

Nachhaltigkeit frühzeitig im Spiralcurriculum des Chemieunterrichts verankern



Ein Appell für die Stärkung des Kontextes kritische Metalle

MARKUS PRECHTL – KRENARE IBRAJ – YANNICK L. LEGSCHA

Nachhaltige Technologien wie Windturbinen, Solarzellen und Brennstoffzellen sollen den Übergang hin zu einer postfossilen Gesellschaft mit nachhaltiger Energieversorgung ermöglichen. Da dafür massenhaft anorganische Rohstoffe benötigt werden, kann die Energiewende als Materialwende, d.h. als Übergang von fossilen Brennstoffen zu mineralischen Rohstoffen aufgefasst werden. Dieser ergiebige und fordernde Kontext ist essenziell für die Bildung für nachhaltige Entwicklung im Chemieunterricht.

1 Bildung für nachhaltige Entwicklung im Chemieunterricht von Anfang an

Ein Blick in die Kerncurricula der Bundesländer zeigt, dass nachhaltige Innovationen aus der Chemie(technik) primär in höheren Klassenstufen, z.B. anhand moderner Waschmittel, Kunststoffe oder Energiespeicher, thematisiert werden. Dies ist reichlich spät, in Anbetracht der Tatsache, dass der Klimawandel früh zum Schlüsselthema für Jugendliche wird (ALBERT, QUENZEL, HURRELMANN & KANTAR, 2019). Insbesondere Schüler/innen mit wenig fundiertem Vorwissen zu Umweltthemen sowie Schüler/innen, die sich, eingeschüchtert von komplexen Systemzusammenhängen, zurückziehen, bedürfen frühzeitig Orientierungshilfen (KUTHE et al., 2019). Notwendig sind auch Einordnungen der anstatt zu Berichterstattungen über den Klimawandel, wenn die Chemie(technik) ausschließlich als Schadensverursacherin charakterisiert wird. Ergänzend sollten Innovationen aus Forschung und Technik thematisiert werden. Ideal wären auf Nachhaltigkeit abzielende Perspektiven auf Probleme und Lösungen. Beginnend mit dem Anfangsunterricht, können diese in das Spiralcurriculum des Chemieunterrichts implementiert werden. Einen Ankerpunkt bieten kritische Metalle. Am Beispiel der Metalle der Seltenerdelemente (SEE) und der Platingruppe wird ein konzeptioneller Weg in diese Richtung eingeschlagen, der zur Diskussion gestellt wird.

2 Metalle nachhaltig und materialwissenschaftlich denken

Am Thema Metalle Umweltaspekte festzumachen, ist nicht neu. Unterrichtsmaterialien z. B. zum Recycling von Gold und Kupfer aus Platinen (z.B. Unterricht Chemie, 2017, 28/161) oder zu der Frage, welche Metalle in Mobiltelefonen und Tablets stecken (z.B. NORDMANN et al., 2015; LAWATSHECK, HADI & KUSE, 2022; KANBUR, HUWER, FETZER, SIOL & EILKS, 2022), sind etabliert. Metalle werden im Anfangsunterricht elementar, teils in gediegener Form, vorgestellt, wohingegen Metalle in nachhaltigen Anwendungen als Komponente in Legierungen, als Ionen in Kristallgittern oder Zentralatome in Komplexen vorliegen.

Unbestritten ist eine adäquate Elementarisierung im Anfangsunterricht schwierig und auch nicht Intention dieses Appells. Befürwortet werden Hinweise auf wichtige Anwendungen und Funktionen einzelner Metalle, um sinnstiftende Anknüpfungspunkte an *Sustainable Development Goals*, Energiewende und nachhaltige Chemie schaffen zu können. Zeigt beispielsweise ein gebildertes Periodensystem der Elemente nur wenige Anwendungsbeispiele für Metalle, etwa Schrauben (Ni) oder Zahnersatz (Pd), erscheint es uns sinnvoll, Hinweise auf nachhaltige Anwendungen in einfacher Fachsprache zu ergänzen, z.B. folgendermaßen: *Das Metall ... bildet die Grundlage für eine Technologie, die keine schädlichen Gase produziert; ... ist Bestandteil von nachhaltigen Energiespeichern; ... hat eine Funktion in Anwendungen, von denen man sich verspricht, wichtige Klimaziele zu erreichen; etc.* Die Anwendungen und Funktionalität der Metalle sowie ihrer Verbindungen sollten entlang ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften vermittelt werden; wie nachfolgend am Beispiel von Gold: *Das Metall wird in Platinen aufgrund seiner exzellenten Leitfähigkeit als Kontakt verbaut.* Davon ausgehend lassen sich, Schritt für Schritt, wiederum ökologische, wirtschaftliche und soziale Perspektiven einer Bildung für nachhaltige Entwicklung erschließen, wie die Einführung des Konzepts der Kritikalität, das wir im Folgenden beleuchten werden, sowie Wertschöpfungsketten und Recycling. Vor diesem Hintergrund unterstützen wir die Idee, im Anfangsunterricht Nachhaltigkeitsaspekte an Rohstoffen im Allgemeinen und an Metallen im Besonderen festzumachen und Stoffe früh funktional und das heißt materialwissenschaftlich zu denken.

