

# Seltene Erden & Co. in der digitalen Nachhaltigkeitsbildung

Lernen mit und über den nachhaltigen Einsatz

von Tablets in der Schule

Aktenzeichen der DBU: 34467/01-41  
Aktenzeichen der Nachbewilligung DBU: 34467/02

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

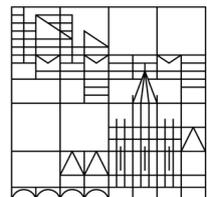
[www.dbu.de](http://www.dbu.de)

## Abschlussbericht

Projektbeginn: Oktober 2018  
Projekt Ende: Juli 2023  
Projektlaufzeit: 58 Monate

**Prof. Dr. J. Huwer,**  
**Dr. Sabrina Syskowski**  
Universität Konstanz  
Fachdidaktik der Naturwissenschaften  
Universitätsstraße 10  
78464 Konstanz

Universität  
Konstanz



**Prof. Dr. I. Eilks, Dr. A. Siol,**  
**M.Ed. C. Lathwesen**  
Universität Bremen  
Institut für die Didaktik  
der Naturwissenschaften (IDN)  
Leobener Straße 4, NW 2  
28359 Bremen



Universität  
Bremen

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Kurzfassung des Berichts</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Anlass und Zielsetzungen des Projekts</b> .....	<b>4</b>
3.1	<i>Anlass des Projektes</i> .....	4
3.2	<i>Zielsetzung des Projektes</i> .....	8
<b>4</b>	<b>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</b> .....	<b>10</b>
4.1	<i>Angewandte Methoden</i> .....	10
4.2	<i>Kooperation und Arbeitsaufteilung</i> .....	10
4.3	<i>Darstellung der Arbeitsschritte inklusive Zeitplan</i> .....	11
<b>5</b>	<b>Ergebnisse: Entwicklung, Adaption und Implementation der Schülerlaborangebote</b> .....	<b>13</b>
5.1	<i>Methodische Überlegungen:</i> .....	13
5.2	<i>Digitale Varianten</i> .....	14
5.2.1	Digitale Lernumgebung zu Neodym .....	15
5.2.2	Digitale Lernumgebung zu Lithium.....	17
5.2.3	Digitale Lernumgebung zu Kupfer.....	17
5.2.4	Digitale Lernumgebung zu Gold .....	18
5.2.5	Digitale Lernumgebung zu Aluminium.....	18
5.3	<i>Die Schülerlaborangebote</i> .....	19
5.3.1	Übergeordneter Baustein Demontage.....	21
5.3.2	Baustein 1: Lithium-Ionen-Akkumulator.....	21
5.3.3	Baustein 2: Kupfer und Gold im Mainboard.....	22
5.3.4	Baustein 3: Aluminium im Gehäuse .....	22
5.3.5	Baustein 4: K-Stoffe (Kunst- & Klebstoffe) .....	23
5.3.6	Baustein 5: Lautsprecher am Beispiel Neodym.....	24
5.3.7	Baustein 6: Display.....	24
5.3.8	Life Cycle Assessment von Tablets – Ökobilanz.....	25
<b>6</b>	<b>Öffentlichkeitsarbeit</b> .....	<b>26</b>
6.1	<i>Lehrkräftefortbildungen, Vorträge und sonstige Öffentlichkeitsarbeit</i> .....	27
6.2	<i>Publikationen zum Thema:</i> .....	30
6.2.1	Unterrichtsmaterial .....	30
6.2.2	Erschienene Publikationen .....	30
6.2.3	Ausstehende Publikationen .....	31
6.2.4	Sonstige Dissemination: .....	31
6.2.5	Projekthomepages:.....	31
<b>7</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>32</b>
7.1	<i>Inwieweit wurden die verfolgten Ziele erreicht?</i> .....	32
7.2	<i>Woraus ergeben sich die Abweichungen der erhaltenen Ergebnisse?</i> .....	32
7.3	<i>Wie gestaltete sich die Arbeit mit den unterschiedlichen Kooperationspartnern?</i> .....	32
7.3.1	Synergie zwischen Konstanz und Bremen .....	32
7.3.2	Interne Kommunikation, Projekt- und Beiratstreffen.....	33
<b>8</b>	<b>Verstetigung</b> .....	<b>34</b>
<b>9</b>	<b>Fazit</b> .....	<b>34</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>36</b>

## **1 Einleitung**

Der vorliegende Abschlussbericht stellt die im Zeitraum Oktober 2018 bis Juli 2023 erarbeiteten Projektergebnisse dar. Die ungewöhnlich lange Projektlaufzeit war geprägt durch die Corona-Pandemie und einem Lehrstuhlwechsel von Prof. Huwer mit den dadurch bedingten temporären Reibungsverlusten.

Die Nachwirkungen der Corona-Pandemie beeinflussen unser Projekt im Berichtszeitraum - genauso wie die gesamte Bildungslandschaft - nach wie vor. Einerseits hatten die Schulen eine Unterrichtsgarantie gegeben und von Schließungen abgesehen, andererseits bestanden im laufenden Betrieb einige Hürden: So fand an den Hochschulen das Sommersemester 2021 ausschließlich virtuell statt; ein Schülerlaborbetrieb war an den beteiligten Universitäten nicht möglich. War der Beginn des Wintersemesters 2021/2022 noch in Präsenz, so stellte sich wegen den „Delta“- und „Omikron“-Wellen bald wieder ein digitaler Betrieb ein. Die von uns anvisierten Öffnungen der Schülerlabore ab November 2021 konnten leider nicht realisiert werden. Mit dem Wegfall der meisten Beschränkungen ab April 2022 standen aus Sicht der Beschränkungen dem verstärkten Präsenzangebot die Corona Pandemie nichts mehr entgegen. Da Schulen etwas verhalten in dem Besuch von Universitäten waren, konnten wir mit einem On-Tour Angebot einige Schüler\*innengruppen erreichen.

Es konnten ausgewählte Angebote für das Distance-Learning entwickelt und evaluiert werden, die auch als Ergänzung zu einem Präsenzangebot im Schülerlabor genutzt werden können. Eine Konzeption zur Übertragung und Umsetzung von Laborpraktika wurde entworfen, adaptiert, wurde seit Herbst 2022 umgesetzt und danach verstetigt.

## **2 Kurzfassung des Berichts**

Ziel des Projekts war die Entwicklung und Implementation von Schülerbildungs- und Schülerexperimentierangeboten zur Umwelt- und Nachhaltigkeitsbildung rund um das digitale Medium Tabletcomputer. Die Bildungsangebote haben eine Ausrichtung an mediendidaktischen, chemischen und physikalisch-technischen Themen mit Nachhaltigkeits- oder Umweltbezug. Die Angebote wurden zunächst im Schülerlabor „iChemLab“ der Chemiedidaktik der PH in Weingarten und im „Schülerlabor Chemie“ & „ARiSELAB“ an der Universität Konstanz entwickelt und zusätzlich auch im Schülerlabor „FreiEx“ an der Universität Bremen implementiert. Die Angebote richteten sich an die Jahrgangsstufen 7-13 der allgemein- und berufsbildenden Schulen der Sekundarstufen I + II.

Alleinstellungsmerkmal dieses Angebots war die Instrumentalisierung eines digitalen Mediums auf zweierlei Ebenen: zum einen bildet die Hardware der Tablets selbst den Lerngegenstand und wird hinsichtlich einer nachhaltigen Nutzung und eines effektiven Recyclings des anfallenden Elektroschrotts in das Zentrum des Lernens gestellt. Zum anderen wirken die Tablets als Lernwerkzeuge bzw. Lernbegleiter, um neue mediendidaktische Zugänge bei der Behandlung des Themas „Recycling von Tablets“ zur Förderung eines breiten Spektrums an Kompetenzen zu entwickeln.

Hierzu wurde ein Angebot zu vier Themenfeldern für die Sekundarstufe I und ein Angebot für die Sekundarstufe II entwickelt, die sich - ausgehend von der baulichen Konstruktion von Tablets - mit den wichtigsten funktionellen Einheiten, der Identifikation der stofflichen Zusammensetzung und den Möglichkeiten einer zeitgemäßen und effektiven Rückgewinnung werthaltiger Fraktionen befassen. Die umwelt- und nachhaltigkeitsrelevanten Fragestellungen mit Bezug zu Chemie und Technik sollten sich sowohl in ihrer experimentellen als auch digitalen Umsetzung sinnvoll ergänzen, um umfangreiche Hintergrundinformationen zu vermitteln und gleichzeitig sicherheitsrelevante Risiken zu vermeiden.

Die Angebote wurden nach der Strukturierung in Arbeitspakete aufgeteilt und den beiden Projektpartnern zugewiesen. An beiden Standorten wurden diese schrittweise entwickelt. Danach wurden sie beim jeweils anderen Kooperationspartner adaptiert. Die Entwicklung und Implementation des Schülerbildungs- und Schülerexperimentierangebotes wurden im letzten halben Jahr weiter vorangetrieben.

Der Fokus der Entwicklungen im Projektzeitraum lagen vor dem Hintergrund der pandemiebedingten Einschränkungen von Präsenzveranstaltungen in Schulen und Universitäten auf dem zweiten Schwerpunkt, der Entwicklung von digitalen Lehr-Lernumgebungen, die auch auf die Distanz (im sogenannten Distance-Learning) eingesetzt werden können.

Für eine langfristige Perspektive wurden und werden die Bildungsangebote schließlich an beiden Standorten implementiert, mit zusammen 30 Lerngruppen durchgeführt und über den Förderzeitraum hinaus für mindestens weitere drei Jahre vorgehalten. Parallel zur Implementation wurden die Bildungsangebote sukzessive auch in die Lehramtsausbildung für die Fächer Chemie (zusätzlich Biologie und Physik an der Universität Konstanz) an den beiden Hochschulen integriert und über Lehrerfortbildungen der beteiligten Chemielehrerfortbildungszentren verbreitet.

### **3 Anlass und Zielsetzungen des Projekts**

#### **3.1 Anlass des Projektes**

Die Kultusministerkonferenz rückt in ihrem Beschluss „*Kompetenzen in der Digitalen Welt*“ (KMK, 2016) den produktiven und reflektierten Umgang mit digitalen Medien in den Mittelpunkt schulischer Bildung. Die entsprechenden digitalen Kompetenzen sollen jedoch nicht in einem eigenständigen Fach „Medienbildung“, sondern im Fachunterricht vermittelt und gefördert werden. Damit sollen sich fachliche Inhalte mit digitalen Fertigkeiten sinnvoll ergänzen. Unter anderem sieht der Kompetenzbereich 4 vor, dass „*Umweltauswirkungen digitaler Technologien*“ berücksichtigt werden sollen (KMK, 2016, S. 17) – eine Kompetenz, die wesentlich in den Bereich einer digital bezogenen MINT-Nachhaltigkeitsbildung fallen sollte.

Zeitnah wurde mit dem IT-Gipfel 2016 der Bundesregierung das digitale Zeitalter im deutschen (schulischen) Bildungssystem ausgerufen. Bildungsministerin Prof. Dr. Johanna Wanka stellte mit ihrem „digitalpakt“ fünf Milliarden Euro (später während der Corona Pandemie aufgestockt) für den Breitbandausbau und die Anschaffung von Hardware für Schulen in Aussicht. So titelt die Tageschau: „*Kaum ein Schüler hat hierzulande die Chance, jeden Tag einen Schulcomputer zu nutzen. Das soll sich jetzt ändern. Mit einem Milliardenprogramm will Bildungsministerin Wanka die deutschen Schulen technisch auf den neuesten Stand bringen*“ (<https://www.tagesschau.de/inland/wanka-digitalisierung-101.html>).

Die aufgeworfene Frage ist mehr als berechtigt: Die Anschaffung von Hardware führt zwangsläufig zur Herausforderung des Behandelns und Recyclens einer größer werdenden Menge Elektroschrott. Dies ist nur zu rechtfertigen, wenn die Hardware zuvor durch sinnvolle methodisch-didaktische Konzepte auch gewinnbringend eingesetzt wurde. Und obwohl es entsprechende Konzepte erst in Ansätzen gibt, weiterhin großer Nachholbedarf in der Lehrerfortbildung besteht und die Gelder noch nicht ausgeschüttet wurden, machen sich viele Schulen, Schulträger und auch ganze Bundesländer bereits eigenständig auf den Weg, ihre Schulen mit IT-Hardware auszustatten. So wurden bis 2017 beispielsweise in Schulen des Schulträgers Mainz-Bingen (Rheinland-Pfalz) ca. 2.500 Tablets beschafft, wovon ca. 2.300 Geräte iPads sind. Sogar „One-to-One“ Schulen, in denen jede/r Lernende ein eigenes Schul-iPad besitzt, sind keine Utopie mehr, sondern heute bereits Realität. So setzt z.B. die IGS Sprendlingen 959 iPads in einer einzigen Schule ein (Quelle/Auskunft: Kreisverwaltung Mainz-Bingen, Nils Korndörfer, 24.10.2017). Selbst das vergleichsweise kleine Saarland hat bereits mit einer Fördersumme von 1.000.000 € erste Mediensschulen ausgestattet (vgl. Staskevicius, 2016).

Nicht nur aus bildungspolitischer Sicht ist ein kompetenter und verantwortungsbewusster Umgang mit digitalen Medien und dem dazu notwendigen Konsum neuer Hardware eine berechtigte Forderung (Staskevicius, 2016). Auch spielen geopolitische und wirtschaftliche Interessen bei der Umsetzung der Digitalisierung und ihren Folgen eine wichtige Rolle. Es sind zunehmend Risiken bei der Produktion der Geräte selbst absehbar. Lieferengpässe und -abhängigkeiten müssen begrenzt oder vermieden werden, etwa zu politisch instabilen, mineralexportierenden Ländern oder solchen, in denen unter zum Teil ökologisch fragwürdigen und inhumanen Bedingungen Erze gewonnen und verarbeitet werden (z.B. Coltan-Abbau in der DR Kongo., REE-Gewinnung in China) (Zepf et al., 2014, [www.grida.no/news](http://www.grida.no/news)). Seit Mai 2017 gibt es in der EU die Verordnung über Mineralien aus Konfliktgebieten (Verordnung (EU) 2017/821), mit der ein System für die Erfüllung der Sorgfaltspflicht in der Lieferkette geschaffen wurde, um die Möglichkeiten für bewaffnete Gruppen und Sicherheitskräfte zum Handel mit Zinn, Tantal und Wolfram, deren Erzen und Gold einzuschränken. Ferner ist Europa aufgrund fehlender mineralischer Vorkommen nahezu vollständig von Erzimporten abhängig, Die Europäische Kommission veröffentlicht hierzu regelmäßig Statusberichte und hat im September 2017 in einer Mitteilung 27 kritische Rohstoffe benannt. Bei ihnen sind das Risiko eines Versorgungsengpässes und dessen Folgen für die Wirtschaft größer als bei den meisten anderen Rohstoffen (Mitteilung EU, 2017). China ist das einflussreichste Land für die weltweite Versorgung mit kritischen Rohstoffen, z.B. seltene Erden, Magnesium, Wolfram, Antimon, Gallium und Germanium. Mehrere andere Länder dominieren die Versorgung mit anderen Rohstoffen, etwa Brasilien (Niob) oder die USA (Beryllium und Helium). Die Versorgung mit Metallen der Platingruppe ist auf Russland (Palladium) und Südafrika konzentriert (Iridium, Platin, Rhodium und Ruthenium). In der Liste der kritischen Rohstoffe sind schwere seltene Erden (Dysprosium, Erbium, Europium, Gadolinium, Holmium, Lutetium, Terbium, Thulium, Ytterbium, Yttrium), leichte seltene Erden (Lanthan, Cer, Praseodym, Neodym, Samarium) und Metalle der Platingruppe (Palladium, Platin, Rhodium, Ruthenium, Iridium) als Gruppen aufgeführt bewertet. Es handelt sich demnach nicht nur um 27 sondern eigentlich um 27+15 Rohstoffe mit kritischem Versorgungsstatus. Zu den mit der Produktion verbundenen Risiken kommt in vielen Fällen erschwerend hinzu, dass kritische Rohstoffe in ihren Anwendungsbereichen gar

nicht oder nur schwer ersetzt werden können und ihre Rückgewinnungsquoten (noch) nicht ausreichend sind.

