid (LiCoO_2) genutzt. Alternative Materialien sind z. B. Lithiummanganoxid (LiMn_2O_4), Lithiumvanadiumoxid (LiV_2O_3) oder Lithiumeisenphosphat (LiFePO_4). Die Gewährleistung des Ionentransports zwischen den Elektroden erfolgt durch den Elektrolyten. Dieser besteht meist aus einem Leitsalz wie Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6), das in einem Gemisch aus aprotischen organischen Lösungsmitteln gelöst wird.⁶ Derartige Flüssigelektrolyte müssen eine gute ionische Leitfähigkeit, hohe chemische Stabilität und Sicherheit aufweisen und möglichst preiswert sein.⁹ Dafür eignen sich z. B. Lösungsmittel wie organische Carbonate oder Ether wie Ethylencarbonat (EC), Ethylmethylcarbonat (EMC) oder Tetrahydrofuran (THF).¹⁰ Ein weiterer Bestandteil des Akkus ist der Separator, der sich zwischen den Elektroden befindet. Dieser verhindert einen elektrischen Kurzschluss, der bei direktem Kontakt der beiden Elektroden auftreten kann. Demzufolge muss der Separator elektrisch isolierend sein und chemische, mechanische und thermische Stabilität aufweisen. Hinsichtlich der Arten von Separatoren wird zwischen mikroporösen Polymermembranen, anorganischen Komposit-Separatoren und Faservliesstoffen unterschieden.¹¹ In Lithium-Polymer-Akkus fungiert der folienartige Elektrolyt als Separator.⁶ Für die Durchführbarkeit des Schülerexperiments ist entscheidend, welche Mengen an kritischen Metallen sich in den Smartphone-Akkus befinden. Der Metallgehalt beträgt, mit Abweichungen für verschiedene Akku-Hersteller, ca. 5-7% Li und ca. 5-20% Co.¹² Eine weitere Quelle gibt an, dass in 100 g gebrauchter Lithium-Ionen-Akkus ca. 1.5 g Lithium und ca. 12 g Cobalt enthalten sind.⁴ Da ein einzelner Akku ca. 20 g wiegt, sollten somit ausreichende Mengen der Metalle enthalten sein, um sie im Schülerversuch recyceln zu können.

3.1.2. Funktionsweise eines Lithium-Ionen-Akkus

Im nachfolgenden Abschnitt soll näher auf die Funktionsweise des Lithium-Ionen-Akkus eingegangen werden, da diese Grundlagen für den Recyclingsprozess von Cobalt und Lithium benötigt werden. Lithium-Ionen-Akkus stellen mehrfach auf- und entladbare Energiequellen dar. Beim Entladevorgang fließen die Lithium-Ionen von der Anode zur Kathode und generieren einen elektrischen Stromfluss. Während des Ladevorgangs des Akkus erfolgt die Freisetzung von Lithium-Ionen aus der Kathode, die dann aufgrund der elektrischen Potentialdifferenz zwischen beiden Elektroden zurück zur Anode wandern (**Abb. 3**).^{13,14}

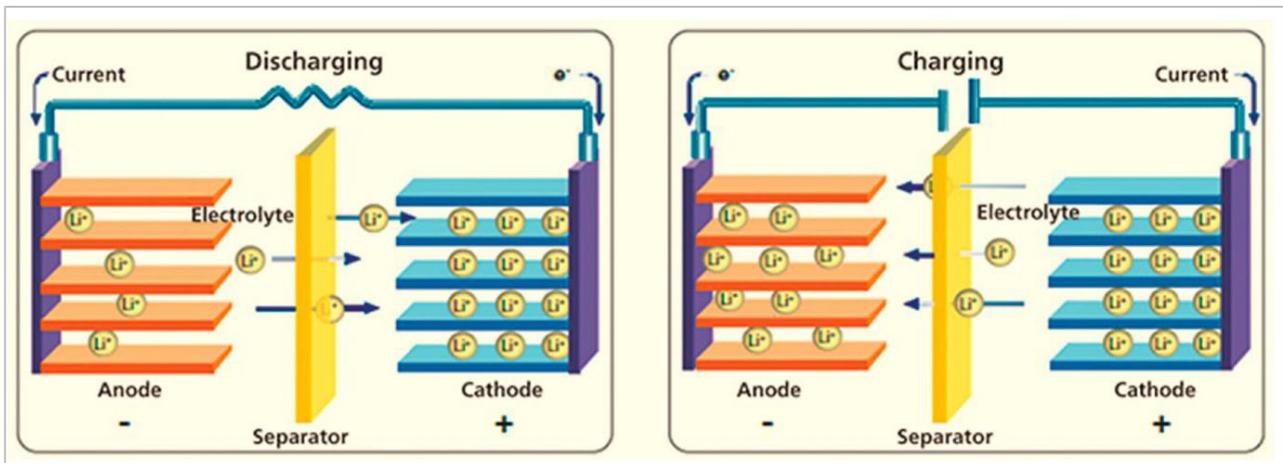


Abbildung 3: Funktionsweise eines Lithium-Ionen-Akkus beim Entladevorgang und Ladevorgang.¹³

Um ein möglichst risikofreie Recyclingprozedur entwickeln zu können, muss die potentielle Gefährdung durch einen elektrischen Kurzschluss minimiert werden. Kommen Anode und Kathode während der Entmantelung der Akkus miteinander in Kontakt, so kann das zu einem Kurzschluss führen, bei dem die gesamte im Akku gespeicherte chemische Energie mit einem Schlag freigesetzt wird. Daher werden die Smartphone-Akkus vor der Zerlegung in Einzelteile weitestgehend entladen, um die gespeicherte Energiemenge so gering wie möglich zu halten.

3.1.3. Recycling von Cobalt und Lithium aus Lithium-Ionen-Akkus

Zur Wiedergewinnung von Metallen aus verbrauchten Lithium-Ionen-Akkus werden hauptsächlich pyrometallurgische¹⁴, hydrometallurgische¹⁵ oder Biolaugungs-Verfahren¹⁶ angewendet und entwickelt. Im Vergleich zu Methoden der Hydrometallurgie und Biolaugung verursachen pyrometallurgische Techniken weitaus größere Umweltbelastungen und Energieverschwendungen.¹⁷

Weltweit recyceln etwa 50 Betriebe in einem bestimmten Maß Lithium-Ionen-Akkus. Es existieren kleine Laborbetriebe bis hin zu großtechnisch angelegten, vollautomatischen Recyclinganlagen. China zeichnet sich durch die höchsten Recyclingquoten aus, gefolgt von Südkorea, der europäischen Union, Japan, Kanada und den Vereinigten Staaten.^{18,19} Generell bestehen die Recyclingprozesse von Lithium-Ionen-Akkus aus drei Teilschritten – der Vorbehandlung, dem sekundärer Behandlungsprozess und einem Tiefen-Recyclingprozess.⁷

Im Vorbehandlungsprozess erfolgt die Sortierung der Akku-Bestandteile in einzelne Fraktionen. Zunächst muss das Gefährdungspotential der Akkus durch Kurzschlüsse gesenkt werden. Dazu können die Akkus entladen,²⁰ mit flüssigem Stickstoff eingefroren²¹ oder unter Schutzgas bearbeitet

werden.²² Anschließend erfolgt entweder die manuelle Entmantelung und Zerlegung der Akkus oder deren maschinelle Zerkleinerung und Sortierung. Fraktionen von Anoden- und Kathodenmaterial, Kupferfolie und Aluminiumfolie werden erhalten. Die Fraktionen von Plastik und Eisen werden entfernt.⁷

Während des sekundären Behandlungsprozesses⁷ sollen Kupfer, Aluminium, Lithium, Cobalt und Graphit quantitativ voneinander als Feststoff oder in Lösung getrennt werden. Das gelingt u.a. durch Laugung mit Säuren,^{23,24,25} Biolaugung,²⁶ Lösevorgang mit *N*-Methylpyrrolidon (NMP),^{27,28} Ultraschallbehandlung^{21,29,30} oder hydrothermische Verfahren.³¹

Abschließend erfolgt der Tiefen-Recyclingprozess. Hohe Reinheiten von Kupfer, Aluminium, Lithium und Cobalt in fester Form werden durch vereinte Methoden der Lösungsmittelextraktion, der Ausfällung, der Elektrolyse, der Kristallisation und des Kalzinierens erreicht.⁷ In der vorliegenden Arbeit wird ein Verfahren auf Basis von manueller Akku-Entmantelung mit anschließender nass-chemischer Behandlung der Akku-Komponenten ausgearbeitet.

3.2. Displays und Touchscreens von Smartphones

3.1.1. Aufbau von Smartphone-Displays

Flüssigkristall-Display (engl.: Liquid Crystal Display (LCD)) - Bildschirme bestehen meist aus einer Trägerstruktur, einer elektronischen Einheit und einem Kunststoffgehäuse. Des Weiteren beinhalten sie die bildgebende Einheit mit Hintergrundbeleuchtung, Streuscheiben und dem LCD-Panel. Der Aufbau des LCD-Panels wiederum setzt sich aus Kunststoff-Polarisationsfiltern, Glasschichten, Indiumzinnoxid (engl.: indium tin oxide (ITO)) - Schichten, Lackschicht, und Farbfiltern zusammen (**Abb. 4**).³² Daraus resultiert auch die hohe Nachfrage nach Zinn-dotiertem Indiumoxid. Denn fast die gesamte Indiumproduktion weltweit wird zur Herstellung von ITO-Schichten eingesetzt.³³ Die ITO-Schicht setzt sich aus ca. 90% In_2O_3 und ca. 10% SnO_2 zusammen. Das entspricht einem Massenanteil von 78% Indium in der ITO-Schicht.^{34,35} In Bezug auf die gesamte LCD-Einheit liegt die Konzentration von Indium laut Rasenack im Mittel bei etwa 170 ppm. Das entspricht ca. 0.7 g Indium pro m^2 Bildschirmfläche.³²

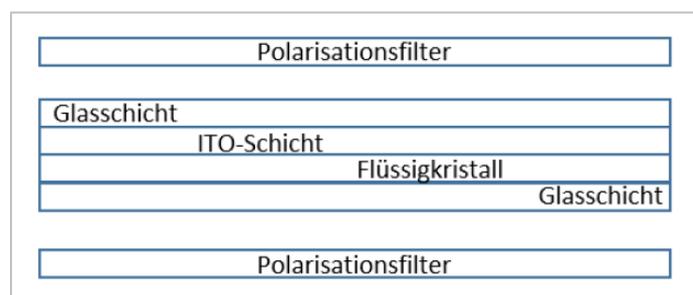


Abbildung 4: Aufbau der Laminierung der ITO-Schicht eines LCD-Panels.³⁶

3.1.2. Recycling von Indium und Zinn aus Smartphone-Displays

Indium wurde 2011 als kritisches Metall^{37,38} und energiekritisches Element³⁹ eingestuft. Problematisch für die Entwicklung eines Metall-Recyclingprozesses aus Displays ist der geringe Gehalt der Metalle Indium und Zinn. Auch der Umstand, dass hier entsorgte Geräte verwertet werden sollen,

die beschädigt und verschmutzt sein können, kann die Rückgewinnung von Indium und Zinn erschweren.³² Verfahren zum Recycling von Indium umfassen verschiedene Teilschritte – die Vorbehandlung⁴⁰ (thermisch und/oder mechanisch), die Laugung und die abschließende Aufkonzentration der Lösung zu einem Indium-Konzentrat.³² Einen detaillierten Überblick über die Vorbehandlungsmöglichkeiten gibt Zhang et al.⁴¹ und eine Auflistung entwickelter Methoden zum Metallrecycling aus LCDs erfolgt in Zhang und Xu.⁴²

4. Bericht der Ergebnisse

4.1. Entwicklung neuer Chemie-Schülerexperimente

SuS der Sekundarstufen soll anhand von neuen Laborexperimenten des Schülerlabors NatLab die Vielfalt der in Smartphones eingesetzten Rohstoffe verdeutlicht werden. Es sollen die Metalle Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkus und die Metalle Indium und Zinn aus Displays oder Touchscreens auf experimentellem Weg wiedergewonnen werden. Für SuS, die aus verschiedenen Gründen nicht am Versuch teilnehmen können, soll der bereits entwickelte Recyclingprozess von Neodym aus Smartphone-Lautsprechern digitalisiert werden, sodass die Bildung der SuS auch außerhalb der Labore des NatLabs stattfinden kann.

Die Durchführung der Experimente dient der Wissensvermittlung und soll die SuS gleichzeitig für anspruchsvolles chemisches Arbeiten mit technischem Hintergrund begeistern. Anhand der topaktuellen Thematik des Recyclings von Smartphone-Bestandteilen sollen SuS Wissen zu physikalischen Grundlagen erlernen, bzw. festigen und chemische Arbeitsmethoden wie das Rückflusksochen, die Vakuumfiltration und Fällungsreaktionen erlernen und anwenden.

Eine weitere Zielsetzung ist die Gewährung eines Einblicks in die Problematiken der Kreislaufwirtschaft von Smartphone-Akkus, um die SuS für einen Ressourcen-sensiblen Umgang mit elektronischen Geräten zu gewinnen. Dabei soll es zum einen um Arbeitsbedingungen, Umweltbelastungen und Transportwege gehen, die mit der Rohstoffgewinnung von Cobalt, Lithium, Indium, Zinn und Neodym einhergehen. Auch die Produktion von Smartphones erfolgt zum Teil unter inakzeptablen Bedingungen für die Arbeitskräfte sowie erheblichen Verschmutzungen der Umwelt. Weitere Problematiken ergeben sich für die Entsorgung und das Recycling von Smartphones, da z. B. Smartphone-Akkus Inhaltsstoffe mit hohem Gefahrenpotential enthalten, die zu Risiken beim Transport, der Lagerung und der Entsorgung von Akkus führen. Eine Abwägung zwischen Effizienz möglicher Recycling-Strategien und finanziellen Nachteilen gegenüber der herkömmlichen Rohstoffgewinnung soll ebenfalls erfolgen.

4.1.1. Recycling von Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkus

Versuchsentwicklung

Der Versuch umfasst folgende experimentelle Teilschritte:

- Wahl eines geeigneten Li-Ionen-Akkus
- Entladung
- Entmantelung
- Sortierung der Materialien zum Erhalt der Kathodenfraktion
- Gewinnung von aktivem Material (Lithiumcobaltoxid, LiCoO_2) aus der Kathode

- Laugung von LiCoO_2
- Ausfällung von Cobalhydroxid
- Ausfällung von Lithiumphosphat
- Analytik der Cobalt- und Lithiumsalze

Auswahl eines geeigneten Smartphone-Akku-Typs

Zur Entwicklung des Schülerversuchs sollte zunächst ein Smartphone-Akku-Typ untersucht werden, der sich unkompliziert und schnell in seine Bestandteile zerlegen lässt. Des Weiteren sollte dieser Akku-Typ Bestandteile mit einem möglichst geringem Gefährdungspotential enthalten, damit SuS verschiedener Altersklassen diesen Versuch bewältigen können.

Herkömmliche Li-Ionen-Akkus enthalten leicht entzündliche organische Lösungsmittel, die ein Gefahrenpotential für die Durchführung des Recyclingversuchs darstellen können.⁴³ Bei einer Entmantelung des Akkus würden sowohl die Lösemittel als auch das in ihnen gelöste Leitsalz LiPF_6 freigesetzt werden. Zwar kann LiPF_6 hydrolysiert und anschließend mit Ca(OH)_2 zu stabilem und ungefährlichem CaF_2 umgesetzt werden,²² diese Prozedur ist jedoch zeitaufwändiger und potenziell schädlicher für die Gesundheit. Daher werden zunächst Smartphone-Akkus mit festem Elektrolyten für den Schülerversuch bevorzugt.

Li-Ionen-Akkus vom Typ Li-Polymer können unkompliziert entmantelt und recycelt werden. Der Elektrolyt liegt hier als Polymer und in festem Aggregatzustand vor.⁴⁴ Es ergeben sich flexible, kompakte und laminierte Strukturen, die keine Anfälligkeit für undichte Stellen aufweisen.⁴⁵ Diese Form des Akkus ist demzufolge weitaus sicherer zu handhaben und stabiler als Akkus mit Flüssigelektrolyten.⁴³

Bei der Entmantelung und dem anschließenden Sortieren des Materials müssen lediglich die Plastikhülle des Akkus sowie die Kathoden-, Anoden- und Polymer-Elektrolyt-Folie voneinander getrennt werden. Die Elektrolytfolie kann bequem und ungefährlich mit dem normalen Feststoffabfall des Labors entsorgt werden und die Weiterverarbeitung des Kathodenmaterials ist direkt im Anschluss möglich.

Es wurden zwei verschiedene Verarbeitungsformen von Li-Polymer-Akkus verwendet. Eine Form enthält durchgängige Kathoden-, Anoden- und Elektrolytfolien (**Abb. 5**; Li-Polymer-Akku Typ 1). Die einzelnen Bestandteile können problemlos voneinander separiert werden.



Abbildung 5: Li- Polymer-Akku-Typen: Typ 1 enthält durchgängige Elektroden- und Elektrolytfolien: Vollständiger Akku vor der Entmantelung (links) und Kathodenfolie nach der Entmantelung (rechts).

Ein zweiter Typ eines Li-Polymer-Akkus enthält kleinere Folienstücke der Kathode und Anode, die jeweils durch die Separatorfolie voneinander getrennt sind. Verbunden werden die einzelnen Kathoden- und Anodeneinheiten durch die Kontakte, die sich oben an den Elektrodenstücken befinden. Auf diese Weise erfolgt die Verknüpfung vieler Elektrodeneinheiten (**Abb. 6**; Li-Polymer-Akku Typ 2). Die Gesamtkapazität ergibt sich aus der Summe der Teilkapazitäten der Einheiten, gemäß einer Parallelschaltung von Kondensatoren.⁴ Dieser Typ von Li-Polymer-Akku kann ebenfalls für das Recycling von Lithium und Cobalt aus Akkus verwendet und in seine Bestandteile zerlegt werden. Er ist an dem gelben Klebstoff erkennbar, der an der Verarbeitung der Außenhülle des Akkus zu sehen ist (**Abb. 6**).



Abbildung 6: Li-Polymer- Akku-Typen: Typ 2 enthält mehrere Elektrodeneinheiten. Vollständiger Akku vor der Entmantelung (links) und einzelne Elektrodeneinheiten nach der Entmantelung (rechts).

Entladevorgang der Smartphone-Akkus

Bei der Zerlegung eines Li-Ionen-Akkus in seine Bestandteile besteht die Gefahr eines Kurzschlusses, der entsteht, wenn Kathode und Anode miteinander in Kontakt kommen. In diesem Fall wird die komplette im Akku gespeicherte chemische Energie freigesetzt.²³ Da Li-Ionen-Akkus hochreaktive Komponenten und somit eine beträchtliche Menge an Energie beinhalten, kann ein Kurzschluss gefährliche Folgen haben. So sind ein abrupter Anstieg der Temperatur und eine heftige Gasbildung möglich. Sogar Brände oder Explosionen können auftreten.²⁰ Um die mit einem Kurzschluss verbundenen Risiken zu minimieren, muss der Akku vor der Entmantelung weitestgehend entladen sein. Auf diese Weise wird die Menge an chemischer Energie verringert, die während eines Kurzschlusses freigesetzt werden könnte.

Zur Entladung werden Li-Ionen-Akkus gewöhnlich in Salzlösungen gegeben.⁷ Von verschiedenen Salz-Elektrolytlösungen zeigte NaCl-Lösung in geeigneter Konzentration die besten Entladungsergebnisse.²⁰ Dennoch dauerte der Entladevorgang mehrere Stunden, sodass dieser Ansatz für einen Schülerversuch zu zeitintensiv wäre. Alternativ ist die Entladung eines Akkus über einen ohmschen Widerstand möglich. Diese Herangehensweise wurde in der vorliegenden Arbeit angewendet, da sie weitaus effizienter verläuft und die SuS zudem fachübergreifende Einblicke in physikalische Grundlagenkenntnisse gewährt.

Für die Beurteilung des Ladezustands der Li-Polymer-Akkus wurde deren Leerlaufspannung mit einem Multimeter (VOLT CRAFT VC130-1) gemessen. Akkus, die bereits mehrere Jahre nicht mehr im Gebrauch waren, zeigten eine Leerlaufspannung von 0 V an. Diese können ohne Entladungsvorgang entmantelt werden. Akkus mit kürzerer Lagerzeit wiesen Leerlaufspannungswerte von ca. 1.0 V – 4.2 V auf und wurden im Folgenden über einen geeigneten ohmschen Widerstand entladen.

Exemplarisch wurde ein iPhone-Akku mit einer Leerlaufspannung von 4.0 V über einen elektrischen Widerstand (Widerstand = 10 Ω und Leistung = 2 W) entladen. Der Akku ist hierbei als Kondensator zu betrachten, der über gespeicherte elektrische Ladung verfügt. Wird der Akku mit einem Verbraucher, in diesem Fall dem Widerstand, mithilfe von elektrischen Leitungen verbunden, so wird ein elektrischer Stromfluss generiert. Parallel zum Widerstand wird ein Multimeter zur Überprüfung der Nennspannung geschaltet (**Abb. 7**).

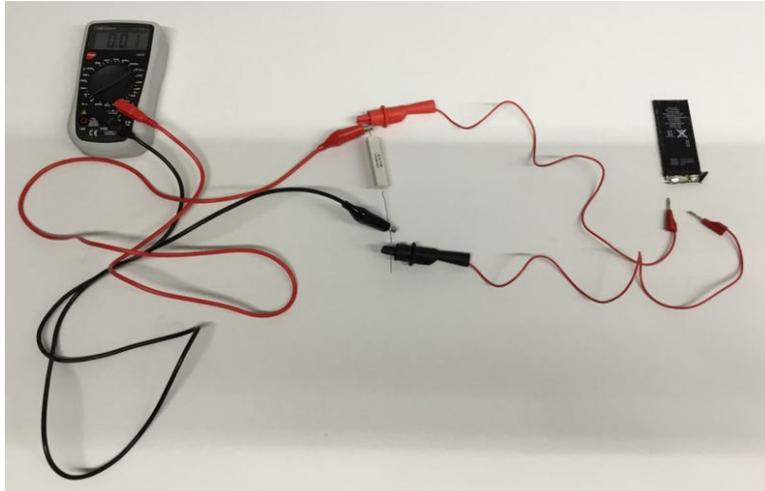


Abbildung 7: Manuelle Entladung eines Lithium-Polymer- Akkus über einen ohmschen Widerstand.

Voll geladene Akkus liefern eine Leerlaufspannung von ca. 3.5 – 4.2 V und sollten auf eine Leerlaufspannung von unter 1.4 V entladen werden. Die Entladung über einen Widerstand mit $R = 1.5 \Omega$ und einer Leistung von 11 W entlädt den Akku in ca. 30 min. Die recht hohe Leistung des Widerstands ist von Vorteil, da dieser bei Verbindung mit dem Akku einen recht hohen Stromfluss kompensieren muss und sich stark erhitzt. Der Akku liefert für ca. 30 min eine Nennspannung zwischen 2.5 und 3.5 V, die anschließend auf ca. 0.2 V sinkt. Beträgt die Leerlaufspannung weniger als 1.4 V, ist der Akku ausreichend entladen.

Entmantelung der Smartphone-Akkus

Zunächst wurde die schwarze Plastikfolie, mit der der Akku umhüllt ist, mit einem scharfen Messer vorsichtig angeschnitten. Dabei muss beachtet werden, dass die verschiedenen Schichten des Akkus nicht durchstoßen werden dürfen, da sonst weiterhin die Gefahr eines Kurzschlusses besteht. Die Plastikfolie wurde vorsichtig entfernt. Im Anschluss wurde mithilfe des Messers die darunterliegende, mit schwarzem Pulver beschichtete Aluminiumfolie abgewickelt. Darunter befand sich eine beschichtete Kupferfolie, die ebenfalls abgewickelt wurde (**Abb. 8**). Die Kontakte des Akkus sind bestmöglich während der Entmantelung nicht berührt worden und konnten nach Abwicklung der Kupferfolie mit einer Schere abgetrennt werden.



Abbildung 8: Übersicht verschiedener Materialklassen nach der Entmantelung eines Li-Polymer-Akkus eines iPhones.

Die verschiedenen Materialien wurden im Anschluss in 3 Fraktionen sortiert. Fraktion 1 enthielt alle Aluminiumfolienteile der Kathode, Fraktion 2 alle Kupferfolienstücke der Anode und Fraktion 3 die verbliebenen Plastikfolien, Kontakte und, sofern abtrennbar, Separator- und Elektrolytfolien (**Abb. 9**).



Abbildung 9: Sortierung der verschiedenen Materialklassen nach der Entmantelung eines Li-Polymer-Akkus eines iPhones. (links). Kathodenmaterial aus Aluminium; (Mitte) Anodenmaterial aus Kupfer; (rechts) Plastikabfälle, Kontakte und Separator- und Elektrolytfolien.

Bei der Entmantelung vom Li-Polymer-Akku Typ 2 ist oft nicht leicht erkennbar, ob es sich bei Einzelfolien um beschichtete Kupfer- oder Aluminiumfolien handelt. Zur Identifizierung des Metalls kann die darüber liegende schwarze Folie etwas mit einem Spatel abgekratzt werden, sodass die silberne Aluminiumfolie der Kathode von der kupferfarbenen Anodenfolie deutlich unterschieden werden kann. Zum Recycling von Lithium und Cobalt werden lediglich die Kathodenelemente des Akkus benötigt.

Gewinnung von aktivem Material (LiCoO_2) aus der Kathode

Das aktive Material Lithiumcobaltdioxid (LiCoO_2) ist meist mit dem Klebemittel Polyvinylidenfluorid (PDVF) auf der Aluminiumschicht der Kathode befestigt. PDVF weist eine hohe mechanische und chemische Stabilität auf und kann daher nur schwer entfernt werden.⁴⁴ Zur Isolierung von LiCoO_2 kann PDVF effektiv nach Contestabile⁴⁶ mit dem Lösungsmittel *N*-Methylpyrrolidon (NMP) entfernt werden. NMP löst PDVF sehr gut (ca. 200 g/kg Lösungsmittel) und weist zudem einen hohen Siedepunkt von ca. 200°C auf, der einen Lösungsvorgang des aktiven Materials von der Aluminiumfolie bei hohen Temperaturen ermöglicht.⁴⁷ So kann das Bindemittel effektiv und in hoher Ausbeute entfernt werden.

Für den Versuch wurde die beschichtete Aluminiumfolienfraktion in ca. 1 x 1 cm große Stücke zerschnitten und in einen 500-mL-Einhalskolben, ausgestattet mit einem Rückflusskühler, gegeben. Nach Zugabe von ca. 200 mL NMP wurde der Ansatz für 1 h auf ca. 100°C unter starkem Rühren erhitzt (**Abb. 10a**). Die Lösung verfärbte sich zunehmend schwarz. Nach Abkühlung der Lösung wurden die Aluminiumstückchen über einen Büchnertrichter von der Lösung getrennt (**Abb. 10b**). Die im Kolben verbliebenen Aluminiumstücke (**Abb. 10c**) wurden drei Mal mit ca. 20 mL NMP gewaschen. Anschließend wurde die Lösung mehrfach filtriert, bis der überwiegende Teil an schwarzen Partikeln vom Lösungsmittel getrennt werden konnte. Das erhaltene Pulver wurde intensiv mit destilliertem Wasser gewaschen und getrocknet. Es wurden ca. 600 mg aktives Material erhalten (**Abb. 10d**). Das erhaltene Pulver bestand vermutlich aus einer Mischung von LiCoO_2 und Graphit, da die Fraktionen der Anoden und Kathoden während des Sortierprozesses nicht exakt voneinander getrennt werden konnten. Im nachfolgenden Schritt werden die einzelnen Bestandteile der Mischung voneinander separiert.