3 Problematische Ausgangslagen am Indikator Kritikalität festmachen

Mit dem Kriegsausbruch in der Ukraine 2022 geriet die Versorgung mit Erdgas in den Fokus der Aufmerksamkeit. Politiker/innen mahnten an, die Energiewende müsse vorangebracht werden – via Solaranlagen, Windturbinen, Energiespeichersysteme. Selten wurde erwähnt, dass dafür Metalle benötigt werden, die restriktiver Handelspolitik unterliegen. „Die Lage

scheint paradox: Wir benötigen russische Metalle, um von russischem Öl und Gas unabhängig zu werden“ (MÜLLER, CARRY & REISCH, 2022). Für die postfossile Hightechindustrie sind Metalle unentbehrlich und die EU befindet sich nicht zum ersten Mal in einer herausfordernden Lage. Während der Corona-Pandemie mangelte es an Halbleitern. Zehn Jahre zuvor war der Zugriff auf SEE massiv eingeschränkt (MARSCHALL & HOLDINGHAUSEN, 2017). Da die EU ihre Rohstoffabhängigkeit seither nicht merklich hat verringern können, wird mit Nachdruck an der Stärkung der Widerstandsfähigkeit der Wertschöpfungsketten gearbeitet (EU COM, 2020) – ein herausforderndes Unterfangen in Anbetracht der hohen Anzahl der als instabil gekennzeichneten Erzeugerländer (Abb. 1). Seit Juni 2022 wirkt die EU im Rahmen des Programms Minerals Security Partnership auf Lieferketten-souveränität hin. Leitworte wie *Friendshoring* (Beschränkung des Handels mit wichtigen Produkten auf befreundete Staaten) und *Responsible Supply Chains* (Lieferkettenkonzepte, die Menschenrechte, faire Arbeitspraktiken und ökologischen Fortschritt berücksichtigen) verweisen darauf, dass chemisch-technische Souveränität durch Abkoppelung von politisch instabilen Partnern erreicht und zugleich eine neue Bündnisqualität hinsichtlich sozialer und ökologischer Werte angestrebt werden soll. Die Interdependenz wirtschaftlicher, sozialer und ökologischer Perspektiven – Kernprinzip der Nachhaltigkeit – lässt sich hieran festmachen.

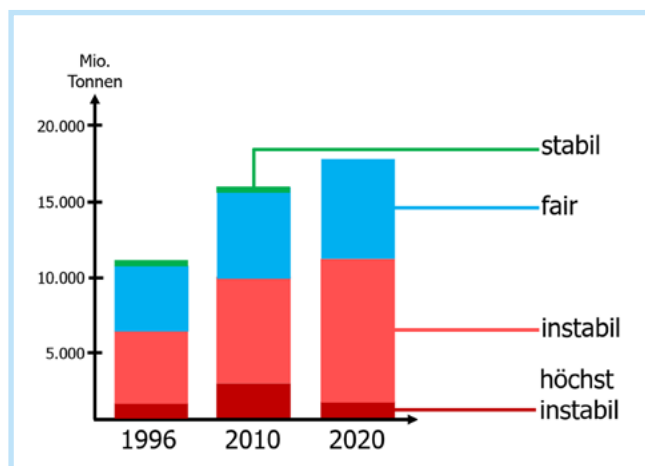


Abb. 1. Einschätzung der Entwicklung der politischen Stabilität von Lieferländern in Relation zu deren Rohstoffförderung in Tonnen für den Zeitraum 1996–2020. Grafik nach REICHL & SCHATZ (2022, 5, 29). Indikatoren zu Rechtsstaatlichkeit, Korruption, Abwesenheit von Gewalt, Effektivität der Regierung und weiteren Aspekten, die auf Umfragen von Unternehmen und Expert/inn/en beruhen, führen zu folgender Abstufung: höchst instabil (kleiner als $-1,25$), instabil ($-1,25$ bis 0), angemessen/fair (0 bis $+1,25$) und stabil (größer als $+1,25$), auf einer Skala von $-2,5$ bis $+2,5$ (ebd., 23).

Die Importabhängigkeit der EU ist für kritische Rohstoffe hoch. Im Fall der Metalle der Platingruppe (primär Südafrika, Russland) und SEE (primär China), die bedeutsam für High- und Green-Tech-Sektoren sind, beträgt sie nahezu 100 % (EU COM, 2020). Die Benennung von Rohstoffen als „kritisch“ betrifft im Kern das Versorgungsrisiko und deren wirtschaftliche Bedeutung. Kritikalitätsassessments werden unterschiedlich durch-

geführt – für ein Material (BACH et al., 2016), eine Technologie (HELBIG et al., 2018), eine Region (EU COM, 2020) oder auf globaler Ebene (GRAEDEL et al., 2012). Es gibt kein Standardverfahren zur Beurteilung der Kritikalität eines Rohstoffs (SCHRIJVERS et al., 2020). Je nach Modell ziehen Analyst/innen weitere Aspekte wie Substitutionsmöglichkeiten, Recyclingraten und technologische Innovationen heran, deren Relevanz in unterschiedlicher Weise interpretiert wird (CIMPRICH et al., 2019). Auch wenn die Vielfalt und Komplexität der Kritikalitätsassessments einen Vergleich ihrer Ergebnisse für Lai/inn/en unmöglich macht, bieten der Orientierung dienliche Zielwerte, wie Versorgungsrisiko, Auswirkungen von Versorgungsunterbrechungen, ökologische und soziale Aspekte, eine sehr gute Basis um Kennzeichen von Nachhaltigkeit abbilden und Reflexionen zu *Life Cycle Assessments* anbahnen zu können.

4 Lösungsansätze: Recycling, Substitution, innovatives Materialdesign

In Zeiten politischer Instabilität ist es klug, nicht alles auf eine Karte zu setzen. Systeme aus Kreislaufwirtschaft mit Recycling – perspektivisch *Urban Mining* (Bewirtschaftung anthropogener Lagerstätten, etwa aus Elektroschrott, mit dem Ziel, aus langlebigen Gütern sowie Ablagerungen Rezyklate zu gewinnen) –, Substitution und innovativem Materialdesign, vielfach verknüpft und redundant, wirken auf Stabilität hin.