Somit besteht bei der ordnungsgemäßen Verwertung von Elektro- und Elektronikschrotten Handlungsbedarf. Die EU-Kommission hat bereits 2002 und 2003 als Reaktion auf die Entsorgungsproblematik zwei Richtlinien erlassen: Die WEEE-Richtlinie (Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronik-Altgeräte) und die RoHS-Richtlinie (Verwendungsbeschränkung bestimmter gefährlicher Stoffe). Während die RoHS-Richtlinie die Zielsetzung verfolgt, die Verwendung von gefährlichen Stoffen – hierzu zählen besonders giftige Schwermetalle, Weichmacher und chlorierte Flammschutzmittel - in Produkten zu reduzieren, wurde durch den Erlass der WEEE-Richtlinie ein gesetzlicher Rahmen geschaffen, um ausgediente Elektro- und Elektronik-Geräte von Verbrauchern einzusammeln und den Anteil dieser Geräte am Hausmüll zu reduzieren. Durch die gesteuerte und kontrollierte Verwertung soll außerdem der illegale Export von Elektroaltgeräten ins Ausland bekämpft werden, sollen seltene und wertvolle Rohstoffe wiederverwendet und die negativen Auswirkungen auf die Umwelt und die Gesundheit reduziert werden. Die WEEE-Richtlinie der EU zum Umgang mit Elektronikschrott wird in Deutschland durch das Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) seit 2005 umgesetzt (Huisman et al., 2007).

Vor diesem Hintergrund hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in den vergangenen Jahren umfangreiche Anstrengungen unternommen, auf nationaler Ebene entsprechende Forschung für Nachhaltige Entwicklung voranzutreiben (<https://www.fona.de/>). Gemeinsam mit dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) hat das BMBF 2012 den Green Economy Agendaprozess gestartet (<https://www.fona.de/de/leitinitiative-green-economy-19689.html>). Neben den Leitinitiativen zur Energieeffizienz, der Green Economy und zur Zukunftsstadt wurde explizit der Forschungsschwerpunkt zur Rohstoffeffizienz ausgerufen. Es sind neue Forschungsansätze und Technologieentwicklungen nötig, um die weltweit immer knapper und teurer werdenden Rohstoffe auch zukünftig zur Verfügung zu haben. „...Die Rohstoffforschung des BMBF verfolgt dazu folgende strategische Ansätze (<https://www.fona.de/de/rohstoffeffizienz-19766.html>):

Rohstoffproduktivität steigern, Rohstoffbasis sichern und verbreitern, kleine und mittlere Unternehmen fördern, die Umsetzung beschleunigen sowie international zusammenarbeiten“.

Prioritäre Themen des hierzu aufgelegten „r+-“Programms sind neben der Steigerung der Material- und Rohstoffeffizienz vor allem die Rückführung hochwertiger Rohstofffraktionen aus Abfallströmen. So sollen, z.B. durch technische Modifikationen stationärer Sortieranlagen zur Aufbereitung industrieller Reststoffe, bei der Rückgewinnung von Nicht-Eisen-(NE)-Metallen aus Elektroschrott auch die schlacke- und die nicht schlacke-basierten Feinfraktionen (Partikelgröße < 6 mm) industrieller Reststofffraktionen einbezogen werden. Dies soll auch die Aufbereitung bereits deponierter Reststoffe städtischer sowie kommunaler Industriehalden und Abfalldeponien einschließen (Stichwort „Urban Mining“).

Viele Anstrengungen werden aktuell unternommen, den besonders werthaltigen Elektrogeräte- und Elektronikschrott zu verwerten (Holm, 2014; Fraunhofer Institut, 2009; Rüßmann, 2014; UBA 2010 & 2017; Sander et al., 2017). Dabei beschränken sich die Bemühungen nicht nur auf Großunternehmen, sondern zielen auch auf KMU ab (ESG, Buchert, 2012, Böttcher & Thorenz, 2013; Hempel et al., 2017). Durch diesen Kontext motiviert, gibt es bereits Forschung

mit Handlungsempfehlungen auch für kleinere Unternehmen, sich mit der Ressourcenschonung durch Innovationen in Wertschöpfungsnetzwerken zu beschäftigen ([www.resource-lab.de](http://www.resource-lab.de), Böttcher, Reller & Thorenz, 2014).

Einige Projekte aus der fachdidaktischen Forschung bekräftigen die Notwendigkeit, besagte Schwerpunkte zum Gegenstand schulischer Bildung zu machen. So gibt es bereits Projekte, welche die seltenen Erden in der Hardware digitaler Medien fokussieren, jedoch über das Zerlegen eines Mobiltelefons und identifizieren wichtiger Metalle durch Sortieren selten hinausgehen (Kuse, Jeggle & Skiebe-Corette, 2018). Ebenso gibt es Vorhaben mit hauptsächlich physikalischen Hintergrund, mobile Endgeräte als Experimentalwerkzeuge einzusetzen, also den Einsatz digitaler Medien zur Messwerteerfassung in Experimenten mit nachhaltigkeitsbezogenen Fragestellungen zu stärken (z.B. iNature oder iMobilePhysics: Hirth, Kuhn, Müller, Rohs & Klein, 2016).

Die Entwicklung eines Unterrichtskonzepts, dass das Recycling der Hardware iPad als Lerngegenstand hat und methodisch sowie mediendidaktisch durch das Lernen mit dem iPad angereichert wird, knüpft genau hier an. Leider ist die durchschnittliche Lebensspanne von Tabletcomputern mit fünf Jahren relativ kurz, so dass durch die zunehmende Verbreitung dieser digitalen Lernwerkzeuge selbst ein Entsorgungsproblem entsteht.

Dieses Dilemma soll Gegenstand des hier vorgestellten Projekts zur transformativen naturwissenschaftlichen (Schul)Bildung an allgemein- und berufsbildenden Schulen sowie der universitären Lehramtsausbildung sein. So eignen sich Tabletcomputer aus gesellschaftlicher, sozio-ökonomischer und bildungswissenschaftlich-didaktischer Sicht, bei ihrem Einsatz in Schulen gleichermaßen sowohl Lernwerkzeug als auch Lerngegenstand zu sein.

Mit Hilfe digitaler Lernhilfen sollen systemische Zusammenhänge (z.B. zur Kreislaufwirtschaft) vermittelt und adressatengerecht sowie fach- und mediendidaktisch aufbereitet werden. Dies soll eine kritisch-konstruktive Auseinandersetzung mit dem digitalen Wandel in der Schule fördern. Zudem bieten die Digitalen Medien neue Möglichkeiten für sichere, effektivere und stärker individualisierte Lernprozesse. Chancen bestehen, z.B., in der Verbindung von formalem und nicht-formalem Lernen (Huyer & Eilks, 2017), neuen Wegen beim forschenden Lernen oder in der Visualisierung (McCollum, Regier, Leong, Simpson & Sterner, 2014). Die Komplexität eines Tabletcomputers mit seinen fast 40 enthaltenden Elementmetallen, verschiedenen organischen Substanzen (z.B. Kunst-, Farb-, und Klebstoffe) und dem Werkstoff Glas bieten bundeslandübergreifend eine Fülle inhaltlicher Zugänge zu curricularen chemiebasierten Themen in den Sekundarstufen I + II sowie in der Lehramtsausbildung. Hier sind u.a. die Themen Metalle, Kunststoffe, Elektrochemie, Säuren und Basen, Farbstoffe zu nennen. Die Präsenz und Nutzung elektronischer Geräte und Steuerungsmodule ist allgegenwärtig – die Kenntnis über deren Aufbau, Funktionsweise und Inhaltsstoffe hingegen ist nur partiell vorhanden.

Im Zentrum der Bildungsangebote steht die Rückgewinnung wichtiger Rohstoffe aus alten Tabletcomputern. Insbesondere die Rückgewinnung metallischer Elemente spielt in der EU sowohl technisch als auch ökonomisch eine bedeutende Rolle, da die EU nur begrenzt über nennenswerte mineralische Rohstoffvorkommen verfügt. Ziel dieser Bemühungen ist es, vor allem bei Edelmetallen (Au, Pt, Pd) und seltenen Erden (wie Ta, Ir, Nb, Dy) Recyclingquoten zu erhöhen und damit Versorgungsrisiken und -kosten zu minimieren (u.a. Forschungsinstitut Edelmetalle & Metallchemie, 2011; UBA ÖkoRess I, 2017).

Die Diskussion auch der geopolitischen Dimension des Themas „Nachhaltige Nutzung von Tablets“ ist integraler Bestandteil der zu entwickelnden Bildungsangebote. Durch digital aufbereitete Lehr- und Lernmaterialien erhalten die Lernenden Informationen über die bergbaulichen Bedingungen, die bei der Gewinnung von Mineralerzen und deren Weiterverarbeitung herrschen. Ebenso sollen die bereits oben genannten EU-Richtlinien und deren rechtliche Umsetzung in Deutschland Gegenstand des Lernens werden. Die Lernenden sollen Eindrücke in die ökologischen Folgen erhalten, die nichtsachgerechte Rohstoffgewinnung für die Flora und Fauna vor Ort haben kann. Die ökonomische Seite des Metallrecyclings wird ebenso thematisiert, wie die illegale Ausfuhr enormer Mengen Elektroschrotts in Länder Afrikas und Asiens, die massiv unter den Folgen unkontrollierter Freisetzung toxischer Bestandteile und den damit verbundenen Beeinträchtigungen für die Umwelt und für die Gesundheit der dort lebenden Menschen leiden (Zepf, 2015; Hempel et al., 2017; van Abel, 2017).

Die Corona Pandemie 2020 hatte ihrerseits Auswirkungen (z.B. Schulschließungen, zeitweise Verbot des Besuchs sowie Schließungen von außerschulischen Lernorten) auf den Anlass und die Zielsetzungen des Projektes, sodass wir auch eine Verlängerung im Projekt beantragen mussten. Gleichzeitig wurde die Digitalisierung durch die Corona-Pandemie und die dadurch bedingten Schulschließungen katalysiert: So wurden Tablets in großem Stil für Lehrkräfte und für Schülerinnen und Schüler angeschafft. D.h. inhaltlich hat das Projekt während der Pandemie an Relevanz deutlich gewonnen. Die von uns bei Antragstellung prognostizierte Annahme, dass überwiegend die Apple Geräte „iPads“ angeschafft werden würden, bestätigte sich. Zeitgleich hat sich die Firma Apple (unabhängig vom Bildungssektor) auch klar zu einer eigenen Nachhaltigkeitsstrategie bekannt. So werden bei dem von uns ausgewählten Tablet (das Apple iPad) als Lerngegenstand die Bemühungen seitens des Herstellers zu einer Kreislaufwirtschaft bzgl. der Ressourcen weiter vorangetrieben. Der Prozess der Digitalisierung des deutschen Schulsystems ist jedoch auch mit Projektende 2023 noch nicht abgeschlossen; sodass die Ergebnisse (insbesondere die Lernumgebungen) nach wie vor aktuell und wichtig sind.

### 3.2 Zielsetzung des Projektes

Die angesprochenen Dilemmata sollten Gegenstand eines an transformativer naturwissenschaftlicher (Schul)Bildung ausgerichteten Lehr-Lernkonzepts werden. Durch die kritisch-konstruktive Auseinandersetzung mit dem digitalen Wandel in der Schule sollte ein lernpsychologischer Mehrwert der Digitalisierung für die MINT-Nachhaltigkeitsbildung entstehen, die die ökologischen, ökonomischen und sozialen Risiken des Medieneinsatzes (als Hardware) nicht aus dem Blick verliert.

Insgesamt fokussierte das Projekt die Entwicklung zweier unterschiedlicher modularer Lernangebote, die es erlauben **mit Tablets über** nachhaltige Aspekte von **Tablets zu lernen**:

**Ziel 1:** Die Entwicklung eines „klassischen“, modularen Lernangebotes für Schülerlabore, bei dem sichere und anwendungsorientierte Experimente (z.B. die chemischen Prozesse bei der Herstellung, der Nutzung und dem Recycling von Tablets) mit digitalen Lernangeboten angereichert werden.

**Ziel 2:** Die Entwicklung eines **digitalen modularen Lernangebotes**, das ortsunabhängig und ohne ein Labor im Sinne des **Distance Learnings** genutzt werden kann. Dabei werden reale Experimente durch digitale Varianten ersetzt und versucht, ein möglichst immersives Lernerlebnis zu generieren.

## 4 Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

### 4.1 Angewandte Methoden

Das Projekt verfolgte den Ansatz eines Design Research (Plomp & Nieveen, 2013) mit starken Elementen kollaborativer Aktionsforschung, ausgehend von eigenen Erfahrungen in diesem Bereich (Eilks & Ralle, 2002 und viele folgende Arbeiten). Solche Ansätze arbeiten zyklisch mit der frühzeitigen Entwicklung erster Designs und der frühen und punktuellen Testung einzelner Elemente und ganzer Designs. Die Testung generiert Erfahrungen aber auch systematisch gesammelte Beobachtungen und Reflexionen der Schülerlaborbetreiber, die mit Lehrer- und Schülerrückmeldungen (erhoben über mündliches und schriftliches Feedback) trianguliert werden.

Ebenso wurde auf die in den Arbeitsgruppen laufende Grundlagenforschung zur Gestaltungen digitaler Lernumgebungen (z.B. Gestaltungsparameter von Augmented Reality Lehr-Lernumgebungen; Krug et al, 2021) zurückgegriffen.