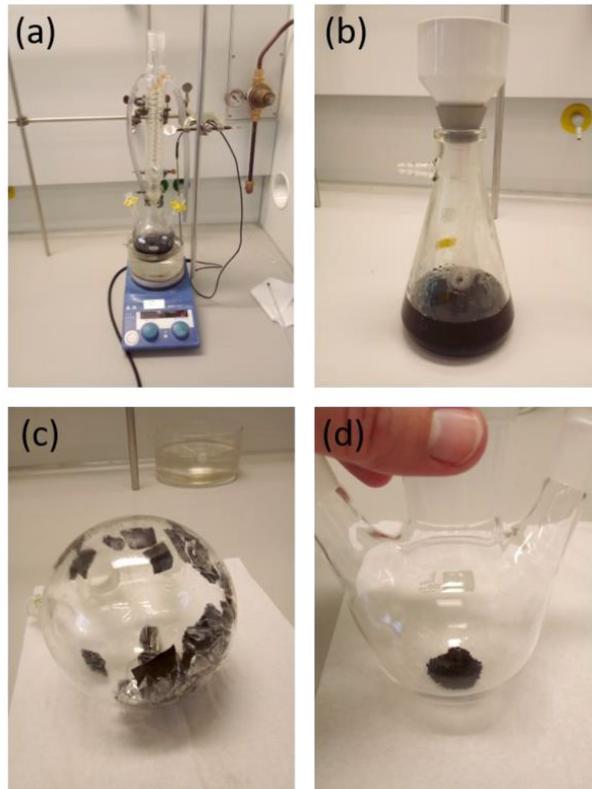


Abbildung 10: Übersicht der experimentellen Prozedur der Gewinnung von Aktivmaterial aus der Kathode eines Li-Polymer-Akkus eines iPhones. (a) Versuchsaufbau; (b) Trennung von Aluminium und aktivem Material mittels Büchnertrichter; (c) im Kolben verbliebene Aluminiumstücke; (d) gewonnenes aktives Material der Kathode.

NMP ist jedoch ein Lösungsmittel mit relativ hohem Gefährdungspotential, das zu den krebserzeugenden, erbgutverändernden und fruchtbarkeitsgefährdenden (engl.: cancerogen mutagen reprotoxic (CMR)) Stoffen der Kategorie 1 und 2 gehört und somit für die Verwendung durch SuS nicht geeignet ist. Ein geeignetes Ersatzlösungsmittel ohne Gefahrensymbole ist u. a. Dimethylsulfoxid (DMSO). Der Ersatz von NMP durch DMSO konnte ohne entscheidende Materialverluste an LiCoO_2 durchgeführt werden.

Weiterhin war es bedeutsam, eine möglichst kurze Versuchszeit zu entwickeln, da die SuS den kompletten Versuch in 4 h absolvieren sollen. So wurden die Reaktionszeit von 1 h auf 30 min verkürzt und das zeitaufwändige Abfiltrieren des aktiven Materials durch Dekantieren ersetzt, ohne entscheidende Materialverluste. Die Abkühlung der Reaktionsmischung von 100°C auf Raumtemperatur konnte durch Kühlung mit einem Eisbad beschleunigt werden.

Es wurden mehrere Versuche zur Optimierung durchgeführt. Zunächst erfolgte ein Optimierungsversuch in NMP mit 30 min Reaktionszeit bei 100°C . Aus 3.62 g Kathodenfraktion konnten 650 mg LiCoO_2 erhalten werden. Die Ausbeute von 18% entsprach der des Ausgangsversuchs. Bei Verwendung des Lösungsmittels DMSO statt NMP und einer Reaktionszeit von 30 min bei 100°C wurden aus 3.23 g Kathodenmaterial 400 mg LiCoO_2 mit einer etwas geringeren Ausbeute von 12% gewonnen (**Tab. 1**).

Tab. 1. Übersicht der Optimierungsversuche zur Gewinnung von LiCoO_2 aus dem Kathodenmaterial.

| Lösungsmittel | Reaktionszeit [h] | Masse Kathodenmaterial [g] | Masse LiCoO_2 [g] | Ausbeute [%] |
|---------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|--------------|
| NMP | 1 | 3.44 | 0.62 | 18 |
| NMP | 0.5 | 3.62 | 0.65 | 18 |
| DMSO | 0.5 | 3.23 | 0.40 | 12 |

Der Materialverlust resultiert vermutlich aus der geringeren Löslichkeit von PDVF in DMSO im Vergleich zu NMP und dem Ersatz des Filtrierens durch Dekantieren. Da jedoch genügend aktives Material für die Weiterverarbeitung erhalten wurde, ist die geringere Ausbeute zugunsten der Reaktionsdauer vertretbar. Die Zahlenwerte sind als Richtwerte anzusehen, da es nicht genau möglich ist, alle zur Kathodenfraktion gehörenden Teile eines Akkus akkurat von den restlichen Bestandteilen abzutrennen.

Die optimierte Versuchsvorschrift lautet: Die beschichtete Aluminiumfolienfraktion wurde in ca. 1 x 1 cm große Stücke zerschnitten und in einen 500-mL-Einhalskolben, ausgestattet mit einem Rückflusskühler, gegeben. Nach Zugabe von ca. 200 mL DMSO wurde der Ansatz für 30 min auf ca. 100°C unter starkem Rühren erhitzt. Die Lösung verfärbte sich zunehmend schwarz. Nach Abkühlung der Lösung im Eisbad wurden die Aluminiumstückchen über einen Büchnertrichter von der Lösung getrennt. Das Filtrat wurde nach 2 min Sedimentationszeit dekantiert. Die im Kolben verbliebenen Aluminiumstücke wurden fünf Mal mit ca. 100 mL destilliertem Wasser gewaschen und ebenfalls über den Büchnertrichter abfiltriert. Die Lösung wurde dekantiert und die verbleibenden schwarzen LiCoO_2 -Partikel vereinigt. Die Partikel wurden drei Mal mit ca. 200 mL destilliertem Wasser gewaschen, dekantiert und mithilfe einer Vakuumpumpe trockengesaugt.

Laugung von LiCoO_2

Um LiCoO_2 quantitativ lösen zu können, wurde das im vorangehenden Arbeitsschritt gewonnene aktive Material in ca. 6 mL 4 M HCl gelöst. Es wurde ein Säure/Probe-Verhältnis von ca. 10:1 gewählt. Die Mischung wurde für 1 h auf ca. 80°C unter Rühren erhitzt (**Abb. 11**).⁴⁶

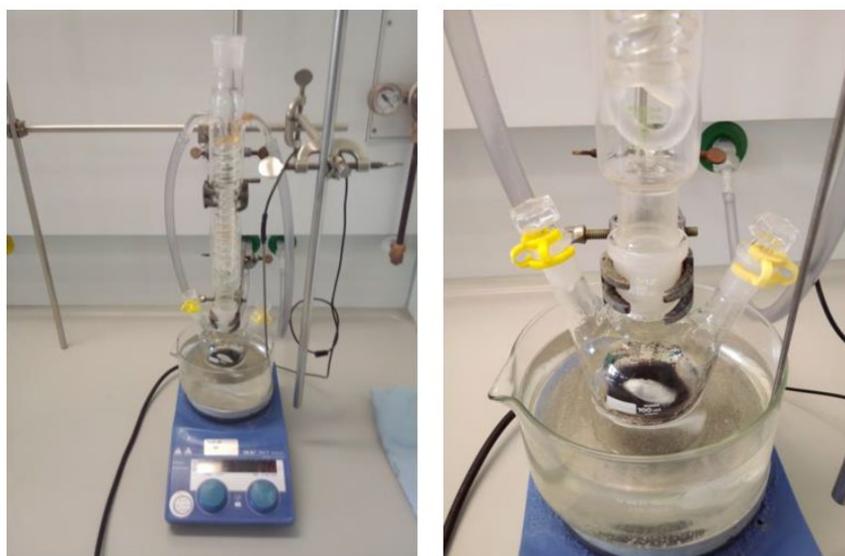


Abbildung 11: Aufbau des Laugungs-Prozesses des aktiven Materials eines Li-Polymer-Akkus eines iPhones.

Zur Verkürzung der Reaktionszeit wurde das aktive Material zu einem späteren Zeitpunkt statt im Ölbad mit dem Bunsenbrenner erhitzt. Die angepasste Vorschrift lautet: „Lösen Sie das gewonnene LiCoO_2 (1,8 g) im Erlenmeyerkolben in ca. 18 mL 4 M HCl (7,6 mL destilliertes Wasser + 12,4 mL 20%ige HCl) auf. Erhitzen Sie die Mischung anschließend für ca. 2 min mit dem Bunsenbrenner.“

Ausfällung von Cobalhydroxid

Nach der Abkühlung des Gemisches aus dem Laugungsvorgang wurden ungelöste Nebenprodukte wie Graphit abfiltriert und eine rote, klare Lösung erhalten (**Abb. 12a**). Durch Zugabe von 4 M Natriumhydroxid (NaOH)-Lösung wurde Cobalt als Cobalhydroxid (Co(OH)_2) ausgefällt. Dazu wurde der pH-Wert auf 12-14 eingestellt und anschließend das Gemisch für 5 min bei Raumtemperatur gerührt. Bei der Zugabe von NaOH wurde die Bildung eines blauen Niederschlags beobachtet, der sich nach dem Abfiltrieren schnell braun verfärbte (**Abb. 12b**). Dieser wurde analytisch untersucht und es konnte gezeigt werden, dass es sich um reines Co(OH)_2 handelte.

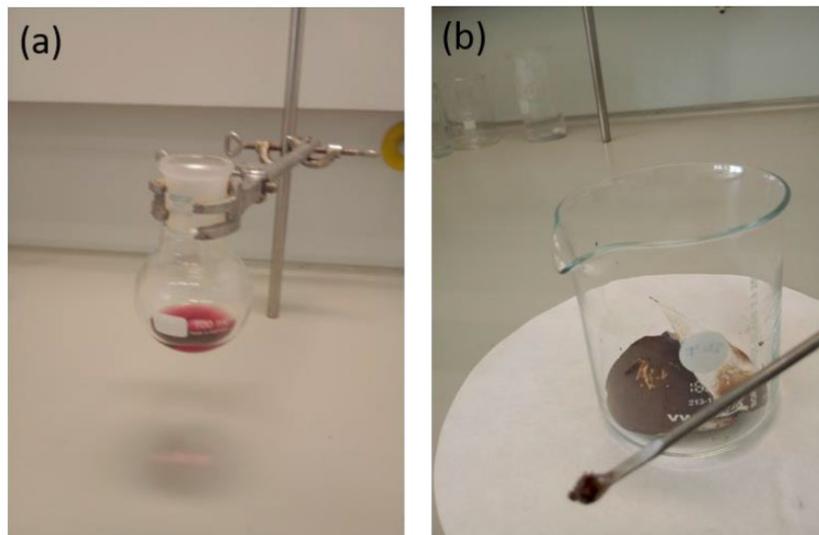


Abbildung 12: Ausfällung von Cobalt aus der Lösung des LiCoO_2 -Laugungs-Prozesses (a) Co^{2+} -haltige Lösung (b) brauner Feststoff nach Fällung mit NaOH.

Ausfällung von Lithiumphosphat

Nach der Abfiltration und dem Waschen von Co(OH)_2 mit destilliertem Wasser wurden das Filtrat auf 50°C erhitzt und 45 mg Natriumphosphatdodecahydrat ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) zugegeben. Nach Song et al.⁴⁸ kann Lithiumphosphat (Li_3PO_4) aus gering konzentrierten lithiumhaltigen Lösungen am effektivsten⁴ bei 50°C und einem molaren Verhältnis von 1.33:3 ($\text{PO}_4^{3-} / \text{Li}^+$) ausgefällt werden. Nach einer Stunde Rühren bei 50°C zeigte sich allerdings keine Niederschlagsbildung. Daher wurde das Filtrat (ca. 30 mL) durch Erhitzen auf 100°C bis zur Trockne eingeeengt. Der Rückstand wurde mit destilliertem Wasser gewaschen, sodass sich Bestandteile wie Natriumhydroxid (NaOH), Natriumchlorid (NaCl) oder Lithiumchlorid (LiCl) lösten und das wasserunlösliche Li_3PO_4 in reiner Form erhalten werden konnte.

Analytik der Cobalt- und Lithiumsalze

Der analytische Nachweis der isolierten lithium- und cobalthaltigen Substanzen erfolgte durch Röntgenbeugungsmessungen (engl.: X-ray diffraction (XRD)). Die aufgenommenen XRD-Spek-

tren von LiCoO_2 (**Abb. 13**), Co(OH)_2 (**Abb. 14**) und Li_3PO_4 (**Abb. 15**) stimmen mit den Literaturspektren überein. Die Substanzen konnten somit in hoher Reinheit erhalten werden.

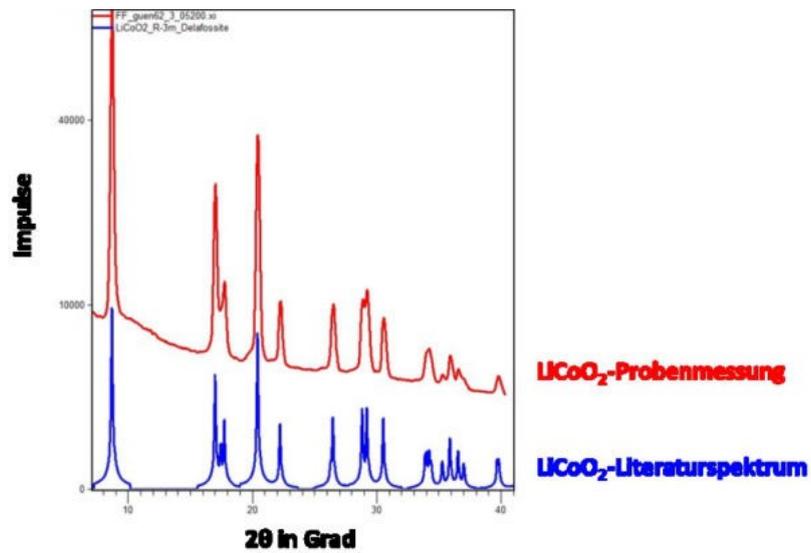


Abbildung 13: XRD- Messung von LiCoO_2 und Vergleich mit dem Literaturspektrum.

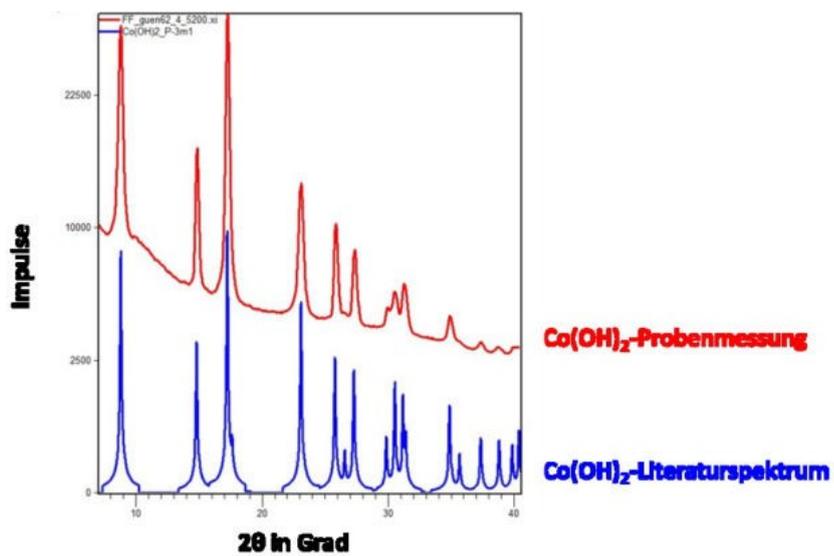


Abbildung 14: XRD- Messung von Co(OH)_2 und Vergleich mit dem Literaturspektrum.

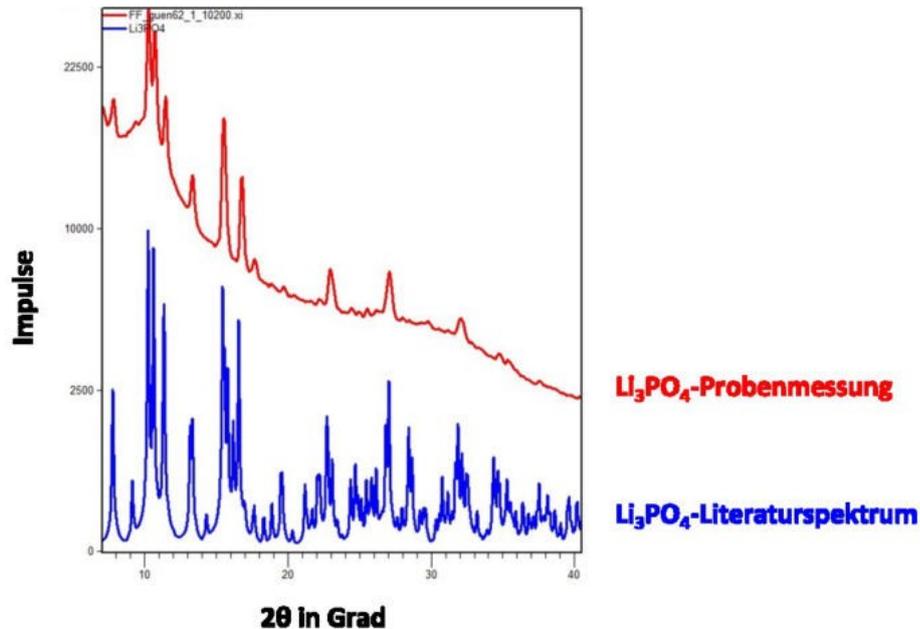


Abbildung 15: XRD-Messung von Li_3PO_4 und Vergleich mit dem Literaturspektrum.

Li_3PO_4 wurde zusätzlich durch Erhitzen in der Brennerflamme nachgewiesen (**Abb. 16**). Die für Lithiumsalze charakteristische rote Flammenfärbung ist deutlich erkennbar. Diesen Nachweis sollen auch die SuS im Laufe des Experiments durchführen. Wenn die SuS durch langsamere Arbeitsweise am Ende des Versuchs nur wenig Zeit zur Verfügung haben sollten, können sie das lithiumhaltige Filtrat nach der Abfiltration von $\text{Co}(\text{OH})_2$ direkt ohne Zugabe von $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ bis zur Trockne einengen. Der Rückstand enthält in diesem Fall eine Mischung aus NaCl , NaOH und LiCl . Durch Erhitzen dieser Mischung in der Brennerflamme ergibt sich eine gelbe und rote Brennerflamme, die den SuS einen guten Nachweis des darin enthaltenen Lithiums und den zeitlich flexiblen Abschluss des Experiments ermöglicht.



Abbildung 16: Charakteristische rote Flammenfärbung von Li_3PO_4 .

Versuchsdurchführung

Am 01.10.2020 wurde der neu entwickelte Kurs zum Recycling von Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkus das erste Mal im Schülerlabor NatLab durchgeführt. Teilnehmer waren 11

SuS der Klassenstufe 12, die am Dreilinden-Gymnasium und jahrgangsübergreifend (Q1/Q3) einen Chemie-Leistungskurs belegten. Die SuS wurden in zwei Gruppen aufgeteilt und konnten den Versuch unter Betreuung von Dr. Carmen Lawatscheck und der studentischen Hilfskraft Isabell Rühl erfolgreich innerhalb von 4 h durchführen (**Abb. 17**).

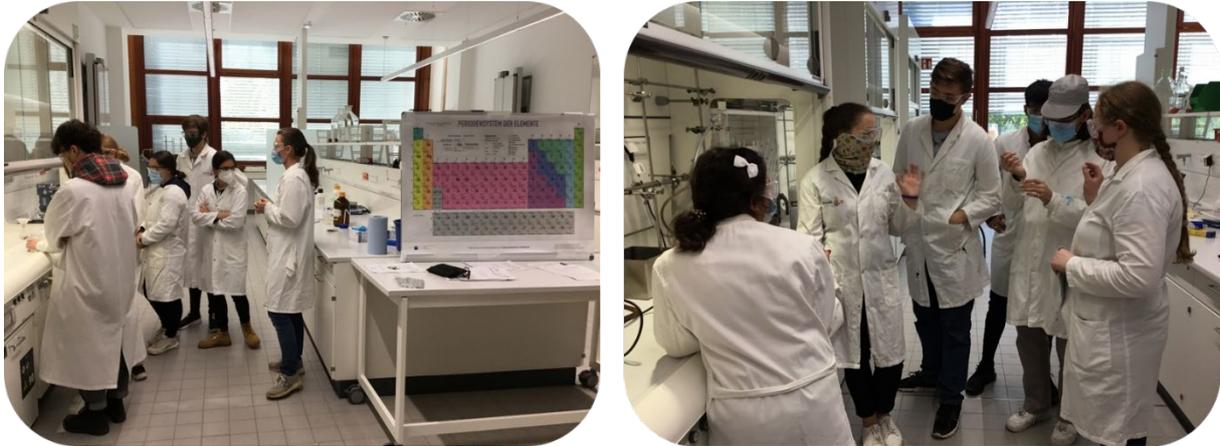


Abbildung 17: Erste Durchführung des neu entwickelten Versuchs „Recycling von Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkus“ mit SuS eines Chemie-Leistungskurses.

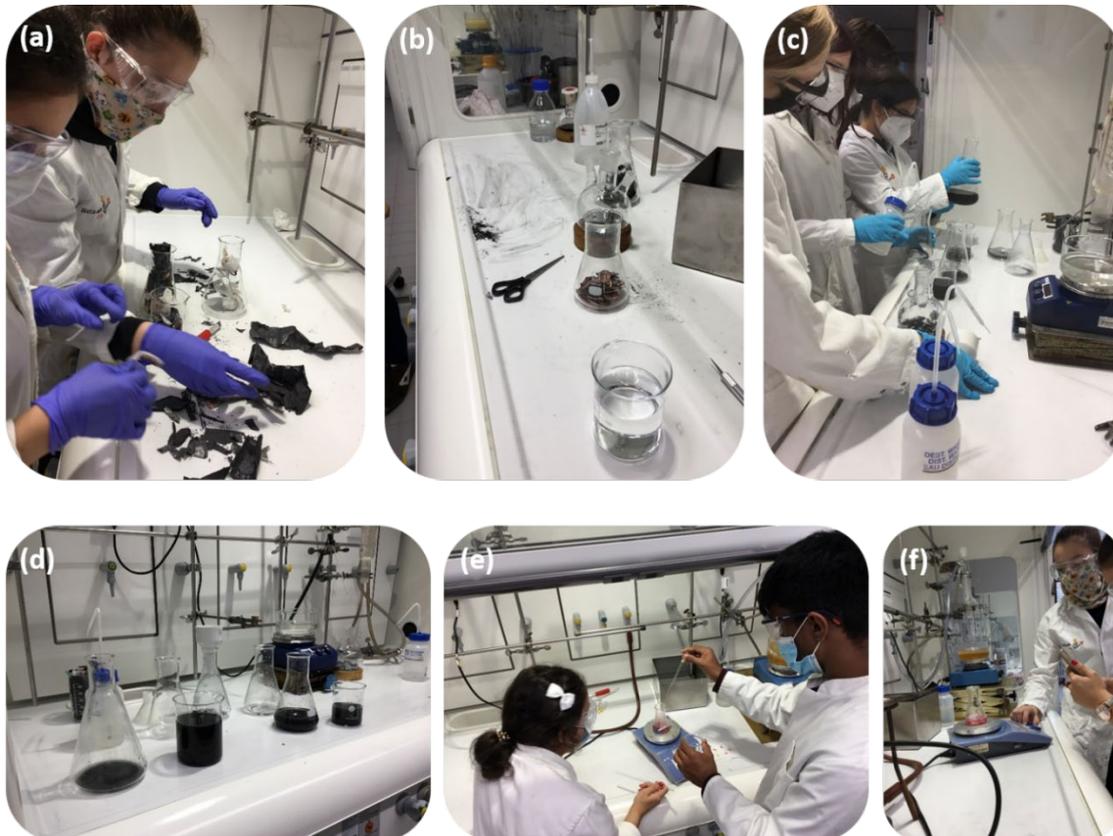


Abbildung 18: SuS eines Chemie-Leistungskurses gewinnen die Metalle Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkus zurück. (a) Entmantelungsprozedur; (b) Sortierung des Materials; (c) Lösen von LiCoO_2 von der Kathode; (d) Dekantieren; (e,f) Ausfällung von Co(OH)_2 .

Die SuS entmantelten pro Gruppe zwei Li-Polymer-Akkus, sammelten die Kathodenfraktion und lösten das aktive Material von der Kathode. Anschließend führten sie die Laugung von LiCoO_2 durch und gewannen Cobalhydroxid und Lithiumphosphat durch Fällungsreaktionen (**Abb. 18**).



Abbildung 19: Die Durchführung des Kurses in zwei Gruppen ermöglichte eine intensive Betreuung der SuS sowie das gleichzeitige praktische Arbeiten mehrerer SuS.

Alle SuS konnten aktiv am Versuch mitarbeiten. An jedem Teilschritt des Recyclingverfahrens arbeiteten mindestens zwei SuS parallel im Abzug. Die anderen SuS bereiteten Reagenzien vor, machten Notizen, stellten Fragen oder holten benötigte Laborgeräte (**Abb. 19**). Im Anschluss an den Versuch erfolgte die Evaluation des Kurses.

Evaluation des Versuchs

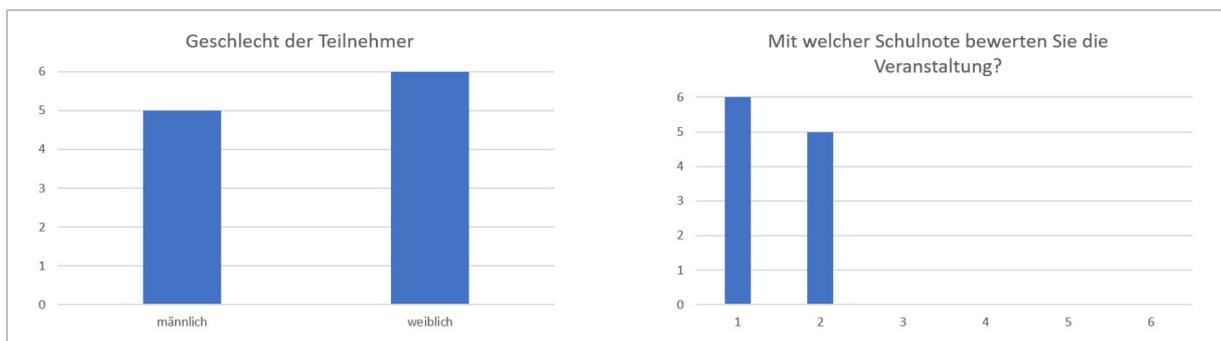


Abbildung 20: Evaluation des Kurses „Recycling von Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkus“. Angaben zum Geschlecht der Teilnehmenden (links) und der Gesamtbewertung des Versuchs (rechts).

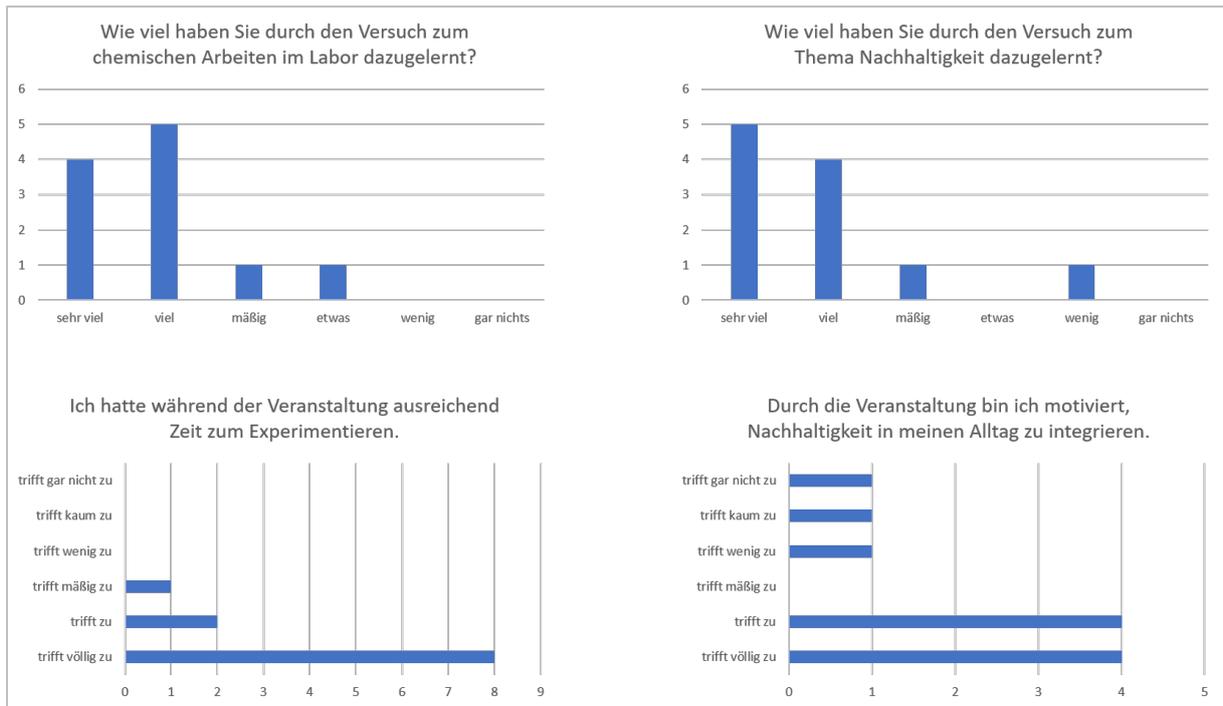


Abbildung 21: Evaluation des Kurses „Recycling von Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkus“. Angaben zum Lernzuwachs bzgl. chemischen Arbeiten im Labor und Nachhaltigkeit.