4.1 Recycling

Recycling kennzeichnet, „(...) dass einmal eingesetzte Rohstoffe in Primärproduktqualität dem Wirtschaftskreislauf wieder zur Verfügung gestellt werden. Das Erlangen der Primärproduktqualität ist dabei der zentrale Dreh- und Angelpunkt (...)“ (BERTAU, 2018). Den Anteil der Metalle an recycelten Stoffen, der im Fall von Platin und Eisen hoch, im Fall von SEE wiederum sehr gering ist, können Schüler/innen gut selbst recherchieren. Zum Recycling/Downcycling von Metallen liegt Material vor (Kasten 1). Vermittels komparativer Betrachtung der Verfahren, können Schüler/innen hieran ihre Bewertungskompetenz üben.

4.2 Substitution

Das Konzept der Substitution lässt sich am Stoff und seiner Funktionalität, durch Betrachtung von Struktur-Eigenschaftsbeziehungen, festmachen (Tab. 1).

Funktion und Zweck sowie System und Systemkomponenten sind dabei zu differenzieren. Als Analogie formuliert: Der Austausch einer Spielerin in einem Hockeyteam mag zu einer Verbesserung der Gesamtleistung des Teams führen, ändert aber nicht die Systemstruktur – es gelten Hockeyregeln. Werden im Leuchtstoff $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$, Dy^{3+} Dysprosium- durch Neodymionen substituiert, reduziert dies den Einsatz des kritischen Elements Dysprosium, nicht aber die SEE-Problematik in Gänze. Ein neues „Regelwerk“ böten hingegen OLEDs. In der Chemie(-technik) betrifft die Substitution einer Systemkomponente in der Regel das gesamte System, da Legierungen, Hybrid- und Verbundmaterial eingesetzt werden. An der Forschungsvision,

Zum Recycling von Neodym, das Bestandteil von Neodym-Eisen-Bor-Magneten in mechanischen Festplatten und Lautsprechern ist, liegen händische (MIEGER & PRECHTL, 2017), virtuelle (LAWATSCHHECK, HADI & KUSE, 2022; <https://neodym.natlab.fu-berlin.de/>) und auf Augmented Reality beruhende Experimentalsettings (KANBUR et al., 2022) für den Unterricht vor. In allen drei Fällen wird ein Magnet mit Säure im Überschuss umgesetzt. Die chemische Reaktion von Metall und Säure unter Bildung von Wasserstoffgas ist ein gängiger Lerninhalt der Sekundarstufe I. Zugänge zu Leitideen der nachhaltigen Chemie bieten das Problem, dass die Säure nicht regeneriert wird, sowie die Herausforderung, nur so viel Substanz einzusetzen, wie für die Stoffumsetzung erforderlich ist. Web-Recherchen führen zu Alternativen, die nicht immer als Schulversuch realisierbar aber anhand von Videos (YouTube/Mediatheken) erschließbar sind:

- **Hydrogen Decrepitation.** Wasserstoffgas bewirkt die Volumenexpansion eines Magneten, der spröde wird und zu Pulver zerfällt, woraus ein neuer Magnet verpresst werden kann.
- **Biokollektoren.** Die Leschs-Kosmos-Sendung *Der Schatz in der Mülltonne* (ZDF, 2022) zeigte, wie aus Bakteriophagen, die Metallionen spezifisch binden, und magnetischem Trägermaterial, Biokollektoren für die Rückgewinnung kritischer Metalle konstruiert werden können (vgl. auch LEDERER & POLLMANN, 2021).
- **SepSELSA.** Das Verfahren zum SEE-Recycling aus Leuchtstofflampenpulver (LORENZ & BERTAU, 2019) bietet nachhaltige Perspektiven für den Unterricht (Sek. II); u.a. im Modellversuch (PRECHTL, 2022). SepSELSA verwendet Ammoniumchlorid anstatt konzentrierter Säuren. Im Heizgerät dissoziiert Ammoniumchlorid in Chlorwasserstoff- und Ammoniakgas. Chlorwasserstoffgas setzt SEE-Verbindungen im Abfall selektiv um ($SEE_2O_3 + 6 HCl \rightarrow 2 SEECl_3 + 3 H_2O$). Dabei wird so viel Chlorwasserstoffgas eingesetzt, wie SEE-oxid umgesetzt werden kann. Beim Abkühlen entsteht wieder Ammoniumchlorid. Überschüssiges Ammoniakgas wird weiter verwertet.

Kasten 1. Recycling am Beispiel von Seltenerdelementen (SEE)

Art	Beschreibung	Beispiel
Materialsubstitution	Neues Material ersetzt ein vorhandenes Material	Kunststoff- statt Kupferrohre in Fußbodenheizungen
Technologische Substitution	Weniger Materialverbrauch durch optimierte Prozesse	Zuschneiden von Textilrohlingen mit Lasertechnik
Qualitätssubstitution	Materialeinsparung durch Werkstoffe geringerer Qualität	Molybdän statt Niob als Legierungselement in Stahl
Funktionale Substitution	Produktersatz durch neues Produkt mit gleicher Funktion	Kauf eines eBooks anstelle von Büchern aus Papier
Nichtmaterielle Substitution	Ideelle Form der Substitution	Verzicht auf Strohhalme; Trinken aus dem Glas

Tab. 1. Typen von Substitutionen (nach MARSCHALL & HOLDINGHAUSEN, 2017).

kritisches Platin in Brennstoffzellentechnik durch Eisen (verbindungen) zu substituieren, lässt sich dies veranschaulichen (Kasten 2). Anknüpfungspunkte bieten Themenfelder wie mobile Energiewandler und Geschwindigkeit chemischer Reaktionen/Katalyse. Sie eröffnen Optionen für fächerverbindendes Unterrichten, u.a. zu Eisenkomplexen in der Biosphäre.