### 4.2 Kooperation und Arbeitsaufteilung

Zentrale Herausforderung bei der Umsetzung des Projekts war, zum einen geeignete Recyclingverfahren zu finden und diese in das Curriculum einzubinden und zum anderen eine gut strukturierte Lernumgebung zu entwickeln, um den großen Umfang der Inhalte effizient erarbeiten zu können. Hinsichtlich der Recyclingverfahren der Stoffklassen ließen sich vor allem solche zum Kunststoffrecycling sehr gut adaptieren und in eine Schülerlaborumgebung integrieren. Im Bereich der Metalle stellte sich die Lage vor allem im Bereich der kritischen Rohstoffe etwas komplexer dar. Hier gab und gibt es auch in der aktuellen Forschung sehr wenig ausgereifte Verfahren, die den Labormaßstab schon überschritten haben. Zudem stellen diese Verfahren enorm hohe Ansprüche an die zum Teil sicherheitstechnisch anspruchsvolle Reaktionsführung, die einer Umsetzung im Schülerlabor entgegenstanden. Beispielsweise konnte durch Substitution des hyperkritischen Germaniums durch in Schulen verfügbares Zink, der Ersatz der Li-Ionen-Akkus durch Kunststoffattrappen oder Auswahl ungiftiger aber funktionaler OLED-Farbstoffe auf Kupferbasis die Konzeption modularer Schülerlaborangebote gelingen. Fanden sich keine Alternativen, wurden digitale Modellexperimente oder Videos zu industriellen Prozessen - bspw. für Gold, Gorillaglas, Neodym und Yttrium - erstellt. Dabei ist ein breiter Pool an möglichen Experimenten zusammengetragen worden, bei denen der Fokus auf den Eigenschaften, der Herstellung und dem Recycling einzelner Stoffgruppen sowie der Demontage von Tablets und Tabletbestandteilen liegt. Diese Experimente wurden an den Standorten in einer Pilotierungsuntersuchung auf ihre Eignung und Durchführbarkeit getestet, überarbeitet und anschließend in das didaktische Curriculum integriert. An den beiden Standorten wurden basierend auf dem etablierten Konzept „Lernen an Stationen“ die Schülerlaborangebote ohne strenge zeitliche Taktung strukturiert, um Möglichkeiten zum offenen und forschenden Experimentieren zu gewährleisten.

Auf Grund des großen Umfangs, wurden die Schülerlaborangebote, die nach verschiedenen Themenkomplexen aufgeteilt wurden (vgl. Tabelle 1), sowohl an der PH Weingarten / Universität Konstanz als auch an der Universität Bremen entwickelt. Die Universität Bremen fokussierte dabei die Entwicklung von Experimenten zur qualitativen und quantitativen Analyse von

Metallen sowie zu den Materialrubriken Glas und Klebstoffen. An der PH Weingarten / Universität Konstanz erfolgte eine Versuchsentwicklung zu den Themenkomplexen Metalle sowie Kunststoffe in Steckverbindungen und Gehäuseabdeckungen. In Abhängigkeit von der Altersstufe sollten die Versuche in verschiedenen Schwierigkeitsgraden adaptiert werden. Die Entwicklung der digitalen Lernumgebungen erfolgte an der Universität Konstanz.

### 4.3 Darstellung der Arbeitsschritte inklusive Zeitplan

Das Projekt gliederte sich in 3 Phasen, die inhaltlich aufeinander aufbauten (vgl. Tabelle 1).

Die erste Projektphase umfasste die Projektjahre 1 und 2: Hier wurden an der PH Weingarten und der Universität Bremen Experimente konzipiert und Material entwickelt. Da die Entwicklung mit der Erprobung und der Optimierung parallel laufen musste, war dies die intensivste Arbeitsphase im Vorhaben. Die Übersichtstabelle 1 gibt die inhaltliche Beschreibung der zu erstellenden Arbeitspakete wieder. Anhand dieser Übersicht wurden Unterrichts- und Versuchsmaterialien erstellt, nach Möglichkeit mit digitalen Tools versehen, deren Robustheit überprüft und mit sicherheitsrelevanten Daten sowie Geräte- und Materiallisten vervollständigt. Wenn möglich wurden diese Arbeiten im Rahmen von Qualifizierungsarbeiten (BSc. / MEd. / Staatsexamina) durchgeführt.

Die zweite Projektphase erstreckte sich etwa von Oktober 2020 bis April 2022 und umfasste die pandemiebedingten Einschränkungen des Projektes. Hier lag der Fokus auf der Entwicklung, Evaluierung und Finalisierung von digitalen Distance-Learning Angeboten zu den Projektthemen. Wenn möglich wurden diese Arbeiten im Rahmen von Qualifizierungsarbeiten (BSc. / MEd. / Staatsexamina) durchgeführt.

Die dritte Projektphase erstreckte sich etwa von April 2022 bis Juli 2023 und umfasste die post-pandemische Phase des Projektes. Hier lag der Fokus auf der finalen Anpassung, Evaluierung und Finalisierung der Schülerlaborangeboten. Diese wurden sowohl in den beteiligten Schülerlaboren als auch als Schülerlabor-on-Tour angeboten. Wenn möglich wurden diese Arbeiten im Rahmen von Qualifizierungsarbeiten (BSc. / MEd. / Staatsexamina) durchgeführt.

Die Corona Pandemie erzwang Anpassungen und Überarbeitungen unseres ursprünglichen Zeitplans, da ursprünglich eine zweite Projektphase nicht geplant war. Die DBU hatte uns dankenswerterweise eine Laufzeitverlängerung bis zum 31.07.2023 inklusive Nachfinanzierung genehmigt, um die Auswirkungen der Corona-Pandemie aufzufangen – an dieser Stelle nochmals ein herzliches Dankeschön für diese Unterstützung.

Tabelle 1: Zeitplan nach Tätigkeiten an den Partnerhochschulen

	Zeit	Tätigkeiten Uni Konstanz	Tätigkeiten Uni Bremen
Projektphase 1	1. Projekt-jahr 10/ 2018 – 10/ 2019	Literaturrecherche und Festlegung der Versuche	
		„Umzug“ des Projekts an die PH Weingarten (Wechsel Prof. Huwer von Universität des Saarlandes an die PH Weingarten)	
		Methoden zur Zerlegung von Tablets	
		Entwicklung von Versuchsangeboten zu EK6 und EK8 als Bachelorarbeiten	
		Entwicklung eines didaktisch passenden Kontextes (Didaktisches Curriculum)	
		Grundlagen LCA und Bestandteile von Tablets	
		Erarbeitung des Versuchskomplexes EK1 als Bachelorarbeit	
	2. Projekt-jahr 11/ 2019 – 10/ 2020	Erarbeitung der Versuchskomplexe EK2 bis EK6 in Bachelorarbeiten und Lehrveranstaltungen (bis Mitte 02/ 2020)	
		Evaluation und Optimierung der Versuche (ab 01/ 2020)	
		Fertigstellung und Implementierung SL-Angebote	
Erstellung digitaler Tools und Finalisierung des didaktischen Konzepts			
Projektphase 2		Evaluation der bisherigen Bildungsangeboten mittels Schülerlabor-on-Tour	
		Dissemination der Ergebnisse durch Konferenzbeiträge und Publikationen.	
	3. Projekt-jahr 11/ 2020 – 10/ 2021	Vielzahl von Bachelor- und Masterarbeiten mit kleinen Mikroentwicklungen zum Projekt mit besonderem Fokus auf digitale Lernumgebungen, die auch während Schulschließungen verwendet werden können.	
		Schülerlabor on Tour Angebot von Präsenzpraktika	
		Einstellung und Einarbeitung einer/s neuen Mitarbeiterin/s	
		Konzeption von digitalen Tools, insbesondere Virtuelle Lernumgebungen (AR und VR) in Mikrozyklen im Sinne des DBR Ansatzes	
		Netzwerk und Schularbeit, um die Tools bekannt zu machen	
		Dissemination und Publikation der Ergebnisse des Projektes	
	4. Projekt-jahr	Einstellung und Einarbeitung einer/s neuen Mitarbeiterin/s	
		Konzeption von digitalen Tools	
Projektphase 3	10/ 2021 – 11/ 2022	Weiterentwicklung der digitalen AR Lehr-Lernumgebung und Optimierung vorhandener Module in Mikrozyklen im Sinne des DBR Ansatzes	
		Dissemination und Publikation der Ergebnisse des Projektes	
	5. Projekt-jahr 11/ 2022 – 07/ 2023	Finalisierung und Erprobung des Angebotes durch einzelne DBR Zyklen zu den Schülerlabor und Schülerlabor on Tour Varianten	
		Start des regulären Schülerlaborbetriebs und Verstetigung in unser Angebot	
		Aufbereitung der Lernmaterialien für die abschließende Projektdissemination und - Publikation	
	Dissemination und Publikation der Ergebnisse des Projektes		

## 5 Ergebnisse: Entwicklung, Adaption und Implementation der Schülerlaborangebote

### 5.1 Methodische Überlegungen

Das Lernangebot untergliedert sich in vier Bausteine: Demontage, Eigenschaften, Herstellung & Funktion sowie Recycling & Substitution eines jeden Rohstoffs.

Tabelle 2: Strukturierung der Experimente

Baustein	Ziel
Demontage	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Auseinanderbauen des Tablets</li> <li>- Verortung einzelner funktioneller Komponenten</li> <li>- Untersuchung der Komponenten auf stoffliche Zusammensetzung</li> </ul>
Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Untersuchung der physikalischen und chemischen Eigenschaften der verbauten Stoffe</li> </ul>
Herstellung & Funktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Industrielle Herstellungsverfahren der Stoffe im Labormaßstab</li> <li>- Untersuchung der Funktionsweise einzelner Komponenten</li> </ul>
Recycling & Substitution	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recyclingverfahren einzelner Komponenten; wenn möglich im Labormaßstab durchführen</li> <li>- Vergleich mit alternativen Materialien</li> <li>- Effizienz und Notwendigkeit bewerten</li> </ul>

Die entwickelten Lernumgebungen folgenden dabei folgenden Prinzipien:

- Erstellt wurden Schülerlaborangebote für jeweils 3 Zeitstunden, die modular aus in sich kohärenten Teilthemen aufgebaut sind. Diese können im Umfang und der thematischen Ausrichtung mit Blick auf die jeweilige Lerngruppe angepasst werden. Jedes Schülerlaborangebot hat 3-5 in sich kohärente Teilthemen, aus denen in Absprache mit der Lehrkraft bzw. den Betreuern einer außerschulischen Lerngruppe eine Auswahl getroffen wird.
- Jedes Modul besteht aus 3-4 digitalen oder physischen Experimente, die bezüglich der Durchführbarkeit (Ausstattung der schulischen Fachräume, Reisemöglichkeit oder die digitale Variante) und somit auch motorischen und fachlichen Fähigkeiten der Schülerinnen und Schüler eine Bandbreite von „einfach“ bis „anspruchsvoll“ abdecken. Konzipiert sind die Modulangebote für Lernende ab Jahrgangsstufe 9 der allgemeinbildenden Schulen.
- Alle Versuchsanleitungen werden im Sinne der *Guided Inquiry* (angeleitetes forschendes Lernen mit gegebener Problemstellung aber offenem Lösungsweg) gestaltet. Diese sind mit Experimentierhilfekarten hinterlegt, so dass bei Nutzung der Karten auch ein *Structured Inquiry* (vorstrukturiertes forschendes Lernen mit schrittweise angeleitetem Lösungsweg) bis ggf. zum *Confirmatory Learning* (gegebene Problemstellung mit gegebenem Lösungsweg) möglich wird.
- Ausgewählte Modulsequenzen wurden im Schülerlabor-on-Tour angeboten. Nach Absprache mit den Lehrkräften kommt das Projektteam an die Schule. Voraussetzung für eine erfolgreiche Durchführung dieser Serviceleistung ist eine detaillierte Absprache über die räumliche Infrastruktur sowie sicherheits- und gerätetechnische Ausstattung

der Schule. Ggf. muss auch die digitale Infrastruktur vom Projektteam organisiert werden (Einrichtung eines mobilen Hot-Spots).

- Die digitalen Varianten der Projektphase 2, die für das Distance-Learning gestaltet wurden, beinhalten neben Lernbausteinen auch virtuelle Experimente und Experimentierumgebungen (z.B. virtuelles Labor). Hierzu wurden Lernangebote zu umwelt- und nachhaltigkeitsrelevanten Fragestellungen mit Bezug zum Aufbau, zur Funktionalität sowie Nutzung von Tabletcomputern entwickelt. Durch Veränderungen im inhaltlichen Zugang sind umfangreiche digitale Elemente entwickelt worden, die die Einbindung des Tablets als Lern-Instrument zur Durchführung von Lernstationen über das Tablet als Lernobjekt ermöglichen. Die Inhalte sind so konzipiert, dass jede Lernumgebung nicht länger als 30 Minuten Zeit in Anspruch nehmen sollte. Alleinstellungsmerkmal dieser Angebote war, dass digitale Elemente entwickelt wurden, die als Äquivalent zu den klassischen Laborversuchen gelten können. So gelang es, auch auf Lernende ab-zuzielen, die keinen Zugang zu Schülerlaboren haben, sei es aus Gründen der Reichweite oder Pandemie-bedingten Schulschließungen.

## 5.2 Digitale Varianten

Die digitale Variante umfasst kleine modulare Einheiten, die alle ähnlich aufgebaut sind: Im ersten Schritt lernen die Schüler\*innen den Aufbau eines iPads kennen, indem sie das iPad digital „zerlegen“. Dies wird technisch durch den Einsatz von Augmented Reality (AR5) visualisiert. AR bietet die Möglichkeit, die Realität mit virtuellen Elementen anzureichern und eröffnet damit gerade im Chemieunterricht einen neuen Zugang zu Visualisierungen von Prozessen auf submikroskopischer Ebene. Damit entfällt das „wirkliche“ Zerlegen der iPads, was durch die vielen verklebten Teile und den Bedarf an Spezialwerkzeugen für Laien schwierig ist und nicht ohne die Gefahr des Beschädigens des iPads einhergeht. Durch die Verlagerung dieses Schrittes ins Digitale können die Schüler\*innen trotzdem interaktiv alle baulichen Komponenten des iPads betrachten.

Um die Lernumgebung aufzurufen, wird das eigene iPad auf einem Triggerbild platziert, das den Code in die digitale Lernumgebung enthält. Um den Code zu scannen, bedarf es auf einem zweiten digitalen Endgerät (zweites Tablet oder Smartphone) der App *ZappAR*, die in gängigen App-Stores kostenfrei zum Download zur Verfügung steht. Die erste Ansicht ist die eines virtuellen iPads auf dem realen iPad, das auf dem Triggerbild platziert wurde, und Buttons, über die man die Lernumgebung steuern kann. Das virtuelle iPad lässt sich so durch einen Klick zerlegen und man gelangt zur Sprengansicht, die die einzelnen baulichen Komponenten des iPads darstellt. Diese lassen sich zudem drehen und wieder zurückdrehen, sodass sie multidimensional betrachtet werden können.