4.1.2. Recycling von Indium und Zinn aus Displays/Touchscreens

Versuchsentwicklung

Für das zweite Experiment, der Rückgewinnung von Indium aus Touchscreens, wurden defekte Screens freundlicherweise von der Firma „Phonedoctor“ in Berlin Steglitz zur Verfügung gestellt. Als gut geeignet erwiesen sich die Screens der Smartphones der Firma Samsung. Die Trennung des leitfähigen, ITO-haltigen Glases vom Gerät selbst und weiteren Komponenten ist nicht ganz einfach. Hersteller verwenden bei neueren Geräten zunehmend schwer abzulösende Klebstoffe.

Eine Kugelmühle wurde von einer AG des FB Chemie der Freien Universität gestellt.

Der Versuch zur Rückgewinnung des Indiums und Zinns umfasst folgende experimentelle Teilschritte:

| a) Vorbehandlung: | b) Laugungsprozess: |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none">- Entmantelungsprozess zur Abtrennung von Kunststoffen und Leiterplatte- Erhitzen des ITO-Glases- Abtrennung der polarisierenden Folien- Reinigung des ITO-Glases- Zerkleinerung von Displays | <ul style="list-style-type: none">- Laugung mit Säure- Isolierung von Indium- Nachweis von Indium |

a) Vorbehandlung

Entmantelungsprozess zur Abtrennung von Kunststoffen und Leiterplatte

Vor der Laugung von Smartphone-Displays zur Rückgewinnung von Indium wurden die Displays manuell auseinandergenommen und Kunststoffe, Spiegelplatten und andere Paneelteile von der mit ITO beschichteten Glasplatte bestmöglich abgetrennt. Als Hilfsmittel dienten hier ein Präzisionsschneider, Pinzetten und Präzisionsmesser sowie Glasschutzhandschuhe und Schutzbrille sowie ein Visier. LCD-Panelen bestehen meist aus Polarisationsfolien, Glas, Flüssigkristallkomponenten, Farbfiltern und ITO-Elektroden. Auffällig war, dass die präzise Separierung der ITO-beschichteten Glasplatte oft nicht möglich war, da in Smartphones verwendete Adhäsivklebstoffe⁴⁹ die einzelnen Teile zusammenhielten. Auch die Polarisationsfolien, die sich auf der Glasschicht befinden, verhindern eine effektive Abtrennung der ITO-Schicht. Die Polarisationsfolien bestehen hauptsächlich aus den thermoplastischen Kunststoffen Cellulosetriacetat und Polyvinylalkohol.³⁰ Um diese Verunreinigungen zu beseitigen, bzw. zu verringern vor der Indium-Rückgewinnung, wurden verschiedene Methoden zur Vorreinigung ausprobiert. In der Literatur gibt es die folgenden Methoden zur Auswahl: Stickstoff- oder Vakuumpyrolyse, physikochemische Methoden wie die Zerkleinerung des Materials mit Mühlen oder Kugelmühlen oder die elektrische Zersetzung.⁴¹ Auch das Erhitzen der Bestandteile oder das Auflösen, bzw. die Abtrennung von Bestandteilen des Displays in Lösungsmitteln ist möglich.^{7,30}

Erhitzen des Smartphone-Displays

Um die Polarisationsfolien, also organische Bestandteile von der ITO-Glasschicht thermisch abzutrennen, wurde das Display mit einer Heißluftpistole stark erhitzt. Polyvinylalkohol zersetzt sich erst ab 220°C, da es von dem hitzeresistenten Cellulosetriacetat geschützt wird.³⁰ Es war ein Schmelzvorgang der Polarisationsfolien beim Erhitzen sichtbar, jedoch splitterte das Display oft oder verkohlte. Da auch die Verklebung der Display-Schichten durch das Erhitzen nicht entfernt werden konnte, klebten einzelne Bestandteile nach dem Erhitzen nach wie vor zusammen und ließen sich durch diese Methode nicht voneinander trennen.

Einsatz von Lösungsmitteln zur Abtrennung der ITO-Schicht

Um die Polarisationsfolien und Klebemittel von den Displays zu entfernen, wurden verschiedene Reinigungsmethoden ausprobiert. Auf physikalischem Weg sollten sich laut Rochetti et al.⁵⁰ organische Displaykomponenten durch das Waschen von zerkleinerten Displays in destilliertem Wasser und 30-minütigem Rühren mit einem Magnetrührer entfernen lassen. Li et al.⁵¹ beschrieben die Reinigung von ITO-Glasschichten durch Ultraschallanwendung bei Displays in destilliertem Wasser und unter Zugabe von Spülmittel für 10 min bei 40 kHz. Alle Methoden wurden ausprobiert, führten jedoch nicht zu einer Abtrennung von organischen Bestandteilen des Displays.

Entfernung der Adhäsivklebstoffe durch den Einsatz organischer Lösungsmittel

Die Lösung von in Smartphone-Akkus verwendeten Klebstoffen erfolgte durch das Lösungsmittel N-Methylpyrrolidon (NMP), daher lag es nahe, dass sich die in Displays verwendeten Klebstoffe ebenfalls durch dieses Lösungsmittel entfernen ließen. Daher wurden Smartphone-Displays für 1 h auf ca. 100°C unter starkem Rühren erhitzt. Nach Abkühlung der Lösung war ein Großteil des Klebers in Lösung gegangen. Teilweise klebten Displaystücke noch zusammen. Auf diese Weise war eine überwiegende Abtrennung von der ITO-Glasschicht von organischen Verunreinigungen möglich.

Zerkleinerung von Handy-Displays

Die grobe Zerkleinerung der Displays in Stücke < 0.5 cm war manuell durch die Verwendung eines Seitenschneiders möglich. Das Zertrümmern des Displays mit einem Hammer führte hingegen nicht zum Erfolg.

Um eine möglichst große Display-Oberfläche für die Laugung mit Säure zu schaffen, wurde im Anschluss an die grobe Zerkleinerung zermahlen. Sowohl durch die Verwendung einer Kugelmühle als auch einer etwas gröberen Mühle mit höherem Fassungsvermögen konnte sehr fein gemahlene Display-Pulver erhalten werden.

b) Laugungsprozess

Laugung von Smartphone-Displays mit Säure

Zur Gewinnung von Indium aus Smartphone-Displays sind eine Vielzahl von Laugungsmöglichkeiten bekannt. Die Verwendung von anorganischen Säuren wie Salpetersäure, Salzsäure oder Schwefelsäure haben fast alle Verfahren gemeinsam (**Abb. 22**).⁵²

| Focus of Process | Process Output | Methodology | Indium Yield | Re |
|--|--|---|---------------------------------|-----------------------------|
| Indium | Indium concentrate Glass substrate Residues | Leaching with sub-critical water T 360 °C, RT 1 h | >10% | |
| | Indium concentrate Residues | HCl leaching Chloride-Induced Vaporization T 700 °C, RT 90 min | >84% | |
| | Indium concentrate Residues | LCD glass crushed to micron size particles HCl leaching T room temperature, RT ~30 min | <90% | |
| | Condensed indium product Residues | Vacuum carbon-reduction T 950 °C, RT 30 min | <90% | |
| | Indium concentrate Residues | H ₂ SO ₄ leaching Varying T and RT Ion exchange for indium concentration | <95% | |
| | Indium concentrate Residues | H ₂ SO ₄ leaching T 80 °C-90 °C, varying RT | <96.4% | [16] |
| | Indium concentrate Residues | Leaching with HCl HNO ₃ H ₂ SO ₄ Varying T and RT Solvent extraction for indium concentration | >99% | [20] |
| | Solid indium product Solid zinc product Residues | LCD glass crushed to micron size particles H ₂ SO ₄ leaching T 90 °C, 120 min Zinc plate cementation for indium recovery; T 65 °C Sulfide precipitation for zinc recovery; T 60 °C, RT 10 min | <99% | |
| | Solid indium product Residues | H ₂ SO ₄ leaching Cementation with zinc powder; T 55-60 °C, varying RT | 99.8% | |
| | Indium Tin | Indium concentrate Glass substrate Residues | HCl leaching T 75 °C, RT 2 h | 76.16 × 10 ³ g/L |
| Indium Arsenic Antimony Polarizer foils | Polarizer foils Indium, arsenic, antimony concentrate Residues | Thermal shock for foil recovery Leaching with: HNO ₃ HCl Varying T and RT | ~60% | |
| Indium Polarizer foils | Indium concentrate Glass substrate Polarizer foils Residues | Thermal and chemical treatment for polarizer foil removal HCl leaching T 25 °C, RT 6 h Solvent extraction for indium concentration | <90% | |
| | Polarizer foils Indium product Residues | Solvent bath for foil recovery H ₂ SO ₄ leaching T 90 °C, RT 1 h Indium precipitation with NH ₄ OH | >96% | |

Note: H₂SO₄ = sulfuric acid, HCl = hydrochloric acid, HNO₃ = nitric acid, NH₄OH = ammonia water, T = temperature, RT = reaction time.

Abbildung 22: Übersicht verschiedener Leaching-Methoden zum Recycling von Indium aus Displays.

Laugung von Smartphone-Displays mit Schwefelsäure

Zum einen wurde ein sogenannten Cross-Current-Leaching versucht. [Rochetti 2015] Das Handy-Display wurde zerkleinert und in 2 M Schwefelsäure für 10 min auf 80°C erhitzt. Anschließend wurden Feststoffe und Filtrat voneinander getrennt. Zum Filtrat wurde ein weiteres, zerkleinertes Display gegeben und auf dieselbe Weise erhitzt. Dieser Vorgang wurde ein weiteres Mal wiederholt um eine möglichst hohe Anreicherung an Indium in der Lösung zu erreichen. Das Filtrat wurde eingedampft, wobei sich ein schwarzer, klebender Rückstand bildete, der nicht weiterverarbeitet werden konnte.

Laugung und Isolierung von Indium aus Smartphone-Displays mit Salzsäure

Drei Displays wurden mithilfe einer Kugelmühle zermahlen und anschließend in Salzsäure erhitzt. Nach der Abtrennung der festen Bestandteile vom Filtrat wurde Natronlauge hinzugegeben, um bei einem pH-Wert von 4 Indiumhydroxid auszufällen. Tatsächlich fiel bei pH=4 ein weißer Feststoff aus, der jedoch nicht erfolgreich analysiert werden konnte.

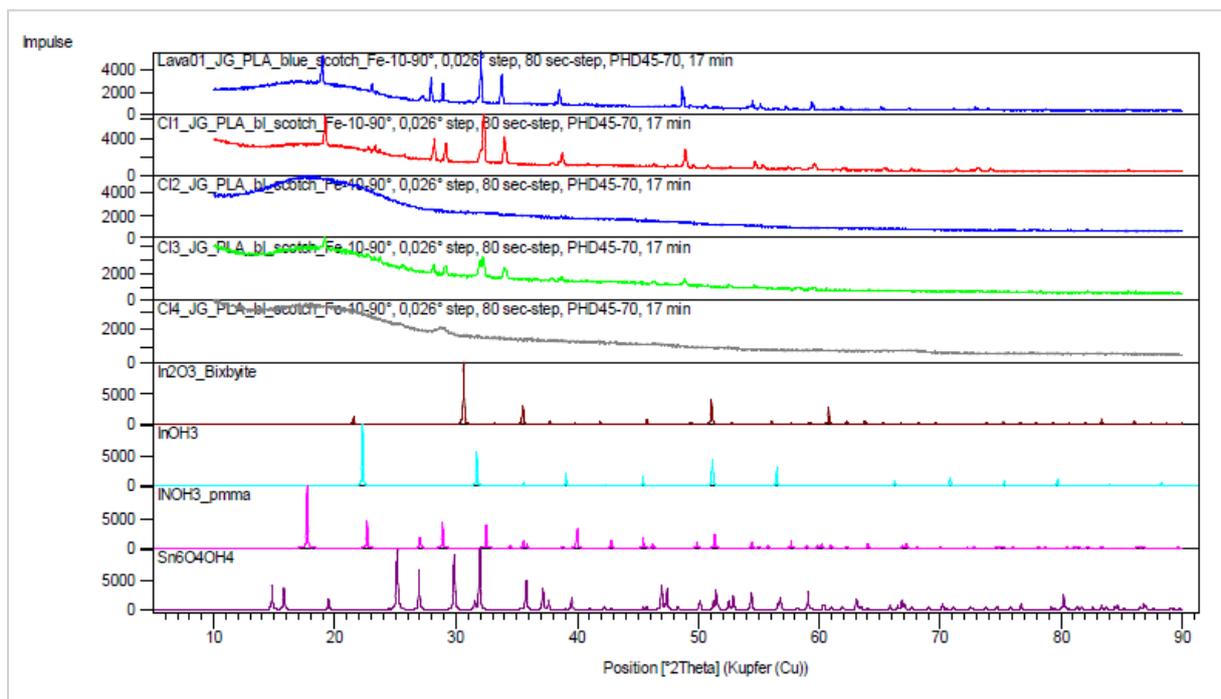
Drei weitere Displays wurden nach dem Zermahlen mit einer gröberen Mühle ebenfalls in Salzsäure erhitzt. Das Filtrat wurde mit D2EHPA extrahiert und anschließend mit Salzsäure, um so Indium selektiv abzutrennen und auf zu konzentrieren. Das Filtrat wurde eingengt. Erneut konnte ein indiumhaltiges Salz nicht nachgewiesen werden.

Weitere Ideen zur Fällung des Indiums sind die Fällung aus essigsaurer Lösung mit 8-Hydroxychinolin, die Fällung des Indiums als Oxalat [Koo 2018]⁵³ oder die Fällung mit Ammoniumhydroxid.

Nachweis von Indium

XRD-Spektroskopie

Nachfolgende XRD-Spektren wurden von Rückständen der Laugung von Displays erhalten. Leider konnte durch keines von ihnen Indiumsalze nachgewiesen werden (**Abb. 23**).



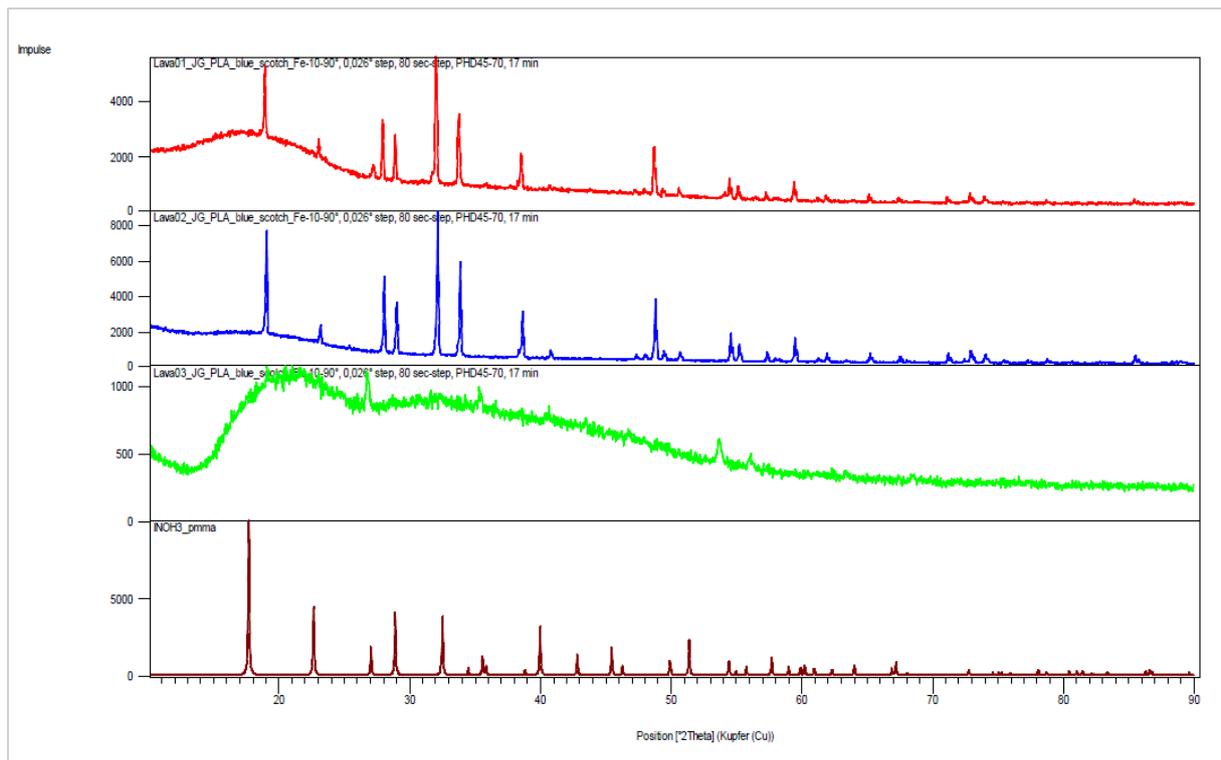


Abbildung 23: XRD-Spektren von Rückständen der Laugungsverfahren.

UV/VIS Spektroskopie:

Die in Abb. 24 links dargestellten Kurven zeigen die aufgenommenen Absorptionsspektren verschiedener Indiumsalze. Aufgenommen wurden diese an einem Zweistrahlphotometer der Firma Jasco. Die Indiumoxide und das Hydroxid wurde vor der Untersuchung durch Zugabe von 25% HNO_3 in Lösung gebracht. Alle drei Verbindungen, bzw. Chargen zeigen ein Absorptionsmaximum im UV-Bereich bei $\lambda_{\text{max}} = 249\text{nm}$. Das rechts dargestellte Spektrum ist der Literatur entnommen.⁵⁴ Da die Komponenten als Nitrate des Indium vorliegen wurden sie Spektren auch mit Indiumnitrat verglichen.

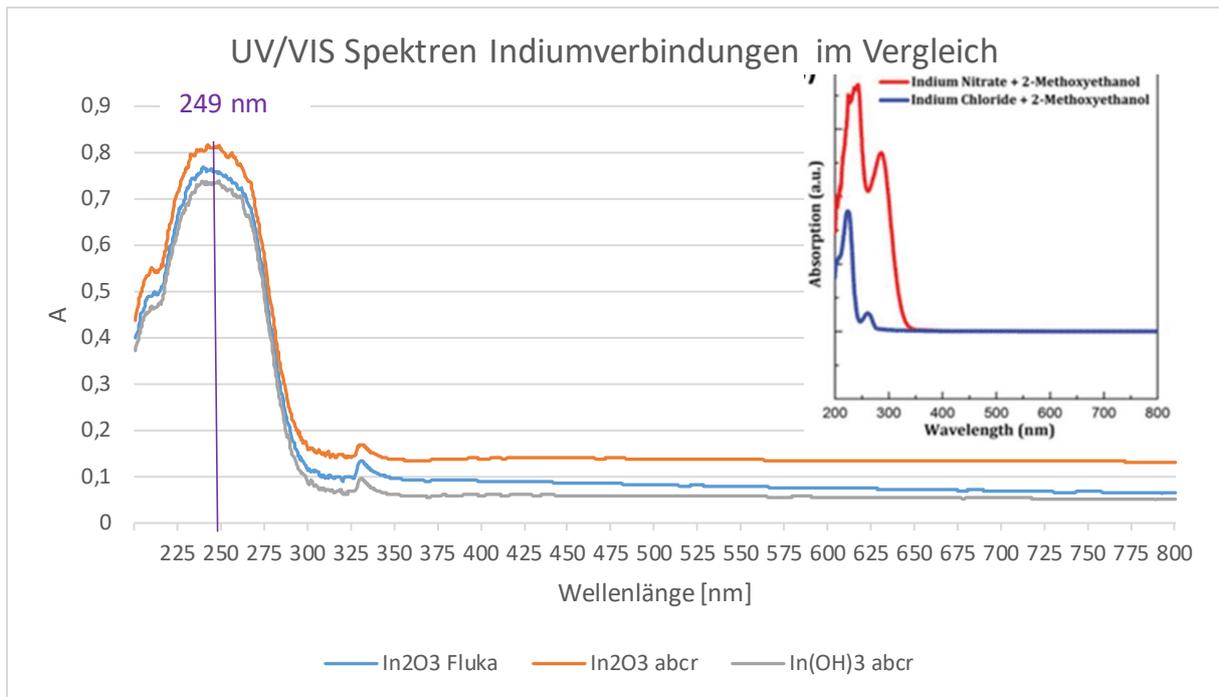


Abbildung 24: Vergleich UV/VIS Absorptionsspektrum (links) In₂O₃ (Fluka, abcr), In(OH)₃ (abcr) und Literaturspektrum (rechts) In(OH)₃ (+Methoxyethanol), Copyright 2016, American Chemical Society.

Die übereinandergelegten Kurven in dem in Abb. 25 dargestellten Spektrum sind die Ergebnisse der Leachingexperimente. Es ist erkennbar, dass Absorptionsmaxima bei gleicher Wellenlänge (249 nm) zu finden sind wie in Abb. 24⁵⁵

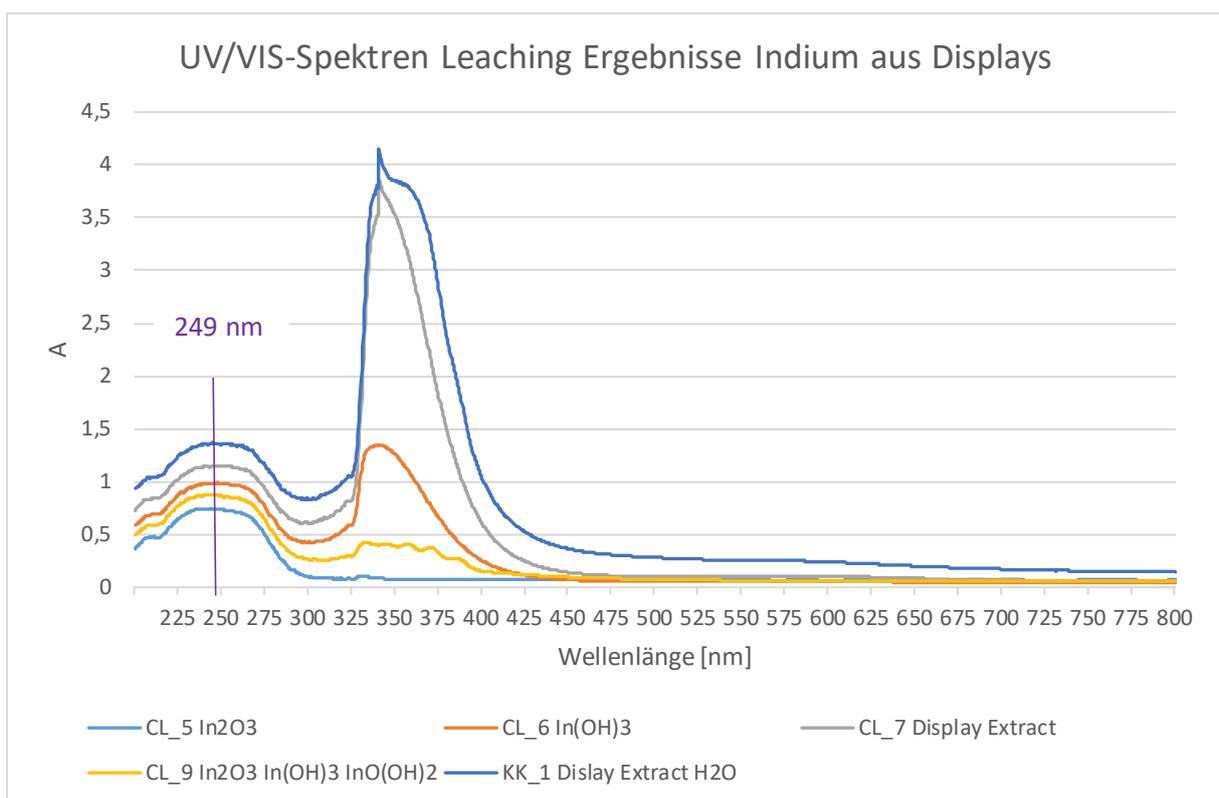


Abbildung 25: UV/VIS Absorptionsspektrenschar der Indium-Leachingergebnisse

Dieses Ergebnis liefert einen Hinweis darauf, dass es sich bei den gewonnenen Feststoffen um das Indium handeln könnte. Die XRD-Aufnahmen widersprechen diesem Ergebnis. Es ist in Betracht zu ziehen, dass die Amorphizität der Feststoffe im XRD Experiment als Störfaktor mit eingehen und uneindeutige Ergebnisse liefern kann.

Folgende Möglichkeiten, die Indiumsalzen nachzuweisen kann das Auftreten charakteristischer Spektrallinien bei 451.1 nm und 410.18 nm sein, die mithilfe eines Flammenspektrometers beobachtbar sein sollten und die zu einer typisch-blauen Flammenfärbung führen oder die Aufnahme von ^{113}In - und ^{115}In -NMR-Spektren, bzw. Massenspektren.

Die Wege werden als nächstes besprochen.

4.1.3. Recycling von Neodym aus Handy-Lautsprechern (Serious Game)

Versuchsentwicklung

Die Entwicklung des Spiels ist abgeschlossen, das Spiel öffentlich zugänglich und die Verbreitung des Spiels wird kontinuierlich vorangetrieben. Zwei Trailer wurden erstellt und das Game für einen Wettbewerb angemeldet. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Aspekte der Spielentwicklung näher beschrieben. Alle Teilbereiche wurden mehrfach überarbeitet und stetig optimiert.

Arbeitsbereiche

Die SuS wechseln im Serious Game zwischen 3 Arbeitsbereichen: Der Laborbank, dem Whiteboard und dem Abzug (**Abb. 26**). An der Laborbank werden Tätigkeiten durchgeführt, die ohne Gefahr außerhalb des Abzugs erfolgen können, wie die Demontage des Smartphones. Der Arbeitsplatz „Whiteboard“ dient der theoretischen Wissensvermittlung zum experimentellen Versuch. Hier bearbeiten die SuS Wissensblöcke und dazugehörige Fragen. Im Abzug werden Tätigkeiten durchgeführt, die besondere Schutzmaßnahmen erfordern, wie das Erhitzen von Flüssigkeiten mit dem Bunsenbrenner oder die Zugabe von ätzenden Säuren und Laugen.





Abbildung 26: Arbeitsbereiche im Spiel: Laborbank (oben), Whiteboard (Mitte) und Abzug (unten).

Spielablauf

Der Spielablauf wurde in Form eines Storyboards geplant und umfasst die einzelnen Arbeitsschritte des Spiels in logischer und anschaulicher Form. Das beinhaltet die folgenden Orte, Tätigkeiten und Informationen, die die SuS durchlaufen und erhalten:

- Flurbereich
- Betreten des Labors
- Vermittlung von Sicherheitsaspekten
- Experimentelles Arbeiten an der Laborbank und am Abzug
- Bearbeitung von Wissensblöcken zur Wissensvermittlung und Wissensfestigung

Nach der Fertigstellung einzelner Arbeitsschritte erhalten die SuS am Whiteboard reale Fotos des jeweiligen experimentellen Vorgangs, um ihren Spielfortschritt zu visualisieren.

Eingangsbereich

Im Eingangsbereich (**Abb. 27**) betreten die SuS eine virtuelle Version des Schülerlabors Nat-Lab.

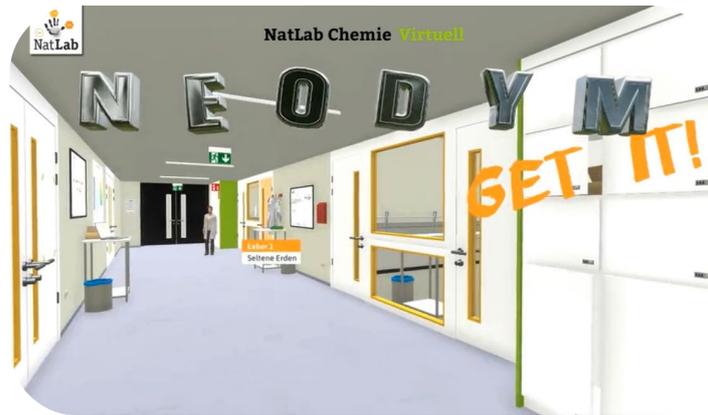


Abbildung 27: Flurbereich des Serious Games Neodym.