4.3 Innovatives Materialdesign

Ferner sehen Aktionspläne der EU vor, Kreislaufwirtschaft und Wirtschaftswachstum durch nachhaltiges Produktdesign zu mobilisieren. Dauermagnete und Leuchtstoffe mit verringertem Anteil an SEE sind in diesem Kontext nur zwei Beispiele. Bisweilen bringt der Einsatz von Nanopartikeln den Durchbruch in der Forschung, so jüngst im Fall weichmagnetischer Werkstoffe (HAN et al., 2022). Nickel- bzw. Kobalt-Eisen-Legierungen zählen hier mittlerweile zu den Schlüsselmaterialien für die Energiewende.

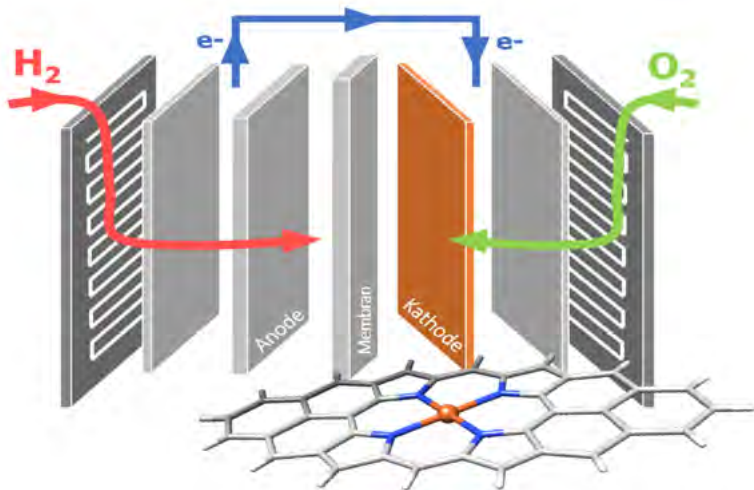
5 Empfehlungen für die Unterrichtsgestaltung

Die Fokussierung auf Kritikalität lässt sich sehr gut mit drei methodischen Ansätzen realisieren: mit Storytelling, Systemdiagrammen (im Folgenden: System-Charts) und Stoffgeschichten, wobei letztere eine Brücke zwischen den beiden ersten Aspekten bauen.

5.1 Storytelling

Storytelling macht Sachliches lebendig, erzeugt Aufmerksamkeit und weckt Emotionen (KELLERMANN, 2018). Zu den Themen kritische Metalle, Coltan (Niob-Tantal-Erz), Glimmer, Bausand etc. halten YouTube und Mediatheken Reportagen vor. Planet e berichtete über schädliches Zinn-Schürfen in Indonesien (*Zinnfieber*, ZDF, 2022), ARTE über den Abbau von Manganknollen im Pazifik (*Die Gier nach Meer*, ARTE, 2022) und das Erste über die dunkle Seite der Energiewende am Beispiel von Kupfer

Die Brennstoffzellentechnik hat sich in den letzten Jahrzehnten erheblich verbessert. Die Kosten wurden reduziert, sind aber weiterhin zu hoch für breite Anwendungen. Im Fall der PEM-FC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) ist der Platinkatalysator der preisbestimmende Faktor. Das Edelmetall unterliegt schwankenden Produktionsmengen und ist geopolitisch kritisch, da über 90 % der Jahresproduktion in drei Ländern – primär in Südafrika (84 %) – abgebaut werden (vgl. EU COM, 2020). Eine visionäre Option der Substitution bietet Eisen, dessen Funktion als Nicht-Edelmetall-Katalysator für PEM-FC-Kathoden beforscht wird.



Zukunftsvision: Fe-N-C-Katalysatoren in PEM-FC-Systemen

Während Platin die Oxidation des Wasserstoffs an der Anode ideal katalysiert, ist die Kinetik der Sauerstoffreduktion an der Kathode suboptimal. Um Spannungsverluste ausgleichen zu können, wird an der Kathode mehr Platin eingesetzt als an der Anode. Daher ist der Kathodenkatalysator der Hauptkostentreiber der PEM-FC-Systeme. Er macht 43 % der Kosten eines Stacks, d. h. der in Serie geschalteten Zellen aus (KÜBLER, 2021, 28). Hier böte ein Eisen-basierter Katalysator eine echte Alternative. Denn bezogen auf 80-kW_{net}-Systeme und ausgehend von einer Produktionsrate von 500.000 Stück dieser Systeme pro Jahr, belief sich der Preis für den Platinkatalysator zuletzt auf etwa 480 Dollar pro System, für einen Eisen-Stickstoff-Kohlenstoff-Katalysator (Fe-N-C) hingegen auf 30 Dollar (KÜBLER, 2021, 30 und Kap. 3.2). Noch ist die Instabilität der Fe-N-C-Katalysatoren unter Prozessbedingungen die Krux. Herausfordernd ist unter anderem die Oxidation der Porphyrin-ähnlichen Struktur, in der die Eisenionen eingebaut sind. Bekäme man diese Probleme in den Griff, geriete das Potenzial, kritisches Platin durch ein kostengünstiges Übergangsmetall zu ersetzen, zu einem Wendepunkt für den Einsatz von PEM-FC-Systemen.