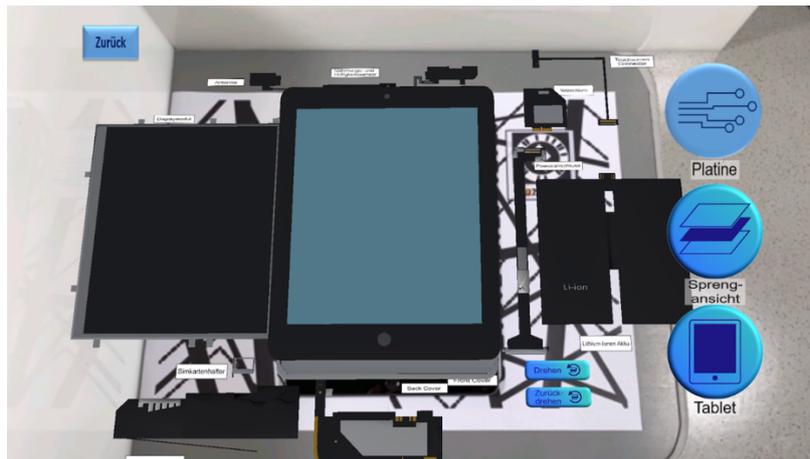


Abbildung 1: Zerlegen eines Tablets

Im nächsten Schritt geht es dann in die bauteilspezifische Lernumgebung, welche in den folgenden Unterkapiteln beschrieben werden:

### 5.2.1 Digitale Lernumgebung zu Neodym

Exemplarisch sei hier das Modul zu Neodym dargestellt, die anderen Module folgen derselben Logik: Neodym findet als Bestandteil von Neodym-Eisen-Bor-Dauermagneten in den miniaturisierten Lautsprechern von iPads Verwendung. Darüber wird in einer Textbox informiert, sobald Schüler\*innen die Lernumgebung über den Lautsprecher-Button betreten. Hier wird auf die Kritikalität des Rohstoffes eingegangen, um die Relevanz des Neodym-Recyclings und damit dieser Lerneinheit aufzuzeigen.

Darauffolgend können die Schüler\*innen selbstständig in der Lernumgebung navigieren. Um das Neodym aus den Magneten zu erhalten, wird der Nd-Fe-B-Magnet beim ausgewählten Versuch mit konzentrierter Schwefelsäure behandelt. Dabei entstehen Eisen(II)-sulfat und Neodym(III)-sulfat, Wasserstoff entweicht. Dieser Vorgang wird in der AR-Umgebung mittels animiertem Reaktionsprozess im dreidimensionalen Becherglas dargestellt. Die Reaktion wird zudem symbolisch erklärt. Bewegt sich der\*die Betrachter\*in, so bleiben die virtuellen Objekte an der zugeschriebenen Position. Somit lässt sich das Becherglas von allen Seiten betrachten. Darüber hinaus können Schüler\*innen die Animationen durch erneutes Betätigen der Buttons nach Belieben wiederholen und damit ihren Lern-Fortschritt individuell steuern.

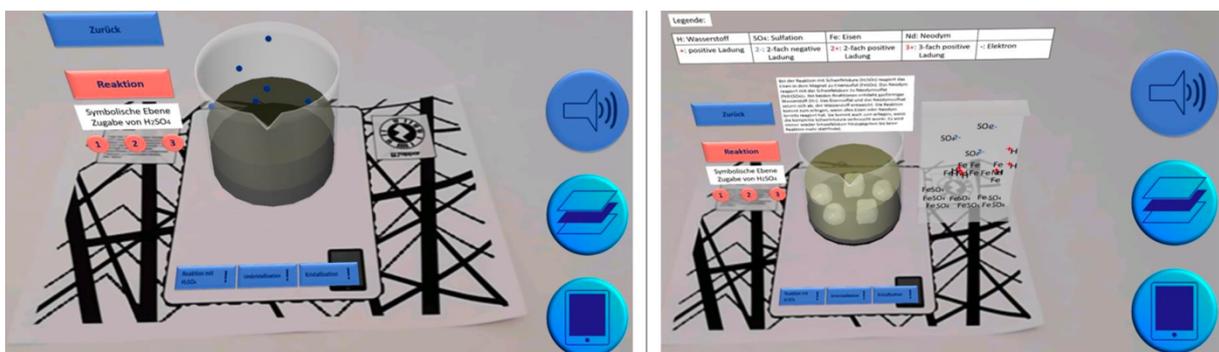


Abbildung 2: Darstellung der Reaktionen auf Symbolebene. Das Becherglas lässt sich virtuell "anfassen".

Neben der Symbolebene werden die Abläufe auch auf der Teilchenebene visualisiert. Das ist besonders bei der Umkristallisation des Neodym(III)-sulfats anschaulich. Die Teilchenebene mitsamt einer Legende und einer Textbox werden durch Klicken auf den Informations-Button eingeblendet. Dabei können die Schüler\*innen durch die Animationen rechts vom Becherglas nachvollziehen, was sich beim Waschvorgang auf der Teilchenebene ereignet.

Durch ein Zoom lässt sich die Teilchenebenen-Visualisierung zudem genauer betrachten. In dieser Lernumgebung werden folglich alle drei Ebenen des Johnstone-Dreiecks bedient: Makro-, Submikro- und Symbolebene.

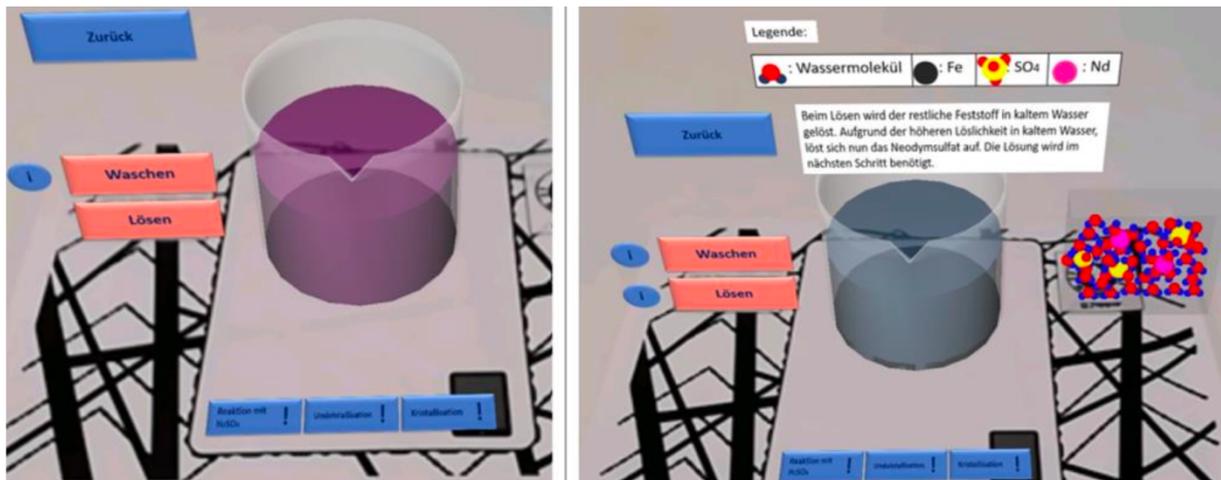


Abbildung 3: Visualisierung der Prozesse auf der Teilchenebene mithilfe von Animationen in einer AR-gestützten Lernumgebung

Alternativ wurde neben der AR Umgebung auch eine VR-Display basierte Lernumgebung entwickelt, die dieselben Versuche darstellte, aber keine reale Laborumgebung benötigte:

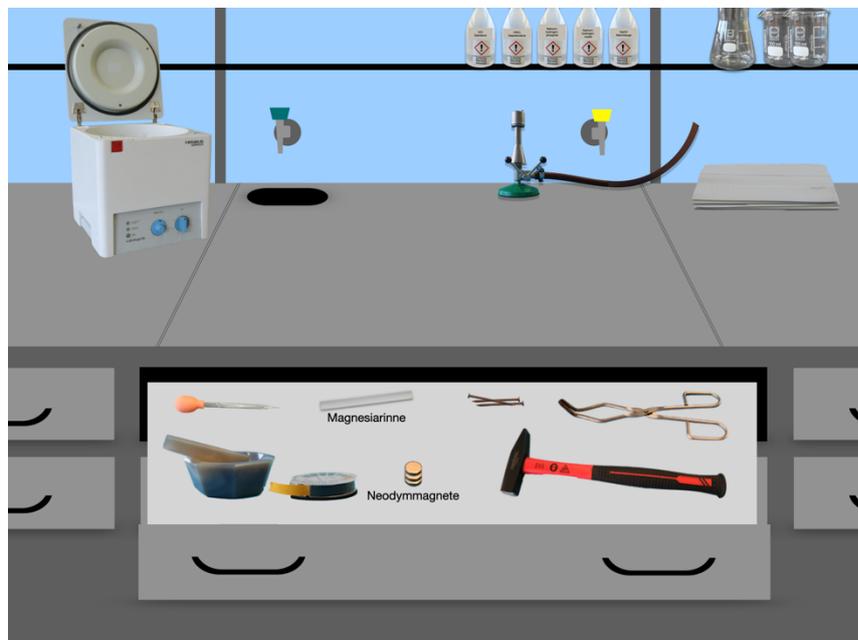


Abbildung 4. Neodymrecycling im virtuellen Labor im skeuomorphistischen Design, also einem Design, das die natürliche Welt nachempfiehlt.

## 5.2.2 Digitale Lernumgebung zu Lithium

Ein Beispiel aus der digitalen Lernumgebung zu Lithium:

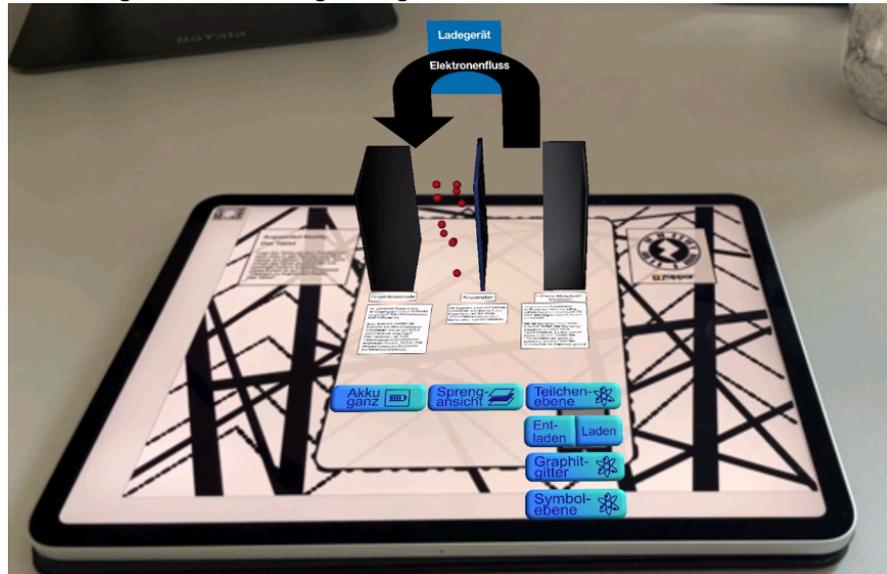


Abbildung 5: Darstellung der Reaktionen auf Symbolebene.

## 5.2.3 Digitale Lernumgebung zu Kupfer

Ein Beispiel aus der digitalen Lernumgebung zu Kupfer:

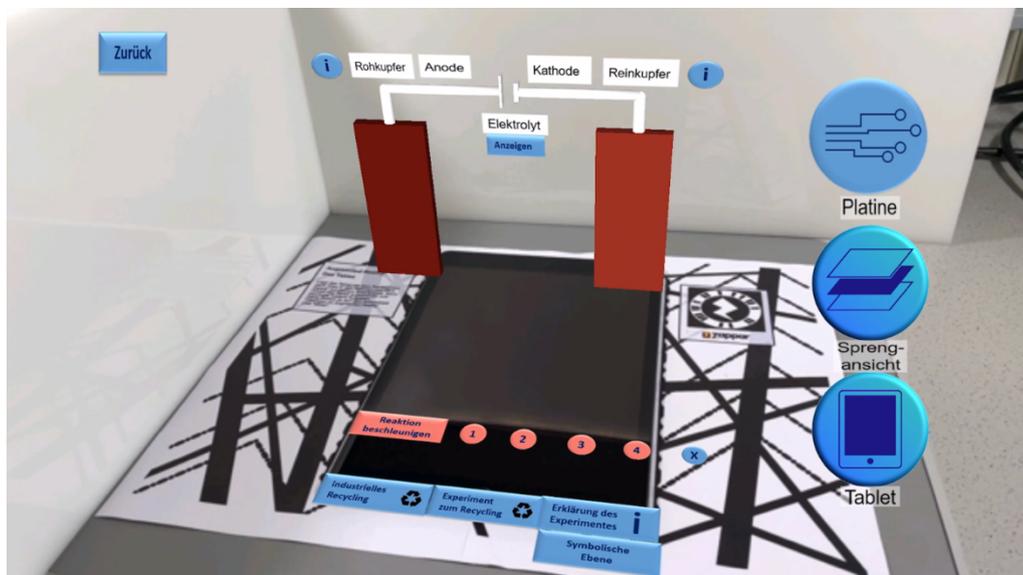


Abbildung 6: Darstellung der Reaktionen auf Makroebene.

## 5.2.4 Digitale Lernumgebung zu Gold

Ein Beispiel aus der digitalen Lernumgebung zu Gold:

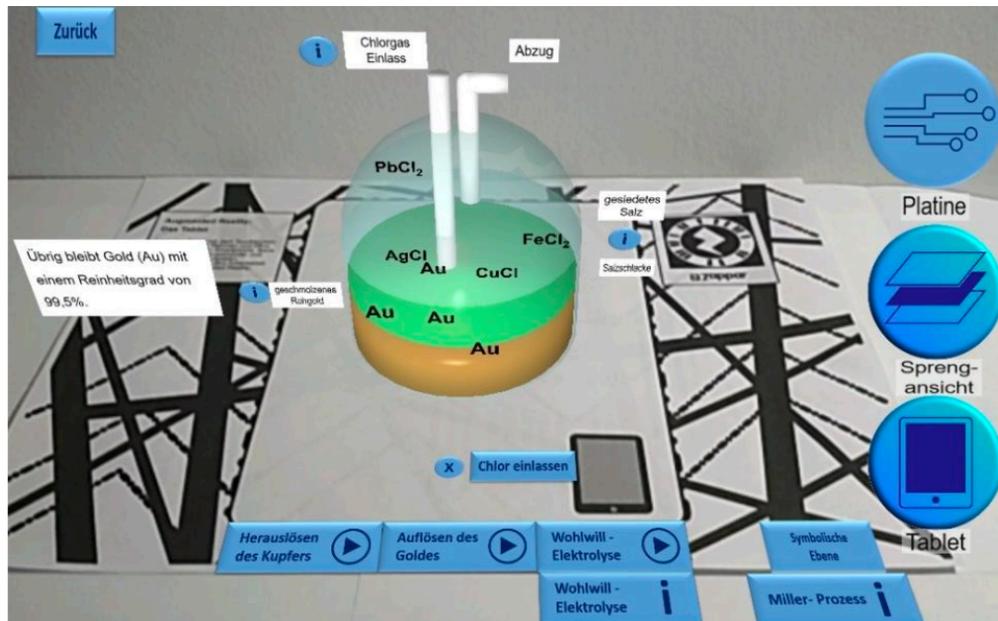


Abbildung 7: Darstellung der Reaktionen auf Makro- und Symbolebene. Das Reaktionsgefäß lässt sich virtuell "anfassen".