Sie können im Flurbereich das Labor betreten, Einstellungen zur Lautstärke und Auflösung des Spiels vornehmen und die Bestenliste des Spiels einsehen. Zusätzlich können Sie eine Übersicht aller an der Spielentwicklung beteiligten Personen auswählen oder aktuelle Informationen zum NatLab erhalten (**Abb. 28**).

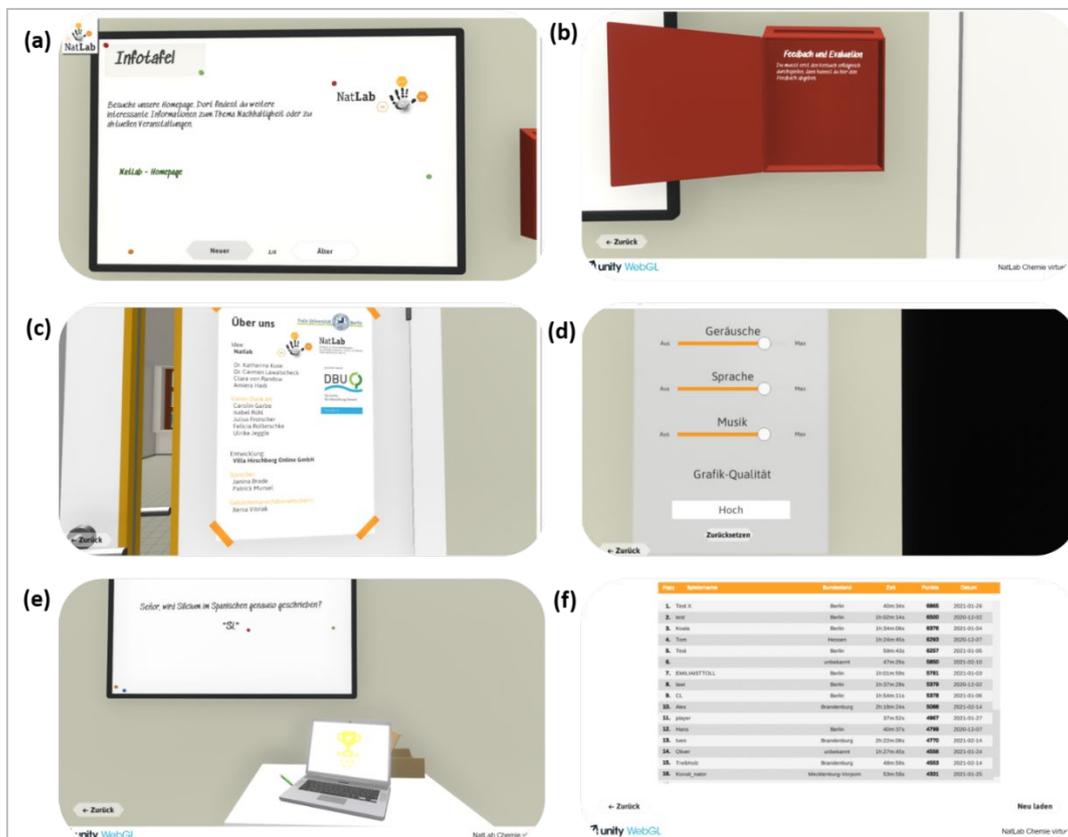


Abbildung 28: Abrufbare Informationen rund um das Serious Game Neodym.

Geschicklichkeitsspiele

Der Entwurf von Geschicklichkeitsspielen im Serious Game erfolgte, um den SuS eine möglichst realistische Vermittlung experimenteller Techniken im Chemielabor zu ermöglichen. Die

folgenden Arbeitstechniken wurden in Form von Geschicklichkeitsspielen umgesetzt (**Abb. 29**):

- Erhitzen von Gegenständen/Flüssigkeiten mit dem Bunsenbrenner
- Pipettieren bei der pH-Wert-Einstellung
- Eingießen von Flüssigkeiten
- Mörsern
- Zentrifugieren
- Filtrieren

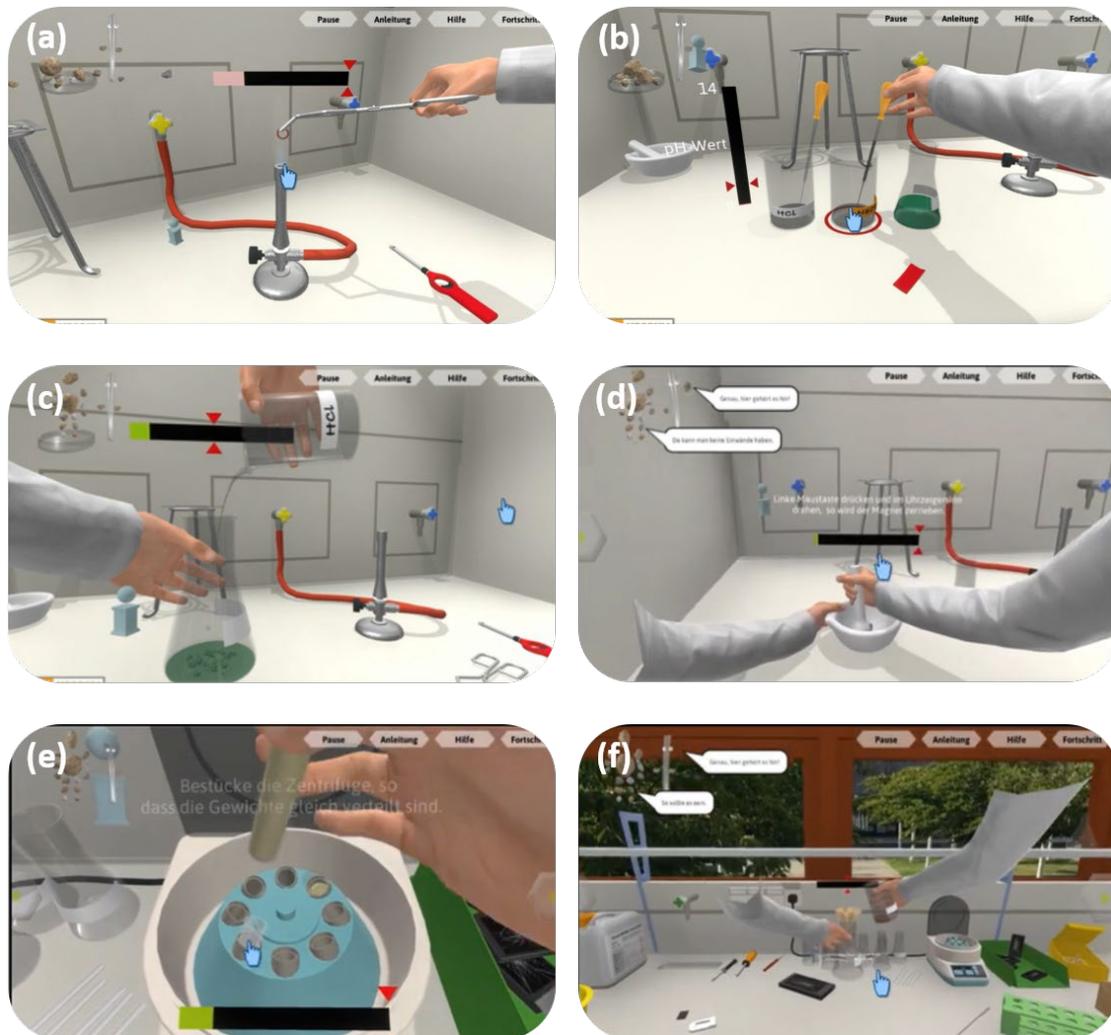


Abbildung 29: Geschicklichkeitsspiele: (a) Erhitzen mit dem Bunsenbrenner; (b) Einstellung des pH-Werts; (c) Schütten von Flüssigkeiten; (d) Mörsern; (e) Befüllen einer Zentrifuge; (f) Filtrieren.

Wissensblöcke

Es wurden insgesamt drei Wissensblöcke entworfen:

- Wissensblock 1: Kritische Metalle
- Wissensblock 2: Säuren und Basen
- Wissensblock 3: Redoxreaktionen

Die Wissensvermittlung erfolgt durch Bilder, Animationen, chemische Formeln und Erklärungen. Zusätzliches Wissen kann im Profiwissen freiwillig erlangt werden. Alle Animationen des

gesprochenen Inhalts sollen die Informationen veranschaulichen und den SuS das Verständnis erleichtern (**Abb. 30**).

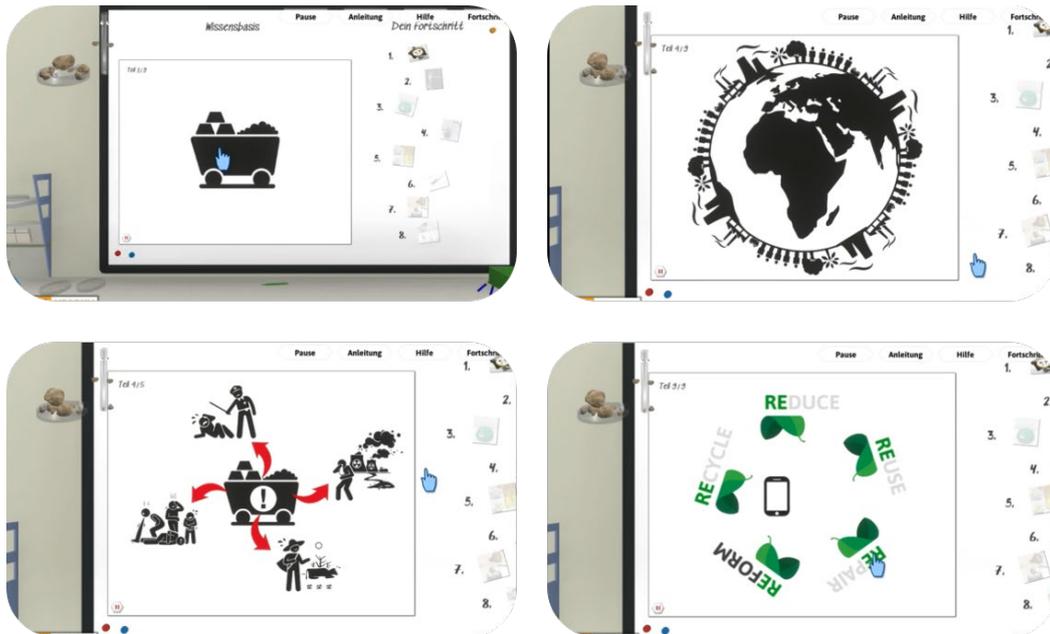


Abbildung 30: Animierte Darstellung der Inhalte der Wissensblöcke in Ergänzung zu sprachlicher und schriftlicher Vermittlung.

Nach erfolgter Wissensvermittlung schließt sich die Wissensfestigung an. Die SuS beantworten Fragen zu den zuvor vermittelten Inhalten und können hierbei zwischen zwei Schwierigkeitsgraden – Sekundarstufe 1 und 2 – wählen (**Abb. 31**).



Abbildung 31: Auswahlmöglichkeiten zwischen Sekundarstufe 1 und 2 zur Beantwortung von Fragen zu den Wissensblöcken.

Die Fragetypen sind abwechslungsreich, um das Erlernen von Sachverhalten sowohl informativ als auch interessant zu gestalten (**Abb. 32**):

- Multiple Choice
- Eintragen von Lösungen
- Lückentext
- Verbinden von Zusammengehörigem
- Schätzfragen

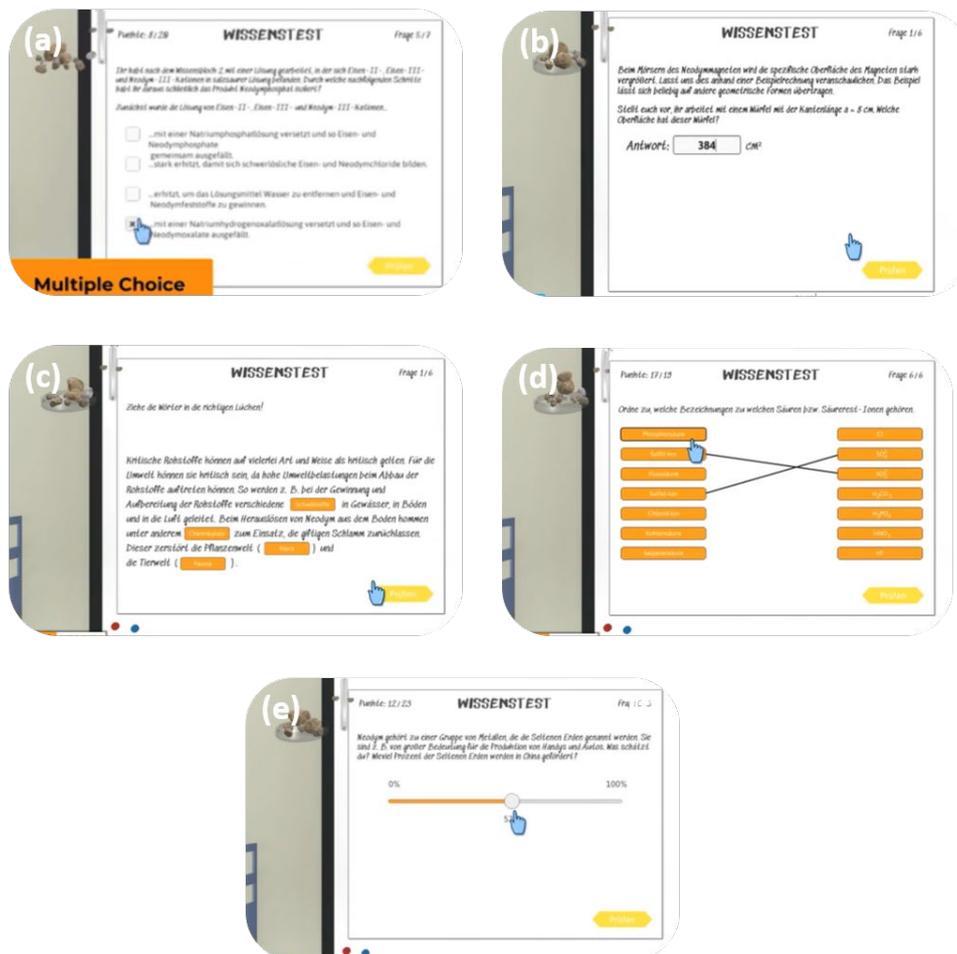


Abbildung 32: Wissenssicherung – Fragetypen: (a) Multiple Choice; (b) Eintragung der korrekten Lösungen; (c) Lückentext; (d) Verbinden von Zusammengehörigem; (e) Schätzfrage.

Fragen zum Wissensblock - Sekundarstufe 1

Frage 1, Typ: Multiple Choice: „Was bedeutet kritische Rohstoffe?“⁴

Rohstoffe können als kritisch gelten, wenn es schwierig ist, Länder mit diesen Stoffen zu versorgen. Die Schwierigkeiten treten auf, weil

- a) ...die Rohstoffe verderben können, wenn sie über weite Wege transportiert werden.
- b) ...die Rohstoffe nur in wenigen Ländern abgebaut werden.**
- c) ...es von diesen Rohstoffen nur sehr geringe Mengen auf der Welt gibt.
- d) ...die Rohstoffe schädlich für die Gesundheit sind.

Frage 2, Typ: Richtige Lösung eintragen: „In welcher Hinsicht können Rohstoffe kritisch sein?“⁴

Die richtigen Antworten sind: **Umwelt, Technik, Wirtschaft, Politik**

Frage 3, Typ: Lückentext: „Ziehe die Wörter in die richtigen Lücken!“

Kritische Rohstoffe können auf vielerlei Art und Weise als kritisch gelten. Für die Umwelt können sie kritisch sein, da hohe Umweltbelastungen beim Abbau der Rohstoffe auftreten können. So werden z. B. bei der Gewinnung und Aufbereitung der Rohstoffe verschiedene **Schadstoffe** in Gewässer, in Böden und in die Luft geleitet. Beim Herauslösen von Neodym aus dem Boden kommen unter anderem **Chemikalien** zum Einsatz, die giftigen Schlamm zurücklassen. Dieser zerstört die Pflanzenwelt (**Flora**) und die Tierwelt (**Fauna**).

Auch bei der **Verarbeitung** von kritischen Rohstoffen treten **Umweltbelastungen** auf. Die Rohstoffe müssen oft über weite Wege in verschiedene Länder transportiert werden. Beim Transport mit z. B. Schiffen, Eisenbahnen oder Lastkraftwagen werden **Kraftstoffe** verbraucht und **Kohlenstoffdioxid** ausgestoßen. Hinzu kommt, dass viel **Energie** und Wasser in den Fabriken verbraucht werden, die aus den Rohstoffen **Produkte** herstellen.

Frage 4, Typ: Zusammengehörende Dinge verbinden: „Was gehört zusammen? Verbinde je zwei kritische chemische Elemente mit der Untergruppe der Metalle und der Haupt- bzw. Nebengruppe im Periodensystem der Elemente, zu denen sie passen.“

Beispiel: Mangan (Mn) und Rhenium (Re) sind Übergangsmetalle und stehen in der Nebengruppe 7 des Periodensystems.

| | | |
|-----------------------------------|------------------|---------------|
| Arsen (As) und Antimon (Sb) | Halbmetalle | Hauptgruppe 5 |
| Chrom (Cr) und Wolfram (W) | Übergangsmetalle | Nebengruppe 6 |
| Beryllium (Be) und Magnesium (Mg) | Erdalkalimetalle | Hauptgruppe 2 |
| Vanadium (V) und Tantal (Ta) | Übergangsmetalle | Nebengruppe 5 |
| Gallium (Ga) und Indium (In) | Metalle | Hauptgruppe 3 |
| Neodym (Nd) und Samarium (Sm) | Lanthanoide | Nebengruppe 3 |
| Lithium (Li) und Cäsium (Cs) | Alkalimetalle | Hauptgruppe 1 |

Frage 5, Typ: Schätzfrage (SuS wählen die richtige Antwort mit einem Schieberegler aus):

„Neodym gehört zu einer Gruppe von Metallen, die die seltenen Erden genannt werden. Sie sind z. B. von großer Bedeutung für die Produktion von Handys und Autos. Was schätzt du? Wieviel Prozent der seltenen Erden werden in China gefördert?“⁵

70%

Fragen zum Wissensblock - Sekundarstufe 2

Frage 1, Typ: Multiple Choice: „Was bedeutet kritische Rohstoffe?“⁴

Rohstoffe werden als kritisch eingestuft, wenn Länder nur unter Risiken damit versorgt werden können, weil

...die Rohstoffe beim Transport an Qualität verlieren.

...die Produktion der Rohstoffe nur in wenigen Ländern konzentriert ist.

...es von diesen Rohstoffen nur sehr geringe Vorkommen auf der Welt gibt.

...die Rohstoffe gesundheitsschädlich sind.

Frage 2, Typ: Richtige Lösung eintragen: „In welcher Hinsicht können Rohstoffe kritisch sein?“

Die richtigen Antworten sind: Umwelt, Technik, Wirtschaft, Politik

Frage 3, Typ: Lückentext: „Ziehe die Wörter in die richtigen Lücken!“

Kritische Rohstoffe können in vielerlei Hinsicht kritisch sein. Ihre Kritikalität in Bezug auf die Umwelt zeigt sich zum einen darin, dass hohe Umweltbelastungen durch den Abbau von kritischen Rohstoffen auftreten. Bei der Gewinnung und Aufbereitung der Rohstoffe werden verschiedene Schadstoffe in Gewässer, in Böden und in die Luft geleitet. So kommen z. B. beim Herauslösen von Neodym aus dem Boden Chemikalien zum Einsatz, die giftigen Schlamm zurücklassen. Dieser zerstört Flora und Fauna und gelangt oft ins Grundwasser.

Auch bei der Verarbeitung von kritischen Rohstoffen treten Umweltbelastungen auf. Die Rohstoffe müssen oft über weite Wege in verschiedene Länder transportiert werden. Beim Transport mit z. B. Schiffen, Eisenbahnen oder Lastkraftwagen werden Kraftstoffe verbraucht und Kohlenstoffdioxid ausgestoßen. Hinzu kommt, dass viel Energie und Wasser in den Fabriken verbraucht werden, die aus den Rohstoffen Produkte herstellen.

Frage 4, Typ: Zusammengehörende Dinge verbinden: „Was gehört zusammen? Verbinde je zwei kritische chemische Elemente mit der Untergruppe der Metalle und der Haupt- bzw. Nebengruppe im Periodensystem der Elemente, zu denen sie passen.“

| | | |
|-----------|------------------|---------------|
| As und Sb | Halbmetalle | Hauptgruppe 5 |
| Cr und W | Übergangsmetalle | Nebengruppe 6 |
| Be und Mg | Erdalkalimetalle | Hauptgruppe 2 |
| V und Ta | Übergangsmetalle | Nebengruppe 5 |
| Ga und In | Metalle | Hauptgruppe 3 |
| Nd und Sm | Lanthanoide | Nebengruppe 3 |
| Li und Cs | Alkalimetalle | Hauptgruppe 1 |

Frage 5, Typ: Schätzfrage (SuS wählen die richtige Antwort mit einem Schieberegler aus):

„Wieviel Prozent des Bruttoinlandsproduktes von Deutschland erwirtschafteten die deutschen GreenTech-Unternehmen im Jahr 2016? Und auf wieviel Prozent soll diese Zahl im Jahr 2025 gestiegen sein?“⁶

2016 15%

2025 19%

Professionelle Sprecherin

Die Wissensblöcke werden von einer professionellen Sprecherin gesprochen, sodass qualitativ hochwertige Lehreinheiten entstanden sind. Der Name der Sprecherin ist Janina Brade.

Wissensblock 1: Sprechertexte

Was bedeutet kritische Rohstoffe und kritische Metalle? Rohstoffe werden von der europäischen Kommission als kritisch eingestuft, wenn die Produktion der Rohstoffe in nur wenigen Ländern konzentriert ist und deshalb hohe Versorgungsrisiken entstehen. Eines der kritischen Metalle ist das chemische Element Neodym, das ihr hier im Versuch zurückgewinnen werdet.

Neodym wird unter anderem zum Bau von Handys, Autos, Computern oder Windrädern benötigt. Problematisch ist, dass Neodym zum größten Teil in China abgebaut wird. Das bedeutet, dass fast alle Länder, die Neodym verwenden, von Lieferungen aus China abhängig sind. Wenn nun Länder aus verschiedenen Gründen wenig oder kein Neodym aus China erhalten, dann haben die Hersteller von Handys und Autos ein großes Problem.

Unser Versuch beschäftigt sich mit kritischen Metallen. Zu diesen gehören verschiedene Elemente der Alkali- und Erdalkalimetalle, der Übergangsmetalle, der Metalle und

Halbmetalle und der Lanthanoide, wie ihr hier in der Abbildung sehen könnt. Das chemische Element Neodym, das wir im Versuch zurückgewinnen, gehört zu den Lanthanoiden.

Jetzt habt ihr erfahren, was kritische Rohstoffe und kritische Metalle bedeutet, und ihr habt auch Metalle gesehen, die kritisch sein können. Nun soll es etwas spezieller werden, und zwar: In welcher Hinsicht sind kritische Rohstoffe bedenklich? Kritische Rohstoffe können auf verschiedene Art und Weise kritisch sein, für die Umwelt, für die Technik, für die Wirtschaft und für die Politik. Wir führen euch jetzt durch die verschiedenen kritischen Bereiche. Beginnen wir mit der Umwelt: Umweltbelastungen durch kritische Rohstoffe.

Das Hauptproblem für die Umwelt ist, dass die weltweite Bevölkerung ständig zunimmt. Da wir immer mehr Menschen werden, die immer mehr produzieren, benötigen wir zunehmend auch mehr Rohstoffe. Indem wir Rohstoffe gewinnen und aufbereiten, greifen wir erheblich in natürliche Lebensräume ein. Wir leiten verschiedene Schadstoffe in Gewässer, in Böden und in die Luft. So kommen z.B. beim Herauslösen von Neodym aus dem Boden Chemikalien zum Einsatz, die giftigen Schlamm zurücklassen. Dieser zerstört Flora und Fauna und gelangt oft ins Grundwasser. Weitere Probleme für die Umwelt entstehen bei der Verarbeitung von kritischen Rohstoffen zu fertigen Produkten. Zum einen werden die Rohstoffe oft über weite Wege in verschiedene Länder transportiert. Dabei werden Kohlenstoffdioxid und Abgase ausgestoßen und Kraftstoffe verbraucht. Zum anderen wird viel Energie in den Fabriken benötigt, die aus den Rohstoffen Grundstoffe und später Produkte herstellen.

Abgesehen von der Umwelt können Rohstoffe auch für die heutige Technik kritisch sein. Daher geht es jetzt um Einschränkungen der Technik durch kritische Rohstoffe. Hier gibt es vor allem Probleme, wenn Metalle Eigenschaften haben, die unbedingt für die Herstellung von neuen technischen Geräten gebraucht werden. Dazu kommt, dass immer mehr verschiedene Rohstoffe für neue technische Produkte eingesetzt werden. So kann man sich vorstellen, dass unglaubliche Mengen an Rohstoffen von Nöten sind, um diese Erfindungen herstellen zu können und dass die Produktionstechnik riesige Probleme bekommt, wenn einige Stoffe nicht geliefert werden.

Da kann man sich auch gleich vorstellen, dass Rohstoffe und Metalle auch für die Wirtschaft kritisch sein können, weil das ja eng mit der Herstellung von technischen Dingen zusammenhängt. Kommen wir also zum nächsten Thema: Wann wird ein Rohstoff als kritisch für die Wirtschaft eingestuft? Das passiert, wenn z.B. neue technische Trends entstehen. Dann ist die Nachfrage nach Rohstoffen sehr groß und die Förderung der Rohstoffe kommt nicht hinterher. Oder wenn ein Land, das führend im Abbau von Rohstoffen ist, diesen an andere Länder nur zu überhöhten Preisen verkauft, um sich selbst zu bereichern. Dann kann es auf dem Markt zu Knappheiten kommen. Das trifft dann die Wirtschaft des Landes, das den Rohstoff dringend braucht. Und natürlich führt das zu Kämpfen und Spannungen in der Politik zwischen verschiedenen Ländern. Ein Rohstoff kann nämlich auch aus Sicht der Politik kritisch sein.

Ein Rohstoff ist z.B. für die Entwicklungspolitik kritisch, wenn soziale, gesellschaftliche oder Umweltprobleme entstehen, weil der Stoff in einem Land, in dem die Industrie nicht so weit entwickelt ist, abgebaut wird. Es kommt zu verschiedenen Problemen: Zum einen kann der Abbau von kritischen Rohstoffen dazu führen, dass Ländereien den Besitzer wechseln und Zwangsumsiedlungen stattfinden. Das heißt auf Englisch „land grabbing“. Zum anderem leiden vor allem die Menschen, die in der Gegend der Rohstoffminen leben, unter sehr schwierigen Lebens- und Arbeitsbedingungen. Hierzu möchten wir euch unbedingt einladen im Profi-Wissen mehr zu erfahren. Da Rohstoffe dermaßen kritisch für die Entwicklung eines Landes sein können, ist es ganz wichtig, dass die Großunternehmen und Abnehmer von kritischen Rohstoffen auch mit Verantwortung tragen wie die Rohstoffe gefördert werden.

Und wie wir alle die aktuelle Lage verbessern können, darum soll es jetzt gehen: Wege zur Veränderung im Umgang mit kritischen Rohstoffen.

Zunächst einmal können wir verschiedene Maßnahmen in unseren Alltag übernehmen. Diese helfen dabei, dass weniger kritische Rohstoffe gefördert werden müssen. Hier gibt es 5 bekannte Grundsätze, die die 5 R's genannt werden. Warum? Weil jeder dieser Punkte im englischen mit R anfängt, wie ihr hier sehen könnt. Reduce, Reuse, Repair, Reform und Recycle. Was bedeuten diese 5 Maßnahmen nun genau?

Der 1. Punkt „Reduce“ heißt reduzieren und steht dafür, dass wir unseren Elektro-Konsum reduzieren. „Reuse“, der 2. Punkt, steht für Wiederverwenden. Du könntest z.B. dein gebrauchtes Handy weiterverkaufen oder weitergeben, bevor es sinnlos im Müll landet, obwohl es noch funktioniert. Oder eben selbst ein gebrauchtes Handy kaufen. Der 3. Punkt, „Repair“, auf Deutsch reparieren, erklärt sich fast von selbst. Wenn Du defekte Teile deines Handys austauschen oder reparieren lässt, musst Du nicht gleich ein neues Handy kaufen. „Reform“ ist der 4. Punkt der 5 R's und heißt auf Deutsch reformieren oder umwandeln. Manchmal kann man aus alten Dingen, die ihren Zweck nicht mehr erfüllen, neue machen. Zu guter Letzt der 5. Punkt – „Recycling“, steht für wiederverwenden. Recycle alles, was du nicht vermeiden oder wiederverwenden kannst. Du wirst sehen, dass schon kleine Veränderungen in deinem Alltag den Umgang mit Elektrogeräten verändern. Im Profi-Wissen findest Du noch viel mehr Ideen hierzu.