Kasten 2. Substitution und Materialdesign am Beispiel von Platin-Katalysatoren

(*Schmutziges Kupfer*, ARD, 2022). Storytelling kann im Unterricht als Text, Comic oder Video umgesetzt werden. Üblicherweise wird ein Sachverhalt aus der Sicht einer Person geschildert, die bei einer Entdeckung dabei gewesen ist oder die sich tagtäglich beruflich mit chemisch-technischen Prozessen beschäftigt und, aus dem eigenen Erleben heraus, über die damit verbundenen – förderlichen wie schädlichen – sozialen und ökologischen Aspekte berichten kann (PRECHTL & LEGSCHA, 2022). Zuweilen wählen Schüler/innen chemische Elemente als Ich-Erzähler und nutzen Informationen zu deren Abbau, Anwendung und Recycling analog zu biografischen Daten (ebd.). Das Konzept des Storytellings, das auf Schüler/innen eher linear als vernetzt wirkt, bietet eine gute Basis, um das methodisch anspruchsvolle Konzept der Stoffgeschichten einzuführen.

5.2 Stoffgeschichten

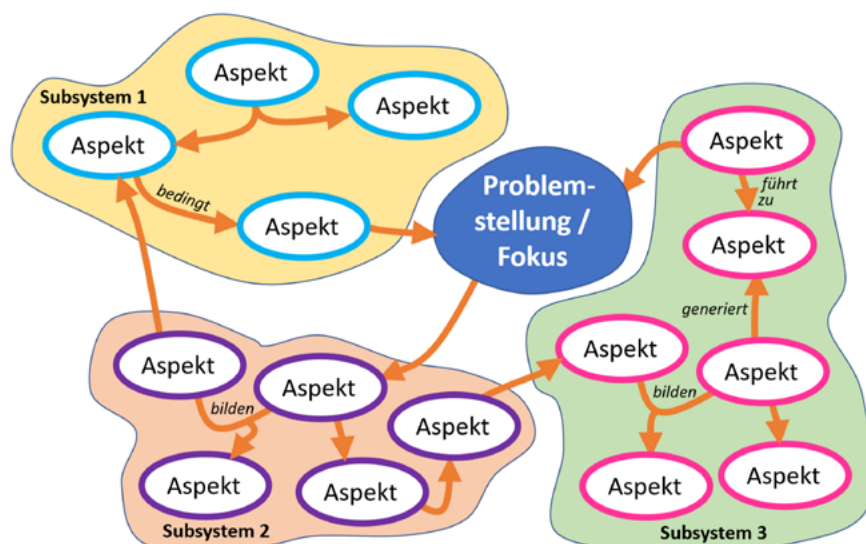
Im Zentrum einer Stoffgeschichte steht der Lebenszyklus eines Stoffes: seine Herstellung, Anwendung, Nachfrage, Nutzung, Auswirkung, Dissipation, Entsorgung und Recyclisierung (MAR-

SCHALL, SCHMIDT & SOENTGEN, 2013). Diese Aspekte werden mit dem Prinzip der Nachhaltigkeit verbunden, indem auch ökologische, ökonomische und soziale Fokusse erfasst werden. Das Unterrichtsverfahren ist dreiphasig: Recherche, Strukturierung und Narration. Für die zweite Phase eignen sich System-Charts (vgl. Abschnitt 5.3). In der dritten Phase wählen die Schüler/innen ein Narrativ ihrer Wahl: Berichte, Erzählungen, Sachcomics, Drehbücher etc.

5.3 System-Charts

Systemdenken kann mittels Lesen und Gestalten von System-Charts angeregt werden. Wir verwenden den Terminus System-Chart als Oberbegriff für verschiedene Diagrammtypen, mit denen sich Dynamiken wie Entwicklungstrends – Wie ist die aktuelle Lage? Was folgt? – abbilden lassen. Bekannte Beispiele aus dem schulischen Kontext sind Flussdiagramme (MEADOWS, 2019), Own-Word-Maps (SUMFLETH & TIEMANN, 2000) und Struktur-bäume (MARSCHALL, SCHMIDT & SOENTGEN, 2013, 206). In Kasten 3 und Kasten 4 berichten wir über zwei neue Typen von

SOCME ist ein Visualisierungstool für komplexe Systeme. Es ermöglicht die Darstellung einzelner Systemkomponenten sowie deren dynamische Beziehungen (*inter-system*) und stellt explizit verschiedene Subsysteme im System und deren Grenzen (*cross-system*) dar. Damit verschafft es Nutzer/innen die Freiheit, die Komplexität des Systems selbst zu steuern. Anhand der Einteilung des Systems in Subsysteme können Diskussionen und Lernprozesse im Chemieunterricht angeregt und dabei Veränderungen in Subsystemen und deren Effekte auf das gesamte System reflektiert werden (MATLIN, 2020).



Dieses Bild zeigt die SOCME-Grundstruktur. Konkrete Anschauungsbeispiele, z.B. zu Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre (MATLIN, 2020), können mittels Eingabe des Akronyms SOCME in Suchmaschinen online abgerufen werden.

SOCME ähnelt Concept Maps. Auch beim SOCME stellen die Knotenpunkte (*nodes*) die Aspekte/Konzepte/Ideen dar, während die Pfeile auf die Beziehungen zwischen den einzelnen Knotenpunkten verweisen (MATLIN, 2020). Es unterscheidet sich von Concept Maps jedoch in der Fokussierung auf Subsysteme und deren Grenzen. Sie werden in Anlehnung an AUBRECHT et al. (2019) an zwei Fragen expliziert: Welche Grenzen umfassen mein gewähltes Konzept? Wurde die passende Grenze gewählt oder gibt es weitere Subsysteme, die beachtet werden müssten? Die Aufmerksamkeit wird darüber insbesondere auf Systemdynamiken gelenkt.