## 5.2.5 Digitale Lernumgebung zu Aluminium

Ein Beispiel aus der digitalen Lernumgebung zu Aluminium:

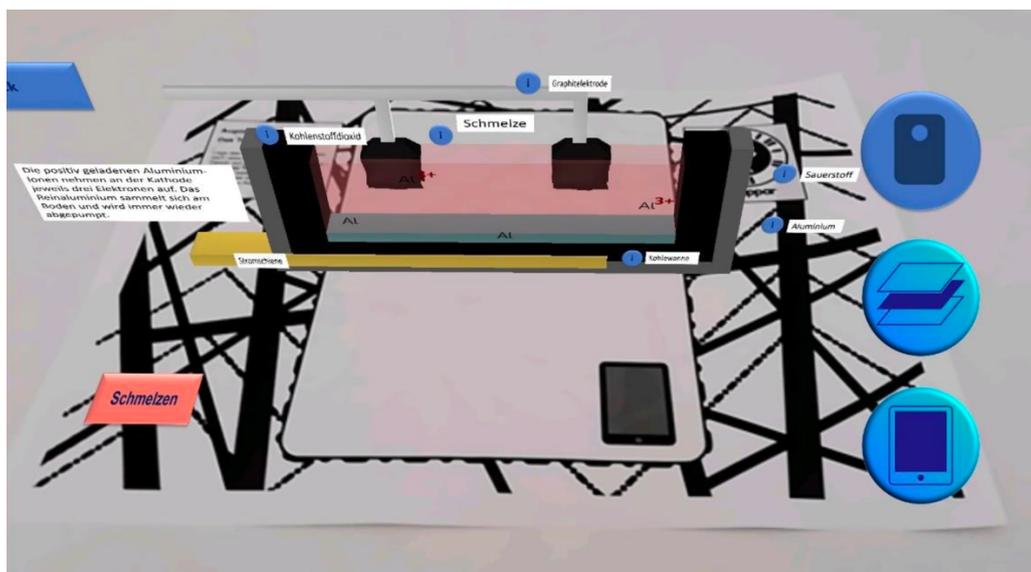


Abbildung 8: Darstellung der Reaktionen auf Makro- und Symbolebene. Das Reaktionsgefäß lässt sich virtuell "anfassen".

### 5.3 Die Schülerlaborangebote

In den unterschiedlichen Projektphasen wurden 2 unterschiedliche Varianten des experimentellen Angebotes (und eine digitale Variante, siehe oben) entwickelt:

#### Variante 1 (Projektphase 1): Lernfirma „Tablets for future“

Die Experimente und entwickelten Materialien werden in die Lernfirma „Tablets for future“ eingebettet, die sich in drei Abteilungen unterteilt. Der Aufbau der Lernfirma orientiert sich an der Unterteilung der Bestandteile eines Tablets in verschiedene Stoffgruppen. Dadurch wird der alltagsbezogene Kontext der nachhaltigen Nutzung von Tablets zusätzlich von einer authentischen Lehr-Lern-Situation umrahmt. Die Durchführung der Experimente und die Erarbeitung der Inhalte werden in einer digitalen Lernumgebung durch verschiedene Tools angereichert und sich die Schüler\*innen somit selbstständig mit authentischen Forscherfrage befassen können. Hier wurden zum Thema „Kupfer und seine Legierungen“ ein erster Prototyp zur Umsetzung der graphischen Oberfläche der digitalen Lernumgebung ausgearbeitet.

#### Variante 2 (Projektphase 3): Modulares Lernen an Stationen mit Augmented Reality

Es wurde eine differenzierende Lernumgebung im Sinne des Lernens an Stationen entwickelt. Die zentralen Unterschiede zur Variante 1 liegen darin, dass die Kombination der Lernbausteine deutlich flexibler (modularer) ist und große Teile der digitalen Varianten (im Wesentlichen AR Lernumgebungen) aus der Projektphase 2 implementiert wurde. So wurden im realen als auch virtuellem Labor Experimentier- und Theoriestationen angeboten, die die Lernenden frei oder nach bestimmten Regeln (Pflicht-, Wahl- und Wahlpflichtstationen, Vorgaben oder Offenheit in der Reihenfolge, zeitliche Vorgaben) oder Rahmenbedingungen (Sicherheitsaspekte, Zeit, Mindestanzahl) absolvieren. Der Umfang der Stationen ist in Dauer, Anspruch und abgestufte Lernhilfen dabei so gestaltet, dass sich eine geöffnete und differenzierende Lernumgebung ergibt. Damit können wir den Anforderungen der neuen Bildungspläne zielgerechter begegnen.

## Seltene Erden & Co – Konzept des Gesamtlernangebots

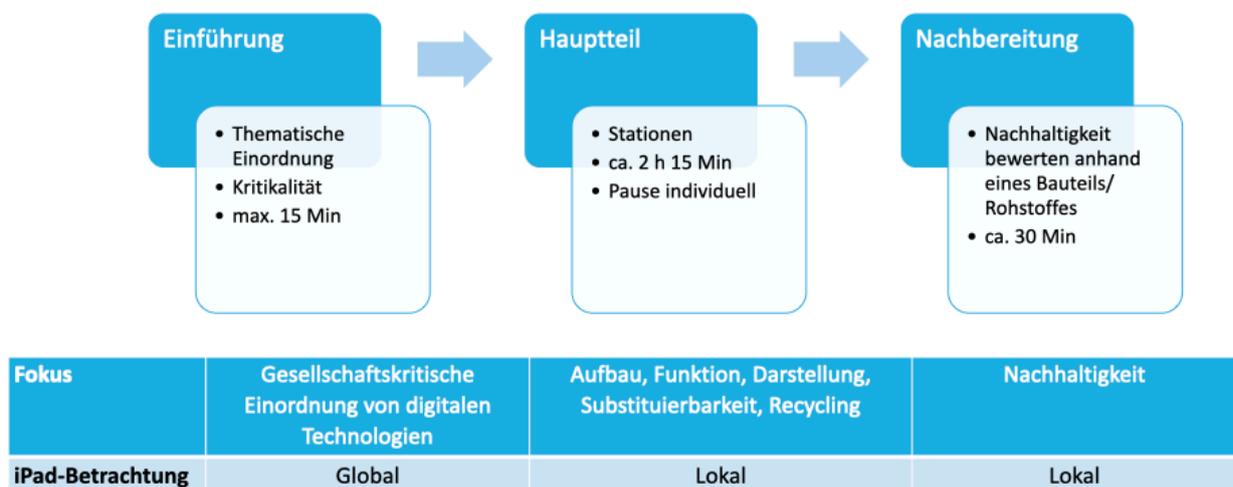


Abbildung 9: Gesamtkonzept des Lernangebots

Es basiert auf der oben abgebildeten Struktur und ist für einen Zeitrahmen von 3-3,5 h (incl. Pause) pro Baustein ausgelegt.

## Lehr-Lernangebote in der Übersicht



Abbildung 10: Die Inhalte des Lernangebots in der Übersicht

Fokussiert werden die fünf wesentlichen Bausteine eines iPads – Akku, Platine, Gehäuse, Lautsprecher, Display - und ein Modul der sogenannten „K-Stoffe“, das sich mit Kunst- und Klebstoffen befasst. Die theoretischen und experimentellen Angebote in den Bausteinen 1-5 sind für Schulklassen für die Jahrgangsstufe 9-12 konzipiert aber theoretisch und labortechnisch fordernd. Der Baustein 6 Display umfasst drei Teilthemen, die sich bezüglich ihrer theoretischen Komplexität und technischen Anforderung unterscheiden: das LED-Angebot und Gorilla(Glas)-Angebot ist ab Jahrgangsstufe 9 leistbar, der OLED-Teil ist für die Oberstufenkurse konzipiert. Als Ergänzung kann ein Angebot zum für mobile Endgeräte speziell gefertigtes Gorilla-Glas (Dauer 60 min, ab Jahrgangsstufe 9 leistbar) abgerufen werden.

Zum Ablauf der Schülerlaborbesuche: Die Einführung in das Thema gibt in 15 Minuten allgemeine Hintergrundinformationen zum Tablet selbst und Erläuterungen mit ausgewählten Beispielen zum Begriff kritische Rohstoffe. Eine kurze Sicherheitsbelehrung leitet zur Laborpraxis über. Die Bausteine werden nach der bewährten Unterrichtsmethode des Stationenlernens umgesetzt. Abhängig von der Größe der Lerngruppen werden ausgewählte Stationen mehrfach angeboten. Es werden zwei Laborphasen mit einer Dauer von 60-70 Minuten mit einer Pause (15 Min.) durchgeführt. In der Abschlussbesprechung wird auf die Nachhaltigkeit von digitalen Medien und deren Nutzung eingegangen und Recyclingoptionen diskutiert. Die Durchführung der On-Tour Variante erfolgt analog.

Im Folgenden werden in kurzen Exposés inhaltliche Übersichten der entwickelten Schülerlaborangebote vorgestellt, um einen Eindruck über die Umsetzung zu geben.

Die Baueinheitsstruktur umfasst theoretische und praktische Anteile. An den Theoriestationen sind Erklärvideos, Animationen und Lerneinheiten im Angebot. Kleine Module zu Lebenszyklusanalysen werden nach Leistungsstand der Lerngruppe ergänzt. Laborpraktische Tätigkeiten umfassen synthetische, elektrochemische als auch analytische Aufgaben. Bei der Demontage und bei der Konstruktion eines OLED-Pixels ist handwerkliches Geschick gefordert. Zum Abschluss werden Transferleistung durch Nachhaltigkeitsbetrachtungen erbracht.

### 5.3.1 Übergeordneter Baueinheit Demontage

Problemstellung E-Schrott und Demontageschritte: Die Demontage defekter iPad's ist eine herausfordernde „Pflicht“-Station unseres modularen Angebots. Die Lernenden besitzen fast alle eigene Smartphones und verfügen zudem über von ihren Schulen als Lerninstrument bereitgestellte iPads. Die Bedienung stellt kein Problem dar, Kenntnis über den detaillierten Aufbau dieser mobilen Devices fehlen dagegen. Um einen Eindruck über die Zeitbedarfe, die Effizienz und die notwendige motorische Geschicklichkeit bei der Demontage zu vermitteln, wurden ausgediente iPads unterschiedlicher Baureihen zusammengetragen und für die Bearbeitung durch die Schüler\*innen präpariert (u.a. Lösen der Verklebungen am Display, Farbmarkierungen je Schraubenset, Austausch der originalen Akkus gegen Kunststoffattrappen). Mit Hilfe digitaler oder analoger step-for-step-Anleitungen zerlegen die Lernenden die Tabletcomputer mit Spezialwerkzeug, bestimmen die Gewichte einzelner Bauteile und montieren das iPad anschließend wieder zusammen. Die Wägungen benötigen die SuS bei der abschließenden Bewertung zu Inhaltsstoffen in einem iPad.

Die Demontage ist die bei den SuS beliebteste Station innerhalb der laborpraktischen Modulangebote. Obwohl vielfach die motorische Geschicklichkeit fehlte, schraubten und montierten die Schüler\*innen mit Eifer. Der Zeitbedarf ist hoch - etwa 45-60 min je Gruppe – und erfordert Hilfestellung bei der Montage, da oftmals Schrauben übrigbleiben.

### 5.3.2 Baueinheit 1: Lithium-Ionen-Akkumulator

Vor dem Hintergrund der aktuellen Energiewende ist die Kenntnis über den Aufbau, die Funktionsweise, Haltbarkeit der mittlerweile weit verbreiteten Li-Ionen-Akkus essentiell. Besonders die chemisch-physikalischen Vorgänge beim Be- und Entladen der Energiespeicher sollten mit diesem Modul vermittelt werden. Im Angebot sind 6 Stationen integriert, wobei die Station 1 „Demontage“ als verpflichtend - wie bereits unter 5.4.1. erläutert - angesehen werden kann. Laborpraktisch wird ein Zellelement eines Li-Ionen-Akkus umgesetzt und seine Leistungsfähigkeit ermittelt. Anschließend wird ein Leistungsvergleich erstellt, in dem im gleichartigen Aufbau das Lithium durch Natrium substituiert wird. Als alternative Energielieferant kann optional eine Grätzelzelle gebaut werden.

Ergänzend zur Laborpraxis sind digitale Stationen zum Lithium- und Cobalt-Abbau (Video), zum Lade- bzw. Entladevorgang auf Teilchenebene (AR) und zur Nachbereitung und Bewertung einer nachhaltigen Nutzung von Tabletcomputern vorgesehen.

<b>Einführung</b>	Problemstellung Elektroschrott, Konzept der Kritikalität	ca. 15 Min
<b>Hauptteil</b>	<b>1 Li-Ionen-Akku</b> Stationen: 1. Demontage eines realen iPads 2. Lernvideo und -text über Li- bzw. Co-Abbau 3. Herstellung eines Dual-Carbon-Li-Ionen-Akkus 4. Augmented Reality Lernumgebung zum Lade- und Entladeprozess auf Teilchenebene 5. Herstellung eines Na-Ionen-Akkus 6. Herstellung einer Grätzelzelle	ca. 2h 15 Min
<b>Nachbereitung</b>	Wie nachhaltig ist das Verwenden des Rohstoffes Lithium im Akku?	ca. 30 Min

Abbildung 11: Schematischer Aufbau des Moduls

### 5.3.3 Baustein 2: Kupfer und Gold im Mainboard

Der Baustein Kupfer und Gold fokussiert im experimentell praktischen Teil im Wesentlichen Kupfer. Dies hängt unter damit zusammen, dass Kupfer ein Thema aus den Bildungsplänen ist, wohingegen Gold als solches eine untergeordnete Rolle in den Bildungsplänen findet. Daher ist das Element Kupfer auch experimentell erschlossen, z.B. durch Recycling mittels Elektrolyse. Die Erklärung auf der Teilchenebene ist hier wieder durch die AR Bausteine unterstützt. Gold wird im Modul optional angeboten. Aufgrund der schwierigen experimentellen Erschließung des Elements bieten wir dieses Element ausschließlich in der digitalen Lernumgebung an. Dies ermöglicht auch die Durchführung an den Schulen in unserem On-Tour Angebot.