Jetzt habt ihr wahrscheinlich die passende Motivation, um mit unserem Spiel weiterzumachen, da ihr jetzt wisst, warum es eine gute Idee ist Neodym aus alten Handylautsprechern zurückzugewinnen.

Wissensblock 1: Profi-Wissen:

a) In diesem Artikel des Bundesumweltamts erfahrt ihr, wie seltene Erden in der Mine von Bayan Obo in China gefördert werden und welche Umweltbelastungen hierbei entstehen. Besonders hinweisen möchten wir euch auf ein Satellitenbild der Mine auf Seite 4 und auf die Umweltverschmutzungen durch Chemikalien und radioaktive Stoffe auf den Seiten 6-8.

b) In diesem Bericht geht um Rohstoffe zur Erzeugung von erneuerbarer Energie. Hierfür werden immer mehr verschiedene chemische Elemente benötigt, wie ihr in der Abbildung „Ages of Energy“ sehen könnt. Mit der Zunahme der technischen Entwicklung wurden immer mehr verschiedene Elemente zum Bau neuer Geräte eingesetzt. Daher sollte man nicht aus den Augen verlieren, dass auch für sogenannte saubere Energiegewinnungstechniken sehr viele Rohstoffe gefördert werden müssen. Einige von Ihnen, wie das chemische Element Neodym, gehören leider auch zu den kritischen Rohstoffen.

c) Ein Rohstoff kann aus Sicht der Außenpolitik kritisch sein. Das passiert z.B., wenn die Anbieter und Nachfrager von Rohstoffen unterschiedliche Meinungen haben, wie teuer ein Rohstoff sein sollte, also welcher Preis angemessen ist. Während Förderungsländer wie China, Brasilien oder Russland ihre Rohstoffe zu möglichst hohen Preisen verkaufen wollen, wollen die Abnehmer die Stoffe möglichst günstig einkaufen. Oft werden kritische Rohstoffe in Schwellenländern oder Entwicklungsländern abgebaut und leider können wertvolle Ressourcen dazu führen, dass es heftige Konflikte in diesen Ländern gibt. Andere Länder oder Kriminelle wollen sich an den Bodenschätzen bereichern und gerade arme Länder können sich nicht gut gegen solche Ausbeutungen zur Wehr setzen. Dieses Phänomen nennt man auch den „Ressourcenfluch“, denn eigentlich müsste es einem Land mit vielen Bodenschätzen ja finanziell und politisch gut gehen. Genaueres zum Ressourcenfluch und dessen Folgen könnt ihr in diesem Artikel nachlesen.

d) Wie ihr im Basiswissen erfahren habt, kann ein Rohstoff z.B. für die Entwicklungspolitik kritisch sein. Es kommt zu sozialen, gesellschaftlichen oder Umweltproblemen. Abgesehen vom Problem des Land grabbings leiden vor allem die Menschen, die in der Gegend der Rohstoffminen leben, unter sehr schwierigen Lebens- und Arbeitsbedingungen. Das passiert besonders oft bei der Förderung von Metallen, vor allem bei Tantal, Gold, Cobalt, Zinn und Wolfram, also im Kleinbergbau. Auch die seltenen Erdmetalle und damit auch Neodym werden unter dramatischen Bedingungen für Mensch und Umwelt gefördert. Oft treten auch Nutzungskonflikte zwischen Bergbau und Landwirtschaft auf. Hier geht es z.B. darum, wie das in der Region vorhandene Wasser genutzt werden darf. Wird zu viel Wasser bei der Förderung oder Verarbeitung von Rohstoffen genutzt, kann das zu Trinkwasserknappheit bei der Bevölkerung führen. Außenpolitisch gesehen kommt es teilweise zu richtigen Handelskriegen, wie ihr hier nachlesen könnt.

e) In diesem Artikel findet ihr nochmal ausführliche Erklärungen zu den 5 R's der Nachhaltigkeit: Und wir haben uns natürlich auch nochmal Gedanken gemacht, welche Ideen wir euch hierzu mit auf den Weg geben wollen. Zum 1. Punkt „Reduce“: Frag Dich doch mal ganz ehrlich, wie viele elektronische Geräte Du wirklich brauchst. Sind es Laptop, Handy, PC und iPad oder sind hier Einsparungen möglich? Vielleicht kannst Du auch auf das neueste Modell eines Elektrogeräts verzichten, wenn das aktuelle Gerät noch einwandfrei funktioniert. Wenn Du weniger Elektrogeräte konsumierst, verringerst Du auch gleichzeitig Deinen Elektromüll, der unter

anderem kritische Rohstoffe beinhaltet. Ein bewusstes und minimalistisches Leben ist gut für Dich und die Umwelt und natürlich für alle, die von den Problemen der kritischen Rohstoffe betroffen sind. Weniger ist mehr. Zum 2. Punkt, „Reuse“, möchten wir euch darauf hinweisen, dass es Firmen gibt, die darauf spezialisiert sind gebrauchte Geräte aufzurüsten, um diese dann weiterzuverkaufen. Um dem 3. Punkt, „Repair“, gerecht zu werden, kannst du auch schon beim Kauf deines Geräts darauf achten, ob es möglich ist, dieses zu reparieren. Es gibt z.B. einige Handys, bei denen direkt das ganze Handy entsorgt wird, wenn der Akku nicht mehr funktioniert, weil sich der Akku nicht aus dem Handy herauslösen lässt. Im Gegensatz dazu gibt es Handys, die modular gebaut sind. Das heißt hier kann ein Großteil der Teile ausgetauscht werden. Den 4. Punkt, „Reform“, also aus alten Dingen, die ihren Zweck nicht mehr erfüllen, neue machen, nennt man auch „Upcycling“. Das ist gut für die Umwelt und spornt auch noch deine Kreativität an. Und zum Thema „Recycling“ möchten wir euch noch mit auf den Weg geben, dass es wichtig ist für die Dinge, die man kauft, Verantwortung zu übernehmen. Manche der großen Elektromärkte nehmen alte Handys wieder zurück, um diese fachgerecht recyceln zu lassen.

f) Abgesehen von den 5 R's ist es auch ganz wichtig, Informationen rund um die kritischen Rohstoffe zu sammeln und diese dann weiterzugeben, z.B. an die Familie, an Freunde oder Bekannte oder in der Schule, im Beruf oder im Studium. Denn wenn wir nicht wissen, was hinter den kritischen Rohstoffen und den elektronischen Geräten steckt, die wir jeden Tag nutzen, dann können wir auch nichts ändern. Du könntest Dich z.B. darüber informieren, wo und wie die Rohstoffförderung von Produkten stattfindet oder welche Stoffwege die kritischen Rohstoffe zurücklegen, bis sie im Produkt landen.

g) Außerdem ist es auch wichtig, wie viel Wasser und Energie verbraucht wird, um Rohstoffe zu fördern und Produkte herzustellen und natürlich wie viel Kohlenstoffdioxid freigesetzt wird um Produkte von A nach B zu transportieren. Erfolgen die Arbeitsschritte unter fairen Bedingungen? Und wie werden die Endprodukte entsorgt? Gibt es Recyclingmöglichkeiten?

Das alles soll euch dazu dienen einen kleinen Anstoß zum Umdenken zu bekommen und neugierig zu werden, was hinter euren elektronischen Geräten alles steckt.

Wissensblock 2: Sprechertexte

Im Wissensblock 2 geht es um chemisches Hintergrundwissen zu den Arbeitsschritten, die ihr gerade erfolgreich absolviert habt:

- 1) Entmagnetisieren des Magneten
- 2) Mörsern des Magneten
- 3) Redoxreaktionen (Zugabe von Salzsäure zum Magneten)

Im ersten Teilschritt, dem Entmagnetisieren, habt ihr den grauen Magneten, den ihr aus dem Handy ausgebaut habt, in der Gasbrennerflamme bis zum Glühen erhitzt. Damit habt ihr den Magneten entmagnetisiert, damit die Bestandteile des Magneten beim Mörsern nicht zusammenkleben. Der Magnet besteht aus der Legierung $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, also aus überwiegend Eisen, etwas des seltenen Erdmetalls Neodym und etwas Bor. Um den Magneten zu entmagnetisieren, gibt es mehrere Möglichkeiten: Man kann den Festkörper mechanisch erschüttern, ihn in ein abklingendes Magnetfeld bringen oder ihn solange erhitzen, bis die sogenannte Curie-Temperatur überschritten ist. Ihr habt den Magneten im virtuellen Labor durch starkes Erhitzen entmagnetisiert.

Im nächsten Teilschritt habt ihr die Legierung durch Mörsern, also auf mechanischem Weg, zerkleinert. Aufgrund der damit vergrößerten spezifischen Oberfläche des Magneten wird die Reaktionsgeschwindigkeit im darauffolgenden Schritt, also bei der Reaktion des Magneten mit Salzsäure, erhöht. Die Salzsäuremoleküle können die Legierung auf diese Weise an viel mehr Flächen gleichzeitig angreifen.

Im dritten Teilschritt werden die einzelnen Bestandteile der Nd₂Fe₁₄B-Legierung durch eine chemische Reaktion aus dem Festkörper voneinander getrennt. Bor liegt anschließend weiterhin als fester Bestandteil vor, wohingegen das Neodym und Eisen in den gelösten Zustand übergehen. Das geschieht unter der Abgabe von Elektronen (Oxidation) der Neodym- und Eisenatome, sowie unter der Aufnahme von Elektronen (Reduktion) durch die Protonen der Salzsäure. Gemeinsam bilden die beiden Teilreaktionen Oxidation und Reduktion eine sogenannte Redoxreaktion. Es ergeben sich folgende Reaktionsgleichungen:

Bei der ersten Oxidation geben die zwei Neodym-Atome insgesamt sechs Elektronen ab. Die 14 Eisenatome geben in der zweiten Oxidation 28 Elektronen ab, womit insgesamt eine Abgabe von 34 Elektronen erfolgt. Damit eine solche Oxidation der vorliegenden Metalle nicht ungewollt passiert, sind die Neodymmagneten mit einer Schutzschicht ummantelt, die unter anderem aus Nickel und Zink besteht. Diese nur wenige Micrometer dünne Schutzschicht wird ebenfalls von der Salzsäure oxidiert und somit aufgelöst.

Bei der Reduktion nehmen zwei Protonen jeweils zwei Elektronen auf und bilden dabei ein Molekül Wasserstoff. Damit die gleiche Anzahl an Elektronen abgegeben und aufgenommen wird, muss die Reduktionsgleichung zum Ausgleich der Elektronenbilanz mit 17 multipliziert werden. In der Gesamtgleichung reagieren dann 34 Protonen, zwei Neodymatome und 14 Eisenatome zu 17 Molekülen Wasserstoff, zwei gelösten Neodym-Kationen und 14 gelösten Eisen-Kationen. Die Chlorid-Anionen der Salzsäure und die Boratome nehmen an der Redoxreaktion nicht teil, das heißt, sie geben weder Elektronen ab, noch nehmen sie Elektronen auf.

In der Lösung befinden sich nun Eisen- und Neodym-Kationen. Das Eisenion befindet sich zunächst in der Oxidationsstufe +II und liegt in der wässrigen Lösung als Eisen-(II)-Chlorid-Tetrahydrat vor, das die grüne Färbung der Lösung hervorruft. An der Luft verfärbt sich die Lösung gelb. Das liegt daran, dass der Luftsauerstoff das Eisenkation von der Oxidationsstufe +II zur Stufe +III unter Bildung des gelben Eisen-(III)-Chlorid-Hexahydrats oxidiert. Neodymchlorid liegt im Wässrigen als Neodym-(III)-Chlorid-Hexahydrat vor und ist rosafarben. Die Färbung der Gesamtlösung wird aber vorrangig durch die Färbungen der Eisenverbindungen bestimmt.

Wissensblock 3: Sprechertexte

Im Wissensblock 3 geht es um chemisches Hintergrundwissen zu den Arbeitsschritten, die ihr gerade erfolgreich absolviert habt:

- 1) Einstellen eines pH-Werts*
- 2) Fällungsreaktionen: Gewinnung von Metalloxalaten*
- 3) Kalzinieren: Gewinnung von Metalloxiden*
- 4) Säure-Base-Reaktion: Auflösung von Neodymoxid durch Salzsäure*
- 5) Fällungsreaktionen: Gewinnung vom Produkt Neodymphosphat*

Nach dem Wissensblock 2 habt ihr mit einer Lösung gearbeitet, in der sich Eisen-(II)-, Eisen-(III)- und Neodym-(III)-Kationen in salzsaurer Lösung befanden. Der pH-Wert der Lösung betrug 0, was dem pH-Wert einer 25%igen Salzsäurelösung entspricht. Um mit dem Versuch

fortfahren zu können, muss der pH-Wert der Lösung durch Zugabe einer 20%igen Natronlauge auf 2,2 eingestellt werden.

Die dazugehörige Gleichgewichtsreaktion seht ihr hier: n Salzsäuremoleküle und x Natriumhydroxidmoleküle reagieren zu x Natriumchloridmolekülen, $n-x$ Wassermolekülen und $n-x$ Salzsäuremolekülen. Um den gewünschten pH-Wert zu erreichen, muss der pH-Wert der Lösung stetig überprüft werden. Ist er höher als 2,2, wurde zu viel Natronlauge hinzugegeben. In diesem Fall erfolgt die Zugabe von etwas Salzsäure, um die überschüssigen Hydroxidionen wieder zu neutralisieren.

Im Teilschritt 2 wird eine Natriumhydrogenoxalatlösung zur Fällung von Eisen- und Neodymoxalat eingesetzt. Oxalate sind zweifach negativ geladene Anionen mit der Summenformel $C_2O_4^{2-}$, ebenso wie z.B. ein Carbonat-Ion ein zweifach negativ geladenes Anion ist. In der Abbildung seht ihr die Struktur des Oxalat-Dianions sowie die Bruchstellen, an denen die Verbindung in der Hitze gespalten wird:

Die Oxalat-Anionen müssen für einen optimalen Ablauf der Reaktion dissoziiert vorliegen, was bei einem pH-Wert von 2,2 der Fall ist. Höher als 2,2 darf der pH-Wert nicht sein, da nur bei diesem pH-Wert sowohl das gewünschte Neodymoxalat als auch die Eisenoxalate ohne Nebenprodukte gewonnen werden können. Bei einem höheren pH-Wert würde sich auch Eisenhydroxid bilden, das den weiteren Versuchsablauf stören würde.

Die Eisen-(II)-, Eisen-(III)- und Neodym-(III)-Kationen, die sich in der Lösung befinden, werden nun durch Zugabe der Natriumhydrogenoxalatlösung als beigefarbene Feststoffe, als Oxalate, ausgefällt. Das funktioniert deshalb, weil die Löslichkeitsprodukte der Metalloxalate bei dem vorliegenden pH-Wert klein und die Salze somit wenig oder schwerlöslich sind. So wird aus dem Nd-(III)-Kation das schwerlösliche Neodym-(III)-oxalat, aus den Eisen-(II)- und Eisen-(III)-Kationen schwerlösliche Eisenoxalate. Bei einem pH-Wert von 2,2 liegt das Gleichgewicht der Reaktionen auf der rechten Seite (auf der Seite der Produkte), bei einem pH-Wert von 0 würde sich das Gleichgewicht auf der linken Seite (auf der Seite der Edukte) befinden.

Der dritte Teilschritt ist das sogenannte Kalzinieren. Dafür habt ihr die Metalloxalate auf der Magnesiumrinne in die Gasbrennerflamme gehalten und erhitzt. Durch das Verbrennen der Metalloxalate werden Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid ausgetrieben, wodurch die Metalloxalate in Metalloxide überführt werden, wie ihr hier sehen könnt. Durch thermische Zersetzung und Disproportionierung bilden sich aus Neodym-(III)-, Eisen-(II)- und Eisen-(III)-oxalat das hellblaue Neodym-(III)-oxid sowie die rostfarbenen Eisen-(II)- und Eisen-(III)-oxide.

Gibt man nun im vierten Teilschritt Salzsäure zu der Mischung der Oxide, so löst sich lediglich das Neodymoxid. Die Eisenoxide verbleiben im festen Zustand und können durch Filtration von der neodymhaltigen Lösung abgetrennt werden. Neodymoxid reagiert mit sechs Molekülen Salzsäure zu zwei Molekülen wasserlöslichem Neodymchlorid und zu drei Molekülen Wasser.

Im fünften und letzten Teilschritt habt ihr eine Natriumdihydrogenphosphatlösung zum gelösten Neodymchlorid gegeben. Es bildete sich ein rosafarbener Niederschlag. Der Niederschlag ist das gewünschte Produkt: Neodymphosphat. Ihr habt diese Verbindung abzentrifugiert und zum Schluss in der Gasbrennerflamme getrocknet.

Das Neodymphosphat kann jetzt wieder für die Produktion neuer Neodymmagnete eingesetzt werden. Das habt ihr geschafft! - ganz ohne Förderung eines neuen Primärrohstoffs in China oder anderen Ländern mit Neodym-Vorkommen. Fernab von den Rohstoffminen habt ihr hier vor Ort in Deutschland den Sekundärrohstoff Neodymphosphat aus unserer Labor-Recyclinganlage gewonnen.

Bedenkt aber, dass auch ein Rückgewinnungsverfahren mit Einflüssen auf die Umwelt einhergeht. Im Laufe des Versuchs habt ihr zahlreiche Chemikalien eingesetzt, Lösungsmittelabfälle produziert und Energie verbraucht. Auch die verwendeten Glasgeräte müssen gespült werden. Daher ist es wichtig, ressourcenschonend bei der Gewinnung von Sekundärrohstoffen vorzugehen.

Gebärdendolmetscherin – deutsche Gebärdensprache

Die bereits im Antrag vorgesehene Gebärdensprecherin könnte gewonnen werden. Mit Xenia Vitriak können die SuS damit im Spiel eine Gebärdendolmetscherin hinzuschalten. Diese erscheint an der unteren rechten Seite des Whiteboardbereichs innerhalb des Spiels (**Abb. 33**).

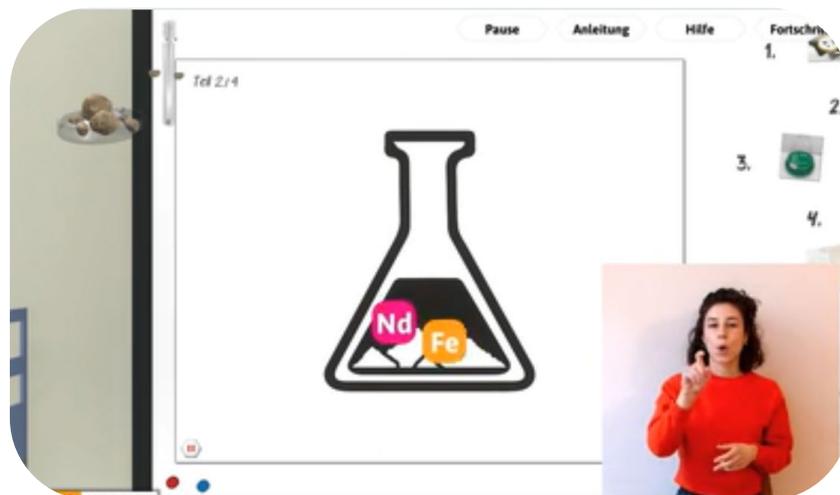


Abbildung 33: Im Serious Game kann eine Gebärdendolmetscherin eingeschaltet werden.

Bei der Entwicklung der Gebärdenvideos mussten zahlreiche Begriffe, hier als „Vokabeln“ benannt, übersetzt werden, da für diese Wörter bisher keine Darstellungen in Gebärdensprache existierten (**Abb. 34**):

| Vokabeln | |
|-------------------------------|--|
| (chem.) Elemente | wie werden Formeln angezeigt? (Bsp.: C2 O4 2-) |
| Neodym | Niederschlag |
| Tantal | spalten (Bsp. Hitze) |
| Kobalt | dissoziiert |
| Zinn | (Stoffe werden) ausgefällt |
| Wolfram | kalzinieren |
| Kohlenstoffdioxid | etw. austreiben |
| Alkali/Erdalkali | etw. wird überführt |
| Übergangsmetalle | thermische Zersetzung |
| Lanthanoide | (ab)zentrifugiert |
| Phosphat | entmagnetisieren |
| Fällungsreaktionen | Redoxreaktionen |
| Oxalat | Legierung |
| (Säure)-Base | Bor |
| Neodymoxid | (Festkörper) erschüttern |
| Kationen | abklingendes (Magnetfeld) |
| Natronlauge | Elektronenbilanz |
| Natriumhydroxid | Nickel |
| Moleküle | Zink |
| Chlorid | Protonen |
| Hydroxidionen | Tetrahydrat, Hexahydrat |
| Natriumhydrogenoxalat | Natriumhydrogenoxalatlösung |
| Natriumhydrogenphosphatlösung | Anionen |
| Dianionen | Carbonat-Ion |
| Zweifach geladenes Anion | Edukt |
| Magnesiumion | Disproportionierung |

Abbildung 34: Für die Entwicklung der Gebärdenvideos im Serious Game war die Übersetzung zahlreicher chemischer Begriffe in Gebärdensprache notwendig.

Verbreitung des Serious Games

Zur Bekanntmachung und Verbreitung des neu entwickelten Serious Games „Neodym“ wurden zwei Trailer (kurze Videoclips, die einige Passagen des originalen Werks enthalten) entwickelt, die die wichtigsten Inhalte des Spiels zusammenfassen:

Trailer 1: vimeo.com/506254142

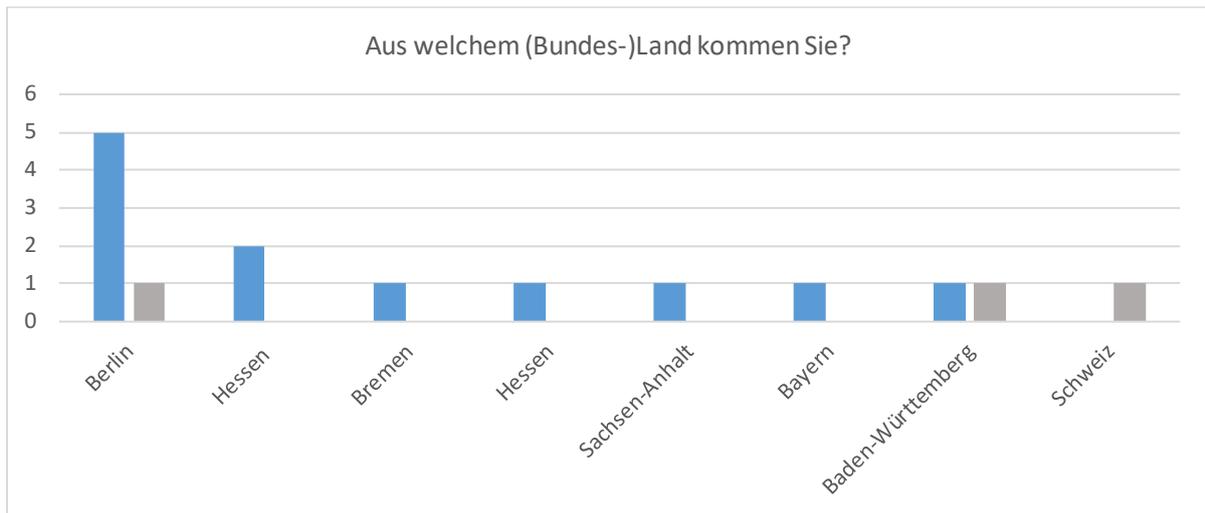
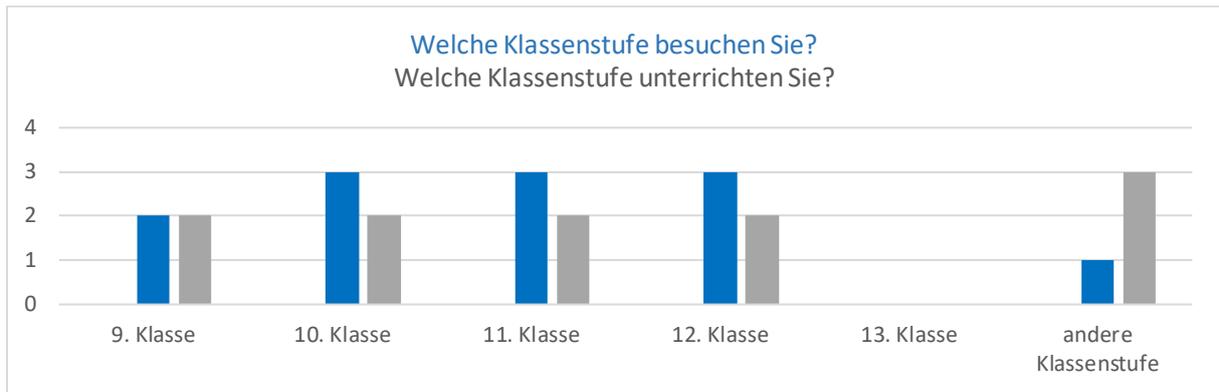
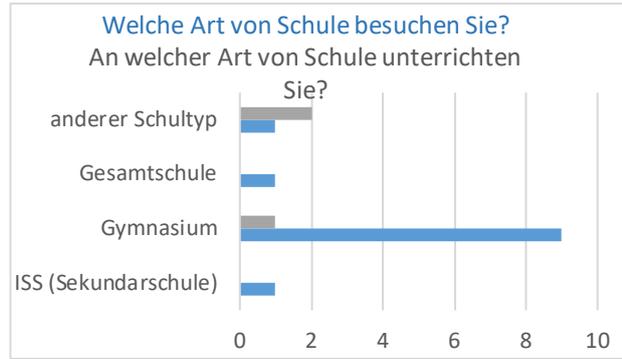
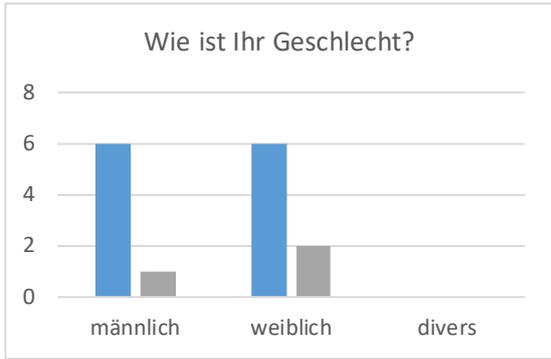
Trailer 2: vimeo.com/512902722