Kasten 3. SOCME (*Systems Oriented Concept Map Extension*)

System-Charts, mit großem Potenzial für die Schulung des Systemdenkens, auf die wir im Rahmen von Literatursichtungen aufmerksam wurden: *Systems-Oriented Concept Map Extension* (SOCME) und *Systemigram*. Solche System-Charts eignen sich für das Erlernen des Lesens, Gestaltens und Reflektierens von Systemen, im direkten Vergleich mit Texten, besonders gut, da Bestandteile simultan betrachtet werden können. Hierfür spricht beispielsweise eine qualitative Studie (SZOZDA, MAHAFFY & FLYNN, 2022), in der sich Chemie-Studierende ($N = 18$) Systemszenarien zum Klimawandel widmeten.

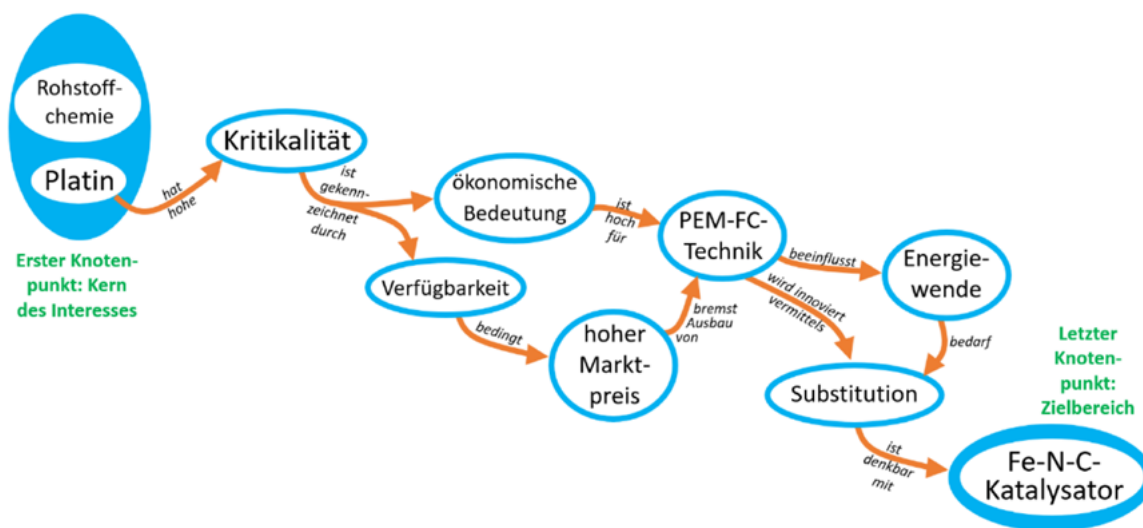
Die Studierenden berücksichtigten Charakteristika des Systemdenkens, allerdings belegte die Bestandsaufnahme von Fokussen und Argumentationen auch Defizite im Umgang mit Schleifen, Rückkopplungen sowie Veränderungen komplexer Komponenten im Laufe der Zeit. Anfangs fällt es Fachkundigen schwer, sich nicht allein auf Bestände, sondern auch auf Flüsse zu konzentrieren (vgl. MEADOWS, 2019). Rückkopplungsschleifen, wie im Fall von Beurteilungen von Rohstoffen jenseits ihrer Reichweite oder Lebensdauer, sind anspruchsvoll und zugleich didaktisch ergiebig, da sich zum Beispiel die Ausgangsgrößen mineralischer Rohstoffe – Vorräte und Produktion – stetig verändern: Ein steigender Marktpreis führt zu Explora-

tionsaktivitäten, die Lagerstättenentdeckungen zur Folge haben, oder zu schnellstmöglicher Vergabe von Konzessionen für den Erzabbau, was sich ungünstig auf die Sorgfaltspflicht zur Einhaltung von Umwelt- und Sozialstandards auswirken kann. Diverse, auf Nachhaltigkeit verweisende Bezüge werden dabei unmittelbar ersichtlich und lassen sich methodisch erschließen.

6 Resümee und Ausblick

Im Kontext der Entwicklung nachhaltiger Technologien wird die Energiewende zunehmend als Materialwende, d.h. als Übergang von fossilen zu mineralischen Rohstoffen aufgefasst. Im Beitrag wurde dafür votiert, diesen Aspekt in das Spiralcurriculum des Chemieunterrichts zu integrieren. Lernsettings lassen sich an der Kritikalität von Metallen exemplifizieren. Für die Schulung des Denkens in Systemen kann auf ein Repertoire an Unterrichtskonzepten und System-Charts zugegriffen werden, das stetig erweitert wird. In der Zusammenschau trägt es dazu bei, Bildung für nachhaltige Entwicklung im Chemieunterricht zu verankern.