<b>Einführung</b>	Problemstellung Elektroschrott, Konzept der Kritikalität	ca. 15 Min
<b>Hauptteil</b>	<b>2 Cu &amp; Au im Mainboard</b> Stationen: 1. Imagefilm AURUBIS 2. Augmented Reality Lernumgebung zum Lade- und Entladeprozess auf Teilchenebene 3. Exp. Recycling via Elektrolyse 4. Exp. Nachweis von Cu mit NH <sub>3</sub> 5. Exp. Elektrochemische Spannungsreihe 6. LCA Recycling von Au & Cu versus Primärproduktion (Endpunkte Energie, Fläche, CO <sub>2</sub> & H <sub>2</sub> O) 7. Optional Augmented Reality Lernumgebung zum Thema Gold	ca. 2h 15 Min
<b>Nachbereitung</b>	Wie nachhaltig ist das Verwenden des Rohstoffes Cu & Au für das Mainboard?	ca. 30 Min

Abbildung 12: Schematischer Aufbau des Moduls

### 5.3.4 Baustein 3: Aluminium im Gehäuse

Mit einem Gesamtgewicht von 600 g ist ein Tablet ein Leichtgewicht unter den mobile Endgeräten. Der Hersteller Apple unternimmt große Anstrengungen, in smarter Bauweise durch die Verwendung von Leichtmetallen und GFK Gewicht zu reduzieren. Die Tablethülle ist eines der größten Bauteile und besteht bei frühen Baureihen zu 100 % aus Aluminium, das zunehmend in späteren Baureihen durch lediglich mit Al-eloxierten GFK ersetzt wurde. In diesem hauptsächlich digital zu bearbeitenden Modul werden in einem Video zunächst Informationen zum Bauxitabbau in Australien unterbreitet. Eine AR-gestützte Lernumgebung visualisiert ergänzend den Lade- und Entladevorgang bei der elektrolytischen Abscheidung des reinen Aluminiums. Eine Betrachtung zum energetischen Aufwand der Gewinnung aus dem Gestein wird dem Recycling gegenübergestellt. Optional und bei verfügbarer Laborkapazität können kleine

Experimente zu chemisch-physikalischen Eigenschaften des Leichtmetalls Aluminium dieses Modul komplettieren.

<b>Einführung</b>	Problemstellung Elektroschrott, Konzept der Kritikalität	ca. 15 Min
<b>Hauptteil</b>	<b>3 Al im Gehäuse</b> Stationen: 1. Lernvideo und -text über Bauxitabbau in Australien 2. Augmented Reality Lernumgebung zum Lade- und Entladeprozess auf Teilchenebene 3. ggf. Schulexperiment Exp. Dichte von Al 4. ggf. Schulexperiment Exp. Löcher in der Alufolie 5. Augmented Reality Lernumgebung zum Exp. Eloxalverfahren Metallkorrosionsschutz 6. LCA Recycling von Alu versus Gewinnung aus Bauxit (Endpunkte Energie, Fläche, CO <sub>2</sub> & H <sub>2</sub> O)	ca. 2h 15 Min
<b>Nachbereitung</b>	Wie nachhaltig ist das Verwenden des Rohstoffes Aluminium im Gehäuse?	ca. 30 Min

Abbildung 13: Schematischer Aufbau des Moduls

### 5.3.5 Baustein 4: K-Stoffe (Kunst- & Klebstoffe)

In diesem Modul gelingt mit den vielseitig verwendbaren Kunst- und Klebstoffen ein Einstieg in die organische Chemie. Neben kleinen auch in Schule durchführbaren Synthesen werden Eigenschaften der Kunst- und Klebstoffe untersucht und Vorversuche zur Recyclingfähigkeit der bio- und fossilbasierten Polymere angeboten. Die Untersuchungen zur Festigkeit und Elastizität von Polymeren sowie die Untersuchung und Bewertung von Klebstoffeigenschaften sind in Anlehnung an die technischen Normungen konzipiert und für die Anwendung im Schülerlabor adaptiert.

Die laborpraktischen Tätigkeiten setzen eine sicherheitstechnisch umfangreiche Laborausstattung voraus. Ohne Abzüge geht es nicht, wenn u.a. die Brennbarkeit und das Lösungsverhalten verschiedener Kunststoffsorten untersucht oder Nylon gezogen werden sollen. Sind diese nicht vorhanden, kann stattdessen ein digitales Modulangebot mit dem Schwerpunkt Kunststoffe genutzt werden.

<b>Einführung</b>	Problemstellung Elektroschrott, Konzept der Kritikalität	ca. 15 Min
<b>Hauptteil</b>	<b>4 K-Stoffe = Kunst- &amp; Klebstoffe</b> Stationen: 1. Lernbox Kunststoffe 2. Exp. Eigenschaften verschiedener Kunststoffe (Kokeln, Festigkeit, Elastizität, etc.) 3. Exp. Herstellung von Nylon 4. Exp. Vulkanisation von Latex 5. Exp. Herstellung eines Polyharzes (Glycerin mit Zitronensäure) 6. Exp. Herstellung eines Polyesters (Phthalsäureanhydrid mit Ethandiol) 7. Exp. Herstellung eines Verbundwerkstoffes aus PP und Gewebefasern 8. Exp. zum Recycling Hydrolyse non PET 9. Exp. zum Recycling Umschmelzen von PE 10. Exp. Eigenschaften verschiedener Klebstoffe (Oberflächenbeschaffenheit, Kohäsion/Adhäsion, Scherrate, Laststabilität) 11. Exp. Herstellung eines Glyptalklebstoffs (Duomer als Mehrkomponentenkleber) 12. Exp. Herstellung eines Schmelzklebstoffs aus PS in Essigsäureethylester	ca. 2h 15 Min
<b>Nachbereitung</b>	Wie nachhaltig ist das Verwenden Von Kunst- + Klebstoffen im iPad?	ca. 30 Min

Abbildung 14: Schematischer Aufbau des Moduls

### 5.3.6 Baustein 5: Lautsprecher am Beispiel Neodym

Der Baustein Lautsprecher fokussiert die Gruppe der Seltenen Erdelemente am Beispiel von Neodym. Aufgrund der schwierigen experimentellen Erschließung des Elements bieten wir dieses Element ausschließlich in der digitalen Lernumgebung an. Dies ermöglicht auch die Durchführung an den Schulen in unserem On-Tour Angebot.

<b>Einführung</b>	Problemstellung Elektroschrott, Konzept der Kritikalität	ca. 15 Min
<b>Hauptteil</b>	<b>5 Nd im Lautsprecher</b> Stationen: 1. Demontage eines realen iPads 2. Lerneinheit Kritische Rohstoffe 3. Augmented Reality Lernumgebung zum Lade- und Entladeprozess auf Teilchenebene 4. Lernvideo zum Recycling von Neodym 5. Augmented Reality Exp. zum Recycling von Neodym 6. Augmented Reality Exp. Supermagnete	ca. 2h 15 Min
<b>Nachbereitung</b>	Wie nachhaltig ist die Verwendung des REE Neodym für Magnete?	ca. 30 Min

Abbildung 15: Schematischer Aufbau des Moduls

### 5.3.7 Baustein 6: Display

Dieses vielseitige und technisch als auch fachlich anspruchsvolle Modulangebot umfasst Informationsmaterial zur Herstellung von Glas (Video zum Sintern von Glas aus Quarzsand und als an die Bedingungen eines Schülerlabors konzipierter Schmelzprozess - Glasperlen), erläutert die speziellen Eigenschaften von Sicherheitsgläsern (Gorilla-Glas).

Die Synthese des fluoreszierenden LED-Flüssigkristalls MBBA kann sowohl praktisch im Labor als auch als Demonstrationsvideo nachvollzogen werden. Die speziellen thermochromen Eigenschaften des MBBA werden untersucht und die technische Umsetzung mit einem Funktionsmodell überprüft. Die opto-physikalischen Grundlagen von Licht wird experimentell unterbreitet und kann von SuS der Sekundarstufe I (Jahrgänge 9+10) bewältigt werden.

Die Gewinnung dreier Cu-basierter OLED kann in dreistufigen Synthesen unter detaillierter digitaler Anleitung nachvollzogen werden. Ferner kann in einem 4-stufigen Bauprozess ein Pixel aus einem kommerziell eingesetzten OLED-Farbstoff hergestellt werden. Dafür wurden die in der technischen Produktion erforderlichen Arbeitsschritte auf die reduzierten Begebenheiten im Schülerlabor angepasst. Abgerundet wird dieses Modulangebot mit einer mikroskopischen Betrachtung der RGB-Farbpatterns des Tablets (oder Smartphones) und einer technischen Anwendung als Spektrometer. Umrahmt wird der OLED-Modulbaustein durch theoretische Einführungen in die MO-Theorie, die Komplex-Chemie und die organische Synthese und richtet sich daher an die Schüler\*innen der Sekundarstufen 2 der Chemie und Physik.

<b>Einführung</b>		Problemstellung Elektroschrott, Konzept der Kritikalität		ca. 15 Min
<b>Hauptteil</b>	<b>6 LCD im Display</b>	<b>Hauptteil</b>	<b>6 OLED im Display</b>	
Stationen:	ca. 2h 15 Min	Stationen:	ca. 2h 15 Min	
1. Erklärvideo zur Lerneinheit Flüssigkristalle & LCD		1. Erklärvideo zur Lerneinheit OLED		
2. Erklärvideo MBBA-Synthese		2. Erklärvideos OLED-Synthese		
3. Herstellung eines MBBA-Flüssigkristalls		3. Theorie: Modell HOMO & LUMO-Wechselwirkung		
4. Eigenschaften von MBBA		4. Exp. Herstellung eines Eigenbau-OLED-Pixels auf Basis von MEH-PPV (gelb) in 4 Schritten		
5. Funktionsmodell LED mit „Optikkiste“		5. Exp. Herstellung eine Cu-haltigen OLED-Farbstoffs		
		6. Exp. Das eigene Smartphon unter dem Mikroskop		
<b>Nachbereitung</b>		Wie nachhaltig ist die Verwendung des Galinstans im Display?		ca. 30 Min

Abbildung 16: Schematischer Aufbau des Moduls

### 5.3.8 Lebenszyklusanalysen von Tablets

Als Rahmen des Themenkomplexes des Tabletrecyclings sollte den Schülerinnen und Schülern die Thematik der Lebenszyklusanalysen in vereinfachter Form nahegebracht werden. Die reflektierte Betrachtung der einzelnen Schritte des Lebenszyklus eines Tablets trägt zur Förderung von Alltagskompetenzen im nachhaltigen Umgang mit diesen Geräten sowie von Beurteilungs- und Bewertungskompetenz im gesellschaftlichen Kontext bei. Somit steht neben dem fachlichen Lernen auch die auch die Förderung des Orientierungswissens über die Relevanz der Chemie in Umwelt- und Nachhaltigkeitsfragen im Fokus.

Unter einer Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment, LCA) wird die systematische Analyse der Umweltwirkungen von Produkten während des gesamten Lebensweges verstanden. Dazu gehören sämtliche Umweltwirkungen während der Produktion, der Nutzungsphase und

Entsorgung des Produkts sowie die damit verbundenen vor- und nachgeschalteten Prozesse (z.B. Herstellung der Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe). Entlang der Produktlinie werden Inputs erfasst (wie etwa metallische Rohstoffe oder fossile oder erneuerbare Energieträger) sowie Outputs wie etwa Emissionen von umwelt- oder gesundheitsbelastenden Stoffen.

für die Sek. II wurde die Nachbereitung dahingehend ergänzt, dass die Lebenszyklusanalyse thematisiert und die neuesten Bestrebungen auf diesem Gebiet (im Bereich der iPads) beinhaltet. SuS können das Erlernte aus den Stationen und die zusätzlichen Informationen hinter dem QR-Code (führt zu Online-pdf) nutzen, um ein Spinnennetzdiagramm zu bearbeiten. Die Materialien zu energetischen LCA-Betrachtung ausgewählter Metalle in Tablets (Au, Al, Li) ergänzen das Modul.

**Seltene Erden** Seltene Erden & Co in der digitalen Nachhaltigkeitsbildung LA1: Li-Ionen-Akku, N

Wie kann man Tablets nachhaltig nutzen?

Vor dem Hintergrund und zunehmender Ressourcenverknappung, Umweltschmutzung und weltweiten klimatischen Veränderungen gewinnen nachhaltige Produktionstechnologien und Änderungen im Konsumverhalten in allen wirtschaftlichen, sozialen und politischen Bereichen an Bedeutung.

Um kompetent nachhaltige Entscheidungen treffen zu können, ist eine Ermittlung der Einflüsse von Produkten und Materialien auf Ökonomie, Umwelt und Gesellschaft hilfreich.

**Arbeitsauftrag**

Erstelle mit deiner Gruppe auf Basis deiner heutigen Erkenntnisse und der Informationen unter dem QR-Code ein Spinnennetzdiagramm, indem ihr gemeinsam die Aussagen an den Ecken des Diagramms **bewertet**. Beachtet dabei die Legende unter dem Diagramm.

Leite auf Grundlage aller Informationen aus der Lerneinheit zum Lithium-Ionen-Akku ein Fazit in Bezug auf Tabletnutzung ab.

Bei der Herstellung des Li-Ionen-Akkus besteht ein geringes Risiko für Mensch und Umwelt.

Bei Entsorgung und Recycling des Li-Ionen-Akkus besteht ein geringes Risiko für Mensch und Umwelt.

Für diesen Rohstoff oder die Komponente bestehen keine großen Herausforderungen bei Lieferantensuche, -bewertung und -verarbeitung.

Dieser Rohstoff ist selbstständig, ohne dass die Funktion der Komponente beeinträchtigt wird.

Die Komponente / der Rohstoff ist zu großen Teilen wiederverwertbar.

Von diesem Rohstoff ist auf absehbare Zeit genügend vorhanden.

Die Komponente / der Rohstoff ist zu großen Teilen nicht zu finden.

Trifft zuTrifft teilweise zuTrifft nicht zu

Fazit: \_\_\_\_\_

Abbildung 17: Nachbereitung - Arbeitsvorlage „Spinnennetz“

## 6 Öffentlichkeitsarbeit

Die Aktivitäten der beiden Projektpartner umfassten Veranstaltungen für Schüler\*innen, Studierende des Lehramts sowie Lehrkräfte. Die Ergebnisse wurden ferner in nationalen und internationalen Fachjournalen, und auf (inter)nationalen Tagungen mit Poster-Präsentationen und Vorträgen dem Fachpublikum vorgestellt.

Ferner wurden im Verbraucherportal unsere Aktivitäten einem breiten Publikum präsentiert (siehe 6.2.3). Webauftritte auf den Projektseiten der beteiligten Partner (siehe 6.2.4) sowie ein Flyer rundeten die Außendarstellung des Vorhabens ab.