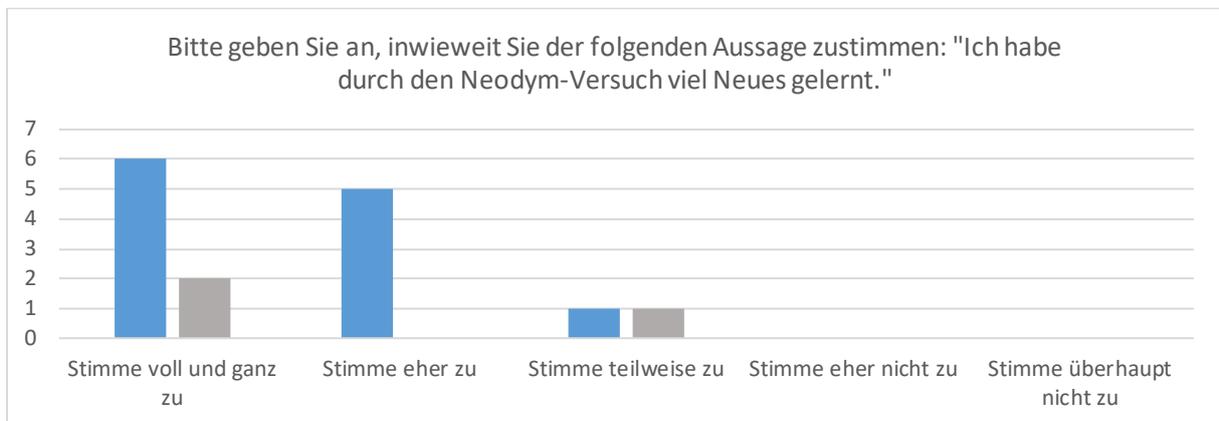
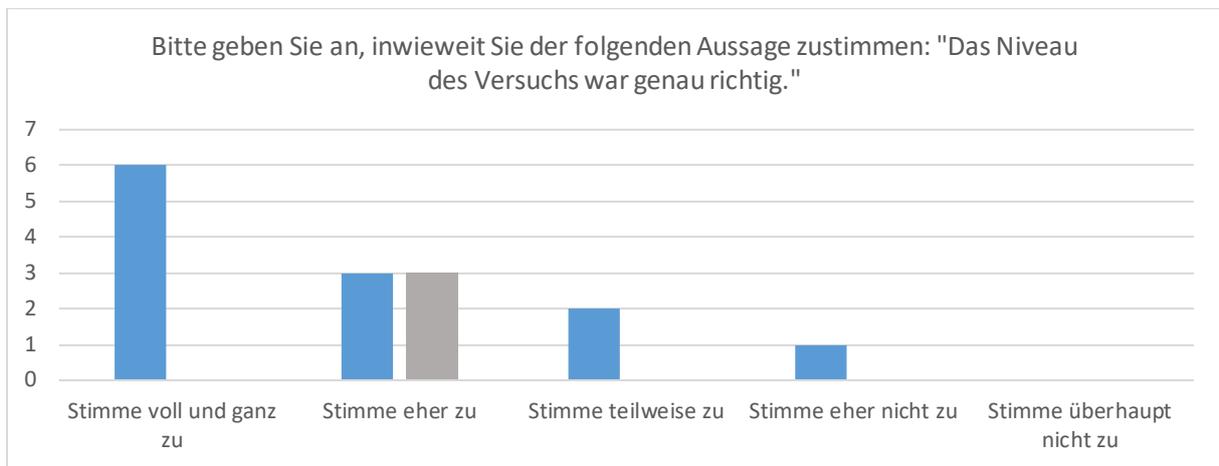
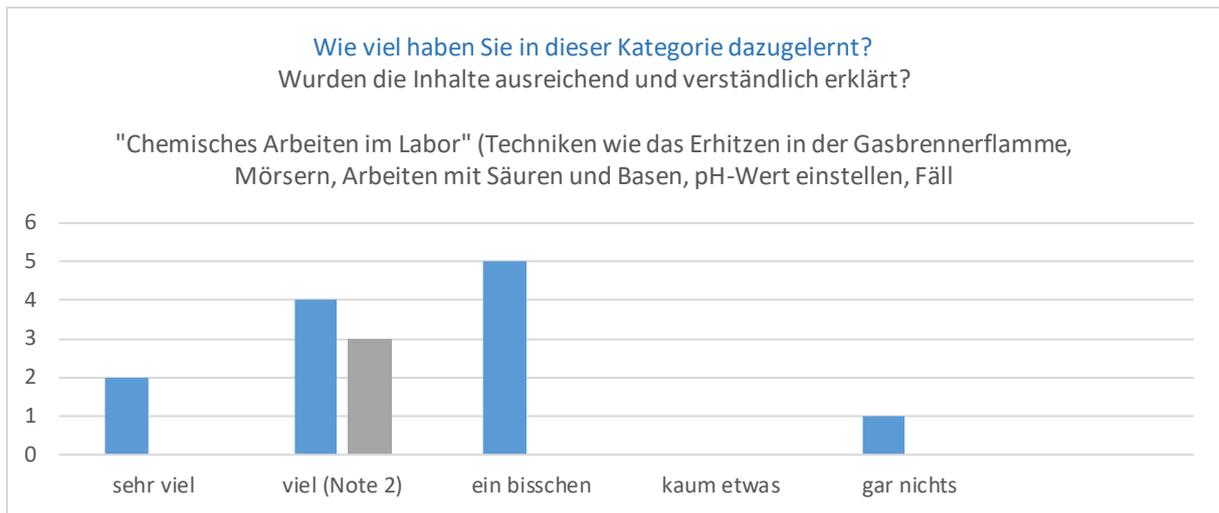
Das Spiel selbst kann unter der folgenden Adresse aufgerufen und in jedem Browser gespielt werden:

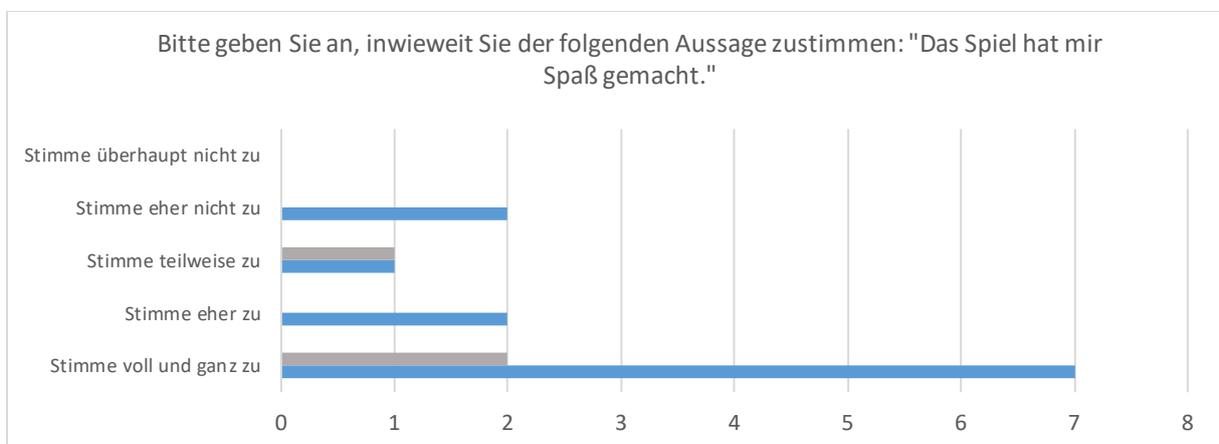
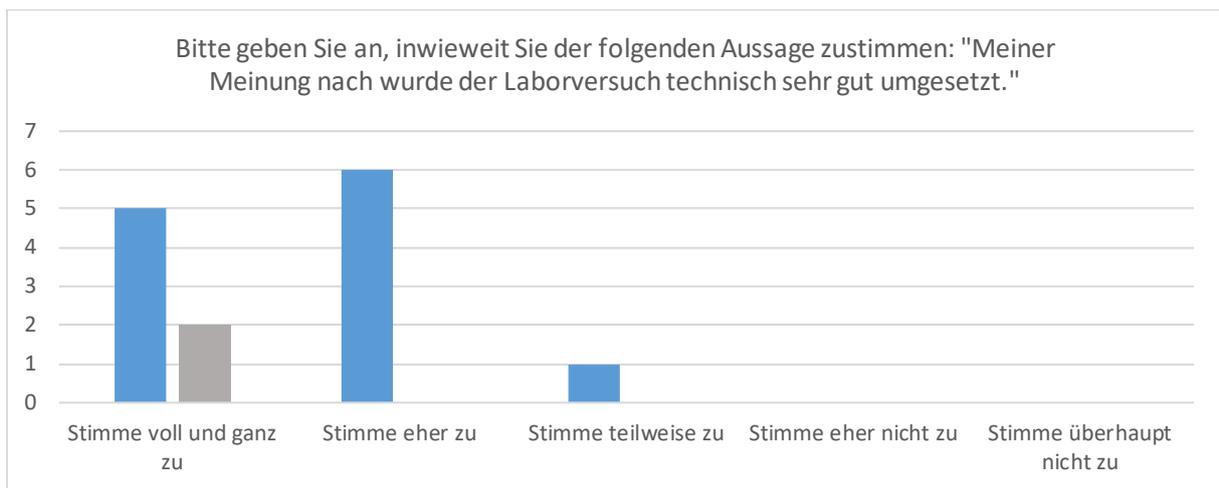
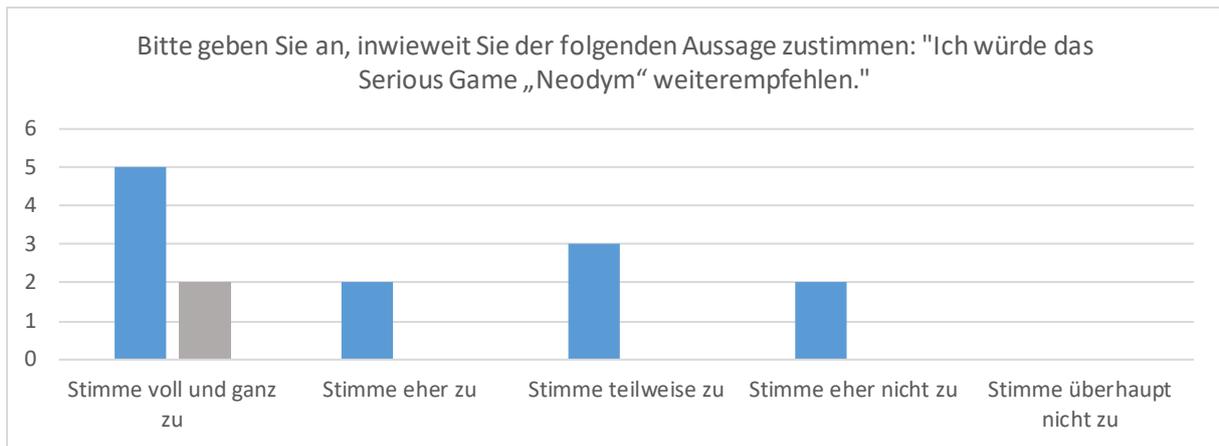
https://www.bcp.fu-berlin.de/natlab/e-learning/serious_game_neodym/index.html

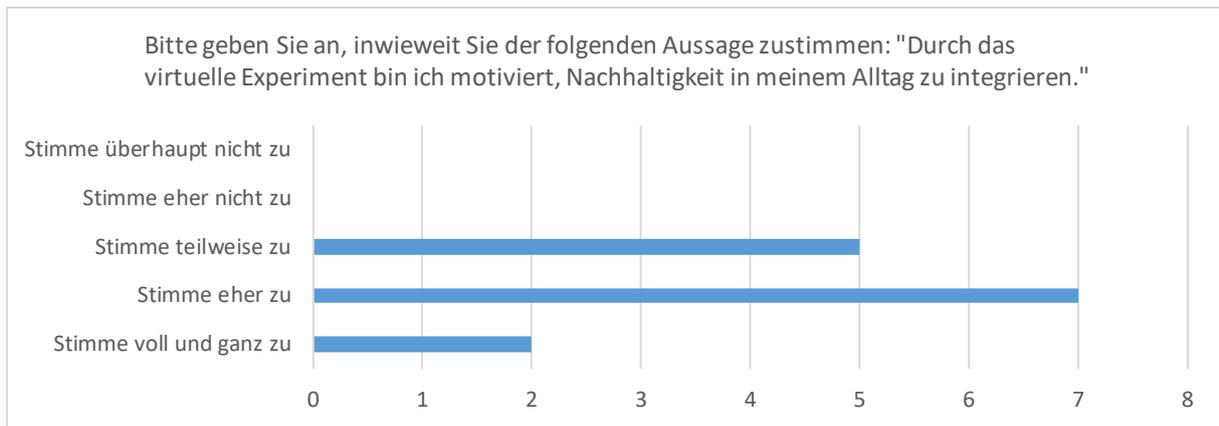
Evaluation des Versuchs

Schüler:innen (n=12) blaue Balken (q:36); Lehrer:innen (n=3), graue Balken (q:34)
Abb. 35

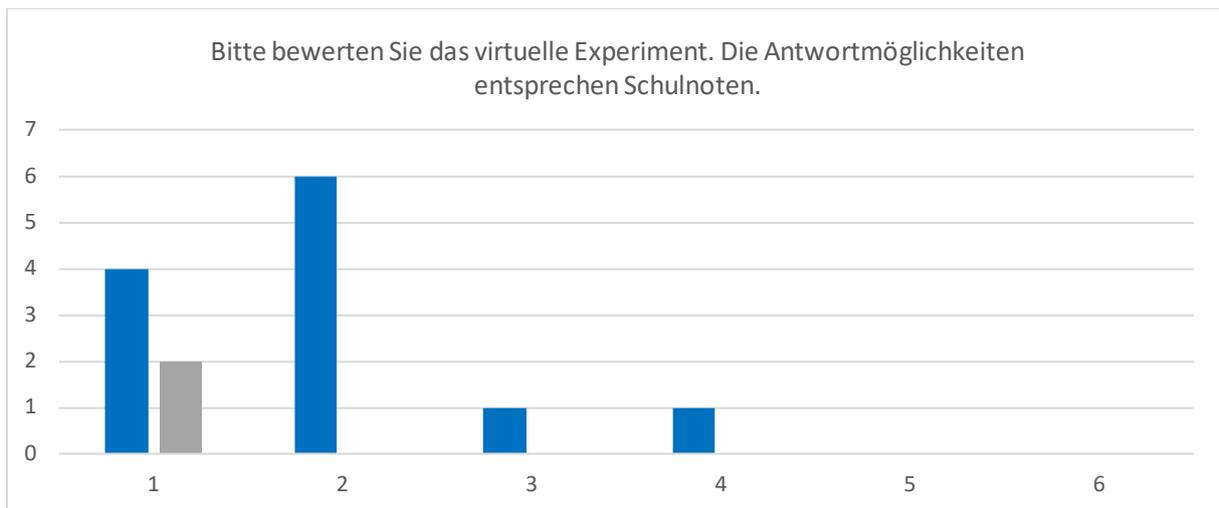








Anm.: versehentlich enthielten die Fragebögen der Lehrkräfte nicht diese Frage („Durch das Experiment bin ich motiviert, Nachhaltigkeit in meinen Alltag integrieren“).



Abbildungen 35: Einzelne Auszüge der Antworten auf Evaluationsfragen (SuS blau, LuL grau).

Tab. 2. Evaluation Serious Game Freitextfragen SuS (n=12, blau) und LuL (n=3, grau)

| |
|--|
| <p>Bitte beschreiben Sie, was Ihnen an dem virtuellen Laborversuch besonders gut gefallen hat.</p> |
| <ul style="list-style-type: none"> • Mir hat die relative Realitätsnähe sehr gut gefallen. Es war wie ein kleiner Flashback ins Labor an der FU während meines Chemiestudiums. Toll fand ich die unterschiedlichen Arbeitsschritte und die theoretischen Erklärungen dazu. • Dass man sich wie in einem Labor fühlen konnte, ohne da zu sein. Das gibt vielen Menschen die Möglichkeit etwas (virtuell) auszuprobieren, das sie vielleicht sonst nie könnten. |
| <ul style="list-style-type: none"> • Die theoretischen Erklärungen • Die realistische Darstellung • Die Hintergrundinformationen bezüglich seltener Erden bzw. kritischen Rohstoffen • Sehr dicht an der Realität (verwendete Chemikalien, Reaktionen, Labor, Erklärungen) • - wie detailliert und grafisch genau das Spiel ist - Wissensblöcke informieren sehr gut, vor allem die Video Form gefällt mir sehr gut <ul style="list-style-type: none"> - Anleitung und Hilfe über Microsoft Teams sehr hilfreich und vieles mehr • Lernen neuer Inhalte und Hintergründe, Auffrischung bekannte digitales Laborerlebnis Design • Dadurch, dass es so detailgetreu dargestellt ist, hatte man das Gefühl dort zu sein und diesen Versuch durchzuführen. Gut war auch der Theorieteil, weil man so viel über die Hintergründe des Experiments erfahren konnte. • Die Idee und das Spiel haben mir sehr gefallen. • Mir haben besonders die Extrapunkte für das schnelle Ausschalten des Gashahns für ein bewussteres Handhaben am Arbeitsplatz gefallen, und dass bei den Versuchen primär an die Umweltbelastung gedacht wurde. • Man konnte einen Versuch den man normalerweise im Labor hätte durchführen müssen, einfach und ohne großen Aufwand am PC spielen. • Das Desing von dem Labor |
| <p>Bitte beschreiben Sie, wie das Spiel Ihrer Meinung nach noch verbessert werden könnte.</p> |
| <ul style="list-style-type: none"> • Im Interesse der Laborsicherheit für Schüler:innen wäre es gerade bei der Bedienung des Brenners sinnvoll auch hier die kleineren Arbeitsschritte mit einzubauen (z.B. beim Ausschalten des Brenners erst die Sauerstoffzufuhr zudrehen, dann die Gaszufuhr und dann das Ventil am Labortisch). Zumindest einmal wäre das sinnvoll. In den Folgeschritten kann das ja dann automatisiert werden. Ansonsten wäre bei den Brennerversuchen eine andere Perspektive sinnvoll, da nicht so richtig gut zu erkennen ist, ob ich ich mit der Probe in der Brennerflamme befinde (das Geräusch kann leicht überhört werden :)). • Mich hat gestört, dass es (bei mir) nicht möglich war eine Pause zu machen und dass man wenn man Hauptmenü drückt immer gleich wieder von vorne beginnen muss. Es wäre auch schön, wenn man nach einem geschafften Teil dort wieder einsteigen könnte (so hab ich den Anfang 3-4 mal machen müssen, weil ich nicht eine ganze Stunde Zeit dafür hatte). Sonst prima! |

- Die Kommentare der Avatare sind demotivierend und zu flapsig. Wenn ich ständig zu hören bekomme "Schläfst du schon?" oder "Mir ist langweilig." fühle ich mich unnötigerweise gehetzt. Außerdem mag ich Hintergrundmusik grundsätzlich nicht und stelle sie aus, wenn das möglich ist. Das könnte man hier vielleicht auch noch programmieren. ;-)

- Die Punkteverteilung und das Minispiel mit dem Bunsenbrenner
- Bessere Anleitung
- die Toleranz bei der Eingabe der Spieler vergrößern
eine Möglichkeit, um bei den Wandzetteln vor/zurück zu spulen (in kleinen Schritten, ähnlich wie bei Youtube)
- Ich habe es geschafft einen Schritt falsch zu machen (einen Schritt übersprungen) und dadurch meinen Erlenmeyerkolben mit dem Gemisch zu verlieren. Ich habe dann einfach an der Stelle weitergemacht und wurde alle zwei Sekunden von den kleinen Figuren genervt. Ich hätte die sehr gerne abgestellt.
- - Nach dem Start ist nicht sofort klar, in welche Tür man soll
- mehr Toleranz beim Ablegen der Gegenstände/ Instrumente
- Anleitung schritt für schritt
- mehr Hilfe durch die beiden Avatare
aber alles nur Kleinigkeiten, im Großen und Ganzen ein super interessantes Game
- Zurückspulen bei Videos
Material zum Download? Übersicht von Zentralen Punkten, die man sich merken sollte
Platz der Geräte etwas genauer kenntlich machen
- Die Avatare könnten noch etwas freundlicher dargestellt werden.
- Das Spiel läuft im Großen und Ganzen nicht sehr flüssig, wodurch sich die Maus im Spiel ein wenig hinterher bewegt, weshalb man vor allem in den Geschicklichkeitsspielen beeinträchtigt wurde.
- Oftmals wurde mir die Aufgabe die ich hatte nicht perfekt geschildert, weshalb ich manchmal lange an einer Aufgabe hing. Vorallem als ich die Chemikalien in mein eigenes Gemisch kippen sollte, war die eigentliche Aufgabe die Chemikalie in ein anderes becherglas zu kippen.
- Es wäre Hilfreich wenn man etwas Erklärt bekommt von den Avataren.

4.2. Interaktiver Rohstoffatlas

Entwicklung des interaktiven Rohstoffatlas

Erstellt wurde die interaktive online Rohstoffkarte zu den beiden Akku-Metallen Lithium und Cobalt. Auf einer zweidimensionalen Weltkarte wurden grundlegende Funktionen mit der Software „Unity 3D“ und Unterstützung der studentischen Hilfskraft Jonas Albrecht entwickelt.

Zunächst wurden Objekte entworfen, die mit dem Abbau und Transport der Rohstoffe verbunden sind, z.B. Bagger und Fabriken. Der Entwurf der Objekte erfolgte mit der freien/open source Software „Blender 3D“. Wie in **Abb. 36** zu sehen, werden z.B. Bagger, Minen und Fabriken in China und USA/Canada als 3D Objekte dargestellt. Bagger markieren dabei die Abbaustelle eines Rohstoffs. Durch Anklicken eines Punktes auf der Weltkarte werden in Kürze auch die Realweltkoordinaten (Längen- und Breitengrad) des Ortes angezeigt werden können.

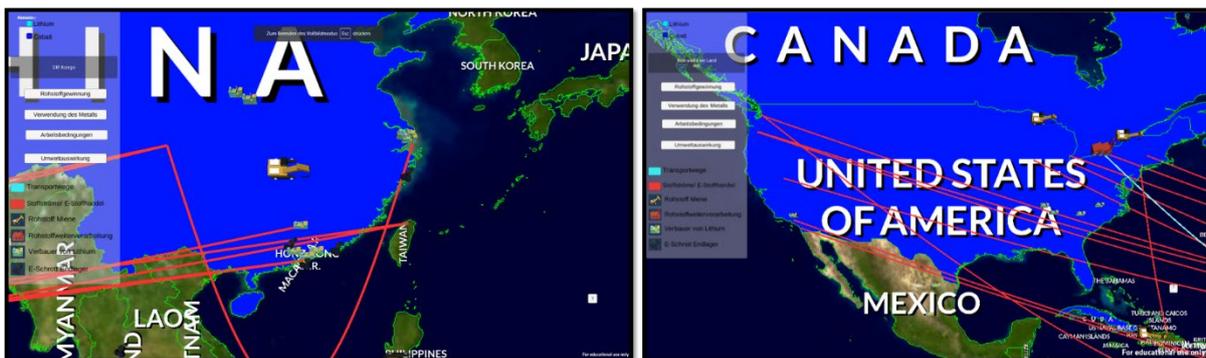


Abbildung 36: Interaktive Karte mit Objekten Bagger und Fabriken.

Die Transportwege und die Stoffströme (Pfade) der beiden Elemente werden dynamisch dargestellt, ausgehend von Mine und Fabrik bilden sich die Pfade über Kontinente und Meere hinweg. Beispielhaft fährt ein Cargoschiff zwischen Hong Kong und dem Hamburger Hafen hin und her. Die Länder, die für die Gewinnung und –verarbeitung des jeweiligen Metalls eine Rolle spielen sind entsprechend eingefärbt. Für Lithium türkis, für Cobalt blau.

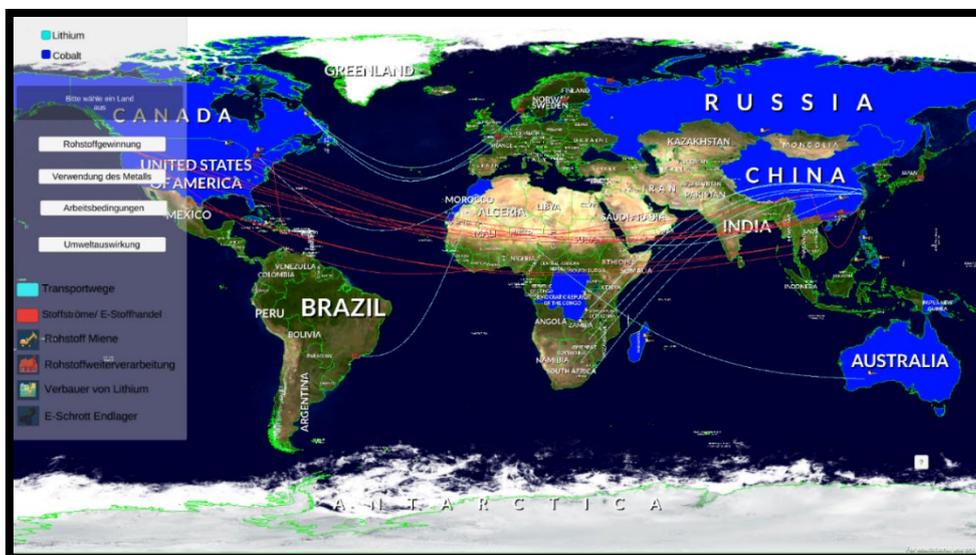


Abbildung 37: Transportwege (hellblau) und Stoffströme (rot)

Der Pfad wird vorher durch leere Spielobjekte festgelegt. An dem Objekt für den Pfad wird dann ein C#-Script angelegt, wobei jeweils ein Ausschnitt vom Meer (für Schiffe) und ein Ausschnitt vom Land (für Züge), die mit Blender erstellt wurden, existiert. Die Wegfindung arbeitet mit dem eigenen Navigationsmodul von Unity-3D und findet den kürzesten Weg auf der markierten / ausgeschnittenen Oberfläche (Abb. 37). Auf diese Weise kann das Cargoschiff zwischen den einzelnen Wegpunkten hin- und herfahren. Form und Farbe können beliebig geändert werden. Durch Anklicken der eingefärbten Länder und nach Klick auf den jeweiligen Button erscheint ein Popup-Fenster, das mit Informationen rund um die Rohstoffe enthält (Abb. 38).

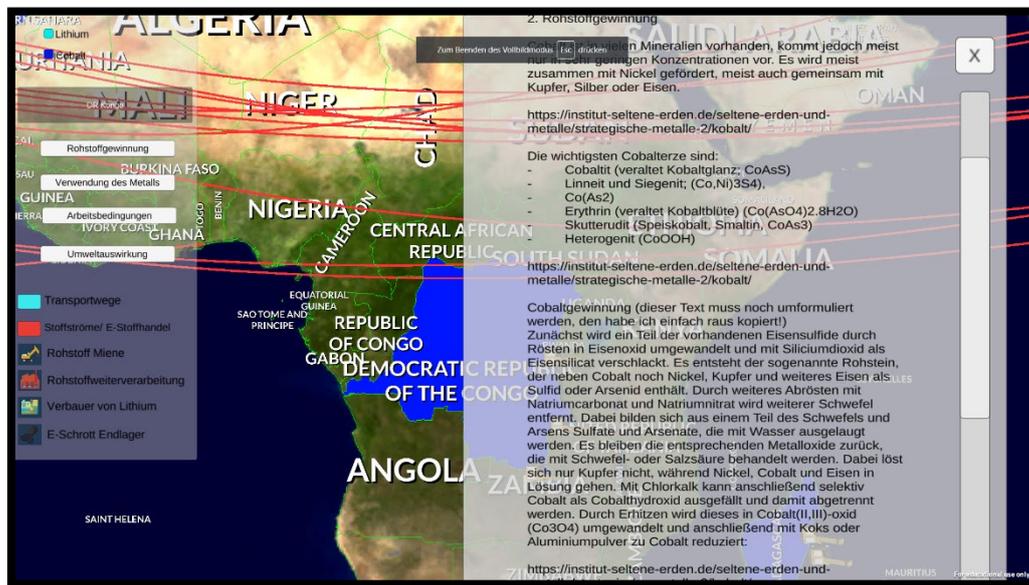


Abbildung 38:: Aktivieren der Informationsseiten

Durch Auswahl eines Objekts der interaktiven Karte erscheinen Popup-Fenster, die Informationen zu Rohstoffwegen enthalten und weiter gespeist werden können.

Online-Link zum interaktiven Rohstoffatlas:

<https://chemielabor.github.io/InteractiveMap/>

Eine Erweiterung der interaktiven Karte auf die Metalle Indium, Zinn und Neodym ist vorgesehen und soll in naher Zukunft erfolgen. Wie die Karte dann aussehen könnte, ist in **Abb. 39** dargestellt. Oben links sind verschiedene Elemente eingefügt.

Als Server wurde vorübergehend „GitHub“ verwendet, ein netzbasierter Dienst zur Versionsverwaltung für Software-Entwicklungsprojekte. Das Unternehmen GitHub, Inc. hat seinen Sitz in San Francisco in den USA.