Das Tool *Systemigram* zur Visualisierung von Beziehungen zwischen Systemkomponenten wurde entwickelt, um Informationen darstellen zu können, die vornehmlich via Text vermittelt werden (vgl. AUBRECHT et al., 2019). Wie im Fall von SOCME erinnert es an Concept Maps, da es Knoten für Aspekte/Konzepte/Ideen sowie Pfeile für Beziehungen zwischen diesen gibt. Die Knoten sind mit Nominalphrasen, die Pfeile mit Verbphrasen versehen. Anders als bei Concept Maps gibt es einen gerichteten Gedankenfluss von der oberen linken zu der unteren rechten Ecke des *Systemigram*. Oben links befindet sich der Input; er führt in das System ein. Der Knoten unten rechts ist der Output; er steht für den Zweck des Systems (AUBRECHT et al., 2019; SQUIRES et al., 2010). Der direkte Weg zwischen Input und Output ist der Kern des Systems. Beispielsweise für die Substitution von Platin könnte ein *Systemigram* folgendermaßen aussehen:



Kasten 4. *Systemigramm*

Förderhinweis

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Projektnummer 443703006 – SFB 1487

Literatur

ALBERT, M., QUENZEL, G., HURRELMANN, K., & KANTAR, P. (2019). *Jugend 2019. Eine Generation meldet sich zu Wort*. Shell Jugendstudie. Bd. 18. Weinheim: Beltz.

AUBRECHT, K.B., DORI, Y.J., HOLME, T.A., LAVI, R., MATLIN, S.A., ORGILL, M., & SKAZA-ACOSTA, H. (2019). Graphical Tools for Conceptualizing Systems Thinking in Chemistry Education. *Journal of Chemical Education*, 96(12), 2888–2900.

BACH, V., BERGER, M., HENSSLER, M., KIRCHNER, M., LEISER, S., MOHR, L., ROTHER, E., RUHLAND, K., SCHNEIDER, L., TIKANA, L., VOLKHAUSEN, W., WALACHOWICZ, F., & FINKBEINER, M. (2016). Integrated method to assess resource efficiency – ESSENZ. *Journal of Cleaner Production*, 137, 118–130.

BERTAU, M. (2018). Warum wir uns mit Rohstoffen befassen müssen. *Chemie in unserer Zeit*, 52(5), 290–296.

CIMPRICH, A., BACH, V., HELBIG, C., THORENZ, A., SCHRIJVERS,

D., SONNEMANN, G., YOUNG, S., SONDEREGGER, T., & BERGER, M. (2019). Raw material criticality assessment as a complement to environmental life cycle assessment: Examining methods for product-level supply risk assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 23(5), 1226–1236.

EU COM, European Commission (2020). *Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability*. Brüssel. COM(2020) 474, 5, verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42849>. Zugriffen: 01.01.2023.

GRAEDEL, T.E., BARR, R., CHANDLER, C., CHASE, T., CHOI, J., CHRISTOFFERSEN, L., FRIEDLANDER, E., HENLY, C., JUN, C., NASSAR, N.T., SCHECHNER, D., WARREN, S., YANG, M.-Y., & ZHU, C. (2012). Methodology of Metal Criticality Determination. *Environmental Science & Technology*, 46(2), 1063–1070.

HAN, L., MACCARI, F., SOUZA FILHO, I.R., PETER, N.J., WEI, Y., GAULT, B., GUTFLEISCH, O., LI, Z., & RAABE, D. (2022). A mechanically strong and ductile soft magnet with extremely low coercivity. *Nature*, 608, 310–316.

HELBIG, C., BRADSHAW, A.M., WIETSCHL, L., THORENZ, A., & TUMA, A. (2018). Supply risks associated with lithium-ion battery materials. *Journal of Cleaner Production*, 172, 274–286.