Zusammenfassend soll eine Übersicht Aufschluss über die erreichten Teilnehmerzahlen geben. Im Gegensatz zu den Vorgängerprojekten des Projektteams („Chemie & Nachhaltigkeit“, „Chemie, Umwelt, Nachhaltigkeit“, „Phosphor-Rückgewinnung“) beschränkte sich die Dissemination nicht ausschließlich auf laborpraktische Veranstaltungen, sondern schlossen pandemiebedingt vor allem neue digitale Lehr-Lernformate ein. Erst nach Abflauen der Zugangsbeschränkungen konnte die Vermittlung der laborpraktischen Angebote beginnen.

Die Übersicht zeigt, dass wie oben dargelegt, dass wir insgesamt mehr Teilnehmer\*innen erreicht haben, als wir ursprünglich geplant haben. Allerdings konnten wir dies nicht – pandemiebedingt – auf die geplante „klassische“ Art, nämlich in Präsenzpraktika erreichen, sondern über neue digitale Formate. Die erreichte Teilnehmer\*innenzahl lässt sich darauf zurückführen, dass wir auch viele Lehrkräfte als Multiplikatoren erreicht haben, die wir mit klassischen Angeboten hätten gar nicht erreichen können.

*Tabelle 3: Erwartete und erreichte Teilnehmerzahlen 2018-2023 im Abgleich*

Art der Veranstaltungen	erwartete Teilnehmer*innen	erreichte Teilnehmer*innen
Zielgruppe 1: Lehrkräfte und Fortbildner*innen auf Tagungen, Workshops & Lehrerfortbildungen	350	1878
Zielgruppe 2: Lernende (Schüler*innen)		
a) bei Schülerlabor und Schülerlabor-on-Tour	1500	844
b) Digitale Variante mit Augmented Reality	0	Ca. 8000
Zielgruppe 3: Lernende (Studierende des Lehramts)	300	202

## 6.1 Lehrkräftefortbildungen, Vorträge und sonstige Öffentlichkeitsarbeit

Tabelle 4 sind die öffentlichen Auftritte auf Tagungen, bei Lehrveranstaltungen, Lehrerfortbildungen und Schülerlaborveranstaltungen (in Präsenz und digital) detailliert zusammengestellt.

*Tabelle 4: Lehrkräftefortbildungen, Vorträge und sonstige Öffentlichkeitsarbeit*

Datum	Veranstaltung	Verantw.	Ort
29.07.19	Junges Forum Medien und Hochschulentwicklung 2019, Vortrag: „Digital Lernen – aber nachhaltig: geht das? Lernen mit und über den nachhaltigen Einsatz von Tablets in Schule und Schülerlabor	UKN	Weingarten
15.09.19	GDCh-Wissenschaftsforum Chemie 2019 Jahrestagung der Fachgruppe Chemieunterricht der Gesellschaft Deutscher Chemiker, Vortrag: „Förderung des forschenden Lernens mit und über den nachhaltigen Einsatz von Tablets in Schule und Schülerlabor“	UKN	Aachen
29.11.19	6. Zukunftsforum Bildungsforschung des Graduiertenkolleg der Hochschulen: „Bildung und Nachhaltigkeit – disziplinäre, interdisziplinäre und transdisziplinäre Perspektiven“ Vortrag	UKN	Weingarten
21.02.20	MNU Landesverbandstagung Hamburg - Workshop	UKN	Hamburg
09.03.20	LeLa Tagung 2020 in Dresden – Poster oder Vortrag	UKN	Dresden
16.11.20	Virtuelle Lehrerfortbildung Leipzig der LASUB	UKN	virtuell
16.-19. 11.2020	MNU Landesverbandstagung Bremen Bremerhaven Vortrag	UHB	virtuell
08.12.20	MINT-Tag Universität Bremen	UHB	virtuell
10.11.20	Impulsvortrag: World Science Day for Peace and Development (MERCK, Darmstadt)	UKN	virtuell
04.03.21	Workshop für Lehrkräfte: Differenzieren mit digitalen Medien – Vortrag und Workshop	UKN	virtuell
17.05.21	Schule AKTUELL - Bildung für nachhaltige Entwicklung: Vortrag	UKN	virtuell
08.- 10.06.2021	DBU Woche der Umwelt – virtueller Stand mit kleinen Input Vorträgen	UKN, UHB	virtuell
14.06.21	Keynote auf dem Apple Education Leadership Event	UKN	virtuell
06.07.21	Keynote auf dem GDCh-Kolloquium in Gießen	UKN	virtuell
14.07.21	Workshop für Lehrkräfte: Digitaler Medien im Chemieunterricht - eine Toolbox	UKN	virtuell
20.09.21	Keynote: Thurgauer Hochschultag: „Nachhaltigkeit sichtbar machen“	UKN	Kreuzlingen (Schweiz)
02.10.21	Keynote: Vernetzt (!) – nationaler Bildungskongress mit mehr als 9000 Teilnehmer*innen: „Digitale Medien im Chemieunterricht: Ein Überblick aus Forschung	UKN	virtuell

	und Praxis & Chemie unterrichten mit angereicherter Realität – wie der Chemieunterricht von Augmented Reality profitieren kann“		
28.10.21	Keynote: Apple Education leadership Briefing	UKN	virtuell
16.11.21	Workshop für Lehrkräfte: LASUB Herbstakademie für Lehrkräfte in Sachsen	UKN	virtuell
19.11.21	Bildungswissenschaftlicher Tag der Binational School of Education	UKN	virtuell
15.- 18.11.2021	67. Bremerhavener MNU-Tagung – digital	UKN	virtuell
25.11.21	Vortrag "Digitalisierung im Chemieunterricht - Vom angereicherten Lernen bis zur Augmented Reality" ; GDCh-Kolloquium der LMU München	UKN	München
08.12.21	MINT-Tag Universität Bremen	UHB	virtuell
08.12.21	Workshop für Lehrkräfte des ZSL BaWü: Digitaler Medien im Chemieunterricht - eine Toolbox	UKN	virtuell
09.12.21	Vortrag „Naturwissenschaften mit erweiterter Realität erleben - Einblicke aus der fachdidaktischen Forschung“ auf der Ringvorlesung des Advanced Data Information and Literacy Track	UKN	virtuell
10.01.22	Workshop für Lehrkräfte in Österreich "Digitale Medien im Chemieunterricht - Funktion und Chance". PH Oberösterreich	UKN	virtuell
09.02.22	Workshop für Lehrkräfte des ZSL BaWü: Digitaler Medien im Chemieunterricht - eine Toolbox	UKN	virtuell
26.03.22	Lehrpersonenfortbildung "Augmented Reality im Chemieunterricht: unterrichten mit erweiterter Realität" auf dem SWISE Innovationstag in Zürich (ausgefallen wegen Krankheit)	UKN	Zürich (Schweiz)
01.06.22	Workshop für Lehrkräfte des ZSL BaWü: Digitaler Medien im Chemieunterricht - eine Toolbox	UKN	virtuell
15.07.22	Workshop mit Referendaren aus Würzburg „TABLETs digital“	UHB	Bremen
18.07.22	Workshop für Lehrkräfte des LFBZ Leipzig der GDCh: "Neues zur Digitalisierung im Chemieunterricht". GDCh Fortbildungszentrum Leipzig	UKN	Leipzig
19.09.22	Workshop für Lehrkräfte des Apple Education <i>Didaktische Funktionen von Tablets in der Unterrichtsgestaltung</i> ,	UKN	virtuell
15.- 18.09.2022	GDCh-Tagung: Vortrag: <i>Lernen mit und über iPads in der digitalen Nachhaltigkeitsbildung. Universität Osnabrück.</i>	beide	Osnabrück
08.10.22	Fortbildungstag Digitalkongress 2 "Der Fachtag für digitale Bildung" mit Keynote: Keynote: "Virtualität und Realität – Augmented Reality bringt zusammen, was zusammen gehört"	UKN	virtuell
26.10.22	Fortbildungstag Chemie und Digitalisierung für das Gymnasium Meersburg	UKN	Konstanz
08.11.22	Fortbildungstag Chemie und Digitalisierung "Digitaler Medien im Chemieunterricht - eine Toolbox, Teil 2" des Zentrums für Schulqualität und Lehrerbildung (Baden-Württemberg)	UKN	virtuell
30.11.22	MNU-Tagung, Bad, Blankenburg	UHB	Bad Blankenburg

07.12.22	Fortbildungstag Chemie und Digitalisierung "Digitaler Medien im Chemieunterricht - eine Toolbox, Teil 2" des Zentrums für Schulqualität und Lehrerbildung (Baden-Württemberg)	UKN	virtuell
24.03.23	DICE-Tagung: mit Vortrag	beide	virtuell
17.04.23	Lehrpersonenfortbildung „TaBLETs digital“ im Rahmen des LFZB OS-HB	UHB	ausgefallen
13.06.23	Fortbildungstag Chemie und Digitalisierung "Digitaler Medien im Chemieunterricht - eine Toolbox, Teil 2" des Zentrums für Schulqualität und Lehrerbildung (Baden-Württemberg)	UKN	virtuell
14.06.2023	Fortbildungstag Chemie und Digitalisierung "Chancen & Risiken der digitalen Transformation - Teil 4: Virtualität und Realität: Augmented Reality im Naturwissenschaftsunterricht" des Zentrums für Schulqualität und Lehrerbildung (Baden-Württemberg)	UKN	virtuell
21.06.23	Fortbildungstag Chemie und Digitalisierung "Digitaler Medien im Chemieunterricht - eine Toolbox, Teil 2" des Zentrums für Schulqualität und Lehrerbildung (Baden-Württemberg)	UKN	virtuell
06.07.23	Fortbildungstag Chemie und Digitalisierung "Chancen & Risiken der digitalen Transformation - Teil 4: Virtualität und Realität: Augmented Reality im Naturwissenschaftsunterricht" des Zentrums für Schulqualität und Lehrerbildung (Baden-Württemberg)	UKN	Mannheim

## 6.2 Publikationen zum Thema:

### 6.2.1 Unterrichtsmaterial

Das digitale Unterrichtsmaterial wird über die Homepage von Prof. Huwer angeboten bzw. verlinkt. Dieses liegt auf CloudServern und steht kostenfrei allen interessierten Personen zur Verfügung: <https://www.chemie.uni-konstanz.de/ag-huwer/forschung/downloads/>

### 6.2.2 Erschienenene Publikationen

- 1) Huwer, J., Barth, C., Siol, A., & Eilks, I. (2021). Nachhaltigkeitsbildung und Digitalisierung gemeinsam denken – Lernen mit und über den nachhaltigen Einsatz von Tablets am Beispiel einer Augmented-Reality-Lernumgebung. *ChemKon*, 28(6), 235-240. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ckon.202100004>
- 2) Kanbur, C., Huwer, J., Fetzer, D., Siol, A., & Eilks, I. (2022). Wie man mit Tablets über Seltenerdelemente in Tablets lernen kann. *PlusLucis*(1), 30-32.
- 3) Huwer, J., Siol, A., & Eilks, I. (2022). Seltene Erden & Co: Digitales Lernen in Unterricht, Schülerlabor und Lehrer\*innenbildung über die stofflichen Auswirkungen der zunehmenden Nutzung digitaler Medien. In J. Weselek, F. Kohler, & A. Siegmund (Eds.), *Digitale Bildung für nachhaltige Entwicklung* (pp. 227-237). Springer
- 4) Huwer, J., Barth, C., Siol, A., & Eilks, I. (2023). Learning With Digital Media About the Chemistry Behind the Recycling of Digital Hardware. In Y. Dori, C. Ngai, & G. Sztainberg (Eds.), *Digital Learning and Teaching in Chemistry*. The Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781839167942-00081>

Ein besonderes Highlight für uns:

Das Projekt hat es auf das Cover des Fachjournals „ChemKon“ (Ausgabe 6/2021) geschafft:



Abbildung 18: Cover des Fachjournals „ChemKon“ (Ausgabe 6/2021)

### 6.2.3 Ausstehende Publikationen

- 1) Sabrina Syskowski, Chantal Lathwesen, Canan Kanbur, Antje Siol, Ingo Eilks, Johannes Huwer (2023). Tablet computers on the two-lane road - Teaching with Augmented Reality using tablets, both as a tool and an object of learning. Journal of Chemical Education (in Begutachtung)
- 2) Sabrina Syskowski, Chantal Lathwesen, Nikolai Maurer, Antje Siol, Ingo Eilks, Johannes Huwer (2023). Learning about Critical aspects of plastics in the iPad with Mixed Reality. Sustainability (in Begutachtung)

### 6.2.4 Sonstige Dissemination

- Interview zum Projekt auf dem Verbraucherportal.de:  
<https://www.verbraucherbildung.de/meldung/digitalisierung-und-nachhaltigkeit-zusammendenken>
- YouTube Video über das Projekt (präsentiert auf der Woche der Umwelt 2021)  
<https://www.youtube.com/watch?v=At40U--chO0>
- DBU Jahresbericht 2018

### 6.2.5 Projekthomepages:

- UKN: <https://www.chemie.uni-konstanz.de/ag-huwer/forschung/forschungsprojekte/aktuelle-projekt-high-ed/seltene-erden-co/>
- UHB: <https://www.uni-bremen.de/freix/>

## 7 Diskussion

### 7.1 Inwieweit wurden die verfolgten Ziele erreicht?

Die Hauptprojektziele konnten erreicht werden. Insgesamt wurden viele Lernende über den Projektzeitraum erreicht und diese Lernenden konnten über nachhaltige Aspekte der modernen Tablet Computer erlernen.

Ergänzt wurde die methodische Umsetzung durch eine digitale Variante für das *Distance-Learning* während der Corona-Pandemie, welche zu Beginn des Projektes nicht absehbar war.

### 7.2 Woraus ergeben sich die Abweichungen der erhaltenen Ergebnisse?

Ursprünglich war ausschließlich geplant, lokal begrenzte Schülerlaborexperimentierangebote zu entwickeln. Aufgrund der Corona-Pandemie kam es zu diversen Problemen: Schulen und auch Schülerlabore wurden in mehreren Pandemiephasen geschlossen oder deren Zugang sehr stark begrenzt.

Gleichzeitig gewann unser Projekt durch die Digitalisierung – insbesondere der Anschaffung von iPads – eine gesteigerte Relevanz, die in dieser Form nicht zu erwarten war. Somit waren wir gezwungen, auf diese Situation unsere Angebote anzupassen und zumindest zeitweise komplett digital aber auch als Schülerlabor-on-Tour anzubieten. Somit haben wir Ergebnisse generiert, welche so nicht geplant waren, jedoch der Situation bedingt notwendig waren. Wir konnten mit dem Projekt während dieser Zeit – durch die digitalen Angebote – weit über unseren normalen Wirkungsradius eine viele größere Anzahl an Lernenden erreichen, als ursprünglich geplant.

Ferner hatten wir ebenfalls pandemie- und krankheitsbedingten Mitarbeiter\*innenausfall, der zu Verzögerungen im Projekt führte.