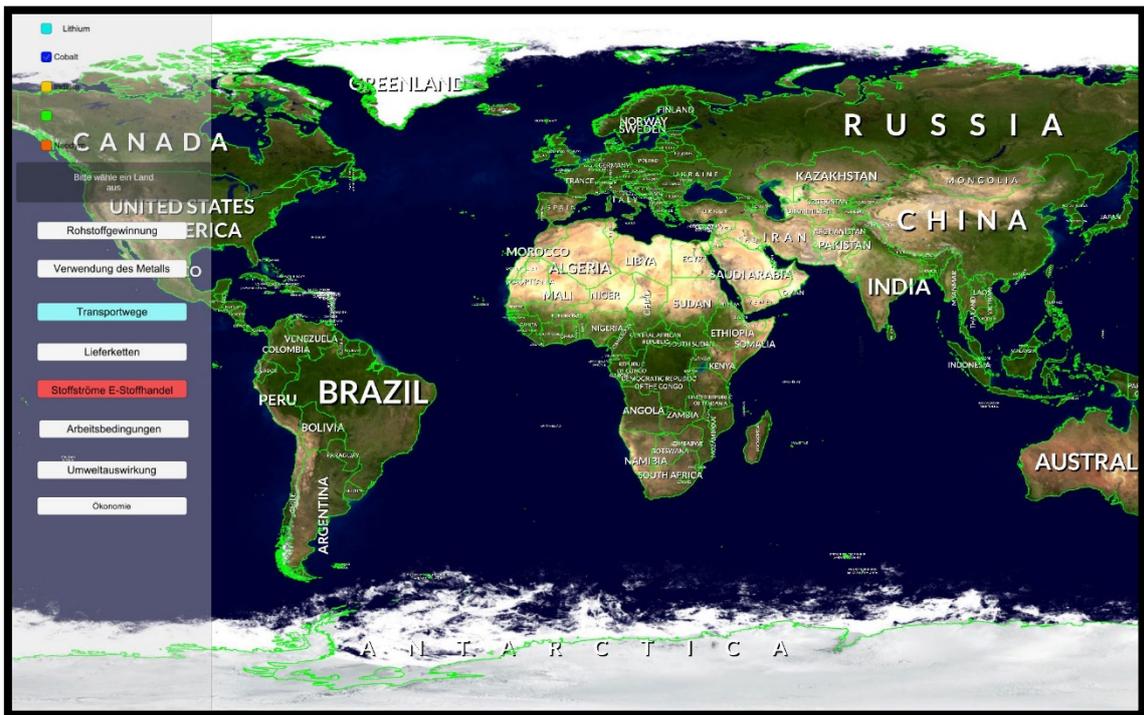


Abbildung 39: Erweiterung auf Metalle Indium, Zinn und Neodym

4.3. Öffentlichkeitsarbeit

4.3.1. Veröffentlichungen

Skripte zum Versuch „Recycling von Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkumulatoren (13.11.2020)“

Um die Rechte am entwickelten Laborversuch „Recycling von Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkus“ zu sichern und den Versuch öffentlich zugänglich zu machen und zu verbreiten, wurde der Versuch in Form von drei Skripten (SuS, Betreuer*innen, Zusatzinformationen) auf der Plattform „Refubium“ der Freien Universität Berlin veröffentlicht (**Abb. 40**):

Online-Link: <https://refubium.fu-berlin.de/handle/fub188/28816>

Freie Universität Berlin

Einloggen Hilfe Kontakt Impressum Datenschutz

Deutsch

REFUBIUM - REPOSITORY DER FREIEN UNIVERSITÄT BERLIN

SUCHE BROWSEN MEIN BENUTZERKONTO STATISTIK

Startseite > Weitere wissenschaftliche Publikationen > Dokumente FU > Dokumentanzeige

Dein Akku ist defekt? Perfekt! Wir zerlegen und recyceln ihn mit dir.

Metadaten

| | |
|-----------------------|---|
| dc.contributor.author | Lawatscheck, Carmen |
| dc.contributor.author | Kuse, Katharina-Maria |
| dc.date.accessioned | 2020-11-13T10:31:09Z |
| dc.date.available | 2020-11-13T10:31:09Z |
| dc.date.issued | 2020 |
| dc.identifier.uri | https://refubium.fu-berlin.de/handle/fub188/28816 |
| dc.identifier.uri | http://dx.doi.org/10.17169/refubium-28565 |

dc.description.abstract

Anhand eines neuen Laborexperiments soll Schülerinnen und Schülern (SuS) der Sekundarstufen die Vielfalt der in de Smartphone eingesetzten Rohstoffe verdeutlicht werden. Hierbei stehen insbesondere die Metalle Lithium und Cobalt im Vordergrund, die zur Produktion von Lithium-Ionen-Akkus für Smartphones verwendet werden. Auf physikalischem und chemischen Wege gewinnen die SuS die Metalle aus den Akkus wieder und informieren sich gleichzeitig zu Nachhaltigkeitsaspekten bezüglich Produktion, Verwendung und Entsorgung von Smartphones. Der hier vorgestellte Recycling-Zyklus von Lithium-Ionen-Akkus umfasst die folgenden experimentellen Schritte: Akkumulator-Typen und deren Bestandteile, Entladevorgang, Entmanteln/Sortieren des Materials, Gewinnung von Lithiumcobaltoxid aus dem Kathodenmaterial, Leaching von Lithiumcobaltoxid mit Salzsäure, Gewinnung der Cobalt- und Lithiummetalle in Form von Salzen, Analytik der isolierten Metallsalze. Im Laufe des Versuchs erlernen und festigen die SuS ihr Wissen zu physikalischen Grundlagen, chemischen Methoden wie dem Rückflusskochen, der Vakuumfiltration und Fällungsreaktionen und erlangen gleichzeitig einen Einblick in die Problematiken der Recyclingwirtschaft von Smartphone-Akkus.

dc.description.abstract

A new laboratory experiment will be used to show secondary school students the variety of raw materials used in en smartphones. In particular, the metals lithium and cobalt, which are used for the production of lithium-ion batteries for smartphones, are addressed. The students recover the metals from the batteries by physical and chemical methods and at the same time obtain information about sustainability aspects regarding production, use and disposal of smartphones. The recycling cycle of lithium-ion batteries presented here comprises the following experimental steps: Battery types and their components, Discharge process, Stripping / sorting of the material, Recovery of lithium cobalt oxide from cathode material, Leaching of lithium cobalt oxide with hydrochloric acid, Extraction of cobalt and lithium as metal salts, Analysis of isolated metal salts. In the course of the experiment, the students will learn and expand their knowledge of physical principles, chemical methods such as reflux boiling, vacuum filtration and precipitation reactions, while at the same time gaining an insight into the problems of recycling smartphone batteries.

dc.format.extent

Skript 1: 8 Seiten; Skript 2: 3 Seiten; Skript 3: 6 Seiten

Abbildung 40 Veröffentlichung des Versuchs „Recycling von Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkus“ auf der Plattform „Refubium“.

Der ausgearbeitete Schülerversuch zum Recycling von Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkus wurde in einem Skript für die SuS ausführlich und anschaulich beschrieben (siehe

Anhang). Das Skript dient der Vorbereitung der SuS auf den Versuch und der genauen Anleitung während der Durchführung des Experiments.

Die Betreuer*innen des Versuchs, die sich aus Lehramtsstudierenden und Studierenden des Fachbereichs Chemie zusammensetzen, erhalten ein zusätzliches Skript zum Experiment (siehe Anhang). Zum einen sollen die Betreuer*innen aus Zeit- und Sicherheitsgründen vor Beginn des Versuchs die Entladung der Smartphone-Akkus durchführen. Zum anderen erhalten die Betreuenden im Skript Informationen zum analytischen Nachweis des Cobaltsalzes $\text{Co}(\text{OH})_2$ durch Röntgenbeugung, da die Aufnahme eines XRD-Spektrums mit den SuS den zeitlichen Rahmen des Experiments überschreiten würde.

Neben der Vermittlung von chemischen Arbeitsmethoden ist es von immenser Bedeutung, dass die SuS auf Nachhaltigkeitsaspekte bezüglich der Rohstoffförderung, Produktion und Entsorgung von Smartphone-Akkus hingewiesen werden. Mithilfe des nachfolgenden Skriptes können die Betreuer*innen den SuS die entsprechenden Informationen geben und sie im Idealfall zum Weiterlesen und zur Entwicklung eigener Nachhaltigkeits-Ideen außerhalb des Schülerversuchs animieren.

4.3.2. Vorträge

UmweltBildungZukunft (27.11.2019)

Im Rahmen dieser Veranstaltung wurde ein kurzer Überblick über den neuen Schülerversuch des Recyclings von Cobalt und Lithium aus Smartphone-Akkus gegeben. Der Titel war „Kritische Metalle in Smartphone & Co – Botschafter für die Intensivierung der Kreislaufwirtschaft“. Es wurde der generelle experimentelle Ablauf des Experiments vorgestellt, sowie der Umstand, dass die Auseinandersetzung der SuS mit dieser Thematik sowohl ihr Wissen in physikalischen Grundlagen, komplexen chemischen Arbeiten und zu Umweltaspekten erweitert und gefestigt wird. Ziel des Vortrags war es, bereits Interesse und Verbreitung für den in Zukunft vom NatLab angebotenen Schülerversuch zu wecken und zu zeigen, dass sich das NatLab mit hochaktuellen Thematiken der Nachhaltigkeit auseinandersetzt. Die Zielgruppen der Konferenz waren Lehrkräfte und Schulleitungen aller Schulformen, Mitarbeiter aus Kindertagesstätten und Bildungseinrichtungen, Vertreter von außerschulischen (grünen) Lernorten sowie Bildungsexperten und – interessierte aus Wirtschaft, Wissenschaft, Kultur, Verwaltung und Gesellschaft.

Final seminar for International Climate Protection Fellows (27.01.2020)

Für 19 internationale Klimaschutz-Stipendiaten wurde ein 30-minütiger Vortrag mit dem Titel „Critical metals in smart phones and circular economy“ gehalten. Es handelte sich um Stipendiaten der Alexander-von-Humboldt-Stiftung und der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU). Ziel war es, den Teilnehmern die kritischen Bestandteile von Smartphones näherzubringen. Der Fokus wurde hierfür auf Cobalt und Lithium gelegt, um über diese beiden Metalle umfassend informieren zu können, da die Beschaffung dieser Rohstoffe besonders problematisch ist. Nach einem Überblick über die Gesamtheit der chemischen Bestandteile eines Smartphones wurde auf die Funktionsweise eines Lithium-Ionen-Akkus und die für die Produktion benötigten Rohstoffe eingegangen. Anschließend wurden die einzelnen Bereiche der Ressourcenförderung, Smartphone-Produktion und der Entsorgung, bzw. des Recyclings von Akkus kritisch und ausführlich beleuchtet unter ökologischen, ökonomischen und sozialen Gesichtspunkten. Im Rahmen einer anschließenden Mentimeter-Umfrage zeigte sich, dass die Mehrzahl der Teilnehmenden sich eine bessere Informationslage wünschte, um künftig die

Recyclingquoten von Smartphone-Akkus verbessern zu können. Es folgten 30 min angeregte Diskussion der Teilnehmenden zum Thema „Cell phones and digitization: boon and bane“.

4.3.3. Postervorstellungen

15. LeLa-Jahrestagung in Dresden (08.-10.03.2020) (Abb.41)

Kritische Metalle in Smartphone & Co

Botschafter für die Intensivierung der Kreislaufwirtschaft

Carmen Lawatscheck, Katharina Kuse Schülerlabor NatLab, Freie Universität Berlin – Fabeckstr. 34-36 – 14195 Berlin

Demnächst bietet das Schülerlabor NatLab einen neuen Versuch an, dessen topaktuelle Thematik (fast) jeden Schüler und Lehrer betrifft:
„Unser Smartphone“

Die Deutschen verwenden es durchschnittlich 88 Mal pro Tag. Das entspricht einer Smartphone-Nutzung von 5,5 Mal pro Stunde.^[1] Doch was steckt hinter der unglaublichen technischen Erfindung? Und wie kann man damit sorgsam, gezielt und nachhaltig umgehen, sodass wertvolle Ressourcen eingespart werden können?

Diesen Fragen geht das **Schülerlabor NatLab gemeinsam** mit den **Schülerinnen und Schülern (SuS)** am Beispiel von Smartphone-Akkus nach. Unter Anleitung sollen die SuS die chemischen Elemente Lithium und Kobalt in Form von Salzen aus Lithium-Ionen-Akkus zurückgewinnen.

Chemie, Technik und Physik

Laborpraxis: Recycling von Lithium und Kobalt aus Smartphone-Akkus

1 Aufbau eines Smartphone-Akkus

Elektrochemie

- Lithium-Ionen-Akkumulator
- Kenngrößen eines Akkus (Typ, Spannung, Leistung)

Entladevorgang

Physik

- Entladen eines Kondensators über einen elektrischen Widerstand
- ohmsches Gesetz

Entmanteln / Sortieren

Technisches Arbeiten

- Gefahrenabschätzung
- Treffen von Sicherheitsvorkehrungen
- Geschicklichkeit (Arbeiten mit Elektronik-Präzisionsmessern)

2 Gewinnung von aktivem Material (LiCoO₂)

Chemisches Arbeiten

- Lösungsmittel
- Rückflusskochen
- Vakuumfiltration

3 Isolierung von Kobalt und Lithium

Chemisches Arbeiten

- Laugung von LiCoO₂ mit Säure
- Ausfällung von schwerlöslichen Salzen

4 Analytik von Kobalt- und Lithiumsalzen

Analytisches Arbeiten

- Infrarot-Spektroskopie
- Flammprobe

Umwelt und Gesellschaft

Bewusster und nachhaltiger Umgang mit den Rohstoffen Lithium und Kobalt sowie „menschlichen Ressourcen“

5 Gewinnung der Rohstoffe Lithium und Kobalt

Lithium^[6a,b]

Hauptvorkommen weltweit (80%): Südamerika (Chile, Bolivien)

Hohe Luft- und Wasserverschmutzung, Zerstörung von Seen

Kobalt^[6c,d]

Hauptvorkommen weltweit: Afrika (Kongo, Sambia)

teilweise un zertifizierte Minen (Kinder- und Zwangsarbeit)

Verringerung der Rohstoff-Förderung durch die 5 R's^[7]

- Reduzieren (**Reduce**)
- Wiederverwenden (**Reuse**)
- Reparieren (**Repair**)
- Umgestalten (**Reform**)
- Wiederverwerten (**Recycle**)

6 Produktion von Lithium-Ionen-Akkus

Umweltbelastungen^[8a]

- weite Transportwege von Rohstoffen^[8b]
- Wasserverbrauch
- Energieverbrauch
- CO₂-Emission

(teilweise) Ausbeutung von Arbeitskräften^[8c,d]

- enorme Anzahl von Überstunden
- Niedriglöhne ohne Arbeitsverträge
- minderjährige Arbeitskräfte?

7 Entsorgung von Lithium-Ionen-Akkus

Von Elektroschrott-Deponien...^[9a-d]

- oft Verkauf von E-Müll an Afrika und China
- verheerende Folgen für die Umwelt und Einwohner aufgrund giftiger Dämpfe

... zum Recycling^[9e]

Bisher liegt die Recyclingquote von Akkus weltweit unter 5%...^[9f]

Abbildung 41: Poster für die 15. LeLa-Jahrestagung am 10.03.2020. Die Erstellung des Posters erfolgte durch Dr. Carmen Lawatscheck, die Vorstellung von Dr. Katharina Kuse.







Freie Universität Berlin

Kritische Metalle in Smartphone & Co

Rückgewinnung des Seltenerdmetalls Neodym im Online-Chemie-Experiment

Amiera Hadi, Carmen Lawatscheck, Katharina Kuse Schülerlabor NatLab, Freie Universität Berlin – Fabeckstr. 34-36 – 14195 Berlin

Die Beschaffung von Neodym als Primärrohstoff ist mit enormen Belastungen für Mensch und Natur nicht nur in den Förderländern verbunden. Die Entwicklung und Durchsetzung einer **KREISLAUFWIRTSCHAFT** für Neodym als Sekundärrohstoff ist eine topaktuelle Thematik von hoher Bedeutung.

Um Schüler und Schülerinnen (SuS) der Sekundarstufen I und II darin zu unterstützen ein Rohstoffbewusstsein zu entwickeln und sie für den nachhaltigen Umgang mit elektronischen Geräten zu sensibilisieren, wurde eine reale chemische Experimentiereinheit des **SCHÜLERLABORS NATLAB** von der Spieleentwicklerfirma Villa Hirschberg Online GmbH in ein virtuelles Online-Chemieexperiment, ein *Serious Game*, übersetzt.

Das **SERIOUS GAME NEODYM** thematisiert die nasschemische **RÜCKGEWINNUNG DES SELTENERDMETALLS NEODYM** aus Lautsprechermagneten in defekten Smartphones. In einer realitätsnahen, dreidimensionalen und virtuellen Laborumgebung erlernen die SuS typische chemische Arbeitstechniken und Abläufe im Laboralltag. Zusätzlich erfahren die SuS wichtige Aspekte zu Umweltschutz und chemische Grundlagen in drei abwechslungsreichen und interaktiven Wissensblöcken.



UMWELTSCHUTZ

- Nachhaltigkeitsaspekte
- Rohstoffbewusstsein
- Recycling

PRAXISVERMITTLUNG

- Geschicklichkeitsspiele
- Laborabläufe und -geräte

WISSENSVERMITTLUNG ÜBER WISSENSBASIS

- Block 1: Kritische Metalle
- Block 2: Säure-Base-Theorie
- Block 3: Redoxchemie
- Vermittlung der Inhalte durch Lehr-Lern-Einheiten
- Wissensabruf über abwechslungsreiche Frageformen

INKLUSION: GEBÄRDENSPRACHE

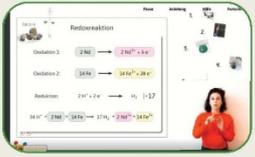


Abbildung 42: Poster für die Projekttagung am 10/11.06.2021. Die Erstellung des Posters erfolgte durch Dr. Carmen Lawatscheck und Amiera Hadi

4.3.4. Workshops

BilRess-Netzwerkkonferenz (22.09.2020)

Im Rahmen der 13. Netzwerkkonferenz des Netzwerks "Bildung für Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz" (BilRess) wurde das neu entwickelte Experiment zum Recycling von Lithium und Cobalt aus Li-Ionen-Akkus von Smartphones in einem 30-minütigen Workshop vorgestellt (**Abb. 43**).

Kritische Metalle in Smartphone & Co
Botschafter für die Intensivierung der Kreislaufwirtschaft

Dr. Carmen Lawatscheck, Dr. Katharina Kuse

Schülerlabor NatLab, Freie Universität Berlin – Fabeckstr. 34-36 – 14195 Berlin

Anhand eines neuen Laborexperiments soll Schülerinnen und Schülern (SuS) der Sekundarstufen die Vielfalt der in Smartphone eingesetzten Rohstoffe verdeutlicht werden. Hierbei stehen insbesondere die Metalle Lithium und Kobalt im Vordergrund, die zur Produktion von Lithium-Ionen-Akkus für Smartphones verwendet werden. Auf physikalischem und chemischen Wege sollen die SuS die Metalle aus den Akkus wiedergewinnen und gleichzeitig auf Nachhaltigkeitsaspekte bezüglich der Produktion, Verwendung und Entsorgung von Smartphones aufmerksam gemacht werden.

Der hier vorgestellte Recycling-Zyklus von Lithium-Ionen-Akkus umfasst die folgenden experimentellen Schritte:

- Akku-Arten und deren Bestandteile
- Entladevorgang
- Entmanteln/Sortieren des Materials
- Gewinnung von Lithiumkobaltoxid aus dem Kathodenmaterial
- Leaching von Lithiumkobaltoxid mit Salzsäure
- Gewinnung der Kobalt- und Lithiummetalle in Form von Salzen
- Analytik der isolierten Metallsalze

Im Laufe des Versuchs erlernen und festigen die SuS ihr Wissen zu physikalischen Grundlagen, chemischen Methoden wie dem Rückflusskochen, der Vakuumfiltration und Fällungsreaktionen und erlangen gleichzeitig einen Einblick in die Problematiken der Recyclingwirtschaft von Smartphone-Akkus.

Abbildung 43: Abstract für die 13. BilRess-Netzwerkkonferenz.

Femtec Workshop: Talent Take Off: Einsteigen @Home 2020 (28.10.2020)

Die Femtec GmbH führt seit 2009, in Kooperation mit der Fraunhofer Gesellschaft für Angewandte Forschung e.V. den Studienorientierungskurs „Talent Take Off – Einsteigen“ für MINT-interessierte Schüler*innen der 10.-13. Klasse aus ganz Deutschland durch:

<https://www.femtec.org/programme/talent-take-off/einsteigen/>

Das Programm läuft mit großem Erfolg: Normalerweise kommen 30 Schüler*innen für sechs Tage in Berlin zusammen, und erhalten ein breites Angebot (Trainings zur persönlichen Weiterentwicklung, den Besuch einer Vorlesung aus dem MINT Bereich, den Besuch eines Fraunhofer-Instituts, Gespräche mit Role Models etc.) an. Einer dieser Punkte war der digitale Workshop zum Serious Game „Neodym“. Der Workshop wurde im Anschluss an die Durchführung von den Teilnehmenden evaluiert (**Abb. 44**).

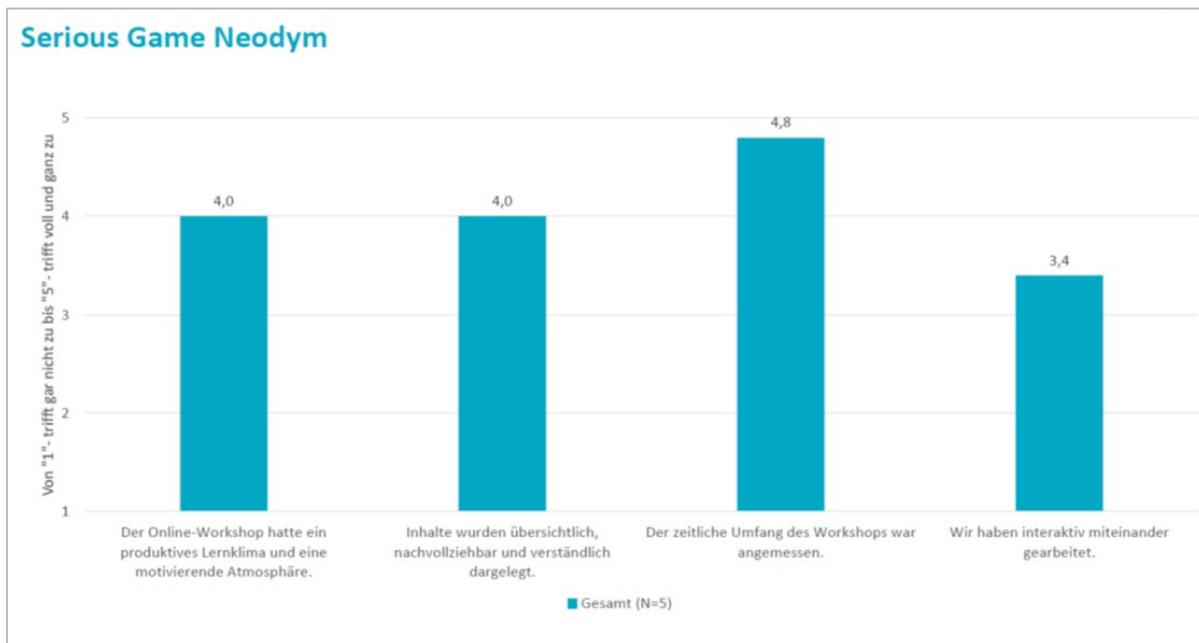


Abbildung 44: Evaluation des Femtec Workshops durch die Teilnehmenden der Veranstaltung.

Tandemworkshop Ressourcenschonung und kritische Metalle (03.12.2020)

Aufgrund der positiven Rückmeldung vom BilRes-Netzwerk bezüglich der 13. Netzwerkkonferenz wurde beschlossen, das Experiment zum Recycling von Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkus erneut in Form eines Workshops vorzustellen. Diesmal wurde als Format ein Tandemworkshop gewählt, um auch den fast fertig entwickelten virtuellen Versuch Neodym öffentlich zu präsentieren und publik zu machen (**Abb. 45**).

03.12.2020 15:00-16:00

Workshop 1: Lithium und Cobalt

Teil 1: Stoffgeschichten

- Cobalt: Konfliktrohstoff, Kinderarbeit und die DR Kongo
- Lithium: umweltgefährdende Rohstoffgewinnung

Teil 2: Praxis

Recycling von Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkumulatoren

03.12.2020 16:20-17:30

Workshop 2: Neodym

Teil 1: Stoffgeschichten

- Unverzichtbarer Grundstoff für Permanentmagnete
- Rohstoffgewinnung mit vielfachen Problemen

Teil 2: Praxis

Serious Game: Recycling von Neodym aus Alt-Handys

Die ganze Welt in meinem Smartphone

Fachübergreifende Wissensvermittlung für Schüler und Schülerinnen (SuS)

Chemie

Technik

Nachhaltigkeit

Physik

Dr. Volker Zepf
DLR_School_Lab Universität Augsburg

Abbildung 45: Ankündigung des Tandemworkshops.

Gemeinsam mit dem Schülerlabor DLR_School_Lab der Universität Augsburg (Projekt: Flatscreen & Co. – Unter die Lupe genommen)

https://www.uni-augsburg.de/de/forschung/einrichtungen/institute/amu/bildung/school_lab/

und dem Schülerlabor NatLab der Freien Universität Berlin in Zusammenarbeit mit Herrn Dr. Volker Zepf entstanden informative und abwechslungsreiche Vorträge, die die Teilnehmenden zu angeregten Diskussionen im Anschluss einluden. Eine Zusammenfassung des Workshops kann auf der BilRes-Website aufgerufen werden:

<https://www.bilress.de/id-2-bilress-vor-ort.html>

Femtec Workshop: Talent Take Off: Einsteigen @Home 2021 (01.04.2021):

Ein Projekt der Fraunhofer-Gesellschaft, das Orientierung für naturwissenschaftlich interessierte oder technikbegeisterte Schüler*innen der Klassen 10 bis 12. anbietet. (10 TN, Serious Game „Neodym“)

Online Workshop: Girls´ Day (22.04. 2021): (9 TN) Serious Game “Neodym”

9. BilRes-Webseminar: Neodym – Stoffgeschichte und Rückgewinnung digital erleben (25.05.2021): Veranstaltung in Kooperation mit dem DLR School Lab der Universität Augsburg, Theorie und Serious Game „Neodym“ (**Abb. 46**) Online-Link: <https://www.bilress.de/id-9-bilress-webseminar.html>

Das kritische HighTechmetall Neodym

Web-Seminar
am Dienstag, 25.05.2021
von 17:30-19:00
per GoToMeeting

Ein neues Experiment im Schülerlabor
für das Schulfach Chemie (Sek I / II)

**Neodym: umweltgefährdende
Rohstoffgewinnung**

Freie Universität Berlin

NatLab

**Neodym als
Sekundärrohstoff in
„End of Life“ Handys**

Demontage Handy
Nanohemische Aufbereitung
Rückgewinnung als Neodymtrifluorid
NatLab Schülerlabor

NatLab Chemie Virtuell
NEODYM

Die Anmeldung erfolgt kostenfrei
über info@bilress.de

Nachhaltigkeit

DBU

Abbildung 46: Ankündigung des 9. Web-Seminars – BilRes auf Facebook

Lehrkräfte Fortbildung Online für die SEK II „Recycling von Lithium, Cobalt, Indium und Zinn aus Smartphones“ (31.05.2021); TN 20, Auf der Homepage des Schülerlabors **Abb. 47 a)** und auf Facebook **Abb. 47 b)** wurde das Web-Seminar beworben.

Freie Universität  Berlin

Startseite Team Kontakt Impressum Datenschutz Barrierefreiheit

mit Google™ suchen ...

Fachbereich Biologie, Chemie, Pharmazie /
NATLAB - MITMACH- & EXPERIMENTIERLABOR FÜR SCHÜLER*INNEN

ÜBER UNS LEHRKRÄFTE SCHÜLER*INNEN STUDIERENDE AKTUELLES ENATLAB

Startseite > NatLab > Lehrkräfte > Fortbildungen für Lehrkräfte > Kritische Metalle

Kritische Metalle



Kritische Metalle

Wir laden Sie herzlich zur Lehrkräftefortbildung für unseren neuesten Schülerkurs zum Thema „**Kritische Metalle in Smartphone & Co – Recycling von Lithium/Cobalt aus Akkus und Indium/Zinn aus Displays**“ ein.

| | |
|---------------|---|
| Datum: | Montag, den 31.05.2021, 14:00 bis ca. 17:30 Uhr |
| Ort: | ONLINE! |

Das Smartphone – jeder kennt es und fast alle nutzen es tagtäglich. Doch was steckt hinter der unglaublichen technischen Erfindung eines Smartphones? Welche Möglichkeiten existieren für einen sorgsamem und nachhaltigen Umgang, sodass wertvolle Ressourcen für diese Technologie eingespart werden können? Diesen Fragen geht das Schülerlabor NatLab gemeinsam mit Schülerinnen und Schülern (SuS) der Sekundarstufen nach. In zwei neuen Laborversuchen werden die Metalle Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkus sowie die Metalle Indium und Zinn aus Touchscreen-Displays auf physikalischem und chemischem Weg zurückgewonnen. Darüber hinaus lernen die SuS auf Nachhaltigkeitsaspekte bezüglich der Produktion, Verwendung und Entsorgung von Smartphones zu achten und erweitern so ihr Rohstoffbewusstsein.