- KANBUR, C., HUWER, J., FETZER, D., SIOL, A., & EILKS, I. (2022). Wie man mit Tablets über Seltenerdelemente in Tablets lernen kann. *Plus Lucis*, 1, 30–32.
- KELLERMANN, R. (2018). *Das Storytelling Handbuch*. Zürich: Midas.
- KUTHE, A., KELLER, L., KÖRFGEN, A., STÖTTER, H., OBERRAUCH, A., & HÖFERL, K.-M. (2019). How many young generations are there? – A typology of teenagers' climate change awareness in Germany and Austria. *The Journal of Environmental Education*, 50(4), 1–15.
- KÜBLER, M. (2021). *Developing a New Synthesis Strategy for Fe-N-C Catalysts for the Oxygen Reduction Reaction in Proton-Exchange-Membrane Fuel Cells*. Doctoral Thesis, TU Darmstadt.
- LAWATSHECK, C., HADI, A.N., & KUSE, K.-M. (2022). Das (umwelt)chemische Laborexperiment Neodym. *Plus Lucis*, 1, 27–29.
- LEDERER, F.L. & POLLMANN, K. (2021). Recycling Technologies – Biohydrometallurgie. In M.E. HOLUSZKO, A. KUMAR, & D.C.R. ESPINOSA (Hg.), *Electronic Waste: Recycling and Reprocessing for a Sustainable Future*. Wiley: <https://doi.org/10.1002/9783527816392.ch9>. Zugegriffen: 01.01.2023.
- LORENZ, T., & BERTAU, M. (2019). Das SepSELSA-Projekt – Wie man Seltene Erden aus Leuchtstoffröhren gewinnt. *Chemie Konkret*, 26(2), 72–77.
- MEADOWS, D.H. (2019). *Die Grenzen des Denkens. Wie wir sie mit System erkennen und überwinden können*. München: Oekom.
- MARSCHALL, L., & HOLDINGHAUSEN, H. (2017). *Seltene Erden. Umkämpfte Rohstoffe des Hightech-Zeitalters*. München: Oekom.
- MARSCHALL, L., SCHMIDT, C., & SOENTGEN, J. (2013). Stoffgeschichten: Ein Instrument zur Analyse und Kommunikation. In A. RELLER et al. (Hg.), *Ressourcenstrategien. Eine Einführung in den nachhaltigen Umgang mit Ressourcen* (S. 195–210). Darmstadt: WBG.
- MATLIN, S.A. (2020). Introducing the SOCME tool for systems thinking in chemistry. Technical Resource. *International Organization for Chemical Sciences in Development*, Namur: http://www.ioccd.org/v2_PDF/2020-TechRes0301-SOCME-Intro.pdf. Zugegriffen: 01.01.2023.
- MIEGER, D., & PRECHTL, M. (2017). Recycling von Neodym(III)-sulfat aus Festplattenmagneten. Seltenerdelemente im Schülerforschungsprojekt und im Berufsschulunterricht. *Unterricht Chemie*, 28(161), 39–43.
- MÜLLER, M., CARRY, I., & REISCH, V. (2022). Putin und das deutsche Windrad. Berlin: *Der Freitag, die Wochenzeitung*, 13.
- NORDMANN, J., WELFENS, M.J., FISCHER, D., NEMNICH, C., BOOKHAGEN, B., BIENGE, K., & NIEBERT, K. (2015). *Die Rohstoff-Expedition: Entdecke, was in (d)einem Handy steckt*. Heidelberg: Springer.
- PRECHTL, M., & LEGSCHA, Y.L. (2022). Storytelling zu Seltenerdelementen. *Plus Lucis*, 1, 11–15.
- PRECHTL, M. (2022). Nachhaltiger Umgang mit Seltenerdelementen. Ein miniaturisierter Modellversuch zum Recycling von Leuchtstofflampenpulver. *Plus Lucis*, 1, 33–37.
- REICHL, C., & SCHATZ, M. (2022). *World Mining Data 2022. Vol. 37. Minerals Production*. <https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD2022.pdf>. Zugegriffen: 01.01.2023.
- SCHRIJVERS, D., HOOL, A., BLENGINI, G.A., CHEN, W.-Q., DEWULF, J., EGGERT, R., VAN ELLEN, L., GAUSS, R., GODDIN, J., HABIB, K., HAGELÜKEN, C., HIROHATA, A., HOFMANN-AMTENBRINK, M., KOSMOL, J., LE GLEUHER, M., GROHOL, M., KU, A., LEE, M.-H., LIU, G., NANSAI, K., NUSS, P., PECK, D., RELLER, A., SONNEMANN, G., TERCERO, L., THORENZ, A., & WÄGER, P.A. (2020). A review of methods and data to determine raw material criticality. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104617.
- SQUIRES, A., PYSTER, A., SAUSER, B., OLWELL, D., ENCK, S., GELOSH, D., & ANTHONY, J. (2010). Applying Systems Thinking via Systemigrams (TM) for Defining the Body of Knowledge and Curriculum to Advance Systems Engineering (BKCASE) Project. *INCOSE International Symposium*, 20(1). Chicago: <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2010.tb01101.x>. Zugegriffen: 01.01.2023.
- SUMFLETH, E., & TIEMANN, R. (2000). Own Word Mapping – ein alternativer Zugang zu Schülervorstellungen. In H. NIEDDERER & H. FISCHLER (Hg.), *Studien zum Physiklernen: Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie* (S. 179–203). Berlin: Logos.
- SZOZDA, A.R., MAHAFFY, P.G., & FLYNN, A.B. (2022). *Identifying chemistry students' baseline systems thinking skills when constructing systems for a topic on climate change*. Social Sciences and Humanities Research Council of Canada. Preprint: 10.26434/chemrxiv-2022-0g9k0. Zugegriffen: 01.01.2023.
- Unterricht Chemie, Themenheft: *Kritische Metalle*, 2017, 28/161.

Film-Dokumentationen

Hinweis: Die Beiträge sind üblicherweise mittelfristig in Mediatheken und langfristige im YouTube-Doku-Channel verfügbar sowie über die Eingabe der Titel in Suchmaschinen ansteuerbar.

ARD (2022). *Schmutziges Kupfer. Die dunkle Seite der Energiewende*. Film von M. Höft. Sendung: 25.10.2022.

ARTE (2022). *Die Gier nach Meer. Wie der Mensch die Ozeane ausbeutet*. Film von M. Stocks. Sendung: 26.07.2022.

ZDF (2022). *Leschs Kosmos: Der Schatz in der Mülltonne. Das Recycling-Versprechen*. Film von H. Lesch. Sendung: 06.09.2022.

ZDF (2022). *Planet e. Zinnfieber. Wie unser Konsum eine Insel zerstört*. Film von D. Ammon, G. Collanges & A. Guiguitant. Sendung: 16.10.2022.

KRENARE IBRAJ, Doktorandin der Chemiedidaktik, TU Darmstadt, widmet sich dem Systems Thinking im Kontext der Bildung für nachhaltige Entwicklung.

YANNICK L. LEGSCHA, Doktorand der Chemiedidaktik, TU Darmstadt, befasst sich mit Rohstoffkritikalität und Life Cycle Assessment als Zugänge zu einer Bildung für nachhaltige Entwicklung. Er wendet hierauf das Konzept der Didaktischen Rekonstruktion im Teilprojekt Public Relations des DFG-Sonderforschungsbereichs (1487) – Iron, upgraded! – an.

MARKUS PRECHTL, Dr., Professor für Chemiedidaktik, TU Darmstadt, fokussiert die Schwerpunkte Gender/Diversity und Bildung für nachhaltige Entwicklung. Gemeinsam mit Y.L. LEGSCHA widmet er sich neuen Perspektiven auf Rohstoffkritikalität in Iron, upgraded! und mit K. IBRAJ methodischen Zugängen zu nachhaltiger Chemie. Kontaktadresse:

Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Chemie/Fachdidaktik Chemie, Neue Anschrift: Peter-Grünberg-Straße 4, 64287 Darmstadt, markus.prechtl@tu-darmstadt.de. ■□