### 7.3 Wie gestaltete sich die Arbeit mit den unterschiedlichen Kooperationspartnern?

#### 7.3.1 Synergie zwischen Konstanz und Bremen

Die Expertisen beider Forschungsstellen in diesem Verbundprojekt ergänzten sich vorteilhaft: Die Universität Bremen besitzt einschlägige Kompetenz im Bereich Umweltforschung, organische Synthesen und nachhaltige Technologien, die sich bereits in vergangenen Projekten ausgedrückt hat. Ergänzt wird dies durch die besondere fachdidaktische Expertise am Lehrstuhl Prof. Eilks, gerade auch in der Didaktik einer chemiebezogenen Bildung für nachhaltige Entwicklung (BnE), des Umgangs mit kultureller und sprachlicher Heterogenität und der Strukturierung von kooperativen Lehr-Lern-Arrangements unter Einbezug offener Experimente und forschungsorientierter Schüleraktivitäten.

Die Arbeitsgruppe von Prof. Huwer beschäftigt sich mit der Forschung im Bereich der schulischen Curricularforschung und der Professionalisierung von Lehrkräften (Hochschuldidaktik). Innerhalb dieser Bereiche fokussiert der Lehrstuhl Prof. Huwer die kontextuellen Schwerpunkte der „Digitalisierung in den Naturwissenschaften“ (Schwerpunkte in der Gestaltung von AR und KI basierten Lernumgebungen sowie DiKoLAN und DPACK) und der „Nachhaltigkeitsbildung/Bildung für Nachhaltige Entwicklung“, die beide eng miteinander verzahnt sind.

Diese Zusammenarbeit deckt in der fachwissenschaftlichen Breite und in der komplementären Ergänzung nahezu alle Felder ab, in denen sich die moderne Chemie besonders um Fragen einer nachhaltigen und grünen Chemie bemüht. Durch die fachdidaktischen Expertisen in Bremen und Konstanz wurde erreicht, dass die entsprechenden fachwissenschaftlichen Aspekte fachdidaktisch elementarisiert und in moderne Bildungszusammenhänge eingeordnet werden konnten, sodass Konzepte sowie analoge als auch digitale Materialien entstanden, die vor dem Hintergrund der schulischen Rahmenvorgaben und einer modernen kompetenzorientierten naturwissenschaftlichen Bildung erfolgreich sind.

### 7.3.2 Interne Kommunikation, Projekt- und Beiratstreffen

Die Kommunikation untereinander lief sehr direkt und unkompliziert. Auch bei den Projekttreffen waren die Diskussionen und Gespräche immer offen und konstruktiv. Bei auftretenden Fragen konnte zeitnah Lösungen herbeigeführt werden. Frühzeitige und auch längere Aufenthalte beider Qualifikantinnen in Bremen wären für die Entwicklung der Modulangebote jedoch hilfreicher und zielführender gewesen. Am Rande von GDCh- oder MNU-Tagungen wurden zwar Projektbelange besprochen, jedoch konnten aus terminlichen Gründen nicht immer alle Projektpartner anwesend sein.

Die Projektbesprechungen fanden stets online statt. Das Projektteam nutzte „Weeklys“ mit Wissenschaftler\*innen und Qualifikanten beider Standorte, sodass intensiver als in bisherigen Projekten die Arbeit an beiden Standorten kollaborativ gestaltet werden konnte. Das „Gesamtprojekttreffen“ wurde im Berichtszeitraum durch die Weeklys ersetzt, so dass fast immer alle Beteiligten anwesend waren. Weiterhin waren auch die Qualifikant\*innen in die Weeklys eingebunden, um ihre Arbeitsfortschritte zu präsentieren und darüber zu diskutieren. Die Diskussionen waren stets fokussiert, informativ und überaus hilfreich für alle Beteiligten und förderten den Zusammenhalt im Projektteam sehr. Die beteiligten Studierenden erhielten dadurch eine enge inhaltliche und fachliche Begleitung sowie eine zeitliche Struktur für ihre Arbeit.

*Tabelle 5: TaBLETs – Beirats- und Projekttreffen 2018-2023*

Datum	Veranstaltung	Ort
29.07.2019	Kick-Off Meeting	online
03.-04.12.2019	2. Projekttreffen	Weingarten
02.-05.03.2020	3. Projekttreffen	Bremen
16.06.2020	1. Treffen des wissenschaftlichen Beirats	online
18.03.2022	2. Treffen des wissenschaftlichen Beirats	online

15-18.05.2022	4. Projekttreffen	Bremen
04.-07.07.2022	5. Projekttreffen	Konstanz
21.-25.11.2022	6. Projekttreffen	Konstanz
25.-28.04.2023	7. Projekttreffen	Konstanz
18.07-20.07.2023	Finales Projekttreffen	Konstanz

Unterstützt wurde das Projektkonsortium „Seltene Erden & Co.“ durch den wissenschaftlichen Beirat, der sich wie folgt zusammensetzte:

- Prof. Dr. Florian Theilmann (PH Weingarten)
- Herr Carsten Kuck (Gertrud-Luckner-Realschule (BW))
- Prof. Dr. Thomas Irion (PH Schwäbisch-Gmünd)

Der Wissenschaftliche Beirat und das Projektkonsortium trafen sich zwei Mal - am 16.06.2020 und am 18.03.2022 - zu virtuellen Sitzungen. In der Frühphase wurden die ausgewählten Themen der Bausteine, die Struktur der Angebote sowie ausgewählte digitale Tools diskutiert. Der zweite Termin diente der Darstellung der bisher erreichten Ziele, Verbesserung der Inhalte für die virtuelle Beschulung vor dem Hintergrund der Einschränkungen der Corona-Pandemie und Dissemination der Ergebnisse.

Gleichzeitig wurde der Beirat um Hilfestellung zu Problemen zur Aktivierung des Projekts innerhalb der Lehrerschaft gebeten, die besonders in der post-Corona Phase sehr schleppend verlief. Die Beiräte befürworteten eine kostenneutrale Verlängerung, um das Schuljahr 2022/2023 möglichst komplett ausschöpfen zu können. Die Treffen fanden in freundlicher Atmosphäre statt und waren ausgesprochen konstruktiv.

## **8 Verstetigung**

Auch über den Förderzeitraum hinaus werden die in diesem Projekt erarbeiteten Materialien und Praktika ein fester Bestandteil des Schülerlaborangebots der beteiligten Partner sein. Erste Buchungen / Terminierungen liegen den Partnerlaboren bereits vor.

## **9 Fazit**

Zum Projektabschluss wurden insgesamt ca. 9000 Lernende (Schüler\*innen sowie Studierende) und ca. 1800 Lehr- und Fachpersonen (Multiplikatoren) erreicht. Unsere Erkenntnisse sowie Ergebnisse konnten wir öffentlichkeitswirksam sowie Fachpersonen in (inter)nationalen Veröffentlichungsorganen präsentieren. Im Rahmen des Projektes sind zudem 20 Bachelor- und Masterarbeiten zum Vorhaben angefertigt worden.

Die Arbeiten an beiden Standorten konnten sich trotz der widrigen äußeren Umstände gut entwickeln. Die Corona Pandemie stellte einige Hürden – wies aber im durch das Distanzlernen auch Chancen für Universitäten und Schulen auf. Die digitalen AR--Module für das Distanzlernen wurden gut angenommen.

Der Schülerlaborbetrieb in Form des On-Tour-Angebotes konnte ab Mai 2022 starten.

Wir konnten also die zunächst widrigen Umstände nutzen, neue Möglichkeiten zu entwickeln, das Lernen über die Nachhaltigkeit von Tabletcomputer schon jetzt weit stärker zu verbreiten, als es ursprünglich angedacht war. Auch der Präsenzbetrieb der Schülerlaborangebote konnte ab Schuljahr 2022/2023 regulär starten. Wir sehen großes Potenzial für die Zukunft, über digitale Lehr-Lernangebote ein breiteres Spektrum an Lernenden zu erreichen.

## **10 Danksagung**

Wir danken der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die großzügige finanzielle Unterstützung des gesamten Projektes und ganz speziell Frau Ulrike Peters, Frau Melanie Vogelpohl sowie Frau Beate Oostergetelo von der DBU für zahlreiche hilfreiche und anregende Gespräche und für ihr stetes Interesse am Fortgang unserer Arbeit.

Wir danken den Mitgliedern unseres Wissenschaftlichen Beirats für ihre Zeit bei den Beiratsitzungen und für ihre Ratschläge, die uns weitergeführt und motiviert haben.

Zu Dank verpflichtet sind wir auch einer Reihe von Chemie-Lehramtsstudierenden, die im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten (BSc.-Arbeiten, MEd.-Arbeiten, wissenschaftliche Examensarbeiten) Teilaspekte dieses Vorhabens mit großem Engagement bearbeitet haben.

## 11 Literaturverzeichnis

- BMBF (2013) FONA Innovative Technologien für Ressourceneffizienz - Strategische Metalle und Mineralien (r<sup>3</sup>) Themenschwerpunkt Urban Mining: u.a. ReStrateGIS; VeMRec; ATR; [www.fona.de](http://www.fona.de)
- Buchert, M., Manhart, A., Bleher, D., Pingel, D. (2012) Recycling critical raw materials from waste electronic equipment. Commissioned by the North Rhine-Westphalia State Agency for Nature, Environment and Consumer Protection; Öko-Institut e.V. Darmstadt
- Böttcher F., Thorenz A. (2013) Seltene Metalle – Ressourcenschonung durch Innovationen in Wertschöpfungsnetzwerken. Endbericht Deutsche Bundesstiftung Umwelt.
- ESG Edelmetall-Service GmbH & Co. KG, Gewerbering 29b, 76287 Rheinstetten <http://www.edelmetall-handel.de/edelmetall-recycling/> und <https://www.scheideanstalt.de/altgeraete-elektro-entsorgung/>
- Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung & Institut für Zukunftsstudien und Techno-logiebewertung: Rohstoffe für Zukunftstechnologien - Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage, 15 May 2009
- Forschungsinstitut Edelmetalle und Metallchemie & Institut für Energie- und Umwelttechnik. Metallurgische Rückgewinnung von Indium, Gallium und Germanium aus Elektronikschrott und Entwicklung entsprechender Aufarbeitungsmethoden für die Verwertungsindustrie Project report, Schwäbisch Gmünd & Duisburg, 2011
- Hirth, M., Kuhn, J., Müller, A., Rohs, M. & Klein, P. (2016). iMobilePhysics: Seamless Learning durch Experimente mit Smartphones & Tablets in Physik. Zeitschrift für Hochschulentwicklung 11 (4), 17-37.
- Hempel, M., Digel, R., Lefevre, J.R., Peters, U., Schwake, M.(2017): DBU Fachinfo Nr. 4 I Nov. 2017 Ressourceneffiziente Wertstofftechnologie <https://www.dbu.de/doiLanding1483.html> abgerufen 6.3.2018
- Holm, O. (2014) Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung: ATR - Rückgewinnung von Kupfer aus der Feinfraktion von HMVA mittels Dichtesortierung. Präsentation ProcessNet Jahrestreffen.
- Kuse, K.; Jeggler, U. & Skiebe-Corrette, P. (2018) Seltene Erden - Chemieexperimente und BNE im SchülerlaborIn LernortLabor (Ed.), *MINT-Umweltbildung* (pp. 34-37).
- Huisman, J.; Magalini, F.; Kuehr, R.; Maurer, C.; Ogilvie, S.; Poll, J.; Delgado, C.; Artim, E.; Szlezak, J.; Stevels, A.: 2008 Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), Bonn 2007.
- Huwer, J., & Eilks, I. (2017). Multitouch Learning Books für schulische und außerschulische Bildung. In J. Meßinger-Koppelt, S. Schanze, & J. Groß (Eds.), *Lernprozesse mit digitalen Werkzeugen unterstützen - Perspektiven aus der Didaktik naturwissenschaftlicher Fächer* (pp. 81-94). Hamburg: Joachim Herz Stiftung Verlag.
- McCollum, B., Regier, L., Leong, J., Simpson, S., & Sterner, S. (2014). The Effects of Using Touch-Screen Devices on Students' Molecular Visualization and Representational Competence Skills. *Journal of Chemical Education*, 91(11), 1810–1817.
- MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN über die Liste kritischer Rohstoffe für die EU 2017 <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2017/DE/COM-2017-490-F1-DE-MAIN-PART-1.PDF> abgerufen am 6.3.2018
- Sekretariat der Kultusministerkonferenz (2016) Bildung in der digitalen Welt – Strategie der Kultusministerkonferenz. [https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/PresseUndAktuelles/2016/Bildung\\_digitale\\_Welt\\_Webversion.pdf](https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/PresseUndAktuelles/2016/Bildung_digitale_Welt_Webversion.pdf) (zuletzt 24.10.2017)
- Staskevicius, A. (2016) Estimation of the Potential Recoverable Amount of Critical Metals from Waste Electric and Electronic Equipment in Lithuania, *Journal of Environmental Research, Engineering and Management*, 72(2) (pp.56-70).
- UBA TEXTE 87/2017 Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit Forschungskennzahl 3713 93 302 UBA-FB 002560. Erörterung ökologischer Grenzen der Primärrohstoffgewinnung und Ent-

wicklung einer Methode zur Bewertung der ökologischen Rohstoffverfügbarkeit zur Weiterentwicklung des Kritikalitätskonzeptes (ÖkoRess I) Konzeptband von Günter Dehoust et al. (2017) <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen> ISSN 1862-4359

UBA (2010) Fakten und Maßnahmen zum Export von Elektroaltgeräten, Herausgeber: Umweltbundesamt Pressestelle Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau-Roßlau im Juli 2010

Van Abel, B.: Fairphone <http://www.handelsblatt.com/my/unternehmen/it-medien/fairphone-gruender-bas-van-abel-immer-mehr-trotzdem-fair-/20302312.html?ticket=ST-5784191-cuGO1DhkZH7AR6bz37Td-ap1>

VERORDNUNG (EU) 2017/821 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 17. Mai 2017 zur Festlegung von Pflichten zur Erfüllung der Sorgfaltspflichten in der Lieferkette für Unionsein-führer von Zinn, Tantal, Wolfram, deren Erzen und Gold aus Konflikt- und Hochrisikogebieten

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R0821&from=DE> abgerufen am 6.3.2018

Zepf V. (2015): Seltene Erden - umkämpfte Rohstoffe für Gegenwart und Zukunft. In: Technisches Museum Wien [Hrsg.]: Blätter für Technikgeschichte. Band 77. Materialien. S. 101-121.

Zepf V., Reller A., Rennie C., Ashfield M., Simmons J. (2014): Materials critical to the energy industry. An introduction. 2<sup>nd</sup> edition, London, 90. [www.bp.com/content/dam/bp/pdf/sustainability/group-reports/ESC\\_Materials\\_handbook\\_BP\\_Apr2014.pdf](http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/sustainability/group-reports/ESC_Materials_handbook_BP_Apr2014.pdf)  
<http://www.grida.no/news>