NEUIGKEITEN

[Ökologiekurse im Schuljahr 2022](#)
Buchen Sie ab 08.11.2021 hier Ihren Kurstermin!
08.11.2021

[Neurobiologiekurse im Schuljahr 2021/2022](#)
Buchen Sie ab 17.08.2021 hier Ihren Kurstermin!
11.08.2021

[Die neuen Evolutionskurse sind buchbar](#)
Evolution stellt die Fragen aller Fragen: Wer ist mit wem verwandt und woher stammen wir? Buchen Sie hier Ihren Kurstermin!
13.04.2021

a)

Kritische Metalle in Smartphone & Co. – Metalle-Recycling von Lithium und Kobalt aus Akkus von Indium und Zinn aus Touchscreens

Web-Seminar LuL FoBi
am Montag, 31.05.2021
von 14:00-17:30
per **Cisco-WebEx** Video Meeting



Lithium, Indium, Zinn: umweltgefährdende Rohstoffgewinnung
Kobalt: Konfliktrohstoff
→ Urban Mining: Sekundärrohstoffe!

Freie Universität  Berlin

Neue Experimente im Schülerlabor NatLab für das

Schulfach Chemie

Fachübergreifende Wissensvermittlung für Schüler und Schülerinnen (SuS)



NatLab 



Anmeldung:




DBU 

b)

Abbildungen 47: Ankündigung des Web-Seminars – Lehrkräftefortbildung auf der Webseite a) und auf Facebook b)

Online Workshop im Rahmen des Einführungs- und Orientierungsstudium EinS@FU (16.06.2021): TN 23; Serious Game „Neodym“

Sommeruniversität Kurs ganztags Serious Game Neodym (30.07.2021): Die Sommeruni ist ein Angebot der Freien Universität Berlin für naturwissenschaftlich-interessierte Schülerinnen und Schüler ab der 10. Klasse. (5 TN)

Workshop mit Schüler-Stipendiaten der Roland Berger Stipendiaten (24.09.2021): Einzug aus dem gesamten Bundesgebiet September? 16 TN

Vortrag zu den Seltenen Erden in der Vortragsreihe der MNU (Zielgruppe Lehrkräfte) (03.11.2021): Serious Game „Neodym“. Einzug aus dem gesamten Bundesgebiet (TN 25)

Weitere Workshops wurden mit SuS der beruflichen Orientierungspraktika durchgeführt.

4.3.5. Tagungen

Deutscher Verein zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts (MNU) Bundeskongress Tagung (04. Und 05.03 2021): TN-Zahl 23 (Recycling von Lithium, Cobalt, Indium und Zinn aus Smartphones, TN-Zahl 85 (Serious Game „Neodym“).

LernortLabor (LeLa) – Tagung Online (08.03.2021) – aufgrund technischer Störung seitens der Organisatoren wurde der Vortrag nachgeholt. Ersatztermin war am 05.05.: (20 TN) Recycling von Lithium, Cobalt, Indium und Zinn aus Smartphones. Auf Facebook wurde das Web-Seminar mit Grafik **Abb. 48** beworben.

**Kritische Metalle in Smartphone & Co.
Recycling von Lithium und Kobalt aus Akkus**

Web-Seminar
am Mittwoch, 05.05.2021
von 16:00-17:00
per **Zoom** Video Meeting

Ein neues Experiment
im Schülerlabor
für das
Schulfach Chemie

Fachübergreifende
Wissensvermittlung
für Schüler und
Schülerinnen (SuS)

mailto:
chemie@natlab.fu-berlin.de
Zum Erhalt des Zoom-Links.

Nachhaltigkeit
Technik Physik

Lithium: umweltgefährdende
Rohstoffgewinnung
Kobalt: Konfliktrohstoff, Kinderarbeit

Freie Universität Berlin

NatLab

DBU
Qualität
Brandenburg-Universität

The graphic is a flyer for a web seminar. It features a title at the top, a central text block with a circular diagram, and several images including a battery, a person in a lab, and a smartphone. Logos for the Freie Universität Berlin, NatLab, and DBU are at the bottom.

Abbildung 48: Ankündigung des des Web-Seminars–Nachholtermin LeLa-Tagung vom 08.03.2021

Projekttagung Digitale NAWIgation von Inklusion Jena Online (11./12. Juni 2021) (ca. 40 TN) Serious Game „Neodym“

4.3.6. Newsletter

Beitrag 1 zur Newsletter vom Netzwerk GenaU

Das Netzwerk „Gemeinsam für naturwissenschaftlich-technischen Unterricht“ (GenaU) bildet einen Zusammenschluss der Schülerlabore Berlins und Brandenburg an Hochschulen und Forschungseinrichtungen. Um den fertig entwickelten Schülerversuch zum Recycling von Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkus einem möglichst breiten Feld an Interessierten zugänglich zu machen, wurde hiermit ein Beitrag für die Newsletter des Netzwerks verfasst (**Abb.**

49). Dieser Artikel erschien im Newsletter nr. 50 am 21.08.2020 unter dem Punkt: 2. NatLab: Kritische Metalle in Smartphone & Co: Lithium-Ionen-Akkumulatoren.

Schülerlabor NatLab, Freie Universität Berlin – Fabeckstr. 34-36 – 14195 Berlin

Kritische Metalle in Smartphone & Co: Lithium-Ionen-Akkumulatoren

Das Schülerlabor NatLab bietet ab sofort allen Interessierten ein neues, dazu passendes, nachhaltiges chemisches Experiment für Schülerinnen und Schüler (SuS) an.

Anhand dieses Laborexperiments wird SuS der Sekundarstufen die Vielfalt der in Smartphones eingesetzten Rohstoffe verdeutlicht. Insbesondere die Metalle Lithium und Kobalt stehen hierbei im Vordergrund, welche zur Produktion von Lithium-Ionen-Akkus verwendet werden.

Die Erfindung des ersten kommerziell erhältlichen Lithium-Ionen-Akkumulators wurde 2019 mit dem Chemie-Nobelpreis ausgezeichnet. Wir haben dieses aktuelle und technologisch bedeutsame Thema aufgegriffen, da z.B. Mobilgeräte, Elektroautos und Elektrofahräder vielfach mit dieser Energiequelle betrieben werden. Der Bedarf an Lithium- und Kobalterzen steigt in bedenklichem Maß und der Abbau der Elemente bringt gewaltige negative Auswirkungen für die Umwelt mit sich.

Im Laborexperiment zerlegen die SuS die funktionsuntüchtigen Akkus unter entsprechenden Sicherheitsvorkehrungen manuell und gewinnen auf nass-chemischem Wege die Metalle zurück. Parallel dazu werden SuS auf Nachhaltigkeitsaspekte bezüglich Produktion, Verwendung und Entsorgung von Smartphones bzw. deren Akkus aufmerksam gemacht.

Der neue Metallrecycling-Versuch zielt auf die Rückgewinnung von Lithium und Kobalt ab und umfasst nach einem theoretischen Einstieg zu Akku-Arten und deren Bestandteilen die folgenden experimentellen Schritte:

- Entladevorgang
- Entmanteln / Sortieren des Materials
- Gewinnung von Lithiumkobaltoxid aus dem Kathodenmaterial
- Leaching von Lithiumkobaltoxid mit Salzsäure
- Gewinnung der Kobalt- und Lithiummetalle in Form von Salzen
- Analytik der isolierten Metallsalze

Im Laufe des Versuchstages festigen und erlernen die SuS ihr Wissen zu allgemeinen physikalischen bzw. chemischen Grundlagen zum elektrischen Strom bzw. zu Metallen, chemische Methoden wie Rückflusskochen, Vakuumfiltration und Fällungsreaktionen. Gleichzeitig erlangen sie einen Einblick in Umweltschäden durch den Erzabbau und in die Problematiken der Recyclingwirtschaft von Smartphone-Akkus.

Nähere Informationen erhalten Sie in Kürze auf unserem Web-Link: https://www.bcp.fu-berlin.de/natlab/lehkraefte/kursthemen/chemie_sek/index.html

Bei Fragen, wenden Sie sich bitte an Frau Carolin Garbe. Email: c.garbe@fu-berlin.de

Abbildung 49: Newsletter-Beitrag für das Netzwerk GenaU zur Bekanntmachung des neu entwickelten Versuchs „Recycling von Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkus.“

Beitrag 2 zur Newsletter vom Netzwerk GenaU

Das Netzwerk „Gemeinsam für naturwissenschaftlich-technischen Unterricht“ (GenaU) bildet einen Zusammenschluss der Schülerlabore Berlins und Brandenburg an Hochschulen und Forschungseinrichtungen. Um den fertig entwickelten Schülerversuch zum Recycling von Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkus einem möglichst breiten Feld an Interessierten

zugänglich zu machen, wurde hiermit ein Beitrag für die Newsletter des Netzwerks verfasst (**Abb. 50**). Der Newsletter erschien am 21.01.2021 unter dem Punkt: 7. Schüler*innen „gamen“ zu viel!

NEWS



Schüler*innen „gamen“ zu viel!

Deshalb möchte das NatLab das Spannende mit dem Nützlichen verbinden und hat ein reales chemisches Experiment aus dem MINT-Umweltbildungs-Angebot des Schülerlabors NatLab von einer Spieleentwicklerfirma in ein virtuelles Chemieexperiment (Serious Game) übersetzen lassen.

Kleine Geschicklichkeits-Minigames im Spiel, wie das Entmagnetisieren eines Magneten in der Brennerflamme oder das Einstellen eines pH-Wertes, lockern das chemische Arbeiten und die informativen Theorieblöcke auf. Inhaltlich beschäftigen sich die Spielenden mit der Chemie des kritischen Metalls Neodym und den Nachhaltigkeitsaspekten der Rückgewinnung aus den Lautsprechern gebrauchter Mobiltelefone. Da die Beschaffung von kritischen Metallen wie Neodym mit enormen Umweltbelastungen in den Förderländern verbunden ist, stellt die Entwicklung und Durchsetzung der Kreislaufwirtschaft für diese Rohstoffe eine topaktuelle Thematik von hoher Bedeutung dar.

Die Sensibilisierung für das Recycling von Seltenerdmetallen erfolgt durch das Sammeln von Wissenspunkten und die Aufrechterhaltung eines Nachhaltigkeits-Levels durch sauberes Arbeiten. Praktische Elemente in der Laborarbeit werden durch manuelle Geschicklichkeit im Spiel nachempfunden. Die Spielenden beschäftigen sich mit Themen wie Redoxreaktionen, Säure-Base-Theorie und Magnetismus. Die Theorieanteile sind teils binnendifferenziert, so dass sowohl Chemieanfänger bereits ab dem zweiten Lernjahr als auch Leistungskurschüler hier etwas mitnehmen können. Die Spieldauer beträgt etwa gut 60 Minuten, das Spiel ist kostenfrei und läuft in jedem gängigen Browser. Für Gehörlose ist eine Gebärdensprachdolmetscherin zuschaltbar. Das Spiel wird beim Deutschen Computerspielpreis in der Rubrik „Serious Games“ eingereicht.

⇒ https://www.bcp.fu-berlin.de/natlab/e-learning/serious_game_neodym/index.html

oder unter

⇒ <http://www.natlab.de>

Hier findet sich auch weiteres Begleitmaterial und andere Onlineangebote.

Fragen gerne an: chemie@natlab.fu-berlin.de

Abbildung 50: Newsletter-Beitrag für das Netzwerk GenaU zur Bekanntmachung des neu entwickelten Versuchs „Recycling von Neodym aus Smartphones.“

Informationen über die Webseite NatLab

Zusätzlich zu Informationen auf der Webseite (**Abb. 51**), werden auch proaktiv Schulen und Lehrkräfte über Mail angeschrieben und über die neu entwickelten und nutzbaren Projektergebnisse informiert, bzw. zu Fortbildungen eingeladen.

Freie Universität Berlin

Startseite Team Kontakt Impressum Datenschutz Barrierefreiheit

Fachbereich Biologie, Chemie, Pharmazie /
NATLAB - MITMACH- & EXPERIMENTIERLABOR FÜR SCHÜLER*INNEN

ÜBER UNS LEHRKRÄFTE SCHÜLER*INNEN STUDIERENDE AKTUELLES ENATLAB

Startseite > NatLab > Neuigkeiten > Entwicklung eines virtuellen Chemieexperiments

Entwicklung eines virtuellen Chemieexperiments



Es geht voran mit unserem neuen virtuellen Chemieversuch, der die NatLab-Chemie direkt in euer Zimmer katapultiert!

News vom 13.11.2020

Interessierte Lehrkräfte und Schüler werden dann ortsunabhängig die detaillierte Rohstoffrückgewinnung kennen lernen und sich dabei von der Chemie begeistern lassen können.

Grüße vom virtuellen NatLab Team und der Villa Hirschberg Online GmbH.

Chemie Zimmer

6 / 31

NEUIGKEITEN

Ökologiekurse im Schuljahr 2022
Buchen Sie ab 08.11.2021 [hier](#) Ihren Kurstermin!
08.11.2021

Neurobiologiekurse im Schuljahr 2021/2022
Buchen Sie ab 17.08.2021 [hier](#) Ihren Kurstermin!
11.08.2021

Die neuen Evolutionskurse sind buchbar
Evolution stellt die Fragen aller Fragen: Wer ist mit wem verwandt und woher stammen wir? Buchen Sie [hier](#) Ihren Kurstermin!
13.04.2021

1 / 10

Abbildung 51: Mitteilungen zu den erstellten Angeboten werden über die Webseite des Schülerlabors verbreitet.

Da in dem Serious Game „Neodym“ eine Gebärdensprecherin zur Barrierefreiheit für Gehörlose beiträgt, wurden 2021 insgesamt 70 Institutionen angeschrieben, die von gehöreingeschränkten Menschen besucht werden.

4.3.7. Veröffentlichungen in Zeitschriften

Digital unterrichten BIOLOGIE Nr. 6/2021- Friedrich Verlag, Erscheinungsdatum: Juni 2021 Schulstufe Sekundarstufe Schulfach / Lernbereich: Biologie Bestellnr.: d1463014 Medienart: PDF Hinweis auf digitale Unterrichtsgestaltung mit dem *NatLab* in der Rubrik „kürz&bündig“ mit Hinweis auf längeren Artikel zu Serious Game „Neodym“ – Manuskript entsteht, Veröffentlichung voraussichtlich Herbst 2022.

Beitrag im Tagungsband im Verlag Springer Nature zur Projekttagung Digitale NAWI-gation von Inklusion Jena Online (11./12. Juni 2021) Serious Game „Neodym“ – im Druck befindlich, Veröffentlichung Frühjahr 2022

Plus Lucis, Zeitschrift des Vereins zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts, Themenheft Schwerpunkt „Mit Seltenerdelementen die Zukunft gestalten?!“ Serious Game „Neodym“ – im Druck befindlich – Veröffentlichung im Frühjahr/Sommer 2022

4.4. Einschränkungen des Projekts durch die Corona-Pandemie

Die Freie Universität gibt regelmäßig neue Bestimmungen zur Eindämmung der Corona-Pandemie auf der folgenden Website bekannt:

<https://www.fu-berlin.de/sites/coronavirus/news-start/index.html>

Durch diese Bestimmungen wurde die Bearbeitung des vorliegenden Projekts in einigen Punkten eingeschränkt. Der fertig entwickelte Schülerversuch zum „Recycling von Lithium und Cobalt aus Smartphone-Akkus“ konnte bisher nur einmal mit Schülern durchgeführt werden, bevor der 2. Lockdown vom 16.12.2021 beschlossen wurde. Alle Möglichkeiten, das neue Experiment publik zu machen wurden so gut wie möglich genutzt. Über Workshops und Tagungen wurde das Schülerexperiment der Öffentlichkeit, insbesondere Lehrkräften, präsentiert. Zahlreiche Workshops wurden durchgeführt, die das Experiment unter Einbindung realer Videos, die die Arbeitsschritte enthielten, präsentierten. Des Weiteren wurden drei hochwertige Skripte erstellt, die die Versuchsdurchführung, Informationen für die Betreuer*innen und Nachhaltigkeitsaspekte bezüglich der Akku-Industrie ausführlich beschreiben. Die Skripte wurden auf der Plattform „Refubium“ der Freien Universität Berlin veröffentlicht, sodass der entwickelte Versuch öffentlich zugänglich ist und verbreitet werden kann.

Insgesamt gab es während des Projekts vielfach Verzögerungen. Sei es die Pflicht im Home-Office zu arbeiten, seien, es geschlossene Kindergärten und Schulen, Quarantänebestimmungen, etc. Es gibt keine an diesem Projekt mitwirkende Person, inkl. die beauftragten Fremdfirmen, die nicht ohne deutliche Beschwerden dieses Projekt bearbeitet hat. Und auch die Lieferzeiten für benötigte Sachmittel hatten sich deutlich verlängert.

Hervorzuheben ist, dass die Entwicklung und Verbreitung des Serious Games „Neodym“ durch die Pandemie noch mehr als erwartet an Bedeutung gewonnen hat, da SuS durch das Spiel, die Möglichkeit erhalten, auf virtuellem Weg Laborerfahrung zu sammeln. Das ist aktuell ein großer Vorteil, da der Schulunterricht meist von zu Hause erfolgt und so chemische Experimente von SuS in einem Präsenzlabor nicht durchgeführt werden können. Daher zeigten sich LuL im Rahmen der Bekanntmachung des Spiels besonders begeistert, da sie das Spiel sehr gut in ihren Unterricht einbauen können und so den SuS eine Möglichkeit geben konnten einen wirklichkeitsnahen Eindruck vom praktischen, chemischen Arbeiten zu gewinnen, wenn auch auf virtuellem Weg.

5. Literaturverzeichnis

- ¹ Europäische Kommission, Brüssel, den 3.9.2020, COM(2020) 474 final, Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0474&from=EN>
- ² K. Kuse, Projektantrag zur Skizze Az 34746 Umweltbildung im Schülerlabor NatLab (FU Berlin), Titel der Projektidee zum DBU Förderthema 8: Kritische Metalle in Smartphone & Co - Botschafter für die Intensivierung der Kreislaufwirtschaft
- ³ Hu, J.; Zhang, J.; Li, H.; Chen, Y.; Wang, C. *Journal of Power Sources* 2017, 351, 192-199.
- ⁴ G. Maschler, T.; Friedrich, B.; Weyhe, R.; Heegn, H.; Rutz, M., *Journal of Power Sources* 2012, 207, 173-182.
- ⁵ Tarascon, J. M.; Armand, M. *Nature* 2001, 414 (6861), 359-367.
- ⁶ German, F. Untersuchungen zur SEI-Bildung und Optimierung der Formation an Lithium-Ionen Voll- und Halbzellen. 2015.
- ⁷ Zeng, X.; Li, J.; Singh, N. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 2014, 44 (10), 1129-1165.
- ⁸ Sun, L.; Qiu, K. *Journal of Hazardous Materials* 2011, 194, 378-384.
- ⁹ Wakihara, M. *Materials Science and Engineering: R: Reports* 2001, 33 (4), 109-134.
- ¹⁰ Xu, K. *Chemical Reviews* 2004, 104 (10), 4303-4418.
- ¹¹ Zhang, S. S. *Journal of Power Sources* 2007, 164 (1), 351-364.
- ¹² Yu, M.; Zhang, Z.; Xue, F.; Yang, B.; Guo, G.; Qiu, J. *Separation and Purification Technology* 2019, 215, 398-402.
- ¹³ Chawla, N.; Bharti, N.; Singh, S. *Batteries* 2019, 5 (1).
- ¹⁴ Joo, S. H.; Shin, S.; Shin, D. J.; Wang, J. P. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 2015, 229, 212-220.
- ¹⁵ Chagnes, A.; Pospiech, B. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 2013, 88 (7), 1191-1199.
- ¹⁶ Lee, J.-c.; Pandey, B. D., Bio-processing of solid wastes and secondary resources for metal extraction – A review. *Waste Management* 2012, 32 (1), 3-18.
- ¹⁷ Chen, X.; Ma, H.; Luo, C.; Zhou, T., Recovery of valuable metals from waste cathode materials of spent lithium-ion batteries using mild phosphoric acid. *Journal of Hazardous Materials* 2017, 326, 77-86.
- ¹⁸ Melin, H. E., State-of-the-art in reuse and recycling of lithium-ion batteries – A research review. 2019, abgerufen am 18.02.2020 von <https://www.energimyndigheten.se/globalassets/forskning-innovation/overgripande/state-of-the-art-in-reuse-and-recycling-of-lithium-ion-batteries-2019.pdf>.
- ¹⁹ Melin, H. E., The lithium-ion battery end-of-life market 2018-2025. *Circular Energy Storage*, United Kingdom 2018, abgerufen am 28.02.2020 von http://www3.weforum.org/docs/GBA_EOL_baseline_Circular_Energy_Storage.pdf.
- ²⁰ Ojanen, S.; Lundström, M.; Santasalo-Aarnio, A.; Serna-Guerrero, R., Challenging the concept of electrochemical discharge using salt solutions for lithium-ion batteries recycling. *Waste Management* 2018, 76, 242-249.
- ²¹ Dorella, G.; Mansur, M. B., A study of the separation of cobalt from spent Li-ion battery residues. *Journal of Power Sources* 2007, 170 (1), 210-215.
- ²² Tanii, T., 2000, U. S. Patent No. WO 00/19557, Takasago, Japan, Europäisches Patentamt.
- ²³ Myoung, J.; Jung, Y.; Lee, J.; Tak, Y., Cobalt oxide preparation from waste LiCoO₂ by electrochemical-hydrothermal method. *Journal of Power Sources* 2002, 112 (2), 639-642.
- ²⁴ Ferreira, D. A.; Prados, L. M. Z.; Majuste, D.; Mansur, M. B., Hydrometallurgical separation of aluminium, cobalt, copper and lithium from spent Li-ion batteries. *Journal of Power Sources* 2009, 187 (1), 238-246.
- ²⁵ Zhang, P.; Yokoyama, T.; Itabashi, O.; Suzuki, T. M.; Inoue, K., Hydrometallurgical process for recovery of metal values from spent lithium-ion secondary batteries. *Hydrometallurgy* 1998, 47 (2), 259-271.
- ²⁶ Mishra, D.; Kim, D.-J.; Ralph, D. E.; Ahn, J.-G.; Rhee, Y.-H., Bioleaching of metals from spent lithium ion secondary batteries using *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Waste Management* 2008, 28 (2), 333-338
- ²⁷ Lee, C. K.; Rhee, K.-I., Preparation of LiCoO₂ from spent lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources* 2002, 109 (1), 17-21.
- ²⁸ Freitas, M. B. J. G.; Garcia, E. M., Electrochemical recycling of cobalt from cathodes of spent lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources* 2007, 171 (2), 953-959.
- ²⁹ Li, L.; Lu, J.; Ren, Y.; Zhang, X. X.; Chen, R. J.; Wu, F.; Amine, K., Ascorbic-acid- assisted recovery of cobalt and lithium from spent Li-ion batteries. *Journal of Power Sources* 2012, 218, 21-27.

- ³⁰ Li, J.; Zhao, R.; He, X.; Liu, H., Preparation of LiCoO₂ cathode materials from spent lithium-ion batteries. *Ionics* 2009, 15 (1), 111-113.
- ³¹ Kim, D.-S.; Sohn, J.-S.; Lee, C.-K.; Lee, J.-H.; Han, K.-S.; Lee, Y.-I., Simultaneous separation and renovation of lithium cobalt oxide from the cathode of spent lithium ion rechargeable batteries. *Journal of Power Sources* 2004, 132 (1), 145-149
- ³² Rasenack, K.; Goldmann, D., Herausforderungen des Indium-Recyclings aus LCD-Bildschirmen und Lösungsansätze. 2014, abgerufen am 18.02.2020 von https://www.vivis.de/wp-content/uploads/RuR7/2014_RuR_205_216_Rasenack.
- ³³ Tan, Q.; Li, J., Recycling Metals from Wastes: A Novel Application of Mechanochemistry. *Environmental Science & Technology* 2015, 49 (10), 5849-5861.
- ³⁴ Tesar, M.; Öhlinger, A., FLACHBILDSCHIRMALTGERÄTE Anforderungen an die Behandlung und Status in Österreich. 2012, abgerufen am 18.02.2020 von <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REPO384.pdf>.
- ³⁵ Angerer, G.; Marscheider-Weidemann, F.; Lüllmann, A.; Erdmann, L.; Scharp, M.; Handke, V.; Marwede, M., Rohstoffe für Zukunftstechnologien. 2009, abgerufen am 18.02.2020 von https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccn/2009/Schlussbericht_lang_20090515.pdf.
- ³⁶ Li, J.; Gao, S.; Duan, H.; Liu, L., Recovery of valuable materials from waste liquid crystal display panel. *Waste Management* 2009, 29 (7), 2033-2039.
- ³⁷ Commission, E., Critical Raw Materials for the EU. Report of the Ad-Hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials. 2010, 2010, 84.
- ³⁸ Bauer, D.; Diamond, D.; Li, J.; McKittrick, M.; Sandalow, D.; Telleen, P., Critical Materials Strategy - U.S. Department of Energy 2011, (2011), 196.
- ³⁹ Lewis, B. G.; Paine, D. C., Applications and Processing of Transparent Conducting Oxides. *MRS Bulletin* 2000, 25 (8), 22-27.
- ⁴⁰ Ferella, F.; Belardi, G.; Marsili, A.; De Michelis, I.; Vegliò, F., Separation and recovery of glass, plastic and indium from spent LCD panels. *Waste Management* 2017, 60, 569-581.
- ⁴¹ Zhang, K.; Wu, Y.; Wang, W.; Li, B.; Zhang, Y.; Zuo, T., Recycling indium from waste LCDs: A review. *Resources, Conservation and Recycling* 2015, 104, 276-290; Y. He and Z. Xu The status and development of treatment techniques of typical waste electrical and electronic equipment in China: A review, *Waste Management & Research*, 2014, Vol. 32(4) 254-269;
- ⁴² Zhang, L.; Xu, Z., A review of current progress of recycling technologies for metals from waste electrical and electronic equipment. *Journal of Cleaner Production* 2016, 127, 19-36.
- ⁴³ Sun, B.; Mindemark, J.; Edström, K.; Brandell, D., Realization of high performance polycarbonate-based Li polymer batteries. *Electrochemistry Communications* 2015, 52, 71-74.
- ⁴⁴ Matsui, S.; Muranaga, T.; Higobashi, H.; Inoue, S.; Sakai, T., Liquid-free rechargeable Li polymer battery. *Journal of Power Sources* 2001, 97-98, 772-774.
- ⁴⁵ Cai, Z.; Liu, Y.; Liu, S.; Li, L.; Zhang, Y., High performance of lithium-ion polymer battery based on non-aqueous lithiated perfluorinated sulfonic ion-exchange membranes. *Energy & Environmental Science* 2012, 5 (2), 5690-5693.
- ⁴⁶ Contestabile, M.; Panero, S.; Scrosati, B., A laboratory-scale lithium-ion battery recycling process. *Journal of Power Sources* 2001, 92 (1), 65-69.
- ⁴⁷ Linergy, Grundlagen der Akkutechnik - Linergy. 2019, abgerufen am 06.02.2020 von <https://linergy.de/wiki/grundlagen-der-akkutechnik/>.
- ⁴⁸ Y. Song, Y. Zhao, *Separation and Purification Technology* 2018, 206, 335-342.
- ⁴⁹ <https://www.henkel-adhesives.com/de/de/produkte/industrielle-klebstoffe/strukturklebstoffe.html>
- ⁵⁰ L. Rocchetti, A. Amato, V. Fonti, S. Ubaldini, I. De Michelis, B. Kopacek, F. Vegliò, F. Beolchini, Cross-current leaching of indium from end-of-life LCD panels, *Waste Management*, Volume 42, 2015, Pages 180-187, ISSN 0956-053X.
- ⁵¹ Li, J.; Gao, S.; Duan, H.; Liu, L., Recovery of valuable materials from waste liquid crystal display panel. *Waste Management* 2009, 29 (7), 2033-2039.
- ⁵² M. Ueberschaar, M. Schlummer, D. Jalalpoor, N. Kaup, V. S. Rotter Potential and Recycling Strategies for LCD Panels from WEEE Recycling, 2017, 2, 7; doi:10.3390/recycling2010007
- ⁵³ S.-J. Koo, C.-S. Ju, Preparation of indium oxide from waste indium tin oxide targets by oxalic acid *Korean J. Chem. Eng.*, 35(1), 251-256 (2018).
- ⁵⁴ E. Yarali, C. Koutsiaki, H. Faber, T. Anthopoulos, Recent Progress in Photonic Processing of Metal Oxide Transistors, *Advanced Functional Materials* May 2020, DOI: 10.1002/adfm.201906022